

Electrotecnia



Electrotecnia
© Pablo Alcalde San Miguel

Gerente Editorial Área Técnico-Vocacional:
Olga M^a Vicenta Crespo

Editoras de Producción:
Clara M^a de la Fuente Rojo
Consuelo García Asensio

Producción Industrial:
Susana Pavón Sánchez

Diseño de cubierta:

Allontexto

Preimpresión:

Allontexto

Impresión:

Gráficas Rogar.
Políg. Ind. Alparrache
Navalcánero (Madrid)

**COPYRIGHT © 2003 International Thomson Editores Spain
Paraninfo, S.A.**
4^a edición, 2^a reimpresión, 2004

Magallanes, 25; 28015 Madrid
ESPAÑA
Teléfono: 91 4463350
Fax: 91 4456218
clientes@paraninfo.es
www.paraninfo.es

Impreso en España
Printed in Spain

ISBN: 84-9732-270-3
Depósito Legal: M-5.333-2004
(026/72/70)

Reservados los derechos para todos los países de lengua española. De conformidad con lo dispuesto en el artículo 270 del Código Penal vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reprodujeren o plagiaren, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica fijada en cualquier tipo de soporte sin la preceptiva autorización. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta, puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste electrónico, químico, mecánico, electro-óptico, grabación, fotocopia o cualquier otro, sin la previa autorización escrita por parte de la Editorial.

Otras delegaciones:

México y Centroamérica
Tel. (528) 281-29-06
Fax (528) 281-26-56
clientes@mail.internet.com.mx
clientes@thomsonlearning.com.mx
México, D.F.

Puerto Rico
Tel. (787) 758-75-80 y 81
Fax (787) 758-75-73
thomson@coqui.net
Hato Rey

Chile
Tel. (562) 531-26-47
Fax (562) 524-46-88
devoregr@netexpress.cl
Santiago

Costa Rica
EDISA
Tel./Fax (506) 236-89-55
edisacr@sol.racsa.co.cr
San José

Colombia
Tel. (571) 340-94-70
Fax (571) 340-94-76
clthomson@andinet.com
Bogotá

Cono Sur
Pasaje Santa Rosa, 5141
C.P. 141 - Ciudad de Buenos Aires
Tel. 4833-3938/3883 - 4831-0764
thomson@thomsonlearning.com.ar
Buenos Aires (Argentina)

República Dominicana
Caribbean Marketing Services
Tel. (809) 533-26-27
Fax (809) 533-18-82
cms@codetel.net.do

Bolivia
Librerías Asociadas, S.R.L.
Tel./Fax (591) 2244-53-09
lbras@datacom-bo.net
La Paz

Venezuela
Ediciones Ramville
Tel. (582) 793-20-92 y 782-29-21
Fax (582) 793-65-68
tslibros@attglobal.net
Caracas

El Salvador
The Bookshop, S.A. de C.V.
Tel. (503) 243-70-17
Fax (503) 243-12-90
amorales@sal.gbm.net
San Salvador

Guatemala
Textos, S.A.
Tel. (502) 368-01-48
Fax (502) 368-15-70
textos@infovia.com.gt
Guatemala

Índice

PRÓLOGO	XI
1 LA ELECTRICIDAD. CONCEPTOS GENERALES	1
1.1 Producción y consumo de electricidad	2
1.2 Efectos de la electricidad	2
1.3 La electricidad	3
1.4 Electricidad estática	5
1.5 Carga eléctrica	5
1.6 Movimiento de electrones	5
1.7 El circuito eléctrico	6
1.8 Formas de producir electricidad	7
1.8.1 Producción de electricidad por reacción química ..	7
1.8.2 Producción de electricidad por presión	7
1.8.3 Producción de electricidad por acción de la luz ..	8
1.8.4 Producción de electricidad por acción del calor ..	8
1.8.5 Producción de electricidad por acción magnética ..	8
1.9 Intensidad de la corriente eléctrica	8
1.10 Sentido real y convencional de la corriente	9
1.11 Movimiento de electrones en un circuito	9
1.12 Medida de la corriente eléctrica	9
1.13 Corriente continua (C.C.)	10
1.14 Corriente alterna (C.A.)	10
1.15 Tensión eléctrica. Fuerza electromotriz	11
1.16 Medida de la tensión	11
2 RESISTENCIA ELÉCTRICA	13
2.1 Conductores y aislantes	14
2.2 Resistencia eléctrica	14
2.3 Medida de la resistencia eléctrica	15
2.4 La ley de Ohm	15
2.5 Resistencia de un conductor	16
2.6 Influencia de la temperatura sobre la resistividad ..	18
2.7 Resistencia de los aislantes	19
2.8 Rigidz dieléctrica	19
3 POTENCIA Y ENERGÍA ELÉCTRICA	21
3.1 Potencia eléctrica	22
3.2 Medida de la potencia eléctrica	23
3.3 Energía eléctrica	24
3.4 Medida de la energía eléctrica	24
4 EFECTO TÉRMICO DE LA ELECTRICIDAD	27
4.1 Efecto Joule	28
4.2 Calor específico	28
4.3 Transmisión de calor	29
4.4 Cálculo de la sección de conductores	29
4.4.1 Cálculo de la sección teniendo en cuenta el calentamiento de los conductores	30
4.4.2 Densidad de la corriente de un conductor	31
4.4.3 Por qué se emplean altas tensiones en el transporte de energía eléctrica	31
4.4.4 Caída de tensión en las líneas eléctricas	32
4.4.5 Cálculo de la sección teniendo en cuenta la caída de tensión	32
5 APLICACIONES DEL EFECTO TÉRMICO	37
5.1 Elementos de caldeo	38
5.2 Lámparas incandescentes	38
5.3 Inconvenientes del efecto térmico	38
5.3.1 El cortocircuito	34
5.3.2 La sobrecarga	34
5.3.3 Protección de los circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas	40
5.3.4 Fusibles	40
5.3.5 Los interruptores automáticos	41
5.3.6 Funcionamiento de un interruptor automático ..	42
5.3.7 Los motores pueden producir sobrecargas en su funcionamiento	43
6 CIRCUITO SERIE, PARALELO Y MIXTO	45
6.1 Acoplamiento de receptores en serie	46
6.1.1 Aplicaciones prácticas del acoplamiento en serie	48
6.2 Acoplamiento de receptores en paralelo	49
6.3 Circuitos mixtos	50
7 RESOLUCIÓN DE CIRCUITOS CON VARIAS MALLAS	55
7.1 Leyes de Kirchhoff	56

7.2 Resolución de circuitos mediante transformaciones de triángulo a estrella	58	10.3 Magnitudes magnéticas	89
7.3 Resolución de circuitos mediante transformaciones de estrella a triángulo	59	10.3.1 Flujo magnético (Φ)	89
7.4 Teorema de superposición	60	10.3.2 Inducción magnética (B)	89
7.5 Teorema de Thevenin	62	10.3.3 Fuerza magnetomotriz (\mathcal{F})	89
8 EFECTO QUÍMICO DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA. PILAS Y ACUMULADORES	65	10.3.4 Intensidad de campo magnético (H)	90
8.1 Electrólisis	66	10.3.5 Reluctancia (R)	90
8.2 Recubrimientos galvánicos	66	10.4 Curva de magnetización. Saturación magnética	91
8.3 Pilas Eléctricas	66	10.5 Permeabilidad magnética	91
8.3.1 Características de las pilas	67	10.6 Histéresis magnética	93
8.3.2 Tipos de pilas eléctricas	67	10.7 Cálculo de circuitos magnéticos	93
8.4 Acumuladores	67	10.8 Electroimanes	95
8.4.1 Acumuladores de plomo	67	10.8.1 Aplicaciones prácticas de los electroimanes	96
8.4.2 Constitución de un acumulador	68		
8.4.3 Capacidad de un acumulador	68		
8.4.4 Tensión y corriente de carga de un acumulador	69		
8.4.5 Tensión y corriente de descarga	69		
8.4.6 Resistencia interna	69		
8.4.7 Vida de un acumulador	69		
8.4.8 Autodescarga de un acumulador	69		
8.4.9 Acumuladores alcalinos	70		
8.5 Conexión de pilas y acumuladores	70		
8.5.1 Tensión en bornes del generador	70		
8.5.2 Potencia del generador	70		
8.5.3 Rendimiento eléctrico de un generador	70		
8.5.4 Conexión de generadores en serie	71		
8.5.5 Conexión de generadores en paralelo	72		
9 LOS CONDENSADORES	75		
9.1 Funcionamiento de un condensador	76		
9.2 Capacidad de un condensador	77		
9.3 Carga de un condensador	78		
9.4 Descarga de un condensador	78		
9.5 Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador	79		
9.6 Tensión de trabajo y de perforación del dieléctrico	79		
9.7 Tipos de condensadores	79		
9.8 Asociación de condensadores	80		
9.8.1 Asociación de condensadores en serie	80		
9.8.2 Asociación en paralelo	81		
10 MAGNETISMO Y ELECTROMAGNETISMO	85		
10.1 Imanes	86		
10.1.1 Polos de un imán	86		
10.1.2 Brújula	86		
10.1.3 Clases de imanes	86		
10.1.4 Teoría molecular de los imanes	86		
10.1.5 Campo magnético de un imán	87		
10.2 Electromagnetismo	87		
10.2.1 Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica	87		
10.2.2 Campo magnético de un conductor en forma de anillo	88		
10.2.3 Campo magnético formado por una bobina	88		
11 INTERACCIÓN ENTRE LA CORRIENTE ELÉCTRICA Y UN CAMPO MAGNÉTICO	99		
11.1 Inducción electromagnética	100		
11.1.1 Experiencia de Faraday	100		
11.1.2 Sentido de la f.e.m. inducida. Ley de Lenz	101		
11.1.3 Fuerza electromotriz inducida en un circuito próximo	102		
11.1.4 Aplicaciones prácticas de la inducción electromagnética	102		
11.2 Corrientes parásitas o de Foucault	103		
11.3 Autoinducción. Bobinas	104		
11.3.1 Coeficiente de autoinducción	104		
11.4 Fuerza sobre una corriente eléctrica en el seno de un campo magnético	105		
12 LA CORRIENTE ALTERNA	109		
12.1 Ventajas de la corriente alterna	110		
12.2 Producción de una corriente alterna	110		
12.3 Valores característicos de la C.A.	112		
12.3.1 Valor instantáneo	112		
12.3.2 Valor máximo de la tensión	113		
12.3.3 Tensión eficaz	113		
12.3.4 Intensidad eficaz	113		
12.3.5 Valor medio del ciclo completo	113		
12.3.6 Ciclo o período	113		
12.3.7 Frecuencia	113		
12.3.8 Relación entre la frecuencia y la velocidad angular	114		
12.4 Receptores elementales en corriente alterna	114		
12.4.1 Circuito con resistencia pura	114		
12.5 Circuito con bobina	116		
12.5.1 Reactancia inductiva de una bobina	116		
12.5.2 Potencia en una bobina	117		
12.6 Circuito con condensador	117		
12.6.1 Reactancia capacitiva de un condensador	118		
12.6.2 Potencia en un condensador	118		
13 CIRCUITOS SERIE R-L-C EN C.A. . .	123		
13.1 Acoplamiento en serie de bobinas y resistencias	124		
13.1.1 Triángulo de tensiones	125		
13.1.2 Triángulo de impedancias	125		
13.1.3 Potencia de un circuito R - L	125		
13.1.4 Factor de potencia (FP)	126		
13.2 Acoplamiento en serie de resistencias y condensadores	127		
13.3 Circuito serie R-L-C	129		

13.4 Importancia práctica del cos φ	131	16.9.2 Ampliación del alcance de un voltímetro mediante transformadores de tensión	175
13.5 Corrección del factor de potencia mediante condensadores	132	16.10 El polímetro	176
13.5.1 Tipos de compensación de la energía reactiva	133	16.11 Medidas de potencia	176
13.6 Caída de tensión en las líneas eléctricas monofásicas de C.A.	134	16.12 Medida de la potencia reactiva con vármetro	177
14 RESOLUCIÓN DE CIRCUITOS PARALELOS Y MIXTOS EN C.A.	137	16.13 Medida de potencia activa en C.A. trifásica	177
14.1 Acoplamiento de receptores en paralelo en C.A.	138	16.13.1 Medida de potencia activa para sistemas con neutro: cargas desequilibradas	177
14.2 Instalaciones monofásicas de varios receptores	138	16.13.2 Medida de potencia activa para sistemas con neutro: cargas equilibradas	178
14.3 Resolución de circuitos de C.A. mediante el cálculo vectorial con números complejos	140	16.13.3 Medida de potencia activa para sistemas sin neutro: cargas equilibradas	178
14.3.1 Representación de un número complejo	140	16.13.4 Medida de potencia activa para sistemas sin neutro: cargas desequilibradas	178
14.3.2 Operaciones con números complejos	141	16.14 Medida de energía en sistemas trifásicos	179
14.3.3 Aplicación de los números complejos a la resolución de circuitos	141	16.15 Medida de la frecuencia	180
14.3.4 Potencia compleja	144	16.16 Medida del factor de potencia	180
14.4 Circuitos oscilantes	144	16.17 Medida de resistencia eléctrica	181
14.4.1 Resonancia	145	16.17.1 Medida de resistencias con óhmetro amperimétrico	181
14.4.2 Resonancia en serie	145	16.17.2 Medida de resistencias mediante puentes de medida	181
14.4.3 Resonancia en paralelo	146	16.17.3 Medida de resistencias de aislamiento	182
15 SISTEMAS TRIFÁSICOS	149	16.17.4 Medida de resistencia de una toma a tierra	182
15.1 Ventajas del uso de sistema trifásicos	150	16.18 El osciloscopio	183
15.2 Generación de un sistema de C.A. trifásica	150	16.19 Sistemas avanzados de medida	184
15.3 Conexión del alternador en estrella	151	16.19.1 Analizador de red trifásico	184
15.4 Conexión de los receptores	152	16.19.2 Comprobador de instalaciones eléctricas de baja tensión	185
15.5 Carga equilibrada en estrella	153	17 LÁMPARAS ELÉCTRICAS	189
15.6 Carga equilibrada en triángulo	155		
15.7 Corrección del factor de potencia	157	17.1 Magnitudes luminosas de las lámparas eléctricas ..	190
15.8 Instalaciones trifásicas de varios receptores	158	17.1.1 Flujo luminoso	190
15.9 Caída de tensión en las líneas trifásicas de C.A.	159	17.1.2 Eficacia luminosa	190
16 MEDIDAS ELÉCTRICAS	165	17.1.3 Índice de reproducción cromático (IRC) ..	190
16.1 Errores en la medida	166	17.1.4 Temperatura de color (K)	190
16.1.1 Errores absolutos y relativos	166	17.2 Tipo de lámparas eléctricas	190
16.2 Precisión de un aparato de medida	166	17.2.1 Lámparas incandescentes	191
16.3 Normas generales para la toma de medidas eléctricas	166	17.2.2 Lámparas incandescentes con halógenos	191
16.4 Instrumentos de medida analógicos y digitales	167	17.2.3 Lámparas fluorescentes	192
16.5 Posición de trabajo de los aparatos de medida	167	17.2.4 Lámparas fluorescentes compactas o de bajo consumo	194
16.6 Escalas de un instrumento de medida analógico	168	17.2.5 Lámparas de vapor de mercurio de color corregido	194
16.7 Sistemas de medida	168	17.2.6 Lámparas de vapor de mercurio con halógenos metálicos	195
16.7.1 Bobina móvil	168	17.2.7 Lámparas de vapor de sodio a alta presión ..	196
16.7.2 Bobina móvil con rectificador	169	17.2.8 Lámparas de vapor de sodio a baja presión ..	196
16.7.3 Bobina móvil con convertidor incorporado ..	169	18 EL TRANSFORMADOR	199
16.7.4 Hierro móvil	169		
16.7.5 Electrodinámico	170		
16.7.6 Ferrodinámico	170		
16.7.7 Inducción	170		
16.7.8 Bimetálico	170		
16.7.9 Láminas vibrantes	170		
16.8 Medida de intensidad	171		
16.8.1 Ampliación del alcance de un amperímetro mediante shunt	171		
16.8.2 Ampliación del alcance de amperímetros mediante transformadores de intensidad	172		
16.9 Medidas de tensión	174		
16.9.1 Ampliación del alcance de un voltímetro mediante resistencias adicionales en serie	174		
18.1 Funcionamiento del transformador	201		
18.2 Funcionamiento de un transformador ideal	202		
18.2.1 Funcionamiento de un transformador ideal en vacío	202		
18.2.2 Funcionamiento del transformador ideal en carga	203		
18.3 Transformador real	205		
18.3.1 Transformador real en vacío	205		
18.3.2 Pérdidas en el hierro	206		
18.3.3 Ensayo en vacío del transformador	206		
18.3.4 Transformador real en carga	207		

18.4 Circuito equivalente en cortocircuito del transformador	207	20.13 Regulación y control de los motores de C.C.	243
18.5 Ensayo del transformador en cortocircuito	208	20.14 Ensayos de los motores de C.C.	244
18.6 Corriente de cortocircuito accidental	210	21 > EL ALTERNADOR TRIFÁSICO	247
18.7 Caída de tensión de un transformador	211	21.1 Principio de funcionamiento del alternador	248
18.8 Rendimiento de un transformador	213	21.2 Constitución de un alternador de inducido fijo	248
18.9 Características nominales de un transformador	214	21.3 Frecuencia de un alternador	249
18.10 Autotransformadores	215	21.4 Acoplamiento de alternadores	250
18.11 Autotransformadores de regulación	215	22 > MOTORES DE C. A.	253
18.12 Transformadores trifásicos	215	22.1 El motor asíncrono trifásico	254
18.12.1 Conexiones de los transformadores trifásicos	216	22.1.1 Principio de funcionamiento del motor asíncrono trifásico	254
18.12.2 Desfase entre el primario y el secundario de transformadores trifásicos	217	22.1.2 Campo magnético giratorio	254
18.12.3 Ensayo en vacío de un transformador trifásico	218	22.2 Motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito	255
18.12.4 Ensayo en cortocircuito de un transformador trifásico	218	22.2.1 Característica mecánica de un motor asíncrono trifásico	256
18.13 Conexión en paralelo de transformadores	219	22.2.2 Características técnicas de un motor asíncrono trifásico	257
18.14 Refrigeración de los transformadores	220	22.2.3 Conexión de los devanados de un motor trifásico	258
18.15 Características de un transformador	220	22.2.4 Sistemas de arranque de los motores asíncronos trifásicos de rotor en cortocircuito	259
18.16 Ensayos a realizar para transformadores monofásicos y trifásicos	221	22.2.4.1 Arranque directo	259
19 > GENERADORES ELECTROMECÁNICOS DE C.C. LAS DINAMOS	225	22.2.4.2 Arranque estrella-triángulo	260
19.1 Producción de corriente alterna en una espira que gira en el seno de un campo magnético	226	22.2.4.3 Arranque por resistencias estatóricas de un motor	260
19.2 Rectificación de la corriente mediante el colector de delgas	226	22.2.4.4 Arranque de un motor por autotransformador	261
19.3 Constitución de una dinamo	227	22.2.5 Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico	261
19.4 Circuito magnético de una dinamo	228	22.3 Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes	262
19.5 Fuerza electromotriz generada por una dinamo	228	22.4 Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos	262
19.6 Reacción del inducido	229	22.4.1 Motores de dos velocidades conexión Dahlander	262
19.7 Devanado de compensación	230	22.4.2 Motor de dos velocidades con dos devanados separados	263
19.8 Excitación de los inductores	230	22.4.3 Regulación de velocidad con variadores de frecuencia	263
19.8.1 Dinamos de excitación independiente	230	22.5 Motores monofásicos	263
19.8.2 Dinamos autoexcitadas	230	22.5.1 Motor monofásico de inducción de rotor en cortocircuito	263
19.8.3 Dinamo con excitación en derivación	231	22.5.2 Motor asíncrono monofásico de fase partida	264
19.8.4 Dinamos con excitación en serie	231	22.5.3 Motor asíncrono monofásico con condensador de arranque	264
19.8.5 Dinamo con excitación compound	232	22.5.4 Motor monofásico con espira en cortocircuito	266
19.9 Ensayos en una dinamo	232	22.5.5 Motor trifásico como monofásico	266
20 > MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA	235	22.5.6 Motor universal	267
20.1 Principio de funcionamiento	236	22.6 Motor síncrono trifásico	267
20.2 Constitución	236	22.7 Motores especiales	268
20.3 Reacción del inducido	236	22.7.1 Motor paso a paso	268
20.4 Comportamiento en servicio	236	22.7.2 Servomotor	268
20.5 Fuerza contraelectromotriz	236	22.8 Ensayos de los motores de C.A.	268
20.6 Corriente del inducido	237		
20.7 Corriente absorbida en el arranque	237		
20.8 Rendimiento de un motor eléctrico	238		
20.9 Par motor	238		
20.10 Velocidad de giro	239		
20.11 Conexión de los motores de corriente continua	239		
20.11.1 Motor con excitación independiente	240		
20.11.2 Motor con excitación derivación o shunt	240		
20.11.3 Motor con excitación en serie	241		
20.11.4 Motor con excitación compound	242		
20.12 Inversión del sentido de giro	243		
23 > COMPONENTES ELECTRÓNICOS BÁSICOS	271		
23.1 Resistencias para circuitos electrónicos	272		
23.1.1 Tolerancia de una resistencia	272		

23.1.2 Código de colores	272	23.6.7.2 Obtención de la ganancia de corriente de un transistor a partir de las curvas características	292
23.1.3 Potencia de disipación de una resistencia	273	23.6.7.3 Influencia de la temperatura ambiente en la potencia máxima de un transistor	293
23.1.4 Clasificación de las resistencias	273	23.7 Tiristores	293
23.1.5 Resistencias fijas	274	23.7.1 El rectificador controlado de silicio (SCR)	294
23.1.6 Resistencias variables	274	23.7.2 El diac	294
23.1.7 Resistencias dependientes	274	23.7.3 El triac	295
23.1.7.1 Resistencias dependientes de la temperatura	274	23.7.4 El transistor de unijuntura (UJT)	295
23.1.7.2 Resistencias dependientes de la luz, LDR	275		
23.1.7.3 Resistencias dependientes de la tensión, VDR	276		
23.2 Los semiconductores	276		
23.3 El diodo como semiconductor	277		
23.3.1 Características atómicas del silicio	277		
23.3.2 El diodo de unión	278		
23.3.3 Características en polarización directa de un diodo	279		
23.3.4 Características en polarización inversa de un diodo	279		
23.3.5 Potencia y corriente nominal	280		
23.3.6 Aplicación de los diodos a circuitos de rectificación	280		
23.3.6.1 Circuito rectificador monofásico de media onda	280		
23.3.6.2 Circuito rectificador monofásico de onda completa	280		
23.3.6.3 Circuito rectificador trifásico de media onda	281		
23.3.6.4 Circuito rectificador trifásico de onda completa	281		
23.3.6.5 El filtrado	281		
23.4 El diodo Zener	283		
23.4.1 El Zener como regulador de tensión	283		
23.5 Dispositivos optoelectrónicos	284		
23.5.1 Diodos luminiscentes (LED)	284		
23.5.2 Fotodiodos	285		
23.6 El transistor	286		
23.6.1 Funcionamiento del transistor	286		
23.6.2 Identificación de transistores	288		
23.6.3 Comprobación del estado de un transistor	289		
23.6.4 Intensidades de corriente en el transistor	289		
23.6.5 Ganancia de corriente o parámetro beta (β) de un transistor	290		
23.6.6 Tensiones de ruptura	291		
23.6.7 Características de los transistores bipolares	291		
23.6.7.1 Curvas características con el emisor común (EC)	291		
23.6.7.2 Obtención de la ganancia de corriente de un transistor a partir de las curvas características	292		
23.6.7.3 Influencia de la temperatura ambiente en la potencia máxima de un transistor	293		
23.7 Tiristores	293		
23.7.1 El rectificador controlado de silicio (SCR)	294		
23.7.2 El diac	294		
23.7.3 El triac	295		
23.7.4 El transistor de unijuntura (UJT)	295		
24 CIRCUITOS ELECTRÓNICOS ANALÓGICOS BÁSICOS	301		
24.1 Fuentes de alimentación	302		
24.1.1 Fuentes de alimentación con reguladores de tensión integrados	302		
24.1.2 Fuentes de alimentación comutadas	303		
24.2 Circuitos básicos de control de potencia	303		
24.2.1 Control de potencia en C.C. con un SCR	303		
24.2.2 Control de potencia en C.A. con un SCR	304		
24.2.3 Control de potencia en C.C. con un triac	304		
24.3 Amplificadores	305		
24.3.1 Ganancia de un amplificador	305		
24.3.2 Adaptación de impedancias	306		
24.3.3 Clasificación de los amplificadores	306		
24.3.4 Amplificador de emisor común (EC)	307		
24.3.5 Amplificador de colector común (CC)	307		
24.3.6 Amplificador de base común (BC)	308		
24.3.7 Acoplamiento de amplificadores	308		
24.3.8 Realimentación en los amplificadores	309		
24.3.9 Distorsión en los amplificadores	309		
24.3.10 El amplificador operacional	310		
24.4 Generadores de señal y osciladores	313		
24.4.1 Generadores senoidales	313		
24.4.2 Principio general de oscilación	313		
24.4.3 Osciladores RC	314		
24.4.4 Oscilador en puente de Wien	315		
24.4.5 Osciladores LC	315		
24.4.6 Osciladores de cristal	316		
24.4.7 Multivibradores	316		
24.4.8 Osciladores integrados	318		
Solución a los Ejercicios de Autoevaluación	323		
Bibliografía	329		

Prólogo

El objetivo de este texto es el de servir como herramienta básica de trabajo en el módulo de “Electrotecnia” para alumnos que vayan a cursar el ciclo formativo de grado medio de “Equipos e Instalaciones Electrotécnicas” (EIE).

Por supuesto, con ello no pretendemos dar unas reglas fijas de trabajo, sino que entendemos que es el profesor, en último caso, quien debe desarrollar y organizar el conjunto del módulo en función de la propia personalidad del grupo destinatario y de los recursos didácticos que se encuentren a su alcance. Se ha realizado un esfuerzo global para elaborar la herramienta docente más adecuada para este proceso de aprendizaje, basándonos para ello en las más modernas tendencias pedagógicas.

Por otro lado, entendemos que el módulo es muy amplio, y que es el profesor quien deberá decidir en todo momento qué aspectos del módulo son más relevantes, para poder incidir en ellos con más insistencia y hacer una reducción didáctica en caso de que el tiempo lectivo disponible no sea suficiente.

El título de “Técnico en Equipos e Instalaciones Electrotécnicas” se enmarca en la familia profesional de “Electricidad Electrónica”, y las capacidades que desarrolla se encuentran orientadas hacia el ámbito de las instalaciones eléctricas.

El objetivo del título de “Técnico en Equipos e Instalaciones Electrotécnicas” es capacitar a los alumnos para que puedan realizar y construir instalaciones de distribución de energía eléctrica en media y baja tensión (MT y BT) de instalaciones singulares y de automatización de edificios, así como equipos electrotécnicos de protección, medida y control para los mismos. También, mantener dichas instalaciones, equipos y máquinas que las componen, de acuerdo con la reglamentación electrotécnica de seguridad y medioambiental vigentes.

La “Electrotecnia” es la disciplina tecnológica que estudia las aplicaciones de la electricidad, y abarca el estudio de los fenómenos eléctricos y electromagnéticos desde el punto de vista de la utilidad práctica de la electricidad incluidos en tres grandes campos de conocimiento y experiencia: 1) los conceptos y leyes científicas que explican el funcionamiento y comportamiento de los distintos aparatos, receptores y máquinas eléctricas, respecto a los fenómenos físicos que en ellos producen; 2) las leyes, teoremas, principios y técnicas de análisis, cálculo y predicción del comportamiento de los circuitos eléctricos y electrónicos; y 3) los elementos con los que se montan y construyen circuitos, aparatos y máquinas eléctricas: representación, disposición, normalización, conexiones y características.

En el Real Decreto se expresan las siete capacidades terminales que deben ser alcanzadas por los alumnos:

• *Anализar los fenómenos eléctricos y electromagnéticos característicos de los circuitos de corriente continua (CC) y de corriente alterna (CA) y aplicar las leyes y teoremas fundamentales en el estudio de dichos circuitos.*

• *Anализar la estructura y características fundamentales de los sistemas eléctricos polifásicos.*

• *Anализar la estructura, principio de funcionamiento y características de las máquinas eléctricas estáticas y rotativas, realizando una clasificación de las mismas.*

• *Realizar con precisión y seguridad las medidas de las magnitudes eléctricas fundamentales (tensión, intensidad, resistencia, potencia, frecuencia, etc.), utilizando, en cada caso, el instrumento (polímetro, vatímetro, osciloscopio, etc.) y los elementos auxiliares más apropiados.*

• *Realizar los ensayos básicos característicos de las máquinas eléctricas estáticas y rotativas de baja potencia.*

• *Anализar la tipología y características funcionales de los componentes electrónicos analógicos básicos y su aplicación en los circuitos electrónicos.*

• *Anализar funcionalmente los circuitos electrónicos analógicos básicos (rectificadores, filtros, amplificadores, etc.) y sus aplicaciones más relevantes (fuentes de alimentación, amplificadores de sonido, circuitos básicos de control de potencia, temporizadores, etc.).*

Para alcanzar estas capacidades terminales se han incluido en este texto 24 capítulos donde se tratan los aspectos fundamentales del módulo de “Electrotecnia”: 1, “La electricidad. Conceptos Generales”; 2, “Resistencia eléctrica”; 3, “Potencia y energía eléctrica”; 4, “Efecto térmico de la electricidad”; 5, “Aplicaciones del efecto térmico”; 6, “Circuitos serie, paralelo y mixto”; 7, “Resolución de circuitos con varias mallas”; 8, “Efecto químico de la corriente eléctrica. Pilas y acumuladores”; 9, “Los condensadores”; 10, “Magnetismo y electromagnetismo”; 11, “Interacción entre la corriente eléctrica y un campo magnético”; 12, “La corriente alterna”; 13, “Circuitos serie R-L-C en C.A.”; 14, “Resolución de circuitos paralelos y mixtos en C.A.”; 15, “Sistemas trifásicos”; 16, “Medidas eléctricas”; 17, “Lámparas eléctricas”; 18, “El transformador”; 19, “Generadores electromecánicos de C.C. Las dinamos”; 20, “Motores de corriente continua”; 21, “El alternador trifásico”; 22, “Motores de C.A.”; 23, “Componentes Electrónicos Básicos”; 24, “Circuitos electrónicos analógicos básicos”.

En todos los capítulos se ha intentado incluir una serie de experiencias y actividades de tipo práctico con la idea de integrar la teoría y la práctica como dos elementos de un mismo proceso de aprendizaje, mediante el cual se le presenta al alumno un material significativo para que pueda darle sentido a lo que aprende. De esta forma se emplea una metodología activa y por descubrimiento, como proceso de construcción de capacidades que integre conocimientos científicos (conceptuales), tecnológicos (concretos) y organizativos (individualmente y en equipo), con el fin de que el alumno se capazite para aprender por sí solo.

Se ha procurado que los contenidos desarrollados sean presentados a un nivel fundamental con un lenguaje sencillo y claro, procurando que sean significativos y que respondan a los problemas y situaciones de la realidad tecnológica actual y de los propios integrantes del proceso formativo. También se ha procurado que dichos contenidos sean interdisciplinares, dando oportunidad para que los alumnos influyan en la realidad presentada en los mismos.

También, se ha hecho un importante esfuerzo para no incluir procesos de desarrollo matemático que resulten ser demasiado complejos para el nivel de los alumnos y que se aparten de los objetivos generales marcados.

Aparte del capítulo dedicado a las medidas eléctricas, debido a la importancia que este tema merece y con el objeto de dar a estos contenidos el sentido más práctico posible, se ha introducido el concepto de medida y, lo que es más importante, los procedimientos de utilización de los aparatos de medida en cada uno de los momentos del proceso de aprendizaje.

En los diferentes capítulos se han incluido, aparte de los propios contenidos del módulo, una serie de *experiencias*, que, realizadas de una forma organizada en el laboratorio, ayudarán a acercar los contenidos abstractos del módulo a la realidad cotidiana de los alumnos. Estas experiencias sirven, en la mayoría de las ocasiones, como presentación de los contenidos que se van a tratar en cada uno de los capítulos (los alumnos observan, manipulan, miden y analizan elementos reales de la "Electrotecnia").

Aquí también se sugiere el apoyo de estas fases de presentación con otro tipo de recursos: visualización de vídeos temáticos, visitas a instalaciones propias del centro educativo y a instalaciones industriales, etc.

Acompañando a los contenidos propios de la asignatura, se presenta una serie de *ejemplos* con los que se pretende "ejemplificar" la solución de aquellos ejercicios que resulten más relevantes para la comprensión del módulo. A este respecto se han seleccionado, en todo momento, ejemplos que sean lo más cercanos a la realidad tecnológica y a los propios participantes del proceso de aprendizaje, huyendo en todo momento de ejercicios exclusivamente teóricos. Aquí se sugiere que el profesor proponga a los alumnos la resolución de algunos de

los ejercicios propuestos en la sección de *autoevaluación*, y que estén relacionados con los que se acaban de resolver.

Al final de cada uno de los capítulos se incluye una serie de *actividades* de carácter eminentemente práctico, que ayudarán a trasladar a la realidad todo aquello que se estudia en la teoría. Por supuesto, será el profesor el que decida qué tipos de ejercicios prácticos conviene llevar a cabo y cuándo es más conveniente hacerlo. Los ejercicios prácticos que aquí se incorporan son totalmente orientativos.

En cada uno de los capítulos se incorpora un apartado dedicado a la *autoevaluación*. Aquí se propone una serie de preguntas y ejercicios, en los que se aporta el resultado al final del texto con el fin de que los alumnos puedan autoevaluarse.

En todo momento se incentivará a los alumnos para que trabajen en grupo, planificando el desarrollo de las experiencias, ejercicios y actividades que a lo largo del curso se lleven a cabo en el laboratorio de "Electrotecnia". Al finalizar cada una de estas actividades es conveniente que los alumnos presenten un "informe-memoria" sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.), exponiendo al resto del grupo sus trabajos.

Otro aspecto que cabe resaltar es que siempre resulta de gran interés que sean los propios alumnos los que investiguen ciertos procesos tecnológicos y busquen informaciones técnicas en las diferentes fuentes de información, estimulando así la curiosidad y el afán por saber. A este respecto, conviene dotar al aula con una completa biblioteca técnica, donde se incluyan manuales de uso de diferentes dispositivos electrotécnicos, así como una gran variedad de informaciones técnicas, tales como catálogos comerciales, revistas técnicas, reglamentos y normas vigentes en el campo de la "Electrotecnia", proyectos ejemplo extraídos de la realidad, etc.

Los contenidos incluidos en los diferentes capítulos se pueden ampliar consultando diferentes páginas web en Internet. Para facilitar la búsqueda de las mismas se ha desarrollado, por parte del autor, una página web: <http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>. Aquí se incluyen diferentes contenidos de interés, como pueden ser direcciones útiles para la electrotecnia en Internet ordenadas por capítulos del texto, guía didáctica, currículo completo del ciclo formativo EIE del MEC, y muchas otras cosas más.

Si desea realizar algún comentario o sugerencia, pueden contactar con el autor escribiendo a la siguiente dirección electrónica: pablo.alcalde@t2000idiomas.com

Doy las gracias a Saci, Kainos AEG, Siemens, Imefy, Mazda, Osram, Philips, Kaise, Varta, y Tudor por su colaboración para disponer del material gráfico que se presenta en este libro.

La Electricidad. Conceptos Generales

Introducción

La electricidad es una de las formas de energía que más ventajas y comodidades aporta a los seres humanos en la actualidad. Con ella conseguimos que funcionen, entre otras, las siguientes aplicaciones: luz con las lámparas eléctricas; calor con cocinas, hornos y calefacciones; frío con frigoríficos y equipos de aire acondicionado; fuerza motriz con motores (ascensores, máquinas herramientas, vehículos eléctricos, electrodomésticos, etc); sistemas de información, automatización y telecomunicación con ordenadores, microprocesadores, sistemas robotizados, televisores, radio, etc., y muchas otras aplicaciones que con el paso de los años aparecerán.

Contenido

En este capítulo vamos a estudiar la naturaleza de la electricidad; de qué diferentes formas puede producirse esta energía; qué efectos provechosos podemos conseguir gracias a la electricidad, así como cuáles son sus magnitudes más básicas.

- ... *Sistemas de producción, transporte y distribución de la energía eléctrica.*
- ... *Efectos de la electricidad.*
- ... *Naturaleza de la electricidad.*
- ... *Carga eléctrica.*
- ... *Corriente eléctrica.*
- ... *El circuito eléctrico.*
- ... *Formas de producir electricidad.*
- ... *Intensidad de la corriente eléctrica y su medida.*
- ... *Corriente continua y corriente alterna.*
- ... *Tensión eléctrica y su medida.*
- ... *Fuerza electromotriz.*

Objetivos

- ... *Entender los procedimientos de producción, transporte y consumo de la electricidad.*
- ... *Identificar las partes de un circuito eléctrico.*
- ... *Relacionar las magnitudes de un circuito eléctrico con su unidad de medida correspondiente, así como entender el papel de las mismas en el circuito y los aparatos de medida que las miden.*
- ... *Diferenciar una C.C. de una C.A.*
- ... *Emplear el voltímetro y amperímetro de una forma adecuada.*

1.1 Producción y consumo de electricidad

La electricidad se produce fundamentalmente en las centrales eléctricas. Su misión consiste en transformar cualquier forma de energía primaria (hidráulica, térmica, nuclear, solar, etc.) en energía eléctrica. Dada la facilidad con que se transporta la electricidad, por medio de las líneas eléctricas, la ventaja fundamental que conseguimos con esto es que producimos energía eléctrica en las zonas donde podemos acceder con facilidad a la energía primaria, para luego consumirla en ciudades, empresas o cualquier otro centro de consumo (Figura 1.1).

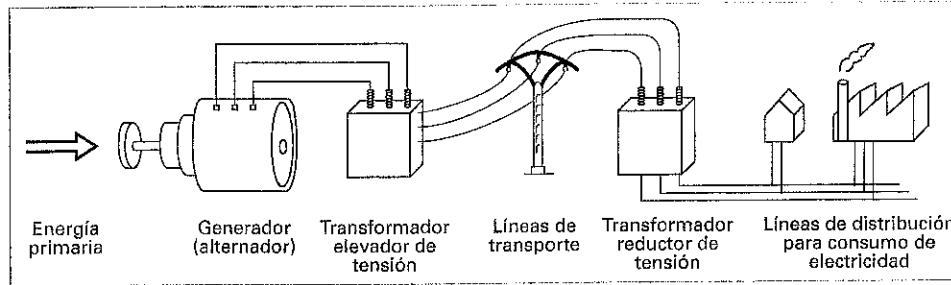


Figura 1.1. Sistema de producción, transporte y distribución de la energía eléctrica.

El generador eléctrico, que se utiliza habitualmente en una central eléctrica, se basa en un fenómeno que fue descubierto en 1820, por Faraday.

“Cuando se mueve un conductor eléctrico (hilo metálico), en el seno de un campo magnético (imán o electroimán) aparece una corriente eléctrica por dicho conductor. Lo mismo ocurre si se mueve el imán y se deja fijo el conductor” (Figura 1.2).

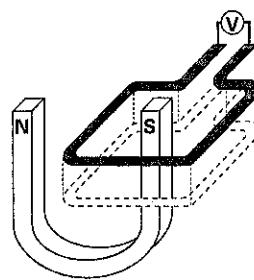


Figura 1.2. Cuando se mueve el conductor dentro de un campo magnético se produce electricidad.

En un generador eléctrico se hacen mover bobinas en sentido giratorio en las proximidades de campos magnéticos producidos por imanes o electroimanes (Figura 1.3)

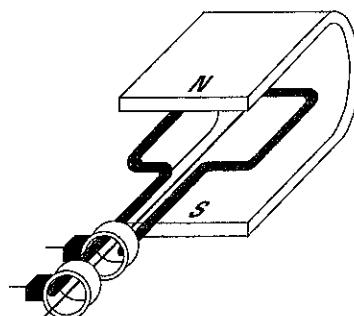


Figura 1.3. Generador eléctrico elemental.

En las primeras centrales eléctricas el generador producía corriente continua mediante dinamos, lo que impedía el transporte de la energía eléctrica a grandes distancias. Actualmente los generadores eléctricos son **alternadores trifásicos**. Es decir, generan **corriente alterna trifásica**. De esta forma, es más fácil transportar la electricidad a grandes distancias.

Los alternadores de las centrales proporcionan la energía eléctrica a una tensión de 10.000 a 20.000 voltios. Una vez producida la electricidad por éstos, hay que transportarla hasta las ciudades, industrias, y todo tipo de centros de consumo que, casi siempre, se encuentran a mucha distancia. El transporte se realiza a través de líneas eléctricas. Como éstas no son perfectas, ya que poseen resistencia eléctrica, se producen grandes pérdidas de energía en forma de calor.

Para reducir estas pérdidas se utilizan líneas de alta tensión (220.000, 380.000 voltios). De esta forma, se disminuye la intensidad de la corriente eléctrica y la electricidad puede recorrer grandes distancias con pocas pérdidas.

El generador produce la energía eléctrica a una tensión de 10.000 a 20.000 V. En la estación transformadora se eleva dicha tensión a 220.000 ó 380.000 V, dependiendo de la cantidad de energía que hay que transportar.

Los aparatos que consiguen elevar la tensión son los **transformadores eléctricos**. Estos dispositivos solamente funcionan para la corriente alterna.

Las líneas eléctricas de alta tensión transportan la energía eléctrica desde las centrales hasta las proximidades de los centros de consumo. Estas líneas constan de tres conductores eléctricos (por lo general son de aluminio reforzados con acero) sujetos a torres metálicas de celosía y de gran altura. Las altas tensiones son muy peligrosas, por eso cuanto mayor es el valor de la tensión de la línea, mayor altura tienen dichas torres.

Las subestaciones de transformación preparan la energía eléctrica para ser distribuida, en un mayor número de líneas, hacia los centros de consumo (grandes industrias, pequeñas poblaciones, sectores de una ciudad, etc.). Esto se lleva a cabo con varios transformadores reductores que proporcionan media tensión en su salida. Las líneas de media tensión, que distribuyen la energía por los mencionados centros de consumo, suelen ser subterráneas. De esta manera, se reduce el peligro de las mismas. Por último, se sitúan transformadores reductores cerca de los consumidores y se lleva a cabo la última reducción de la tensión, suministrando 230 o 400 voltios (baja tensión). Estas tensiones son ya mucho menos peligrosas para las personas que utilizan la electricidad.

1.2 Efectos de la electricidad

¿Pero qué es exactamente la electricidad? Podríamos decir que es lo que hace girar los motores, lucir las lámparas, etc., en definitiva una fuerza, que como tal es invisible y de la cual sólo se notan sus efectos.

Los efectos fundamentales que se conocen de la corriente eléctrica, son:

Efecto térmico: Al fluir la corriente eléctrica por ciertos materiales conductores, llamados resistivos, como el carbón, se produce calor en los mismos, pudiendo construirse, gracias a este efecto, calefacciones, cocinas, hornos, calentadores de agua, planchas, secadores, etc. (Figura 1.4).

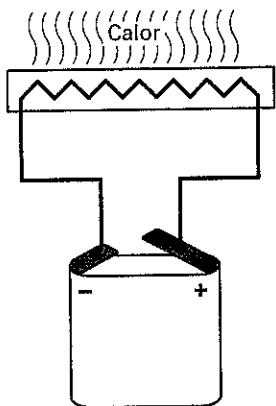


Figura 1.4. Efecto térmico de la electricidad.

Efecto luminoso: En una lámpara eléctrica incandescente, al fluir por su filamento resistivo una corriente eléctrica, éste se calienta a altas temperaturas, irradiando luz (Figura 1.5).

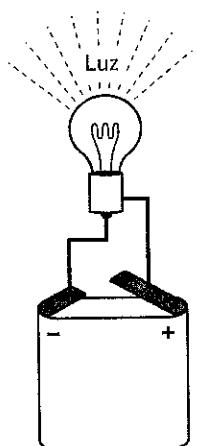


Figura 1.5. Efecto luminoso de la electricidad.

Efecto químico: Al fluir la corriente eléctrica por ciertos líquidos, éstos se disgregan, dándose el nombre de electrólisis a dicho proceso. Gracias a este efecto se pueden producir productos químicos y metales, baños metálicos (galvanización) y recarga de baterías de acumuladores (Figura 1.6).

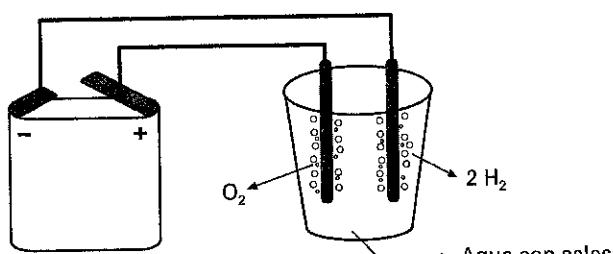


Figura 1.6. Efecto químico de la electricidad.

Efecto magnético: Al conectar una bobina a un circuito eléctrico, aquélla produce un campo magnético similar al de un imán, lo que origina un efecto de atracción sobre ciertos metales. Aprovechando este efecto se pueden construir elec-

troimanes, motores eléctricos, altavoces, instrumentos de medida, etc. (Figura 1.7).

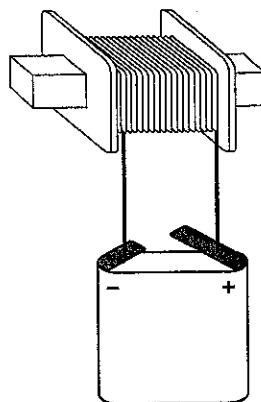


Figura 1.7. Efecto magnético de la electricidad.

1.3 La electricidad

La electricidad es una manifestación física que tiene que ver con las modificaciones que se dan en las partes más pequeñas de la materia, en los átomos, y más concretamente en el electrón. Seguidamente estudiaremos los fenómenos de electrización que se dan en los materiales.

Experiencia 1.1: Consigue un bolígrafo de plástico y frótalo con un paño de lana. Seguidamente, acércalo a unos pedacitos de papel (Figura 1.8).

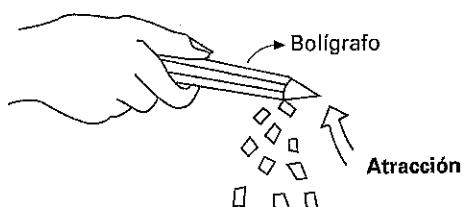


Figura 1.8. Al frotar el bolígrafo se electriza.

Después de frotar el bolígrafo los trozos de papel son atraídos por el bolígrafo, lo que indica que debido al frotamiento se han desarrollado determinadas fuerzas debido a las cargas eléctricas, que previamente no existían.

Para explicar el fenómeno de electrización observado en la Experiencia 1.1 es necesario comprender los cambios que se han producido en las partes más pequeñas de la materia.

Los materiales están compuestos básicamente por moléculas, siendo éstas las partículas más pequeñas que poseen todas las propiedades físicas y químicas del material original. A su vez, estas moléculas se componen de otras partículas más pequeñas, llamadas átomos. Así, por ejemplo la molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno y de uno de oxígeno, tal como indica su fórmula química H_2O .

El átomo es muy pequeño, del orden de una diezmillonésima de milímetro. Está compuesto de partes todavía más pequeñas, como son el núcleo y los electrones. El núcleo del átomo está formado por partículas elementales, tales como los protones y neutrones (Figura 1.9).

Los electrones giran a gran velocidad en órbitas alrededor del núcleo.

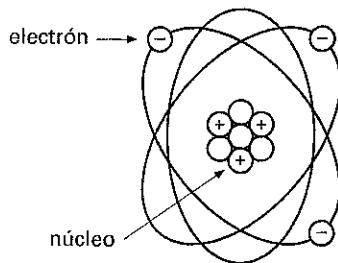


Figura 1.9. Estructura del átomo.

Si fuera posible situar un electrón frente a un protón, se podría observar un fenómeno de atracción. Al contrario, si enfrentamos dos electrones o dos protones éstos se repelen (Fig. 1.10). Esto nos indica que tanto el electrón como el protón poseen una propiedad que se manifiesta en forma de fuerzas de atracción y de repulsión; nos estamos refiriendo a la carga eléctrica. Esta carga eléctrica es de diferente signo para el electrón y para el protón:

- El protón tiene carga eléctrica positiva.
- El electrón tiene carga eléctrica negativa.

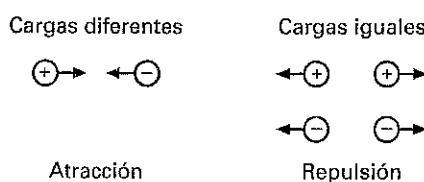


Figura 1.10. Fenómenos de atracción y repulsión en las cargas eléctricas.

En un átomo, los protones se concentran en el núcleo junto a los neutrones y algunas partículas atómicas. A pesar de que los protones posean carga positiva y que entre ellos exista una gran fuerza repulsiva, éstos se mantienen confinados y muy próximos entre sí en el núcleo, debido a las enormes fuerzas de carácter nuclear. Los neutrones no poseen carga eléctrica y aportan masa al núcleo del átomo.

Los fenómenos que se dan en un átomo son comparables a los que se dan en el sistema solar. El planeta es el electrón y el sol es el núcleo. En un átomo los electrones giran a gran velocidad dentro de sus respectivas órbitas alrededor del núcleo. La fuerza centrífuga que los electrones desarrollan en su giro se ve compensada por la fuerza de atracción que aparece entre los protones de carga positiva situados en el núcleo y dichos electrones.

El electrón posee una masa muy pequeña, en torno a algo más de la milésima parte de la masa de un protón. Además, los electrones más alejados del núcleo son atraídos con menor fuerza por el mismo, lo que hace posible su movilidad hacia otros átomos.

Átomo con carga neutra: Un átomo en estado normal posee el mismo número de electrones que de protones. Esto hace que exista un equilibrio entre las fuerzas de carácter eléctrico que se dan entre protones y neutrones, y por tanto que dicho átomo permanezca eléctricamente neutro. Así, por ejemplo, un átomo de litio posee 3 protones y 3 electrones: $3(+)+3(-)=0$ (Figura 1.11).

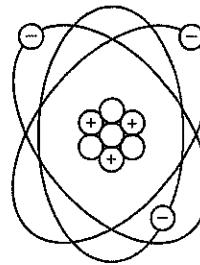


Figura 1.11. Átomo con carga neutra

Átomo con carga positiva: Si por algún medio consiguiésemos arrancar electrones de las últimas órbitas de los átomos, surgiría un desequilibrio entre el número de cargas negativas y positivas, siendo mayores estas últimas y confiriendo, por tanto, una carga positiva a dicho átomo. Así por ejemplo, al frotar con un paño el litio, es posible que se arraque un electrón de su última órbita, quedando el átomo cargado positivamente por poseer un defecto de electrones: $3(+)+2(-)=1(+)$ (Figura 1.12).

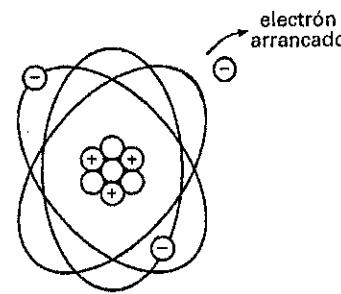


Figura 1.12. Átomo con carga positiva.

Átomo con carga negativa: De la misma manera, si por algún procedimiento conseguimos agregar electrones a un átomo eléctricamente neutro, este exceso de electrones produce una carga negativa en el átomo. En el ejemplo del litio, al añadir un electrón en su última órbita da como resultado una carga negativa: $3(+)+4(-)=1(-)$ (Figura 1.13).

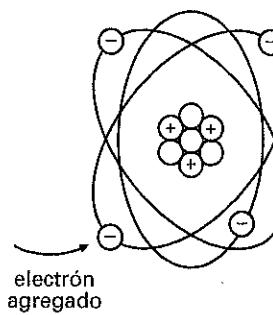


Figura 1.13. Átomo con carga negativa.

1.4 Electricidad estática

Al frotar determinados materiales aislantes, éstos pierden o ganan electrones, lo que origina cargas eléctricas estáticas en dichos materiales. Este tipo de electricidad es el que se da, por ejemplo, en la Experiencia 1.1, realizada anteriormente.

Al frotar el bolígrafo de plástico con el paño, se transfieren electrones de un elemento a otro, quedando el bolígrafo cargado eléctricamente. Cuando acercamos el bolígrafo, cargado con electricidad estática, éste atrae a los papelitos, como es propio de los cuerpos electrizados.

El tipo de carga (positiva o negativa) con la que se electrizan los materiales después de haber sido frotados depende de los materiales que se empleen en el proceso. Así, por ejemplo, si se frota una barra de vidrio con un paño de lana, los electrones se transfieren del vidrio hacia el paño, quedando electrizado el primero con carga positiva (Figura 1.14).

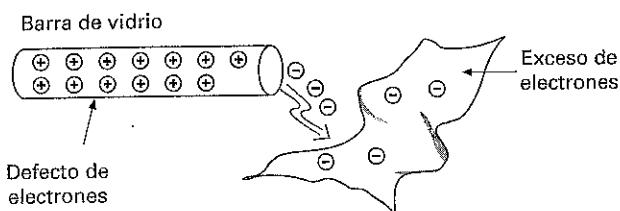


Figura 1.14. Al frotar, el vidrio se electriza con carga positiva.

Por otro lado, si lo que frotamos es una barra de ebonita con una piel de animal, los electrones son transferidos de la piel a la ebonita, quedando esta última cargada negativamente (Figura 1.15).

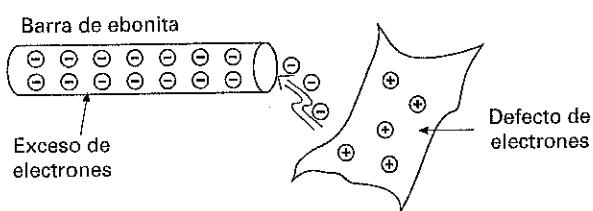


Figura 1.15. Al frotar la ebonita se electriza con carga negativa.

¿Qué ocurre si después de frotar dos barras de vidrio se acercan? (Figura 1.16).

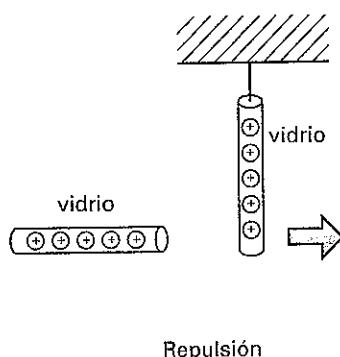


Figura 1.16.

¿Qué ocurre si después de frotar una barra de vidrio y una de ebonita las barras se acercan? (Figura 1.17).

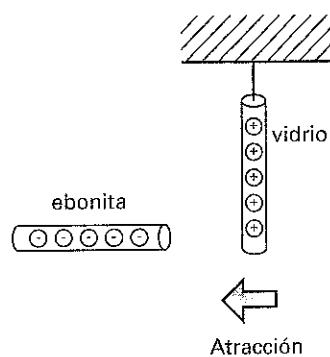


Figura 1.17.

El causante en todo momento de la electrización de los cuerpos es el electrón, ya que posee carga y movilidad para poder desplazarse por los materiales. A partir de estos dos conceptos es posible que exista la electricidad.

1.5 Carga eléctrica

Se conoce como carga eléctrica de un cuerpo al exceso o defecto de electrones que éste posee:

- Carga negativa significa exceso de electrones.
- Carga positiva significa defecto de electrones.

La unidad de carga eléctrica es el **coulombio**.

1 coulombio equivale aproximadamente a un exceso o defecto de 6 trillones de electrones ($1 \text{ coulombio} = 6,3 \cdot 10^{18}$ electrones).

Ejemplo: 1.1.

Determinar la carga eléctrica que tiene un barra de ebonita si una vez frotada posee un exceso de $25,2 \cdot 10^{18}$ electrones:

$$Q = \frac{25,2 \cdot 10^{18}}{6,3 \cdot 10^{18}} = 4 \text{ coulombios de carga negativa}$$

1.6 Movimiento de electrones

Supongamos que cargamos eléctricamente, por frotamiento, una bola de vidrio y otra de ebonita y las disponemos tal como se indica en la Figura 1.18. Entre ellas aparece una diferencia de carga eléctrica.



Figura 1.18.

Si ahora unimos eléctricamente las dos bolas mediante un conductor eléctrico (Figura 1.19), los electrones en exceso de la bola de ebonita cargada negativamente serán atraídos con fuerza por la carga positiva de la bola de vidrio. Dado que existe un camino conductor por donde se pueden desplazar los electrones de una bola a otra, aparece un **movimiento de electrones** por el mismo hasta que las cargas queden compensadas, es decir, hasta que la **diferencia de cargas** deja de existir.

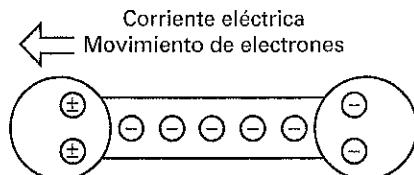


Figura 1.19

Al movimiento de electrones que se establece por el conductor eléctrico se denomina **corriente eléctrica**. Como se puede observar en la Figura 1.19, el sentido de la corriente eléctrica lo establecen los electrones, es decir, del cuerpo donde hay exceso de electrones hasta el cuerpo donde hay defecto de ellos (del negativo al positivo).

A la diferencia de cargas que se establece entre los dos cuerpos cargados eléctricamente, y que es la causante del movimiento de electrones, se la conoce por otro nombre: **tensión o diferencia de potencial**.

1.7 El circuito eléctrico

Experiencia 1.2: Consigue una pila y una lámpara de linterna y conéctalas con unos conductores de cobre tal como se indica en la figura 1.20.

Podrás comprobar que la lámpara se enciende cuando se ponen en contacto los terminales de la lámpara con los bornes de la pila, y se apaga cuando interrumpimos la conexión de uno de los conductores con la pila (Figura 1.21).

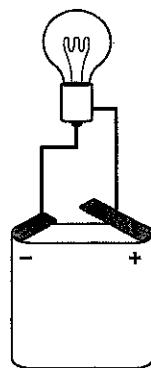


Figura. 1.20

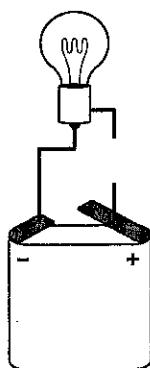


Figura. 1.21

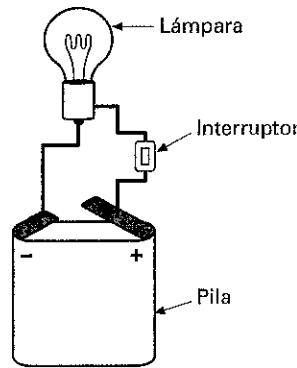


Figura. 1.22

La pila contiene energía eléctrica. Al conectarla mediante los conductores a la lámpara, por éstos fluye una corriente eléctrica hacia la misma, que hace que ésta transforme la energía eléctrica en luminosa.

Ahora conecta un interruptor, tal como se muestra en la Figura 1.21, y a continuación ábrelo y ciérralo.

Podrás comprobar que la lámpara sólo se enciende cuando el interruptor pone en contacto el borne de la pila con el terminal de dicha lámpara. De esta manera podemos encender y apagar la lámpara a voluntad.

Existe otra forma más fácil de hacer un dibujo eléctrico, tal como se muestra en la Figura 1.23. Se le denomina esquema eléctrico, y en él se representan sus elementos (pila, conductores y lámpara) mediante símbolos normalizados.

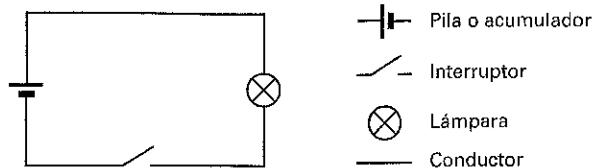


Figura 1.23. Esquema eléctrico.

En la Experiencia 1.2 hemos construido un sencillo circuito eléctrico; vamos a estudiar ahora las magnitudes básicas y los fenómenos que se producen en él.

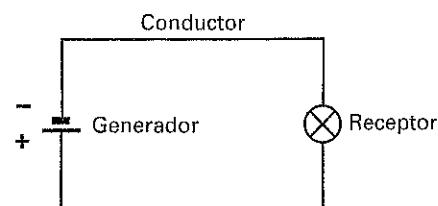


Figura 1.24. Circuito eléctrico.

Las condiciones que se han de dar para que se forme un circuito eléctrico básico como el de la Figura 1.24, son:

- Un GENERADOR, que se encarga de generar una diferencia de cargas o tensión entre sus dos polos. En la Experiencia 1.2 utilizamos como tal una pila de 4,5 voltios de tensión.
- Un CONDUCTOR, que permite que fluyan los electrones de una parte a otra del circuito. En la experiencia empleamos conductores de cobre.
- Un RECEPTOR o aparato eléctrico, que aprovechando el movimiento de electrones consigue transformar la energía eléctrica en energía calorífica, luminosa, motriz, etc. En la experiencia usamos una lámpara de linterna.

Estudiaremos ahora detenidamente cómo fluye la corriente eléctrica por el circuito (Figura 1.25). El generador (en este caso una pila), a costa de consumir algún tipo de energía, separa las cargas en el interior del generador gracias a la fuerza electromotriz (f.e.m.), tomando electrones de una placa y depositándolos en otra. La placa donde son arrancados los electrones queda, por tanto, cargada positivamente (defecto de electrones), mientras que la placa donde se depositan se carga negativamente (exceso de electrones), formándose el polo positivo y negativo del generador. Ahora, entre dichos polos aparece una diferencia de cargas o tensión eléctrica que hace que los

electrones sean fuertemente atraídos por el polo positivo. A través del generador los electrones no pueden fluir de un polo a otro, dado que la fuerza electromotriz tiene un valor un poco mayor que la fuerza provocada por la tensión. El único camino posible por donde los electrones pueden moverse desde el polo negativo es por el conductor, atravesando el receptor hasta llegar al polo positivo. La f.e.m. del generador se encarga de seguir separando las cargas continuamente, y la tensión en bornes de la pila de reponerlos a través del receptor en un movimiento continuo, completándose así lo que se conoce por circuito eléctrico.

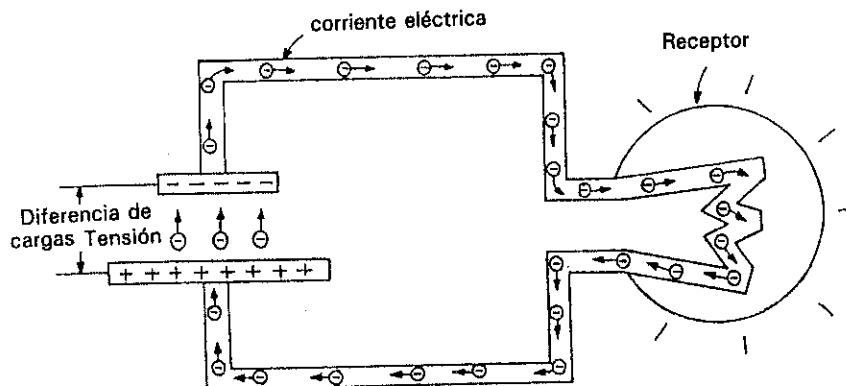


Figura. 1.25. Movimiento de electrones por un circuito.

Una vez que ya sabemos lo que es un circuito eléctrico, vamos a pasar a estudiar detenidamente a lo largo de este estudio sobre "Electrotecnia", las partes que forman dicho circuito. Comenzaremos con las formas de producir electricidad, es decir los diferentes tipos de generadores, para seguir con el estudio de las magnitudes más importantes de un circuito y sus relaciones, así como el de los conductores y aislantes, elementos que producen calor, propiedades químicas y magnéticas de la electricidad, pilas, acumuladores, lámparas y motores.

1.8 Formas de producir electricidad

El encargado de producir la electricidad es el generador, que aprovechando algún fenómeno físico es capaz de desarrollar una determinada fuerza electromotriz que separa las cargas entre sus polos y crea una diferencia de potencial o tensión. Existen varias formas de producir electricidad, de las cuales se construyen los diferentes tipos de generadores.

1.8.1 Producción de electricidad por reacción química

Las pilas y acumuladores son generadores que, aprovechando la energía que se desarrolla en determinadas reacciones químicas, producen electricidad (Figura 1.26).

Así, por ejemplo, podemos fabricar una pila sencilla con los elementos de la Figura 1.27. En este caso, introducimos una barra de cobre (Cu) y una barra de cinc (Zn) en una disolución de agua (H_2O) con unas gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Los terminales de ambas barras se conectan a un voltímetro.

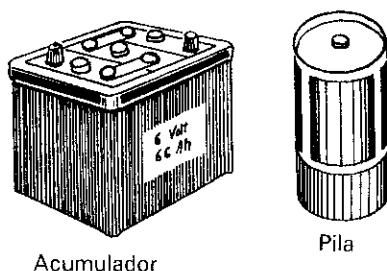


Figura 1.26

El ácido sulfúrico disuelve las barra de cinc y de cobre, pasando sus átomos a la disolución. Por un lado, el cinc cede átomos a la disolución, dejando acumulados gran cantidad de sus electrones en la barra de cinc. Con la barra de cobre pasa algo similar, pero en ella se acumulan muchos menos electrones. El resultado es que la barra de cinc se hace mucho más negativa que la barra de cobre, apareciendo una diferencia de cargas, o tensión eléctrica, entre las dos barras.

Mientras exista material activo en las barras para disolverse, esta pila elemental producirá fuerza electromotriz, pero la pila deja de ser útil cuando se agotan dichos materiales.

Sin embargo, los acumuladores eléctricos, como los que constituyen las baterías de los automóviles, se pueden recargar una vez agotados. Para ello basta con hacerles pasar una corriente eléctrica cuando están descargados. Esto se consigue conectándolos a una fuente de energía eléctrica.

Las aplicaciones prácticas de las pilas y acumuladores son ya bastante conocidas por todos nosotros; destacamos algunas de ellas: alimentación de aparatos portátiles, vehículos eléctricos, automóviles, instalaciones fotovoltaicas de energía solar, almacenamiento de energía eléctrica de emergencia, etc.

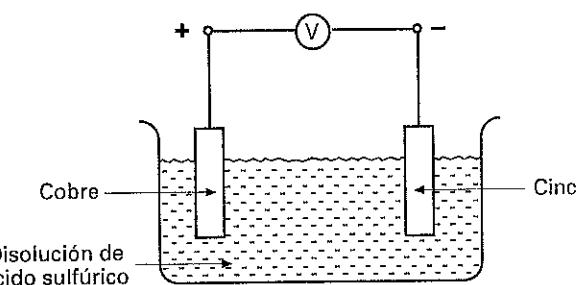


Figura. 1.27. Pila eléctrica elemental.

1.8.2 Producción de electricidad por presión

Existen ciertos materiales, como los cristales de cuarzo, que cuando son golpeados o presionados, entre sus caras aparece una tensión eléctrica (Figura 1.28). De alguna manera lo que ocurre es que al presionar el cristal los electrones salen

desplazados de una de las caras a la otra, originando una diferencia de cargas. Esta propiedad se denomina "piezoelectricidad".

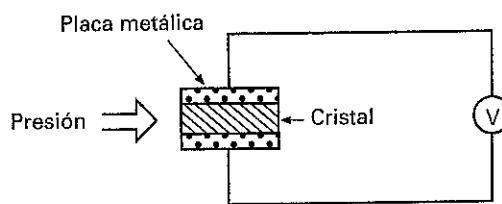


Figura 1.28. Al ser presionados ciertos materiales se produce electricidad.

Dado que la diferencia de potencial que aparece entre las caras de estos materiales es proporcional a la presión ejercida, con ellos pueden construirse agujas para tocadiscos, micrófonos piezoelectríficos, etc.

Ciertos encendedores de cocina aprovechan el efecto piezoelectrónico para su funcionamiento. En estos casos, un percutor golpea con fuerza un cristal, lo que provoca una fuerte diferencia de potencial entre sus caras (del orden de algunos miles de voltios). Al aplicar esta fuerte tensión entre dos electrodos, surge una chispa eléctrica entre ellos.

1.8.3 Producción de electricidad por acción de la luz

Mediante la células fotovoltaicas es posible transformar directamente la energía luminosa en energía eléctrica.

La célula fotovoltaica se construye con materiales semiconductores sensibles a la luz. Al incidir energía luminosa en estos semiconductores, se provoca el desprendimiento de electrones en las últimas órbitas de sus átomos, provocando una diferencia de cargas entre su caras (Figura 1.29).

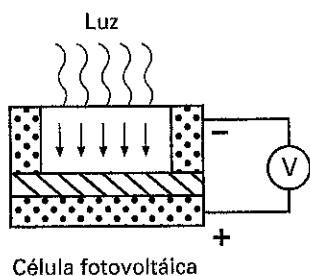


Figura 1.29. Las células fotovoltaicas transforman la luz en electricidad.

Las aplicaciones de esta forma de producir electricidad son: generadores de energía eléctrica para satélites espaciales y para suministro autónomo de energía en instalaciones apartadas de la red eléctrica.

1.8.4 Producción de electricidad por acción del calor

Algunos cuerpos poseen propiedades termoeléctricas, con los cuales se pueden construir pares termoeléctricos. Estos constan de dos metales distintos y unidos, que al ser calentados,

manifiestan una diferencia de potencial entre sus extremos (Figura 1.30).

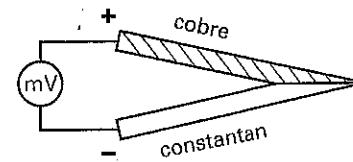


Figura 1.30. Al calentar dos metales distintos y unidos se produce electricidad.

Este fenómeno se debe a que uno de los metales desprende más electrones que el otro, por efecto del calor, generándose una pequeña diferencia de cargas entre sus extremos que es proporcional a la temperatura de la unión.

La energía eléctrica que se produce mediante este sistema es muy pequeña. Mediante este fenómeno se fabrican termopares para la construcción de termómetros (especialmente para medir temperaturas en hornos).

1.8.5 Producción de electricidad por acción magnética

Esta forma de producir electricidad ya es conocida por todos nosotros. Se basa en el principio de Faraday, y es de esta forma como se produce la energía en las grandes centrales eléctricas mediante los alternadores o, en otros casos, con las dinamos en forma de corriente continua.

Cuando se mueve un conductor eléctrico (hilo metálico) en el seno de un campo magnético (imán o electroimán) aparece una corriente eléctrica por dicho conductor. Lo mismo ocurre si se mueve el imán y se deja fijo el conductor. En un generador eléctrico se hacen mover bobinas en sentido giratorio en las proximidades de campos magnéticos producidos por imanes o electroimanes (Figura 1.31).

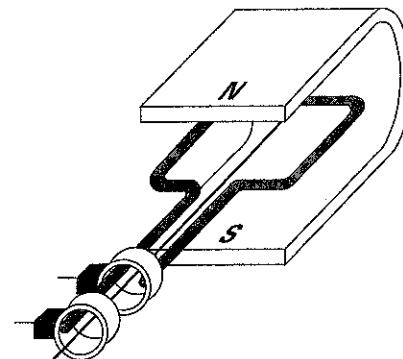


Figura 1.31. Al mover conductores dentro de un campo magnético se produce electricidad.

1.9 Intensidad de la corriente eléctrica

La intensidad de la corriente eléctrica es la cantidad de electricidad que recorre un circuito en la unidad de tiempo

(Figura. 1.33). Esta magnitud es comparable al caudal de agua que fluye por una tubería de agua (Figura. 1.32).

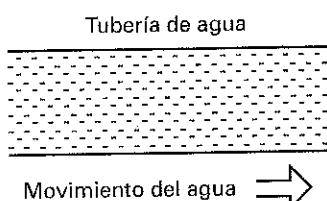


Figura. 1.32

$$\text{Caudal} = \frac{\text{litros}}{\text{segundo}}$$

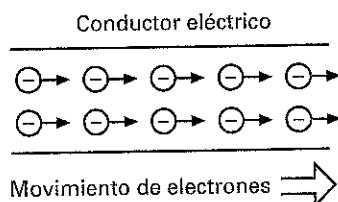


Figura. 1.33

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{culombios}}{\text{segundo}}$$

La unidad de medida de la intensidad (símbolo I) de corriente eléctrica es el **amperio (A)**. De esta manera, cuando en un circuito se mueve una carga de un culombio en un tiempo de un segundo, se dice que la corriente tiene una intensidad de un amperio.

$$I = \frac{Q}{t}$$

$$1\text{Amperio} = \frac{1\text{Culombio}}{1\text{segundo}}$$

Ejemplo: 1.2

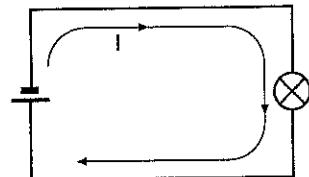
Determinar la intensidad de corriente que se ha establecido por un conductor eléctrico si por él ha fluido una carga de 4 culombios en un tiempo de 2 segundos.

$$\text{Solución: } I = \frac{Q}{t} = \frac{4\text{C}}{2\text{s}} = 2\text{A}$$

1.10 Sentido real y convencional de la corriente

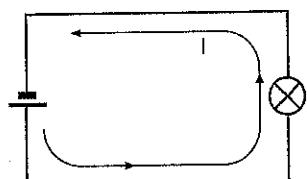
En un circuito, el sentido de la corriente eléctrica, lo determina el movimiento de electrones, tal como se indica en la Figura 1.34. Sin embargo, los antiguos científicos creían que la corriente eléctrica fluía del cuerpo cargado positivamente al

cargado negativamente. Este sentido, denominado **convencional** es el que más se ha utilizado hasta ahora, dado que en él se fundamentan muchas reglas del electromagnetismo y de otras materias afines. Incluso, hoy en día se sigue utilizando en multitud de casos (Figura. 1.35).



Sentido real de la corriente

Figura. 1.34



Sentido convencional de la corriente

Figura. 1.35

1.11 Movimiento de electrones en un circuito

En un circuito eléctrico, como el de la Figura 1.34, la intensidad de la corriente en cualquier punto del mismo es igual. Es decir, existe el mismo flujo de electrones a la salida del generador que a su entrada. Hay que pensar que, al igual que en una tubería que está llena de agua a presión, un conductor eléctrico está también lleno de electrones libres dispuestos a moverse. En cuanto algunos se mueven, empujan al resto, estableciéndose un efecto de traslación uniforme de electrones en todo el conductor. Este efecto de traslación se comunica a la velocidad de 300.000 km/s.

Sin embargo, los electrones se mueven lentamente, dependiendo su velocidad de la intensidad de la corriente y de la sección del conductor. Por lo general, esta velocidad está en torno a algunos milímetros por segundo. Aunque, al conectar, por ejemplo, una lámpara a una fuente de energía eléctrica, se enciende prácticamente al instante, ya que todos los electrones libres del conductor entran en movimiento a la vez.

1.12 Medida de la corriente eléctrica

Para medir la intensidad de la corriente eléctrica utilizamos un aparato de medida llamado amperímetro. Para medir el caudal de agua intercalamos en la tubería un contador. De la misma manera, para medir la cantidad de cargas que se mueven por un circuito en la unidad de tiempo, el amperímetro deberá estar intercalado en el conductor (Figura 1.36). Dado

que la intensidad de la corriente es igual en todos los puntos del circuito, es indiferente donde conectemos el amperímetro.

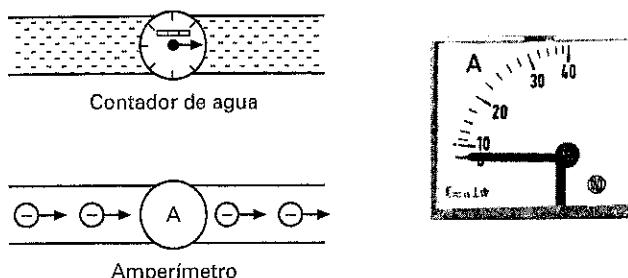


Figura 1.36. El amperímetro se intercala en serie con el circuito.

A esta forma de conectar el amperímetro se le denomina "en serie".

Experiencia 1.3. Toma un amperímetro (o en su defecto un polímetro) y mide la intensidad que fluye por una lámpara al ser conectada a una pila (Figura 1.37). Al hacer el montaje cuida que el aparato de medida sirva para medir corriente continua, que las polaridades sean las correctas y que la escala elegida sea la adecuada con la magnitud a medir, ya que de otra manera podríamos estropear el instrumento medidor.

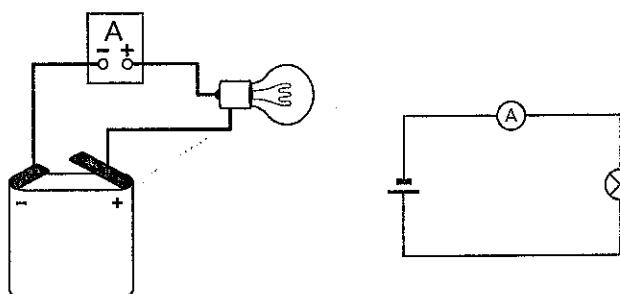


Figura 1.37. Medida de la intensidad con el amperímetro.

Gracias a la Experiencia 1.3, habrás podido observar que el amperio no es una unidad de medida adecuada, ya que resulta excesivamente grande para expresar el resultado. En estos casos se utilizan los submúltiplos:

$$1 \text{ mA (miliamperio)} = 1/1.000 = 0,001 = 10^{-3} \text{ A}$$

$$1 \mu\text{A (microamperio)} = 1/1.000.000 = 0,000001 = 10^{-6} \text{ A}$$

1.13 Corriente continua (C.C.)

Corriente continua es la que proporcionan las baterías de acumuladores, pilas, dinamos y células fotovoltaicas. Su símbolo de representación es $-$.

Una corriente continua se caracteriza porque los electrones libres siempre se mueven en el mismo sentido por el conductor con una intensidad constante.

En el circuito de la Figura 1.38 la pila proporciona C.C. a la lámpara. El amperímetro indicará siempre la misma corriente, por ejemplo, 1 A. La aguja del aparato de medida se

desviará siempre hacia la derecha de la escala. Si invirtiésemos la polaridad de la pila, la aguja indicadora intentaría desviarse hacia la izquierda.

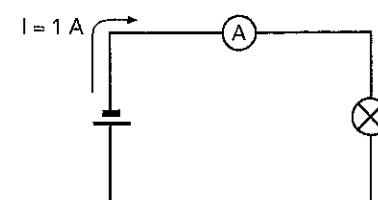


Figura 1.38. Un generador de C.C. mantiene invariable la polaridad de sus terminales.

En el gráfico de la Figura 1.39 se ha representado la C.C. de 1 A. Observa que este valor se mantiene invariable con el paso del tiempo.

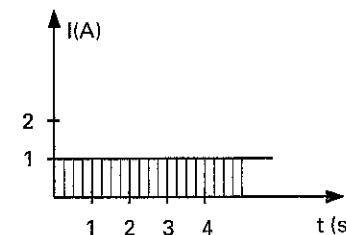


Figura 1.39. Representación gráfica de una C.C.

Los usos que se hacen de la C.C. son muy variados: baños electrolíticos, alimentación de aparatos electrónicos, tracción eléctrica (coches, tranvías, etc.) y otros muchos más.

1.14 Corriente alterna (C.A.)

La corriente alterna es la que producen los alternadores en las centrales eléctricas. Es la forma más común de transportar la energía eléctrica y de consumirla en nuestros hogares y en la industria en general. Su símbolo es \sim .

Una corriente alterna se caracteriza porque el flujo de electrones se mueve por el conductor en un sentido y en otro, y además, el valor de la corriente eléctrica es variable. Se podría decir que en este caso el generador produce periódicamente cambios en la polaridad de sus terminales de salida (Figura. 1.40).

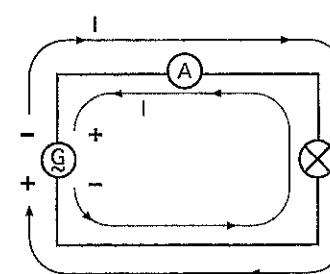


Figura 1.40. Un generador de C.A. produce cambios periódicos en la polaridad de sus terminales.

Para entender esto mejor, observa el gráfico de la Figura 1.41. El eje de tiempos lo hemos puesto en milisegundos, ya que los cambios de corriente son muy rápidos (para una C.A. industrial, la señal representada en la Figura 1.41 se repite 50 veces en un segundo).

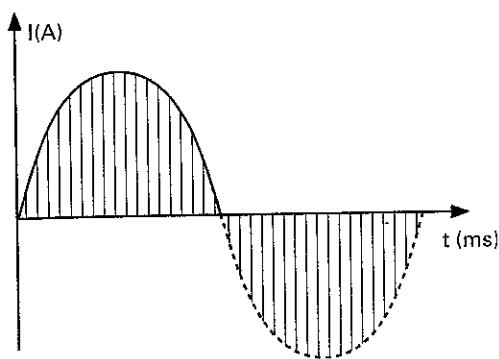


Figura 1.41. Representación gráfica de una C.A.

En un principio cabría pensar que veríamos a la lámpara encenderse y apagarse rápidamente, siguiendo los cambios rápidos de la corriente. Pero en la realidad no podemos ver este fenómeno, ya que el ojo humano no es capaz de percibirlo.

Dado que la corriente alterna es más fácil de producir, y que posee una serie de características que hacen más fácil su transporte, su campo de aplicación es muy amplio. Dada la importancia que posee la C.A. nos dedicaremos a su estudio en profundidad en el capítulo 12.

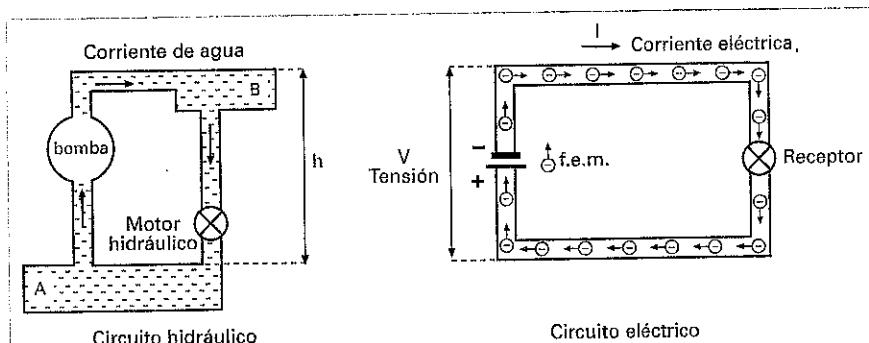


Figura 1.42. Comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico.

1.15 Tensión eléctrica y fuerza electromotriz

Como ya hemos estudiado, en un circuito el generador es el encargado de crear la diferencia de cargas. Para crear esta diferencia de cargas, el generador tiene que arrancar electrones del polo positivo y depositarlos en el polo negativo. Para realizar esta tarea el generador necesita desarrollar una energía: "A la fuerza necesaria para trasladar los electrones desde el polo positivo al negativo, y así crear la diferencia de cargas, se le denomina **fuerza electromotriz (f.e.m.)**".

Es la f.e.m. la que permite la circulación de electrones; el propio término lo indica: fuerza electromotriz, que mueve los electrones.

A la diferencia de cargas se la llama de otra forma: diferencia de potencial o tensión eléctrica (símbolo V), y su unidad de medida es el voltio (V). La f.e.m. de un generador se mide también en voltios.

$$1 \text{ milivoltio} = 1 \text{ mV} = 0,001 \text{ V}$$

$$1 \text{ Kilovoltio} = 1 \text{ KV} = 1000 \text{ V}$$

Para comprender aún mejor todas las magnitudes que aparecen en un circuito eléctrico, vamos a hacer una comparación entre un circuito hidráulico y un circuito eléctrico (Figura 1.42).

La bomba de agua eleva el agua del depósito A hasta el B, lo que crea una diferencia de alturas entre ambos depósitos = El generador eléctrico arranca los electrones de la placa positiva y los deposita en la negativa, lo que crea una diferencia de cargas o tensión entre los bornes de la lámpara.

El depósito B, al estar más alto que el A, adquiere una energía potencial, pudiendo luego el agua descender hacia A y mover así el motor hidráulico = El defecto de cargas negativas del polo positivo atrae con fuerza a los electrones en exceso del polo negativo, a través del circuito, produciéndose un movimiento de electrones, o corriente eléctrica por el filamento de la lámpara, que la hace lucir.

1.16 Medida de la tensión

Para medir la tensión eléctrica se precisa un aparato de medida que sea capaz de captar el desnivel eléctrico o diferencia de cargas entre un punto y otro.

El voltímetro se conecta siempre entre los dos puntos entre los que se quiere determinar la tensión.

Esta forma de conectar el voltímetro se denomina "conexión en paralelo o derivación" (Figura. 1.43).

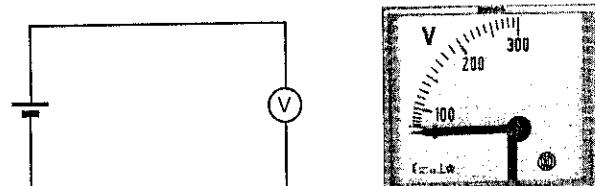


Figura 1.43. El voltímetro se conecta en paralelo.

Experiencia 1.4. Toma un voltímetro (o en su defecto un polímetro) y mide la tensión que aparece entre los polos de una pila (Figura. 1.44). De la misma manera que se hizo al medir la intensidad de la corriente, al hacer las conexiones cuida que el aparato de medida sirva para medir corriente continua, que las polaridades sean las correctas y que la escala elegida sea la adecuada con la magnitud que vamos a medir.

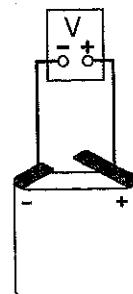


Figura 1.44

Actividades

1. Consigue los elementos necesarios y comprueba experimentalmente los efectos de la corriente eléctrica: térmico, luminoso, químico y magnético.
2. Consigue los elementos necesarios y comprueba experimentalmente las diferentes formas de producir electricidad: acción química, acción de la luz, por presión, mediante termopar y mediante acción magnética.
3. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este

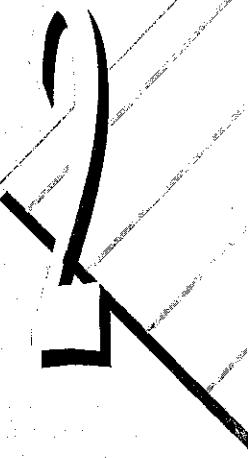
capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) ¿Qué ocurre si se acercan un elemento de ebonita y otro de vidrio una vez frotados?
 - Se repelen
 - Se atraen
 - Se cargan de electricidad
- 2) ¿Qué ocurre cuando se conectan por un conductor dos cuerpos cargados de electricidad de diferente polaridad?
 - Se atraen
 - Se repelen
 - Aparece un flujo de electrones por el conductor hasta que se descargan
- 3) La electricidad existe gracias a que:
 - El electrón posee carga y movilidad
 - El protón posee carga y movilidad
- c) Los electrones poseen carga positiva
- 4) El generador en un circuito eléctrico:
 - Produce un consumo de energía eléctrica
 - Es un elemento de control del circuito
 - Produce una diferencia de cargas entre sus polos e impulsa a moverse a los electrones
- 5) ¿Cuál es el símbolo y la unidad de la tensión e intensidad de la corriente, respectivamente?
 - V (vatio), A (voltio)
 - V (voltio), A (amperio)
 - V (vatio), mA (miliamperio)
- 6) Calcula la intensidad de corriente que ha fluido por un conductor si, en 2 minutos y 20 segundos, se han trasladado $18,9 \cdot 10^{18}$ electrones.

Resistencia Eléctrica



Introducción

La resistencia eléctrica es una característica asociada a los materiales de uso común en electricidad. Conociendo el valor de la resistencia de un conductor o aislante podremos determinar, gracias a la ley de Ohm, su comportamiento en un circuito o instalación eléctrica. Por otro lado, se puede comprobar experimentalmente que la resistencia eléctrica de un material depende de sus dimensiones y de la naturaleza del mismo. También se puede comprobar que la resistencia tiende a elevarse con la temperatura.

Contenido

- ✓ Diferenciar entre conductor y aislante.
- ✓ Resistencia eléctrica y su medida.
- ✓ Ley de Ohm.
- ✓ Resistencia de un conductor (resistividad).
- ✓ Influencia de la temperatura sobre la resistividad.
- ✓ Resistencia de los aislantes.
- ✓ Rigidz dieléctrica.

Objetivos

- ✓ Diferenciar entre aislante, buen conductor y mal conductor de la corriente eléctrica.
- ✓ Emplear el óhmetro de una forma adecuada.
- ✓ Aplicar la ley de Ohm para la resolución de problemas donde intervengan las magnitudes eléctricas: intensidad, tensión y resistencia.
- ✓ Relacionar la resistencia de un conductor con su longitud, sección y constitución.
- ✓ Calcular la resistencia eléctrica de un conductor.
- ✓ Relacionar la calidad de un aislante con su rigidz dieléctrica.
- ✓ Valorar la influencia de la temperatura sobre la resistencia de los materiales.

2.1 Conductores y aislantes

Para el buen funcionamiento de un circuito eléctrico existen dos elementos básicos, los conductores y los aislantes. Unos tienen tanta importancia como los otros, mientras que los primeros permiten el paso de la corriente con una relativa facilidad, los segundos la bloquean.

Así, por ejemplo, un cable eléctrico, como los que hemos utilizado para las experiencias, está formado por un alambre metálico de cobre (el conductor) y por un recubrimiento de plástico (el aislante) que impide que la corriente se fugue hacia otros lugares no deseados, al tiempo que evita fallos y descargas eléctricas indeseables (Figura 2.1).



Figura. 2.1. Constitución de un cable eléctrico.

Los cuerpos aislantes de la electricidad se caracterizan por impedir el paso de la corriente eléctrica a través de ellos. Este fenómeno se debe a que los electrones se encuentran ligados fuertemente a sus átomos y para arrancarlos es necesario aplicar mucha energía (someter al cuerpo a una elevada tensión).

Los cuerpos aislantes tienen tanta importancia como los conductores en el mundo de la industria de materiales eléctricos, ya que gracias a ellos podemos aislar de la electricidad unos cuerpos de otros. Son buenos aislantes: *el exafloruro de azufre (SF₆), las cámaras de vacío, porcelana, aceite mineral, caucho, barniz, vidrio, algodón, seda, papel, plástico, aire seco, etc.*

No todos los aislantes poseen el mismo poder de aislamiento; así por ejemplo, son buenos aislantes el exafloruro de azufre, el vacío, los materiales plásticos, el vidrio y el aire seco, mientras que los textiles vegetales son poco aislantes. Más adelante estudiaremos como se puede medir el poder aislante de un material.

En la actualidad la tecnología de los aislantes es quizás más importante que la de los conductores, sobre todo si hablamos de los materiales que se utilizan para las redes de alta y media tensión. No hay que olvidar que con tensiones elevadas, del orden de 440 KV, 220 KV, etc., la electricidad se puede abrir paso con facilidad hasta por un aislante, pudiendo provocar accidentes, o simplemente hacer inviable el transporte a tensiones elevadas. En este campo se ha avanzado mucho en la fabricación de materiales con una alta capacidad de aislamiento.

Los plásticos elaborados en diferentes formas son los grandes protagonistas de los aislantes, tanto en baja como en media tensión (PVC, polietileno, etc.)

El exafloruro de azufre es un gas que posee una altísima capacidad de aislamiento, lo que permite aproximar las partes activas de una instalación sin que haya peligro.

Las cámaras de vacío resultan un aislante fabuloso en interruptores de media tensión.

La porcelana no es tan buen aislante, pero al soportar altas temperaturas es ideal para algunas aplicaciones (portalámparas, etc.).

A diferencia de los aislantes, los conductores permiten con facilidad el movimiento de electrones por su estructura molecular. Prácticamente, todos los metales son buenos conductores, pero unos lo son mejor que otros.

A continuación se expone una lista en la que aparecen clasificados algunos materiales conductores. Comenzamos por los mejores y terminamos por los peores:

Platino, plata, cobre, oro, aluminio, cinc, estaño, hierro, plomo, maillechort, mercurio, nícrón, carbón.

La plata es un excelente conductor de la electricidad, pero debido a su alto coste, se emplea solamente cuando sus propiedades sean particularmente interesantes, como en los contactos de apertura y cierre de circuitos.

El material más empleado es el cobre, que conduce casi tan bien como la plata, siendo su coste muy inferior.

El aluminio se utiliza en las líneas de transporte, ya que su peso es menor que el del cobre.

Por otro lado, se fabrican materiales a base de aleaciones como el nícrón (níquel-cromo), el constantán (cobre-níquel), el feroníquel (hierro-níquel), el maillechort (cobre-cinc-níquel) y otras muchas más, que poseen la característica de ser mucho peor conductores que el cobre, lo que les hace útiles como materiales resistivos para la fabricación de resistencias (reostatos, elementos calefactores, etc.).

El carbón es bastante mal conductor lo que le hace ideal para la fabricación de pequeñas resistencias para circuitos electrónicos.

2.2 Resistencia eléctrica

La resistencia eléctrica como unidad de medida nos va a ayudar a diferenciar los cuerpos que son mejores conductores de los que son peores, de tal manera que podremos decir que un mal conductor posee mucha resistencia eléctrica, mientras que uno bueno tiene poca. De esta manera podemos decir que:

"La resistencia eléctrica es la mayor o menor oposición que ofrecen los cuerpos conductores al paso de la corriente eléctrica".

Este fenómeno se podría explicar así: cuando los electrones circulan por un conductor, éstos tienen que moverse a través de todos los átomos, produciéndose una especie de rozamiento (resistencia al movimiento de electrones) que se transforma en calor (Figura 2.2). Estos choques son menores en los buenos conductores que en los malos.

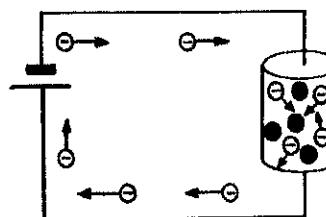


Figura 2.2. La resistencia se manifiesta como una oposición al movimiento de electrones.

La unidad de medida de la resistencia eléctrica (símbolo \mathbf{R}) es el ohmio y se representa por la letra griega omega Ω .

$$1 \text{ miliohmio} = 1 \text{ m}\Omega = 0,001 \Omega$$

$$1 \text{ Kilohmio} = 1 \text{ K}\Omega = 1.000 \Omega$$

$$1 \text{ Megaohmio} = 1 \text{ M}\Omega = 1000.000 \Omega$$

Los símbolos más utilizados para la resistencia son los representados en la Figura 2.3.

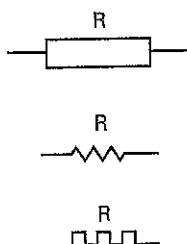


Figura 2.3. Símbolos esquemáticos de la resistencia eléctrica.

2.3 Medida de la resistencia eléctrica

El aparato que se utiliza para medir la resistencia eléctrica es el óhmetro. Para medir el valor de una resistencia, bastará con conectar los extremos de ésta a las puntas del óhmetro (Figura. 2.4).

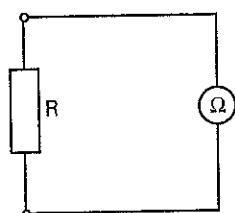


Figura. 2.4. Medida de la resistencia con el óhmetro.

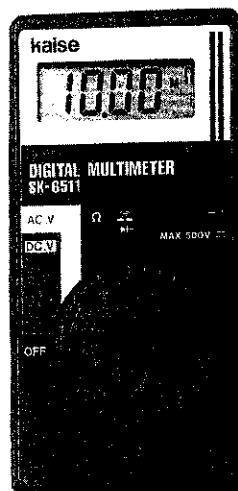


Figura 2.5. El polímetro incorpora un óhmetro para la medida de resistencias.

Existen muchos tipos de óhmetros, pero uno de los más conocidos y más utilizado para medir resistencias de una forma aproximada es el que incorpora el polímetro (Figura. 2.5). El puente de Wheatstone es otro aparato de medida para medir resistencias que se utiliza cuando se quiere dar una mayor precisión en la medida.

Experiencia 2.1. Consigue un óhmetro (por ejemplo, el que se incluye en el polímetro) y mide la resistencia de varias lámparas y de cualquier otro aparato eléctrico que tengas a tu alcance.

2.4 La ley de Ohm

Hasta ahora hemos estudiado con detenimiento varias magnitudes eléctricas: intensidad de la corriente, tensión y resistencia. En la práctica se nos pueden presentar problemas en los que conozcamos dos de estas magnitudes y tengamos que determinar la tercera. Para resolver estos problemas, y otros tantos que se presenten en la práctica, es necesario aplicar una fórmula que nos relacione las tres magnitudes eléctricas conocidas: I , V , R .

El físico Ohm, basándose en un experimento, determinó que la intensidad de la corriente que recorre un circuito eléctrico es directamente proporcional a la tensión aplicada (a más tensión, más intensidad), e inversamente proporcional a la resistencia eléctrica (a más resistencia, menos intensidad).

$$I = \frac{V}{R}$$

Veamos cómo se puede explicar esta relación: al conectar una resistencia a los bornes de una pila, aparece una corriente eléctrica que circula desde el polo negativo de la pila atravesando dicha resistencia, hasta el positivo (Figura 2.6). Recuerda que si existe corriente eléctrica es gracias a que el generador traslada las cargas del polo positivo al negativo, creando así una diferencia de cargas, que nosotros llamamos tensión eléctrica.

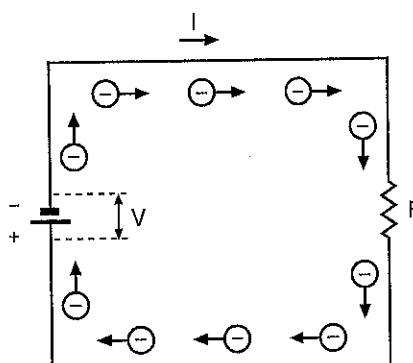


Figura 2.6

Cuanto mayor es la tensión eléctrica, con mayor fuerza atraerá el polo positivo de la pila a los electrones que salen del negativo y atraviesan la resistencia, y por lo tanto, será mayor también la intensidad de la corriente por el circuito.

Cuanto mayor sea el valor óhmico de la resistencia que se opone al paso de la corriente eléctrica, menor será la intensidad de la misma.

Ejemplo: 2.1

Calcular la intensidad que circula por el filamento de una lámpara incandescente de 10 ohmios de resistencia, cuando está sometida a una tensión de 12 voltios.

$$\text{Solución: } I = \frac{V}{R} = \frac{12}{10} = 1,2 \text{ A}$$

La ley de Ohm se puede ampliar despejando, en la fórmula, los valores de V y de R, obteniéndose entonces las siguientes expresiones:

$$I = V/R \quad V = R I \quad R = V/I$$

Ejemplo: 2.2

Se quiere determinar la resistencia eléctrica del filamento de una lámpara incandescente. Para ello, se somete a la lámpara a una tensión de 230 V y, mediante un amperímetro intercalado en serie, se mide el paso de una intensidad de corriente de 0,2 A (Figura 2.7).

$$\text{Solución: } R = \frac{V}{I} = \frac{230}{0,2} = 1.150 \Omega$$

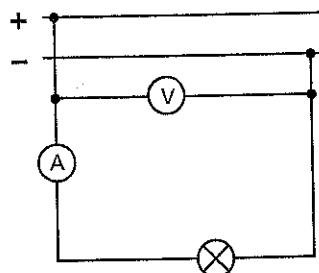


Figura 2.7

Ejemplo: 2.3

Es conocido que en condiciones desfavorables, es decir, con la piel húmeda, la resistencia del cuerpo humano es del orden de 2.500 Ω (Figura 2.8). ¿Qué tensión será suficiente para provocar, en estas condiciones, el paso de una corriente peligrosa, de 30 mA, por el cuerpo humano?

$$\text{Solución: } V = R \cdot I = 2.500 \cdot 0,03 = 75 \text{ V}$$

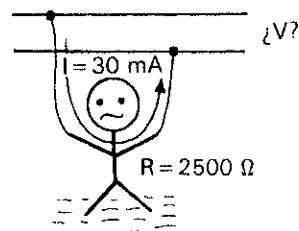


Figura 2.8

Ejemplo: 2.4

Se sabe que una intensidad de corriente de 30 mA puede ocasionar la muerte por fibrilación cardíaca. La resistencia eléctrica del cuerpo humano suele ser, por término medio y en condiciones normales, del orden de 5.000 Ω. Si una persona, por accidente, se pone en contacto con una red de 230 V, ¿cuál será la corriente que atraviese su cuerpo? ¿Existe algún peligro de muerte?

Solución:

$$\text{Intensidad por el cuerpo: } I = \frac{V}{R} = \frac{230}{5.000} = 0,046 \text{ A} = 46 \text{ mA}$$

Sí existe el peligro, ya que la intensidad que recorre el cuerpo del accidentado es superior a 30 mA.

2.5 Resistencia de un conductor

Como ya pudimos estudiar con anterioridad, la resistencia de los diferentes materiales depende fundamentalmente de su naturaleza. Por otro lado, las dimensiones de los mismos también influyen de una forma decisiva en su resistencia final. Esto tiene una especial importancia en los cálculos de la sección de conductores para instalaciones eléctricas, ya que una resistencia elevada en los mismos provocaría su calentamiento y su probable deterioro.

Si midiésemos la resistencia de un conductor de cobre de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección, obtendríamos un resultado de 0,017 Ω (Figura. 2.9). Este resultado nos indica que por cada metro de conductor de cobre de un milímetro cuadrado de sección, la resistencia del mismo será de 0,017 ohmios.

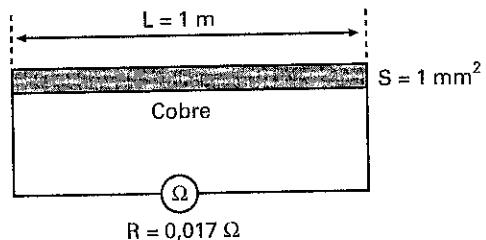


Figura 2.9. Medida de la resistividad del cobre.

Por otro lado es lógico pensar que, si la resistencia eléctrica es la dificultad que ofrece un conductor al paso de la corriente eléctrica, esta dificultad irá aumentando en función del camino que tenga que recorrer; es decir, a mayor longitud, mayor será la resistencia. Así, por ejemplo, si ahora midiésemos la resistencia de un conductor de 2 m de cobre de 1 mm², observaríamos que la resistencia ha aumentado al doble (0,034 Ω).

– *La resistencia de un conductor aumenta con su longitud*

Si, por el contrario, se aumenta la sección del conductor, los electrones tendrán más libertad para moverse y, por tanto, la resistencia será menor. Así, por ejemplo si midiésemos la resistencia de un conductor de 1 m de cobre de 2 mm² daría como resultado un valor óhmico de la mitad (0,0085 Ω).

- La resistencia de un conductor disminuye con su sección

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, la expresión matemática necesaria para determinar la resistencia de un conductor de cobre (R_{cu}) podría quedar así:

$$R_{cu} = 0,017 \frac{L}{S}$$

$0,017$ = Resistencia en ohmios por cada metro de conductor de 1 mm^2 .

L = Longitud del conductor en m.

S = Sección del conductor en mm^2 .

Lógicamente, esta fórmula sólo será válida para calcular la resistencia de conductores de cobre. ¿Qué expresión utilizaremos entonces para otros materiales? Como ya se dijo, existen materiales que son mejores conductores que otros; así, por ejemplo, el aluminio es peor conductor que el cobre. De tal forma, que si midiésemos ahora la resistencia de un conductor de aluminio de un metro de longitud y de un milímetro cuadrado de sección, obtendríamos un resultado igual a $0,028$ ohmios.

Está claro que cada material tendrá un determinado valor de resistencia por cada metro y milímetro cuadrado de sección del mismo. A este valor se le denomina: "coeficiente de resistividad" y se escribe con la letra griega ρ .

La fórmula general para calcular la resistencia de cualquier tipo de conductor podría quedar así:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ = Coeficiente de resistividad ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

L = Longitud del conductor (m)

S = Sección del conductor (mm^2)

R = Resistencia del conductor (Ω)

En la Tabla 2.1 se expone una lista con el coeficiente de resistividad, a 20°C de temperatura, de los materiales más utilizados.

Maillechort	Cu-Zn-Ni	0,30
Constantán	Cu-Ni	0,50
Ferroníquel	Fe-Ni	0,80
Mercúrio	Hg	0,957
Nícrón	Ni-Cr	1
Carbón	C	63

Tabla 2.1.

Ejemplo: 2.5

¿Qué resistencia tendrá un conductor de cobre de 20 metros de longitud y 1 mm^2 de sección?

$$\text{Solución: } R = \rho \frac{L}{S} = 0,017 \frac{20}{1} = 0,34 \Omega$$

Ejemplo: 2.6

¿Y un conductor de aluminio de las mismas dimensiones?

$$\text{Solución: } R = \dots = 0,56 \Omega$$

Ejemplo: 2.7

¿Qué sección poseerá un conductor de constantán de 12 m de longitud, si se ha medido una resistencia entre sus terminales de 6Ω ?

Solución:

$$R = \rho \frac{L}{S}, \text{ despejando } S = \rho \frac{L}{R} = 0,5 \frac{12}{6} = 1 \text{ mm}^2$$

Ejemplo: 2.8

Se desea medir la longitud de una bobina de cobre. Para no tener que desenrollar el conductor, se mide con un óhmetro conectado a los extremos de la bobina una resistencia de 1Ω . Mediante un calibre medimos un diámetro de $0,5 \text{ mm}$ (Figura 2.10).

MATERIAL	Símbolo	PROPIEDAD/mm
Plata	Ag	0,0163
Cobre	Cu	0,017
Aluminio	Al	0,028
Cinc	Zn	0,061
Latón	Cu-Ni	0,07
Estano	Sn	0,12
Hierro	Fe	0,13
Pb	Pb	0,204

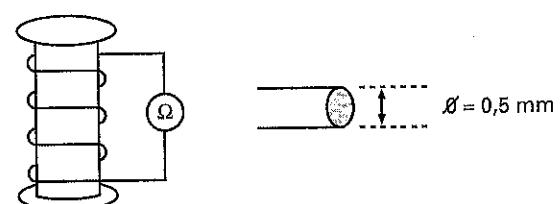


Figura 2.10

Solución: Como la sección es circular:

$$S = \pi r^2 = 3,1416 \cdot 0,25^2 = 0,2 \text{ mm}^2$$

$$R = \rho \frac{L}{S}, \text{ despejando } L = \frac{R \cdot S}{\rho} = \frac{1 \cdot 0,2}{0,017} = 11,8 \text{ m}$$

2.6 Influencia de la temperatura sobre la resistividad

Experiencia 2.1: Consigue una lámpara de linterna y mide con el óhmetro su resistencia en frío. Seguidamente, conecta la lámpara a una pila, y mediante un amperímetro y un voltímetro determina los valores de I y de V . Con ellos determina el valor de la resistencia óhmica del filamento en caliente, aplicando la ley de Ohm. Compara los resultados obtenidos. ¿Obtuviste los mismos resultados en los dos casos?

Seguro que no. Al medir la resistencia con el óhmetro, la lámpara está apagada y, por tanto, el filamento se encuentra frío, es decir, a la temperatura ambiente. Por otro lado, cuando aplicamos la ley de Ohm para calcular la resistencia, se hace con los datos correspondientes al estado de encendido de la lámpara. Hay que tener en cuenta que, en ese estado, el filamento se encuentra a una temperatura de unos 2.000°C . Y es que la resistencia eléctrica se eleva sustancialmente en casi todos los conductores al elevarse su temperatura, de aquí que en una lámpara incandescente la resistencia en frío sea muy inferior a cuando está caliente.

Por lo general, la resistencia aumenta con la temperatura en los conductores metálicos. Este aumento depende del incremento de temperatura y de la materia de que esté constituido dicho conductor.

$$R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

R_t = Resistencia en caliente

R_0 = Resistencia a 0°C

α = Coeficiente de temperatura

Δt = Elevación de temperatura en $^{\circ}\text{C}$

Con esta expresión se puede calcular la resistencia a un temperatura dada (R_t), conociendo la temperatura de la resistencia en frío (R_0), la elevación de la temperatura (Δt) y el coeficiente de temperatura (α), que será diferente para cada material.

En la Tabla 2.2 se dan los coeficientes de temperatura de los materiales más utilizados.

Materia	α	Materia	α
Oro	0,0035	Constantán	0,0001
Plata	0,0036	Wolframio	0,0005
Aluminio	0,00446	Hierro	0,00625
Cobre	0,0039	Ferroniquel	0,00093
Estano	0,0044	Mallechort	0,00036

Tabla 2.2.

El aumento de la resistencia con la temperatura es a veces un gran inconveniente; así ocurre, por ejemplo, en las medidas eléctricas que pueden verse distorsionadas por este fenómeno. Por esta razón, es conveniente utilizar materiales con un bajo coeficiente de temperatura para la construcción de los aparatos de medida.

En otros casos, este aumento de resistencia con la temperatura puede ser beneficioso; como por ejemplo, para medir temperaturas por medio de resistencias que poseen un alto coeficiente de temperatura (termómetros electrónicos).

De una forma especial, existen materiales en los cuales se reduce la resistencia al aumentar su temperatura. En estos casos se dice que poseen un coeficiente de temperatura negativo. En general, los materiales semiconductores pertenecen a este grupo. En especial, existen resistencias construidas con semiconductores especialmente diseñadas para reducir su resistencia cuando aumenta la temperatura, como son las NTC.

Ejemplo: 2.9

Medimos la resistencia de una fase de un bobinado de cobre de un motor antes de haber funcionado (a la temperatura de 0°C), obteniendo un resultado de 4 ohmios. Determinar la resistencia que alcanzará cuando esté en funcionamiento a una temperatura de 75°C .

$$\text{Solución: } R_t = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

$$R_{75^{\circ}\text{C}} = 4 \cdot (1 + 0,0039 \cdot 75) = 5,2 \Omega$$

Ejemplo: 2.10

¿Cuál será el aumento de temperatura que experimenta una lámpara incandescente con filamento de wolframio, si al medir su resistencia a temperatura ambiente (20°C) obtuvimos un resultado de 358 ohmios, habiéndose calculado una resistencia en caliente de 807Ω ?

Solución: Primero calculamos la resistencia a 0°C

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t), \text{ despejando } R_0 =$$

$$\frac{R_t}{(1 + \alpha \cdot \Delta t)} = \frac{358}{1 + 0,0005 \cdot 20} = 354,5 \Omega$$

A continuación despejamos Δt =

$$\left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) / \alpha = \left(\frac{807}{354,5} - 1 \right) / 0,0005 = 2.553^{\circ}\text{C}$$

Ejemplo 2.11

Determinar la corriente que aparecerá en la lámpara incandescente del Ejemplo 2.10 al conectarla a 230 V y en los siguientes casos: a) nada más conectarla, b) una vez encendida.

Solución: a) Nada más conectar la lámpara el filamento se encuentra a 20°C y su resistencia es de 358 ohmios.

$$I = \frac{V}{R_0} = \frac{230}{358} = 0,64 \text{ A}$$

b) Al aumentar la temperatura hasta los 2.553 °C, la resistencia aumenta su valor hasta 807 ohmios, produciéndose una disminución y estabilización de la corriente.

$$I = \frac{V}{R_{2553}} = \frac{230}{807} = 0,29 \text{ A}$$

Como se ha podido comprobar en la tabla de coeficientes de temperatura, existen aleaciones, como el constantán, que apenas varían con la temperatura, lo que las hace ideales para la fabricación de resistencias en las que sea importante la estabilidad de su valor óhmico con los cambios de temperatura.

Los aislantes tienen una característica muy especial: su resistencia disminuye con la temperatura.

Cuando se disminuye mucho la temperatura de los conductores metálicos (cerca de los -273 °C) se puede llegar a alcanzar la **superconductividad**. Es decir, ausencia absoluta de resistencia eléctrica. El paso de la corriente eléctrica por un superconductor no provoca ningún tipo de pérdida calorífica. Hoy en día se están consiguiendo grandes avances en la fabricación de materiales superconductores a temperaturas mucho más elevadas (entorno a los 150 grados bajo cero).

2.7 Resistencia de los aislantes

Ya explicamos que los materiales aislantes o dieléctricos tienen tanta importancia en las aplicaciones prácticas de la electricidad como los conductores. Gracias a los aislantes es posible separar las partes activas de una instalación con las inactivas, consiguiendo así instalaciones eléctricas que sean seguras para las personas que las utilizan.

Lo mismo que existen materiales que son mejores conductores que otros, también existen materiales con mayor capacidad de aislamiento que otros. De tal forma, que cuanto mayor es la resistividad de un aislante, mayor será su capacidad de aislamiento.

Dar una cifra exacta de la resistividad de cada uno de los aislantes es un poco complicado, ya que este valor se suele ver reducido por el grado de humedad y por la elevación de la temperatura.

Así, por ejemplo, el agua pura posee una resistividad aproximada de $10 M\Omega \cdot m^2/m$, y la porcelana $10^{11} M\Omega \cdot m^2/m$.

2.8 Rigidez dieléctrica

Otra forma de medir la calidad de aislamiento de un material es conociendo su rigidez dieléctrica.

La rigidez dieléctrica de un material es la tensión que es capaz de perforar al mismo (corriente eléctrica que se establece por el aislante). Lo cual quiere decir que los materiales aislantes no son perfectos, ya que pueden ser atravesados por una corriente si se eleva suficientemente la tensión.

Así, por ejemplo en una tormenta eléctrica, la fuerte tensión entre la nube y tierra es capaz de perforar un buen aislante: el aire.

Cuando un aislante es perforado por la corriente, la chispa que lo atraviesa suele provocar la destrucción del mismo, sobre todo si se trata de un material sólido, ya que las temperaturas que se desarrollan suelen ser altísimas.

Conocer la tensión que es capaz de perforar un aislante es muy importante. De esta forma, podremos elegir los materiales más adecuados en el momento de aislar una línea, o cualquier aparato eléctrico, consiguiendo así evitar averías, cortocircuitos y accidentes a las personas que manipulan instalaciones sometidas a tensiones peligrosas.

La tensión necesaria para provocar la perforación del dieléctrico viene expresada en kilovoltios por milímetro de espesor del aislante. Este dato no es constante, y depende de la humedad contenida en el aislante, de la temperatura, de la duración de la tensión aplicada, y de otras muchas variables.

Así, por ejemplo, la rigidez dieléctrica de los siguientes elementos es:

Agua	12,0 KV/mm
Papel	16,0 KV/mm
Aceite mineral.....	4,0 KV/mm
Cloruro de polivinilo..	50,0 KV/mm
Aire seco	3,1 KV/mm
Politileno.....	16,0 KV/mm

Cuando se selecciona un conductor eléctrico, aparte de la sección que resulte ser la más adecuada, es muy importante tener en cuenta la tensión de servicio de la instalación donde va a trabajar. En el "Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión" se indican las tensiones que deberán soportar los aislantes de los conductores eléctricos con un margen de seguridad. Siguiendo estas recomendaciones se fabrican, por ejemplo, conductores de 500 V, 750 V y 1.000 V para baja tensión.

Los materiales aislantes que se utilizan para conseguir estas tensiones de aislamiento en conductores para instalaciones eléctricas de baja tensión pueden ser:

- Polícloruro de vinilo (PVC).
- Polietileno reticulado (XLPE).
- Etileno propileno (EPR).

Actividades

- Con un sencillo montaje práctico vamos a comprobar la ley de Ohm. Para ello conecta una pila a una resistencia, para a continuación medir, mediante un polímetro, la tensión en bornes de la resistencia, la intensidad de la corriente del circuito, así como la resistencia óhmica de dicha resistencia. Con los resultados obtenidos de las medidas comprueba si se cumple la relación $I = V/R$. Ahora conecta otras resistencias de diferente valor y compara los resultados.
- Consigue el "Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión" y evalúa el campo de aplicación de los conductores eléctricos según las tensiones de servicio de los mismos.

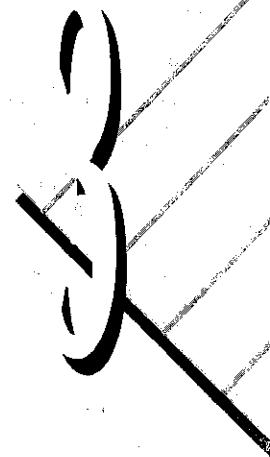
- Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.)

Autoevaluación

- Para medir la resistencia eléctrica:
 - Se conectan los dos terminales del óhmetro con los de la resistencia que se va a medir
 - Se conecta la resistencia al circuito para posteriormente realizar la medida con el óhmetro
 - Se utiliza un resistómetro
- ¿Cuál es la cualidad por la que se diferencian los buenos conductores de los malos?
 - Intensidad óhmica
 - Resistencia eléctrica
 - Tensión resistiva
- Se dispone de una linterna que funciona con una pila de 1,5 V; la lamparita tiene una resistencia de 50 Ω . Calcular la intensidad del circuito.
- Calcular la tensión de funcionamiento de un horno eléctrico que posee una resistencia de 22 Ω , y que al ser conectado, se establece por él una intensidad de 5,7 A.
- ¿Qué resistencia tiene una plancha eléctrica que consume 2 A conectada a 230 V?
- ¿Cuándo será más alta la intensidad de corriente por una lámpara incandescente?
 - Una vez encendida, ya que es cuando más consume
 - Justo al cerrar el interruptor ya que la resistencia del filamento en frío es pequeña y por lo tanto la intensidad de la corriente será más elevada
 - La intensidad de la corriente es la misma en todo momento
- ¿Cuál es la sustancia que más se aproxima al superaislante?
 - El vacío, ya que al no existir en él materia no hay electrones que se puedan poner en movimiento
 - El aire
 - Los plásticos sintéticos
- ¿Qué característica se utiliza habitualmente para medir el poder de aislamiento de un material?
 - El grosor del aislante
 - La rigidez dieléctrica
 - La intensidad máxima que soporta
- ¿Qué material es necesario utilizar para conseguir que un metro de conductor de 0,5 mm² posea una resistencia de 56 m Ω ?
 - El cobre
 - El aluminio
 - La plata
- ¿Qué tendrá más resistencia, un conductor de cobre de 100 m de longitud y 6 mm² de sección, o uno de aluminio de la misma longitud y de 10 mm²?
 - Conducto de cobre
 - Conducto de aluminio
 - Aproximadamente igual
- ¿Cuál será la sección de un conductor de cinc de 5 metros, si posee una resistencia de 1 ohmio?
- Se quiere determinar la longitud de un carrete de hilo de cobre esmaltado de 0,25 mm de diámetro. Para ello, se mide con un óhmetro su resistencia, obteniéndose un resultado de 34,6 Ω .
- La resistencia a 20 °C de una bobina de cobre es de 5 ohmios. Calcula la resistencia de la misma a 80 °C.
- Una resistencia ha aumentado 1,05 Ω al incrementar su temperatura de 0 °C a t °C. Determinar la resistencia final y la temperatura que alcanzó, si su coeficiente de temperatura es de 0,004 y la resistencia a 0 °C es de 65 Ω .

Potencia y Energía Eléctrica



Introducción

El conocimiento de la potencia eléctrica de un receptor es importante, ya que nos indica lo capaz que es éste de realizar una determinada tarea: iluminar (lámparas), trabajo mecánico (motores), calentar (resistencias calefactoras), etc. Cuanta más potencia posea el receptor más rápido realizará la tarea o trabajo. Como estudiaremos más adelante, al aumentar la potencia también aumenta la intensidad de corriente por el circuito.

El conocimiento de la energía eléctrica consumida por un receptor es también importante, puesto que en base a este concepto se negocia la factura que hay que abonar a la compañía suministradora de energía eléctrica.

Contenido

- Potencia eléctrica y su medida.
- Potencia perdida en un conductor.
- Energía eléctrica y su medida.

Objetivos

- Definir el concepto de potencia y energía eléctrica.
- Aplicar las expresiones matemáticas de la potencia y energía eléctrica para resolver cuestiones prácticas.
- Relacionar la potencia perdida en un conductor con su resistencia y corriente.
- Medir la potencia y la energía eléctrica.

3.1 Potencia eléctrica

La unidad de potencia eléctrica es el vatio (W). Si nos preguntan qué lámpara luce más, una de 60 W o una de 40 W, la respuesta sería muy clara: la de 60 W, que es la que más potencia posee. Pero, ¿qué es la potencia eléctrica?

En la asignatura de física, se suele definir la potencia como la rapidez con la que se ejecuta un trabajo, es decir la relación que existe entre el trabajo realizado y el tiempo invertido en realizarlo.

Como todos sabemos, el trabajo se produce gracias a la energía. Trabajo y energía son dos conceptos que dicen lo mismo:

$$\boxed{\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{tiempo}}}$$

$$\boxed{P = \frac{E}{t}}$$

P = Potencia en vatios (W)
 E = Energía en julios (J)
 t = Tiempo en segundos (s)

$$\boxed{\text{Potencia} = \frac{\text{energía}}{\text{tiempo}}}$$

Ejemplo: 3.1

Determinar la potencia que debe desarrollar un ascensor que pesa 500 Kg si para subir al 5º piso (a una distancia de 25 m del suelo) emplea un tiempo de 50 segundos al moverse a una velocidad de 0,5 m/s. Calcular también la energía consumida.

Solución:

El trabajo que necesita un móvil para desplazarse a una cierta distancia es el producto de la fuerza aplicada, multiplicada por la distancia recorrida:

$$E = F \cdot e = 4.905 \cdot 25 = 122.625 \text{ J}$$

(pasamos los Kg a Nw: $500 \text{ Kg} \cdot 9,81 = 4.905 \text{ Nw}$)

$$\boxed{P = \frac{E}{t} = \frac{122.625}{50} = 2.452,5 \text{ W} \approx 2,5 \text{ KW}}$$

Para determinar la potencia también nos podíamos haber valido de la siguiente expresión, que nos indica que la potencia desarrollada por un móvil es el producto de la fuerza aplicada por la velocidad del mismo:

$$P = F \cdot V = 4.905 \cdot 0,5 = 2.452,5 \text{ W}$$

¿Cómo será la potencia a desarrollar por el ascensor si queremos que suba al quinto piso en tan sólo 20 segundos?

La fuerza que mueve un móvil es similar a la tensión que impulsa a moverse a los electrones por un circuito eléctrico. Por otro lado, la velocidad con que se mueve un móvil se puede comparar con la cantidad de electrones que fluyen en un circuito eléctrico en la unidad de tiempo, es decir de la intensidad de la corriente eléctrica. Según esto, la expresión de la potencia podría quedar así:

$$\boxed{P = V \cdot I}$$

La potencia eléctrica es el producto de la tensión por la intensidad de la corriente.

Ejemplo: 3.2

En una habitación existe una base de enchufe de 16 amperios. Se quiere determinar la potencia máxima del aparato eléctrico que se puede conectar al enchufe, teniendo en cuenta que la tensión es de 230 voltios.

Solución: Que la base de enchufe sea de 16 amperios, quiere decir que ésta es la máxima intensidad que puede circular por él sin que se caliente excesivamente. Luego la potencia máxima que podrá suministrar será:

$$P = V \cdot I = 230 \cdot 16 = 3.680 \text{ W}$$

Ejemplo: 3.3

Calcular la potencia que consume un horno eléctrico si se conecta a una tensión de 230 V y su resistencia es de 50Ω .

Solución: Primero calculamos la intensidad, aplicando la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{230}{50} = 4,6 \text{ A}$$

$$P = V \cdot I = \dots = 1.058 \text{ W}$$

Ejemplo: 3.4

La potencia de una cocina eléctrica es de 3,5 KW. Se quiere saber si será suficiente con una base de enchufe de 25 A para conectarla a una red de 230 V.

Solución:

$$P = V \cdot I, \text{ despejando } I = \frac{P}{V} = \frac{3.500 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 15,2 \text{ A}$$

Como la base de enchufe soporta hasta 25 A, está claro que es suficiente para conectar la cocina.

Ejemplo: 3.5

La placa de características de una plancha eléctrica indica que su potencia es de 500 W y su corriente nominal de 4 A. Calcular el valor de la resistencia de caldeo.

Solución: Primero calculamos el valor de la tensión:

$$P = V \cdot I, \text{ despejando } V = \frac{P}{I} = \dots = 125 \text{ V}$$

Para calcular la resistencia nos valemos de la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{R}, \text{ despejando } R = \frac{V}{I} = \frac{125}{4} = 31,25 \Omega$$

Este problema también se podía haber resuelto, determinando primero una fórmula que relacione P, I, y R:

$$\begin{array}{l} P = V I \xrightarrow{\quad} P = R I I \\ V = R I \\ \boxed{P = R \cdot I^2} \end{array}$$

Despeja R de la fórmula obtenida y comprueba el resultado.

Ejemplo: 3.6

Se dispone de una resistencia calefactora para un horno eléctrico de la que sólo se conoce su potencia de trabajo: 700 W y el valor ohmico de la misma: 69 Ω. ¿A qué tensión se podrá conectar el horno para que funcione correctamente?

Solución: Este problema entraña un poco más de complejidad. Para resolverlo, habrá que encontrar primero una fórmula que relacione P, V y R.

$$\begin{array}{l} P = V I \xrightarrow{\quad} P = V \cdot \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R} \\ I = V/R \end{array}$$

$$\boxed{P = \frac{V^2}{R}}$$

$$\text{Despejando: } V = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{700 \cdot 69} = 220V$$

Ejemplo: 3.7

¿Cuál será la pérdida de potencia que se producirá en los conductores de una línea eléctrica de cobre de 4 mm² de sección y de 100 metros de longitud, que alimenta un motor eléctrico de 1 KW a 230 V?

Solución: La potencia que se pierde en los conductores se puede calcular mediante la expresión $P_p = R_L \cdot I^2$, siendo R_L la resistencia de los conductores de la línea e I la intensidad que circula por ellos.

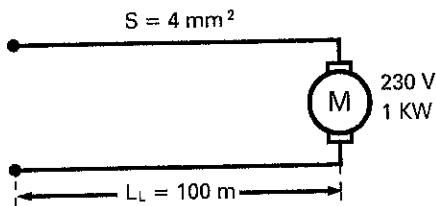


Figura 3.1

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.000}{230} = 4,35 \text{ A}$$

$$R_L = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0,017 \cdot \frac{200}{4} = 0,85 \Omega$$

$$P_p = R_L \cdot I^2 = 0,85 \cdot 4,35^2 = 16,1 \text{ W}$$

*Nota: Se ha tomado 200 m de longitud de conductor, teniendo en cuenta que son 100 m de ida y 100 m de vuelta. La potencia que se pierde en el conductor se transforma en calor, que eleva su temperatura y puede llegar a perjudicarlo.

Ejemplo: 3.8

¿Cuál será el aumento de temperatura que experimenta una lámpara incandescente de 60 W/220 V con filamento de wolframio, si al medir su temperatura en frío obtuvimos un resultado de 358 ohmios?

Solución: Primero calculamos la resistencia aproximada en caliente con la ayuda de las características de la lámpara:

$$P = \frac{V^2}{R}, \text{ despejando } R = \frac{V^2}{P} = \dots = 807 \Omega$$

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t^0), \text{ despejando}$$

$$\Delta t^0 = \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) / \alpha = \dots = 2.508 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.2 Medida de la potencia eléctrica

El aparato que mide la potencia eléctrica es el vatímetro.

En realidad, el vatímetro mide por separado la tensión y la intensidad de la corriente, para después realizar la operación $P = V \cdot I$ (Figura 3.2).

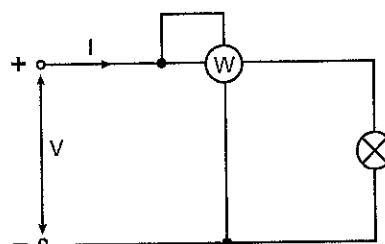


Figura 3.2. Esquema de conexiones del vatímetro.

Este aparato consta de dos bobinas; una amperimétrica y otra voltimétrica (Figura 3.3). La bobina amperimétrica posee unas características similares a la de un amperímetro: tiene una resistencia muy baja y se conecta en serie. La bobina voltimétrica posee las mismas características que las de un voltímetro: tiene una resistencia muy alta y se conecta en paralelo.

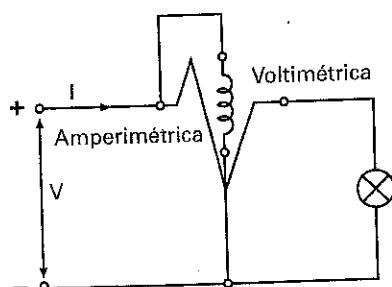


Figura 3.3. Circuitos internos del vatímetro.

3.3 Energía eléctrica

De la expresión que relaciona la energía con la potencia se deduce que la energía es el producto de la potencia por el tiempo. El cálculo de la energía eléctrica consumida por un receptor es muy interesante, especialmente por los consumidores, ya que sobre él se establecen los costos que facturan las compañías eléctricas.

$$P = \frac{E}{t}, \text{ despejando}$$

$$E = P \cdot t$$

¿Cuál es la unidad de medida de la energía eléctrica? Todo dependerá de las unidades que se tomen de la potencia y del tiempo.

$E = P \cdot t$			
P (W)	t(s)	P (kW)	t(h)
$E = W$, s = Julios		$E = kW \cdot h$ = kilovatios·hora	

El julio es la unidad perteneciente al sistema internacional. Como es muy pequeña, se suele utilizar más el KWh.

Ejemplo: 3.9

Calcular la energía, en KWh y julios, consumidos por un calefactor de 500 W en 8 horas de funcionamiento.

$$\text{Solución: } E = P t = 0,5 \text{ KW} \cdot 8 \text{ h} = 4 \text{ KWh}$$

$$500 \text{ W} = 500/1000 = 0,5 \text{ KW}$$

$$E = P t = 500 \text{ W} \cdot 18000 \text{ s} = 9000000 \text{ julios}$$

$$5 \text{ horas} = 5 \cdot 3600 = 18000 \text{ s}$$

Ejemplo: 3.10

Se quiere determinar el gasto bimensual de un calefactor de 500 W, que funciona, por término medio, 4 horas al día. Precio del KWh: 16 pts.

$$\text{Solución: } E = P t = 0,5 \text{ KW} \cdot 240 \text{ h} = 120 \text{ KWh}$$

$$t = 60 \text{ días} \cdot 4 \text{ h} = 240 \text{ h}$$

$$\text{Gasto} = 120 \text{ KWh} \cdot 16 \text{ pts} = 1920 \text{ pts.}$$

Ejemplo: 3.11

¿Cuánto tiempo podremos tener conectado un televisor de 150 W si deseamos gastar 100 pts en concepto de energía eléctrica, siendo el precio del KWh de 17 pts?

$$\text{Solución: Gasto} = E \cdot \text{precio KWh}, \text{ despejando}$$

$$E = \frac{\text{Gasto}}{\text{precio KWh}} = \frac{100}{17} = 5,88 \text{ KWh}$$

$$E = P t, \text{ despejando } t = \frac{E}{P} = \frac{5,88}{0,15} = 39,2 \text{ horas}$$

3.4 Medida de la energía eléctrica

El aparato que mide la energía eléctrica consumida es el contador y, como todos bien sabemos, es el que nos dice, a fin de cuentas, lo que debemos pagar a la compañía eléctrica.

El contador se conecta exactamente igual que un vatímetro, y nos da la lectura de la energía consumida, gracias a que integra el producto de la potencia por el tiempo (Figura 3.4).

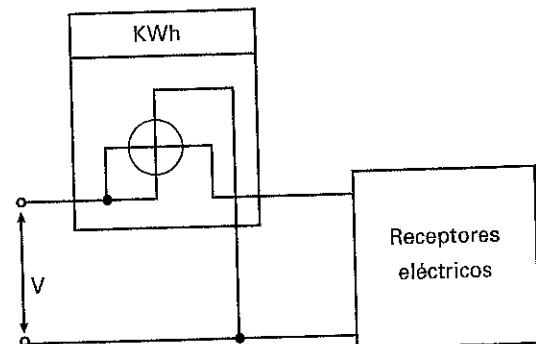


Figura 3.4

El contador de energía que más se está utilizando hasta ahora es el de inducción, que realiza la medida gracias a un sistema motorizado, que obliga a girar un disco. La velocidad de dicho disco depende del producto de la tensión por la intensidad, es decir de la potencia. Existe un sistema que cuenta el número de vueltas y presenta una lectura directa de los KWh consumidos.

Actividades

1. Con los datos obtenidos en las lecturas del voltímetro y del amperímetro de la Actividad 2.1, calcula la potencia que le correspondería a la resistencias utilizadas en dicha actividad.

$$P = V I = \dots = \dots W$$

Ahora toma un vatímetro y mediante el esquema de conexiones de la Figura 3.2 mide su potencia.

Compara los resultados obtenidos por ambos métodos de medición. Lo más probable es que éstos no sean iguales. Esto nos indica que los aparatos de medida no son perfectos y que, por tanto, cometan errores. También hay que tener en cuenta los errores que hayamos podido cometer nosotros al tomar las medidas.

2. Consigue un recibo de la luz de tu vivienda e investiga los diferentes términos que en él se contemplan.

3. Los contadores de energía eléctrica disponen de un disco que gira según se van totalizando la lectura en el indicador. Por lo general, se suele indicar el número de revoluciones de dicho disco que corresponden a un KWh.

Observa el contador correspondiente a tu vivienda y comprueba cuál es el número de revoluciones del disco por cada KWh. Una vez hecho esto, cuenta las vueltas que da el disco en un minuto. ¿Podrías con esos datos determinar la energía y potencia media que se ha estado consumiendo en ese período de tiempo?

4. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Autoevaluación

- 1) Al conectar una lámpara a una toma de corriente de 100 V se miden por el circuito 750 mA. Determinar la potencia de la lámpara y su resistencia.
- 2) ¿A qué tensión habrá que conectar una estufa de 750 W si su resistencia es de 75Ω ? ¿Cuál será la intensidad de la corriente?
- 3) Un calentador de agua presenta en su placa de características los siguientes datos: 3 KW / 220 V. Determinar: a) Intensidad de la corriente y resistencia; b) potencia, si se conecta ahora a 125 V, considerando que la resistencia permanece constante.
- 4) En las instalaciones eléctricas de viviendas, junto al cuadro de mando y protección, e inmediatamente antes, se sitúa el "Interruptor de control de potencia (ICP)" (Figura 3.5). Éste es un interruptor automático que determina la potencia simultánea disponible, de acuerdo con el contrato de suministro de energía eléctrica. Este interruptor desconecta la instalación, se "dispara" cuando la suma de las potencias de los aparatos conectados a la vez supera la potencia contratada. ¿De qué calibre (intensidad a la que dispara) será el interruptor de control de potencia, si la potencia contratada es de 3.450 W a la tensión de 230 V?
- 5) ¿Cómo fabricar una estufa? En el mercado existen hilos metálicos con un coeficiente de resistividad bastante alto. Por ejemplo, el feroníquel tiene un coeficiente de resistividad de $0,8\Omega\text{ mm}^2/\text{m}$. Si nosotros enrollamos

hilo de este material sobre un soporte aislante (a ser posible un material refractario), y hacemos pasar una corriente por él, éste se calentará intensamente.

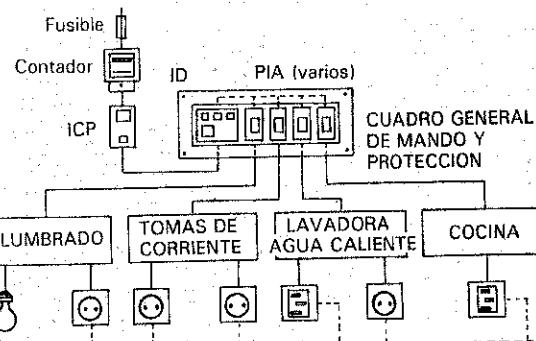


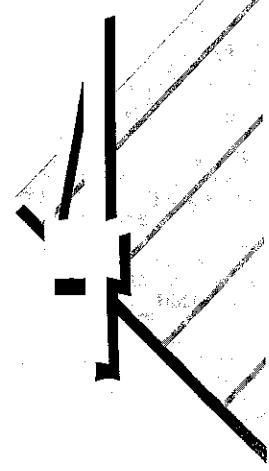
Figura 3.5. Esquema de la instalación eléctrica de una vivienda.

El proyecto de fabricación de la estufa podría ser el siguiente: se quiere construir una estufa eléctrica de 500 W de potencia para conectar una red de 125 V de tensión. Para ello, se dispone de hilo de feroníquel de $0,5\text{ mm}^2$ de sección. Determinar la longitud del hilo que será necesario enrollar sobre el soporte aislante.

- 6) Calcular la potencia que perderá una línea eléctrica de 50 m de longitud compuesta por dos conductores de aluminio de $1,5\text{ mm}^2$ de sección y que alimenta un motor eléctrico de 1 KW a 125 V.

- 7) La placa de una cocina eléctrica indica que consume una potencia de 2,5 KW a la tensión de 230 V. Calcular: a) la intensidad; b) el valor de la resistencia; c) la energía eléctrica que consumirá (en KWh) en un mes, si funciona durante 2 horas al día.
- 8) Para elevar agua de un pozo se instala una motobomba movida por un motor eléctrico de 3 CV a una red de 380 V. Teniendo en cuenta que 1 CV equivale, aproximadamente, a 736 W, calcular: a) la intensidad de corriente; b) el gasto bimensual si el motor funciona, por término medio, 8 h al día. Precio del KWh: 16 ptas.
- 9) ¿Cómo es la resistencia de los circuitos medidores de un vatímetro?
- a) La resistencia de la amperimétrica es baja, mientras que la de la voltmétrica es alta
- b) La resistencia de la amperimétrica es alta, mientras que la de la voltmétrica es baja
- c) Aproximadamente igual
- 10) ¿Cómo se conecta el contador de energía?
- a) En derivación con la carga
- b) El circuito voltmétrico en serie y el amperimétrico en paralelo
- c) Exactamente igual que un vatímetro

Efecto Térmico de la Electricidad



Introducción

Cuando la corriente eléctrica fluye por una resistencia eléctrica ésta se calienta. El calor producido depende de la energía eléctrica consumida por la misma, es decir del producto de la potencia por el tiempo. Las aplicaciones del efecto térmico de la electricidad son muy variadas: calefacción, cocinas y hornos, etc. Ahora bien, el efecto térmico también provoca inconvenientes cuando no es deseado, como por ejemplo el calentamiento que se produce en los conductores de las líneas eléctricas cuando son recorridos por corriente. Para evitar que este calentamiento sea excesivo en los mismos se aumenta su sección.

Contenido

- Efecto Joule.
- Calor específico.
- Transmisión del calor.
- Cálculo de la sección de conductores.

Objetivos

- Describir los procesos de conversión de energía eléctrica a calorífica.
- Emplear el calor específico de los cuerpos para determinar la elevación de su temperatura.
- Distinguir los sistemas de transmisión del calor.
- Relacionar el calentamiento de un conductor con la intensidad que fluye por él y su resistencia eléctrica.
- Calcular la sección de un conductor en función de su intensidad máxima admisible.
- Determinar la caída de tensión de las líneas eléctricas y tenerla en cuenta para el cálculo de la sección de los conductores de una línea eléctrica.

4.1 Efecto Joule

Hemos visto que los conductores y las resistencia se calientan cuando son atravesados por una corriente eléctrica. Este fenómeno es también conocido por "efecto Joule".

El físico P. James Joule estudió la relación que existe entre la energía y su transformación plena en calor. A base de experimentar con un calorímetro, llegó a la conclusión de que la energía de 1 Julio es equivalente a 0,24 calorías.

$$Q = 0,24 \cdot E$$

Q = calor en calorías

E = energía en Julios

De esta manera, si quisiéramos determinar el calor que se produce en una resistencia **R** en un tiempo determinado **t** cuando es recorrida por una corriente eléctrica **I**, tendremos que:

$E = P t$; a su vez $P = R I^2$; si llevamos estos valores a la primera expresión, tenemos:

$$Q = 0,24 R I^2 t$$

Ejemplo: 4.1

Calcular el calor desprendido por un horno eléctrico de 2000 W en 5 minutos de funcionamiento.

Solución: La energía en julios consumida durante ese período de tiempo, es:

$$E = P t = 2.000 \cdot 300 = 600.000 \text{ Julios}$$

$$t = 5 \cdot 60 = 300 \text{ s}$$

Como cada julio se transforma en 0,24 calorías, tendremos que:

$$Q = 0,24 E = 0,24 \cdot 600.000 = 144.000 \text{ calorías} = 144 \text{ Kcal.}$$

Ejemplo: 4.2

Calcular el calor desprendido por un conductor de cobre de 100 m de longitud y 1,5 mm² de sección que alimenta un grupo de lámparas de 1.500 W de potencia a una tensión de 230 V durante un día.

Solución: Primero se calcula la intensidad de corriente que circula por dicho conductor:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.500}{230} = 6,5 \text{ A}$$

Calculemos ahora la resistencia del conductor de la línea:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0,017 \frac{100}{1,5} = 1,13 \Omega$$

El calor producido por el conductor, que eleva su temperatura y se contabiliza como energía perdida, es:

$$Q = 0,24 R I^2 t = 0,24 \cdot 1,13 \cdot 6,5^2 \cdot 86.400 = 989.988 \text{ cal}$$

$$t = 24 \text{ h} \cdot 60 \text{ m} \cdot 60 = 86.400 \text{ s}$$

La energía calorífica desarrollada por una resistencia calefactora o por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica tiende a elevar la temperatura del mismo. Esta elevación depende de varios factores, como son el calor específico de los materiales, su masa, su temperatura, los coeficientes de transmisión por donde se propaga y disipa el calor, etc.

4.2 Calor específico

El calor específico de una substancia es la cantidad de calor que se precisa para aumentar la temperatura en 1°C una masa de 1 gramo.

Así, por ejemplo, para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado se necesita una caloría, bastante más que lo que se necesita para hacer lo mismo con un gramo de cobre (0,093 calorías). En la Tabla 4.1 se expone el calor específico de diferentes substancias, expresado en calorías /gramo · °C

Substancia	Calor específico (cal/gr °C)
cobre	0,093
acero	0,110
PVC	0,210
aluminio	0,220
agua	1

Tabla 4.1.

Conociendo el calor específico de una substancia y su masa es posible calcular la cantidad de calor que es necesario aplicar para elevar su temperatura. Para ello aplicaremos la expresión:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ$$

Q = cantidad de calor (calorías)

m = masa (gramos)

c = calor específico (cal/gr °C)

Δt° = variación de temperatura

Ejemplo: 4.3

Determinar el calor necesario para elevar la temperatura de un litro de agua de 20 a 50 °C.

Solución: Como 1 litro de agua equivale a 1.000 gramos, el calor específico del agua es 1 y la elevación de temperatura que deseamos conseguir es (50 - 20) = 30 °C, el calor a aplicar es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ = 1.000 \cdot 1 \cdot 30 = 30.000 \text{ cal}$$

Ejemplo: 4.4

Determinar la potencia que deberá tener un termo eléctrico de agua para calentar un depósito de 50 litros en

1 hora. El agua entra a 12 °C y se desea calentarla hasta 60 °C. Calcular también el valor ohmico de la resistencia de caldeo para una tensión de 230 V.

***Nota:** Para hacer los cálculos no tener en cuenta el calentamiento de la cuba ni de la resistencia calefactora.

Solución: El calor que debe aportar la resistencia de caldeo, es:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t^\circ = 50.000 \cdot 1 \cdot (60 - 12) = 2.400.000 \text{ cal}$$

La energía eléctrica necesaria para producir este calor, es:

$$Q = 0,24 E, \text{ despejando } E = \frac{Q}{0,24} = \frac{2.400.000}{0,24} = 10.000.000 \text{ julios}$$

La potencia para desarrollar esta energía en 1 hora (3.600 s) será:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{10.000.000}{3.600} = 2.778 \text{ W} = 2,8 \text{ KW}$$

La resistencia la podemos calcular así:

$$P = \frac{V^2}{R} \text{ despejando } R = \frac{V^2}{P} = \frac{230^2}{2.778} = 19 \Omega$$

Ejemplo: 4.5

Averiguar cuál será el costo de la energía del Ejemplo 4.3 si el precio del KWh es de 17 pts.

Solución: La energía en KWh, es:

$$E = P \cdot t = 2,8 \cdot 1 = 2,8 \text{ KWh}$$

$$\text{Gasto} = 2,8 \cdot 17 = 47,6 \text{ pts}$$

Ejemplo: 4.6

Determinar el aumento de temperatura que experimentará una plancha eléctrica de acero si se la calienta mediante una resistencia de caldeo de 10 ohmios a 125 V durante 10 minutos. La plancha posee una masa de 7 kg y se supone que se pierde un 25 % del calor generado.

Solución: Calculamos primero el calor generado:

$$Q = 0,24 R I^2 t = 0,24 \cdot 10 \cdot 12,5^2 \cdot 600 = 225.000 \text{ cal}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{125}{10} = 12,5 \text{ A}, \quad t = 10 \cdot 60 = 600 \text{ s}$$

El calor transmitido a la plancha será sólo el 75 % del total generado:

$$Q = \frac{75}{100} \cdot 225.000 = 168.750 \text{ cal}$$

Como el calor específico del acero es 0,11, el incremento de temperatura será:

$$Q = m c \Delta t^\circ \text{ despejando } \Delta t^\circ = \frac{Q}{m c} = \frac{168.750}{7.000 \cdot 0,11} = 219 \text{ °C.}$$

4.3 Transmisión de calor

La energía calorífica generada en un punto se transmite desde las zonas de más altas temperaturas a las más bajas. Esta transmisión puede conducirse de tres formas diferentes:

Conducción: el calor se transmite por contacto íntimo entre dos materiales, como por ejemplo en los metales.

Convección: todos los gases y líquidos, cuando se calientan se dilatan y disminuyen de densidad, lo que hace que tiendan a desplazarse. Así, por ejemplo, un radiador eléctrico, que transmite calor por convección (convector), calienta el aire que entra en contacto con su superficie, lo que hace que éste ascienda y se mueva por toda la estancia que hay que calentar.

Radiación: este tipo de transmisión se produce por ondas y es similar a la que se produce por el Sol. De esta forma de transmisión se aprovechan elementos calefactores como, por ejemplo, las estufas de rayos infrarrojos, placas solares de alta temperatura, hornos eléctricos.

4.4 Cálculo de la sección de conductores

Uno de los efectos perjudiciales del efecto Joule es el calentamiento que se produce en los conductores eléctricos cuando son recorridos por una corriente eléctrica. Para evitar que este calentamiento alcance valores que sean perjudiciales para los mismos se construyen de diferentes secciones. Cuanto más corriente se prevee que va fluir por ellos, mayor será su sección.

La sección de un conductor es la superficie que aparece cuando le cortamos perpendicularmente a su longitud. Por lo general los conductores son cilíndricos, por lo que la sección suele ser un área circular (Figura 4.1). La sección de los conductores se suele expresar en mm².



Figura 4.1

Dado que los conductores no son perfectos y poseen una cierta resistencia eléctrica, cuando son atravesados por una corriente eléctrica se producen dos fenómenos:

- Se calientan y pierden potencia.
- Al estar conectados en serie con los aparatos eléctricos que alimentan, se produce una caída de tensión, que hace que se reduzca apreciablemente la tensión, al final de la línea.

Éstos son los dos factores más importantes que hay que tener en cuenta a la hora de seleccionar la sección más adecuada para una instalación eléctrica.

4.4.1 Cálculo de la sección teniendo en cuenta el calentamiento de los conductores

El calor que producen los conductores es proporcional a la potencia P_{PL} que se pierde en ellos. Ésta aumenta con la resistencia del conductor (R_L) y con la intensidad de corriente al cuadrado (I^2) que conduce.

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2$$

Dado que la resistencia del conductor depende de su sección, si queremos conseguir pérdidas de potencias bajas deberemos aumentar considerablemente su sección.

Ejemplo: 4.7

Calcular la potencia que se pierde en un conductor de cobre de 100 m de longitud y 1,5 mm² de sección que alimenta un motor eléctrico de 3 KW de potencia a una tensión de 230 V.

Solución: Primero se calcula la intensidad de corriente que fluye por el conductor:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{3.000}{230} = 13 \text{ A}$$

Ahora calcularemos la resistencia del conductor:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0,017 \frac{100}{1,5} = 1,13 \Omega$$

Ya podemos calcular la potencia perdida en el conductor que se transforma en calor:

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2 = 1,13 \cdot 13^2 = 191 \text{ W}$$

La potencia perdida en un conductor produce calor que, al acumularse, eleva su temperatura, pudiendo llegar a fundir el aislante del conductor (el plástico que rodea el conductor). Esto puede llegar a ser muy peligroso ya que podrían originarse incendios. Por otro lado, los aislantes al estar sometidos a estas temperaturas, pierden parte de su capacidad para aislar y envejecen con rapidez, lo que los hace quebradizos y prácticamente inservibles.

Ejemplo: 4.8

¿Cuál sería la perdida de potencia si aumentamos la sección de los conductores del ejemplo 4.7 a 4 mm²?

Solución: $P_{PL} = 78 \text{ W}$

Está claro que al aumentar la sección del conductor, disminuye la pérdida de potencia y, por tanto, el calor producido por el mismo.

El calentamiento de un conductor, entre otros factores, depende de la intensidad de corriente que circule por él. Luego, cuanto mayor sea la corriente que circula por un conductor, mayor tendrá que ser la sección de éste para que no se caliente excesivamente.

Dado que el calor se va a concentrar más en un conductor instalado bajo tubo que en un conductor instalado al aire, también habrá que tener en cuenta, a la hora de determinar la sección, la forma de instalar los conductores. Por el mismo razonamiento, también hay que tener en cuenta la forma de agrupación de los conductores:

- Conductores unipolares: línea formada por conductores separados.
- Conductores bipolares: línea formada por dos conductores unidos por material aislante.
- Conductores tripolares: línea formada por tres conductores unidos por material aislante.

Son los fabricantes de conductores eléctricos los que tienen que indicar la intensidad que soportan éstos (intensidad máxima admisible) en función de las condiciones de instalación. Pero, para que no existan fraudes a este respecto, el "Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión" (REBT) edita diferentes tablas de consulta con las que se pueden calcular la secciones de conductores.

En la Tabla 4.2 se indican las intensidades admisibles para una temperatura ambiente del aire de 40° C y para distintos métodos de instalación, agrupamientos y tipos de cables.

Ejemplo: 4.9

¿Cuál será la intensidad máxima que podrán conducir los conductores de una línea bipolar aislada con PVC instalada directamente sobre la pared si su sección es de 10 mm²? ¿Y si se instala bajo tubo?

Solución: Consultando la Tabla 4.2:

Para "cables multiconductores directamente sobre la pared" "2xPVC" nos encontramos en la columna nº 6, que nos indica que para una sección de 10 mm² intensidad máxima es de 52 A.

Para "cables multiconductores en tubos empotados en paredes aislantes" "2xPVC" nos encontramos en la columna nº 2, que nos indica que para una sección de 10 mm² intensidad máxima es de 37 A.

Intensidades admisibles (A) para una temperatura ambiente de 40° C. N.º de conductores con carga y naturaleza del aislamiento													
		Conductores aislados en tubos empotados en paredes aislantes		3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
		3x	2x										
A2		Cables multiconductores en tubos empotados en paredes aislantes	3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x XLPE o EPR		
B		Conductores aislados en tubos ⁽²⁾ en montaje superficial o empotados en obra			3x PVC	2x PVC	3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x XLPE o EPR		
B2		Cables multiconductores en tubos ⁽²⁾ en montaje superficial y empotados en obra			3x PVC	2x PVC	3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x XLPE o EPR		
C		Cables multiconductores directamente sobre la pared ⁽³⁾			3x PVC	2x PVC	3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x XLPE o EPR		
E		Cables multiconductores al aire libre ⁽⁴⁾ . Distancia a la pared no inferior a 0,3D			3x PVC	2x PVC	3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x XLPE o EPR		
F		Cables unipolares en contacto mutuo. Distancia a la pared no inferior a D			3x PVC	2x PVC	3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR	3x XLPE o EPR		
G		Cables unipolares separados mínimo D			D es el diámetro del cable								
		Sección mm ²	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		1,5	11	11,5	13	13,5	15	16		18	21	24	
		2,5	15	16	17,5	18,5	21	22		25	29	33	
		4	20	21	23	24	27	30		34	38	45	
		6	25	27	30	32	36	37		44	49	57	
		10	34	37	40	44	50	52		60	68	76	
		16	45	49	54	59	66	70		80	91	105	
		25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	
		35			77	86	96	104	110	119	131	144	
		50			94	103	117	125	133	145	159	175	
		70				149	160	171	188	202	224	244	
		95				180	194	207	230	245	271	296	
		120				208	225	240	267	284	314	348	
		150				236	260	278	310	338	363	404	
		185				268	297	317	364	386	415	464	
		240				315	350	374	419	455	490	552	
		300				360	404	423	484	524	565	640	

(1) A partir de 25 mm²
(2) Incluyendo canales para instalaciones, canaletas y conductos de sección no circular
(3) O en bandeja no perforada
(4) O en bandeja perforada

Tabla 4.2

Intensidades en Amperios para conductores de cobre

3xPVC = línea formada por tres conductores unipolares o uno tripolar aislados con Polivinilo clorado

2xPVC = línea formada por dos conductores unipolares o uno bipolar aislados con Polivinilo clorado

3xPVC = línea formada por tres conductores unipolares o uno tripolar aislados con Polietileno reticulado (XLPE) o Etileno propileno (EPR)

2xPVC = línea formada por dos conductores unipolares o uno bipolar aislados con Polietileno reticulado (XLPE) o Etileno propileno (EPR)

4.4.2 Densidad de corriente de un conductor

La densidad de corriente de un conductor nos indica los amperios por milímetro cuadrado que circulan por él:

$$\delta = \frac{I}{S} \text{ en A/mm}^2$$

La densidad de corriente del conductor del Ejemplo 4.10 sería, entonces:

$$\delta = \frac{I}{S} = \frac{25}{4} = 6,25 \text{ A/mm}^2$$

La densidad de corriente admisible por un conductor depende de las condiciones de instalación, tipo de cable y sección del conductor (según aumenta la sección, el calor se disipa peor y la densidad admisible disminuye).

4.4.3 Por qué se emplean altas tensiones en el transporte de energía eléctrica

Veamos un ejemplo: deseamos generar y transportar por una línea una pequeña potencia de 1.000 W. ¿Qué tensión utilizaremos? Estudiaremos dos casos extremos:

Con una tensión de 1.000 V: $P = V I \Rightarrow$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.000}{1.000} = 1 \text{ A}$$

Con una tensión de 1 V: $I = \frac{P}{V} = \frac{1.000}{1} = 1.000 \text{ A}$

Queda claro con este ejemplo que al aumentar la tensión reducimos la intensidad y, por tanto, la sección de los conductores podrá ser más reducida. A su vez, se reducen las pérdidas caloríficas en los conductores ($P_{PL} = R_L I^2$). Tampoco conviene utilizar tensiones demasiado elevadas, ya que esto trae también consigo un encarecimiento de los aislantes (torres más altas, cables más separados, aislantes más perfectos, inclusión de sofisticados sistemas de seguridad, etc.).

En general se busca un compromiso entre la potencia a transportar, la tensión a utilizar y la intensidad de la línea. La solución que resulte más económica es la que se empleará.

4.4.4 Caída de tensión en las líneas eléctricas

Seguro que habrás podido observar cómo en ciertas ocasiones la luz que emiten las lámparas eléctricas que están conectadas a la red eléctrica cambia un poco de luminosidad.

Estos fenómenos son debidos a que las líneas producen una cierta pérdida de tensión.

Como todos sabemos, las líneas que transportan la energía eléctrica están compuestas por conductores eléctricos de una cierta resistencia que, al ser recorridos por una corriente eléctrica se calientan y, por lo tanto, producen una pérdida de potencia. Pues bien, también hay que pensar que los conductores de las líneas están conectados en serie con los receptores, y que al ser recorridos por la corriente ocasionan una caída de tensión. De tal forma, que la tensión que le llega al receptor es menor que la que existe al principio de la línea.

Ejemplo: 4.11

Se desea suministrar energía eléctrica a un motor de 10 KW a 230 V. Para ello, se tiene una línea de cobre de 6 mm^2 de sección desde un transformador de distribución situado a 75 m (Figura 4.2). Calcular: a) la resistencia de la línea; b) intensidad del circuito; c) caída de tensión en

la línea; d) tensión que tiene que suministrar el transformador; e) potencia perdida en la línea.

Solución:

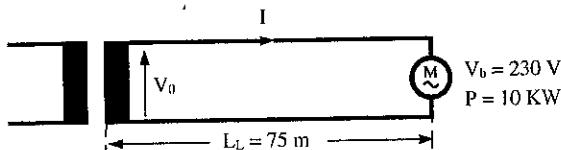


Figura 4.2

a) Para calcular la resistencia de la línea hay que tener en cuenta que la longitud total del conductor son $75 + 75 = 150 \text{ m}$ (conductor de ida + conductor de vuelta).

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = 0,017 \frac{150}{6} = 0,43 \Omega$$

Esta resistencia la podemos representar como si estuviese concentrada en un punto de la línea (Figura 4.3).

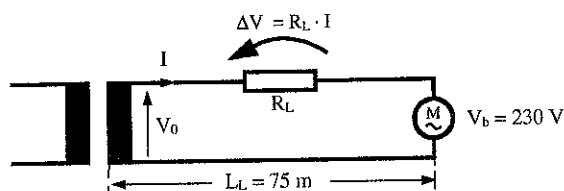


Figura 4.3

b) La intensidad de la línea es:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{10.000}{230} = 43,48 \text{ A}$$

c) La caída de tensión ΔV la calculamos aplicando la ley de Ohm entre los terminales de la hipotética resistencia de línea R_L cuando es recorrida por la intensidad I .

$$\Delta V = R_L \cdot I = 0,43 \cdot 43,48 = 18,7 \text{ V}$$

A veces, conviene expresar este resultado en tantos por ciento referidos a la tensión de alimentación. En nuestro caso:

$$\Delta V\% = \frac{18,7}{230} \cdot 100 = 8,1\%$$

Si aplicásemos las normas contempladas en el “Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión” (REBT), habría que aumentar la sección de los conductores de la línea, ya que este porcentaje de caída de tensión es en cualquier caso inadmisible. El porcentaje máximo que se suele admitir para instalaciones de BT entre el origen de las mismas y cualquier punto de consumo es del 3% del valor nominal para circuitos de alumbrado, y del 5% para los demás usos.

d) La tensión en el transformador, es:

$$V_0 = V_b + \Delta V = 230 + 18,7 = 248,7 \text{ V}$$

e) La potencia que se pierde en la línea la calculamos con la expresión:

$$P_{PL} = R_L \cdot I^2 = 0,43 \cdot 43,48^2 = 813 \text{ W}$$

4.4.5 Cálculo de la sección teniendo en cuenta la caída de tensión

La caída de tensión en las líneas puede llegar a ser un problema para el correcto funcionamiento de los receptores, ya que éstos están diseñados para trabajar a una cierta tensión. Una tensión más baja puede impedir el arranque de un motor, el encendido de un tubo fluorescente, etc. Por todo ello, la caída de tensión no puede exceder de unos límites prefijados en el REBT para cada caso. De esta forma, no sólo habrá que tener en cuenta el calentamiento del conductor para determinar su sección, sino que también será necesario no sobrepasar el porcentaje de caída de tensión prefijado en el REBT.

Ejemplo: 4.12

Calcular la sección que le correspondería a una línea compuesta por dos conductores de cobre unipolares instalados bajo tubo y aislados con PVC de 100 metros de longitud, que alimenta a un taller de 15 KW / 400 V, si la caída máxima de tensión que se admite es del 1% de la de alimentación (Figura 4.4).

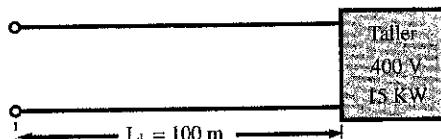


Figura 4.4

Solución:

Primero calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{15.000}{400} = 37,5 \text{ A}$$

La caída de tensión en voltios la calculamos así:

$$\Delta V = \frac{400}{100} \cdot 1\% = 4 \text{ V}$$

Ahora, vamos a encontrar la relación que existe entre la sección del conductor y esta caída de tensión:

$\Delta V = R_L I$, sustituimos R_L por su expresión general:

$$\Delta V = \rho \frac{L}{S} I, \text{ despejando la sección:}$$

$$S = \rho \frac{L}{\Delta V} I = 0,017 \frac{2 \cdot 100}{4} 37,5 = 32 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 35 mm². Ahora comprobamos la intensidad máxima que admite este conductor según la Tabla 4.2: dos conductores unipolares instalados bajo tubo y aislados con PVC de 35 mm² admiten una intensidad de 86 amperios sin calentarse excesivamente. Como la intensidad de la línea es inferior (37,5 A) damos como válido el resultado de 35 mm².

En el caso de que el conductor tuviese una $I_{\max. adm.}$ inferior a la que circula por la línea, habría que tomar una sección superior, predominando en este caso el cálculo de la

sección por calentamiento de los conductores al cálculo por caída de tensión.

¿Qué sección le correspondería a esta línea si no se tuviese en cuenta la caída de tensión de la misma? $S = 10 \text{ mm}^2$.

En resumen, siempre que necesitemos determinar la sección de un conductor emplearemos la siguiente expresión:

$$S = \rho \frac{2 L_L}{\Delta V} I$$

ρ = resistividad del conductor ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

ΔV = caída de tensión máxima en la línea (V)

L_L = distancia de la carga al punto de alimentación (m)

I = intensidad por la línea (A)

S = sección del conductor de la línea (mm^2)

Para concluir, recuérdese que para calcular la sección de los conductores de una línea hay que tener en cuenta dos aspectos fundamentales:

a) La caída de tensión máxima permitida.

b) Corriente máxima admitida por el conductor en función de su tipo e instalación (para evitar sobrecalentamientos).

Cuando se trata de líneas de corta longitud, la caída de tensión es pequeña y por tanto, predominará en el cálculo la sección determinada mediante la corriente admisible. Para líneas más largas, la caída de tensión se hace considerable y, por lo general, es la que exige una sección mayor en el cálculo.

Ejemplo: 4.13

Determinar la sección de los conductores de una línea compuesta por 1 cable bipolar de cobre y aislado con PVC e instalado bajo conducto que alimenta un vivienda unifamiliar mediante paneles fotovoltaicos. La longitud de la línea es de 8 m y se admite una caída de tensión del 4 %. La carga prevista es de 2 KW a 24 V.

Solución: Primero, calculamos la intensidad:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{2.000}{24} = 83 \text{ A}$$

La caída de tensión máxima que se permite en voltios, es:

$$\Delta V = \frac{24}{100} \cdot 4\% = 0,96 \text{ V}$$

La sección necesaria para no superar esta caída, es:

$$S = \rho \frac{2 L_L}{\Delta V} I = 0,017 \frac{2 \cdot 8}{0,96} 83 = 23 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que se fabrica es la superior: 25 mm²

Al comprobar la intensidad admisible en la Tabla 4.2 observamos que este conductor admite 64 A. Dado que por él tienen que pasar 83 A, habrá que aumentar la sección hasta 50 mm² para que no se caliente excesivamente.

Actividades

1. Consigue catálogos técnicos sobre conductores eléctricos, analiza sus características técnicas y su campo de aplicación. Si es posible consigue además alguna aplicación informática sobre el cálculo de conductores eléctricos por ordenador (algunas firmas comerciales del sector proporcionan gratuitamente este tipo de aplicaciones).
2. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Autoevaluación

- 1) Suponiendo dos conductores de la misma masa, uno de cobre y otro de aluminio, que al ser recorridos por una corriente eléctrica se calientan ¿en cuál de los dos conductores se elevará más la temperatura?
 - Toman los dos la misma temperatura, por tener la misma masa
 - El cobre, por poseer un menor calor específico
 - El aluminio, por poseer un mayor calor específico
- 2) Una plancha eléctrica basa su funcionamiento en la transmisión de calor, por:
 - Radiación
 - Convección
 - Condición
- 3) Calcular el calor generado por un termo eléctrico de características 2.000 W / 230 V durante 2 horas de funcionamiento.
- 4) Calcular el tiempo aproximado que hay que tener conectada la resistencia calefactora de un calentador eléctrico de agua sanitaria de 3.500 vatios de potencia, si la capacidad de su depósito es de 75 litros, y el agua se calienta de 10 °C a 50 °C.
- 5) Un termo eléctrico de 1.500 W tarda en calentar 40 litros de agua una hora y media. Determinar el rendimiento del dispositivo si el agua entra a 12 °C y sale a 55 °C.
- 6) Si se consiguiese fabricar un material superconductor a la temperatura ambiente, ¿de qué forma afectaría a la instalación de líneas eléctricas?
 - La ausencia de resistencia en el conductor provocaría un calentamiento inferior en los conductores
- 7) Con la ayuda de la Tabla 4.2, comprueba la densidad de corriente admisible para todas las secciones correspondientes a conductores de 4 mm² en diferentes formas de instalación y agrupación de conductores.
- 8) Se necesita instalar una motobomba de 6 KW a 230 V. Para ello, se tiende una línea bajo tubo, consistente en dos cables unipolares. ¿Cuál será la sección de los conductores, como mínimo, si éstos son de cobre aislados con PVC? Averiguar también la densidad de corriente del conductor. (Se supone que la longitud del conductor es muy corta y, por lo tanto no se tiene en cuenta la caída de tensión).
- 9) ¿Cuál será la sección del conductor y la densidad de corriente si para instalar la motobomba, ejercicio anterior, optamos por realizar la instalación mediante un cable bipolar instalado directamente en la pared?
- 10) La potencia máxima que se espera que pueda consumir una cocina eléctrica de uso doméstico es de unos 4.400 W. Sabiendo esto, calcular la sección de los conductores del circuito que la alimenta, teniendo en cuenta que está conectada a una red de 230 V y que los conductores son unipolares de cobre aislados con PVC y que están instalados bajo tubo.
- 11) Un local posee una instalación de 20 puntos de luz de 100 W cada uno a una tensión de 230 V. Se quiere alimentar a través de una línea de cobre bipolar de 75 metros de longitud instalada al aire. Determinar la sección más recomendable para que la caída máxima de tensión no supere el 3% de la de alimentación. ¿Cuál será la densidad de corriente del conductor?

- 12) La instalación de un pequeño taller se compone de los siguientes receptores: dos motores de C.C. de 4 KW cada uno, 20 puntos de luz de 100 W cada uno, cinco calefactores de 1,5 KW cada uno. La tensión de alimentación es de 400 V (Figura. 4.5). Averiguar la sección de los conductores de la línea general si ésta se compone de un cable bipolar de PVC instalado bajo tubo y se admite una caída de tensión máxima del 4% de la de alimentación. Longitud de la línea es de 77 m.

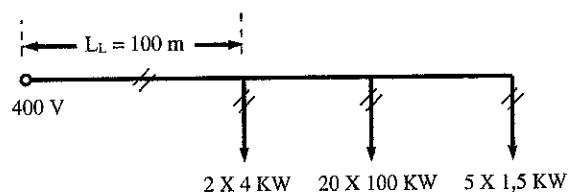
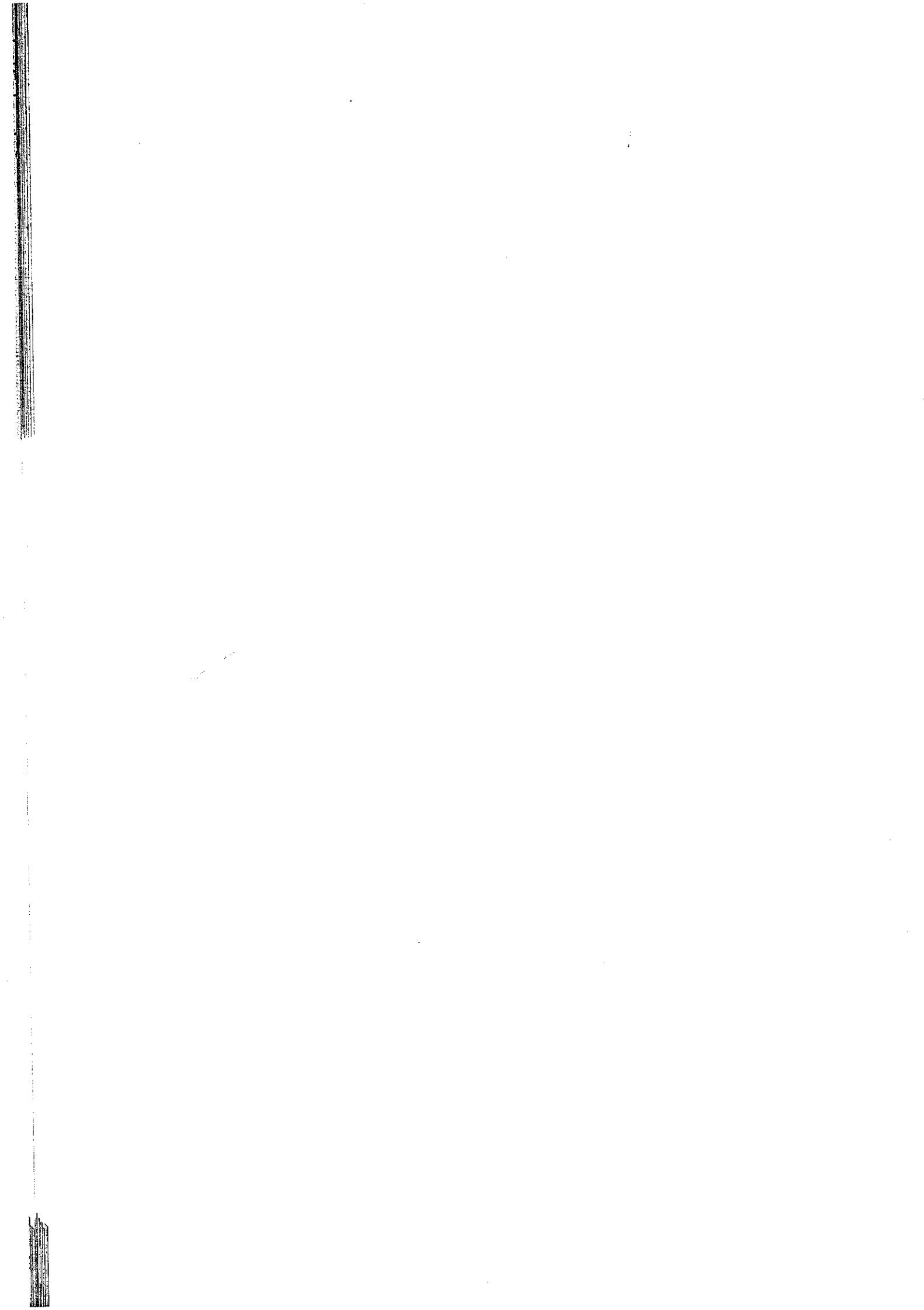
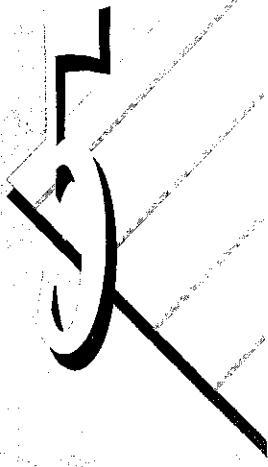


Figura 4.5

El esquema de la Figura 4.5 es del tipo unifilar. El trazo representa a la línea y el número de conductores de ésta se representa por unas rayitas cruzadas (como en nuestro caso la línea tiene dos conductores: //).



Aplicaciones del Efecto Térmico



Introducción

Gracias al efecto térmico se pueden construir multitud de dispositivos de gran aplicación práctica, como son lámparas incandescentes, elementos de caldeo y fusibles.

Contenido

- Elementos de caldeo.
- Control de temperatura mediante el termostato.
- Lamparas incandescentes.
- El cortocircuito y la sobrecarga.
- El interruptor automático.
- Relé magnético y relé térmico.

Objetivos

- Aplicar el efecto Joule para la fabricación de dispositivos capaces de aprovecharse de la corriente eléctrica.
- Distinguir entre cortocircuito y sobrecarga.
- Describir el funcionamiento del fusible y del interruptor automático, y seleccionar el calibre adecuado para cada aplicación.

5.1 Elementos de caldeo

Son resistencias preparadas para transformar la energía eléctrica en calor (Figura 5.1). Se utilizan para la fabricación de estufas, placas de cocina, hornos, planchas eléctricas, secadores, calentadores eléctricos de agua, soldadores, etc.

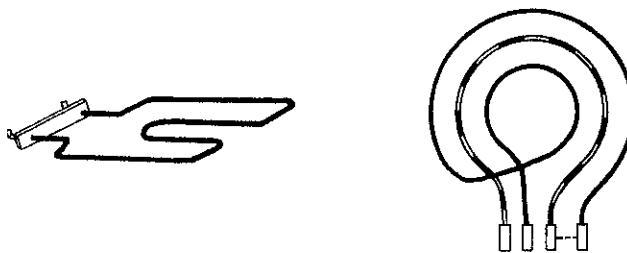


Figura 5.1. Resistencias calefactoras.

El calor eléctrico presenta múltiples ventajas frente a otras formas de producir calor, como la ausencia de llama y gases de combustión, la limpieza y la facilidad para controlar y regular su funcionamiento.

Los elementos de caldeo se fabrican, por lo general, con hilos de aleaciones metálicas resitivas cubiertos por materiales aislantes que soportan altas temperaturas.

El elemento básico de control de temperatura que suelen poseer la mayoría de los aparatos calefactores es el termostato. Con este dispositivo prefijamos la temperatura de funcionamiento del aparato. Una vez alcanzada dicha temperatura el termostato abre el circuito y desconecta el calefactor hasta que la temperatura vuelve a descender, momento en el cual se vuelve a cerrar el circuito. De esta forma, abriendo y cerrando el circuito de alimentación del calefactor se consigue mantener la temperatura prefijada (Figura 5.2).

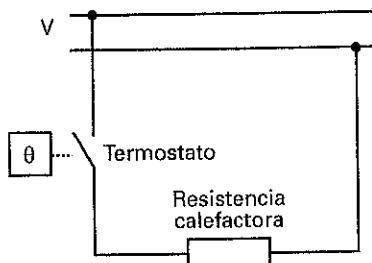


Figura 5.2. Esquema del control de temperatura por termostato.

Los termostatos pueden ser de varios tipos, los más utilizados son los bimetálicos y los electrónicos.

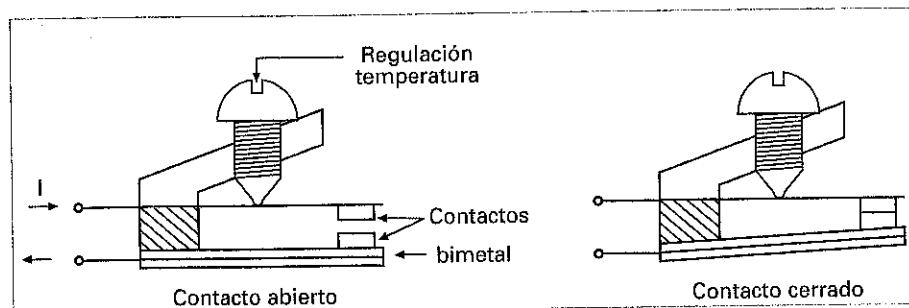


Figura 5.3. Termostato bimetalico.

En la Figura 5.3 se puede apreciar la composición de un termostato bimetálico. El elemento fundamental es el bimetal, que está fabricado a base de unir dos metales de muy diferente coeficiente de dilatación. Al calentarse, una de las láminas tiende a estirarse más que la otra y provoca un arqueo del bimetal. Este movimiento puede aprovecharse para abrir o cerrar un contacto eléctrico.

Los termostatos no sólo son útiles para prefijar la temperatura, por ejemplo, el aire de una habitación o del agua de un termo eléctrico, sino también como elemento de seguridad en los calefactores, ya que así nos aseguramos que la temperatura de funcionamiento de los aparatos nunca alcance valores peligrosos. Por ejemplo, los secadores de pelo llevan integrado un pequeño termostato en el interior del aparato; así nos aseguramos de que, aunque el motor que ventila a la resistencia de caldeo deje de funcionar, la temperatura de las resistencias calefactoras no podrán alcanzar temperaturas peligrosas, ya que en este caso el termostato abre el circuito de alimentación hasta que se reponga la temperatura.

5.2 Lámparas incandescentes

El funcionamiento de una lámpara incandescente es muy sencillo. Al atravesar la corriente un filamento resistivo, éste alcanza una gran temperatura (unos 2.000 °C) poniéndose al rojo blanco, o sea incandescente, lo que provoca una emisión de radiaciones luminosas (Figura 5.4).

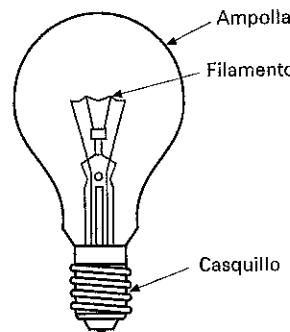


Figura. 5.4. Lámpara incandescente.

Las lámparas incandescentes son muy utilizadas por su bajo coste y por la facilidad de su montaje. Sin embargo, poseen un rendimiento luminoso bastante bajo frente a otro tipo de lámparas, como por ejemplo las fluorescentes. Además, la duración de las mismas no suele superar las 1.000 horas de funcionamiento.

5.3 Inconvenientes del efecto térmico

El efecto térmico se vuelve indeseable cuando no es esperado. Éste caso se da:

- En el calentamiento de conductores en las líneas eléctricas, lo que nos condiciona la sección de los conductores en función de la intensidad de la corriente que los atraviesa.

- En los conductores que forman los bobinados de transformadores, motores y generadores que nos limita su potencia nominal.
- En resistencias que tienen la misión de limitar corriente y tensión al ser conectadas en serie con la carga (reostatos, potenciómetros, resistores en circuitos electrónicos, etc.)
- En ciertos fallos, como el cortocircuito y la sobrecarga, que pueden llegar a dañar las instalaciones eléctricas si no se emplea la protección adecuada.

5.3.1 El cortocircuito

El cortocircuito se produce cuando se unen accidentalmente las dos partes activas del circuito eléctrico. Estos accidentes suelen ser provocados por un error en el montaje de la instalación, fallo de un aislamiento que separa las partes activas o por una falsa maniobra. (Figura. 5.5).

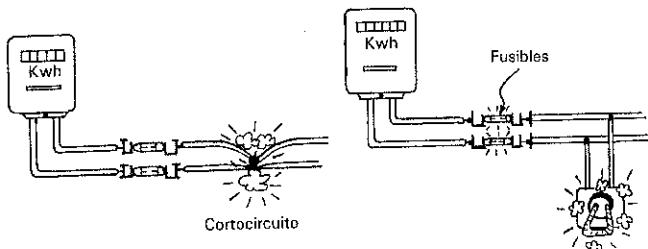


Figura 5.5. Ejemplos de cortocircuito accidental.

Experiencia 5.1: Vamos a comprobar experimentalmente el efecto del cortocircuito. Para ello consigue una pila y una lámpara y conéctalos. Seguidamente une mediante un conductor los terminales de la lámpara (Figura 5.6).

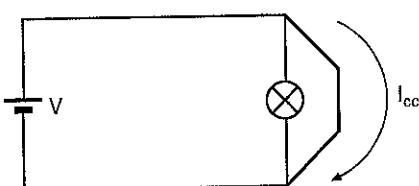


Figura 5.6

Se podrá observar como la lámpara se apaga, ya que toda la corriente eléctrica tiende a derivarse por el conductor de menos resistencia que el filamento. Mediante un amperímetro comprueba el valor de la corriente.

Esta experiencia se puede realizar porque la pila no es capaz de suministrar una corriente muy grande, ya que de haber provocado un cortocircuito, por ejemplo, en una base de enchufe de la red eléctrica, la corriente habría alcanzado valores muy elevados y peligrosos para los conductores eléctricos.

En un cortocircuito la intensidad de corriente que aparece es muy elevada, debido a que la única resistencia que existe

en el circuito es la propia de los conductores de línea (Figura 5.7).

$$I_{CC} = \frac{V}{R_{Línea}}$$

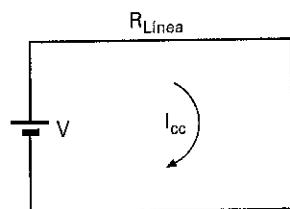


Figura 5.7

Ejemplo: 5.1

Determinar la intensidad de cortocircuito que aparecerá en una toma de corriente si la energía proviene de un transformador de distribución de 125 V y la línea de alimentación consiste en cable de cobre de 4 mm² de sección con una longitud total de 100 m.

Solución: La resistencia del conductor, es:

$$R_L = \rho \frac{L}{S} = 0,017 \frac{100}{4} = 0,425 \Omega$$

La corriente de cortocircuito queda limitada por esta pequeña resistencia:

$$I_{CC} = \frac{V}{R_L} = \frac{125}{0,425} = 294 \text{ A}$$

En el caso de que la resistencia del cortocircuito sea muy baja o cuando trabajamos con tensiones elevadas se pueden llegar a establecerse miles de amperios. Si esta fuerte intensidad no se corta inmediatamente, los conductores se destruyen por efecto del calor ($Q = 0,24 \cdot R_{Línea} \cdot I^2 \cdot t$) en un corto período de tiempo (a veces no llega a unos pocos milisegundos).

5.3.2 La sobrecarga

Se produce una sobrecarga cuando hacemos pasar por un conductor eléctrico más intensidad de corriente que la nominal (intensidad para la que ha sido calculada la línea).

Las sobrecargas pueden venir provocadas por conectar demasiados receptores en una línea eléctrica (Figura 5.8), por un mal funcionamiento de un receptor que tiende a un mayor consumo eléctrico o por un motor eléctrico que es obligado a trabajar a más potencia que su nominal.

Las sobrecargas originan un aumento de intensidad por los conductores que, con el tiempo suficiente, puede llegar a provocar su destrucción por elevación de temperatura.

Para medir una sobrecarga hay que tener en cuenta dos factores:

- El número de veces que se supera la intensidad nominal.
- El tiempo que dura la sobrecarga.

Una sobrecarga provoca daños cuando estos dos factores son considerables. Así, por ejemplo, si provocamos una sobrecarga en un conductor de dos veces su intensidad nominal durante unos pocos segundos, seguro que el mismo no sufre daños. Sin embargo si el tiempo es de horas, esta sobreintensidad puede llegar a dañar seriamente los aislantes del conductor.

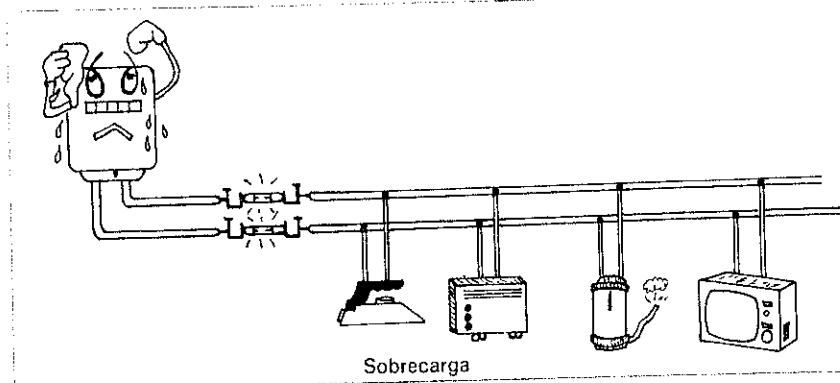


Figura 5.8. Sobrecarga causada por conectar a una línea un exceso de receptores.

5.3.3 Protección de los circuitos contra cortocircuitos y sobrecargas

Los excesos de temperatura de un conductor lo pueden destruir inmediatamente. Éste es el caso del cortocircuito (corriente muy elevada que no puede durar mucho tiempo porque destruye todo los elementos de la instalación que se encuentran a su paso). Las sobrecargas tardan más en dañar el conductor. Aun así, los excesos constantes de temperatura de los materiales aislantes hacen que se envejezcan con más rapidez, limitando la vida útil del conductor (los aislantes sometidos a altas temperaturas acaban volviéndose quebradizos y perdiendo parte de sus propiedades aislantes).

Para la protección contra cortocircuitos y sobrecargas se emplean los fusibles y los interruptores automáticos.

5.3.4 Fusibles

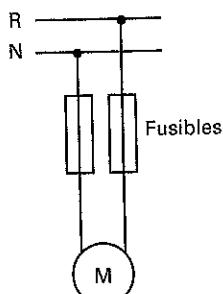


Figura 5.9. Fusibles protegiendo un motor eléctrico.

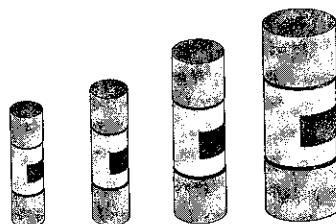
Un fusible está compuesto por un hilo conductor de menor sección que los conductores de la línea. En caso de una sobre-

carga o cortocircuito, la intensidad se eleva a valores peligrosos para los conductores de la línea, y el fusible, que es más débil, se funde debido al efecto Joule, e interrumpe el circuito antes de que la intensidad de la corriente alcance esos valores peligrosos (Figura 5.9).

Para que el hilo fusible se caliente antes que los conductores de la línea, debe ser de mayor resistencia eléctrica. Esto se consigue con un hilo de menor sección o con un hilo de mayor coeficiente de resistividad. Por otro lado, este hilo debe tener un punto de fusión más bajo que los conductores de línea que protege.

Hoy en día, para la fabricación de hilos fusibles, se emplean aleaciones especiales estudiadas para conseguir los mejores resultados. Estas aleaciones pueden ser de cobre-plata, plomo-estaño, etc.

Cuando un hilo fusible se funde, las gotas de material en estado líquido se proyectan, lo que puede producir quemaduras y accidentes, incluido peligro de incendio. Por esta razón, los hilos fusibles se deben colocar en el interior de recipientes herméticamente cerrados, dando así lugar a los llamados cartuchos fusibles. En la Figura 5.10 se muestra, como ejemplo, el aspecto de una gama de cartuchos fusibles comerciales de diferente tamaño, así como sus calibres en amperios.



Tamaño	V	kA	Tipo	Calibrados A								
				2	4	6	10	16	20	25	32	40
8 x 31	380	20	CL-16									
10 x 38	500	100	CL-20									
14 x 51	500	100	CL-40									
22 x 58	500	100	CL-80									

Figura 5.10. Gama de cartuchos comerciales calibrados en amperios.

Una de las ventajas de los cartuchos fusibles es que están calibrados en amperios. El calibre de un fusible nos indica la intensidad que puede pasar por él sin fundirse. Cuando se supera esta intensidad, el fusible corta el circuito. La rapidez con que lo hace está en función de lo alta que sea la intensidad del fallo, tal como se muestra en las curvas de fusión facilitadas por los fabricantes.

En la Figura 5.11 se dan las curvas de fusión de los cartuchos fusibles mostrados en la Figura 5.10. En el eje (X) se representan los valores de la intensidad. En el eje (Y) aparecen representados los tiempos de respuesta del fusible. Para averiguar este tiempo, basta con trazar una recta perpendicular al eje X, desde la intensidad del fallo hasta la intersección con la curva correspondiente al calibre del fusible.

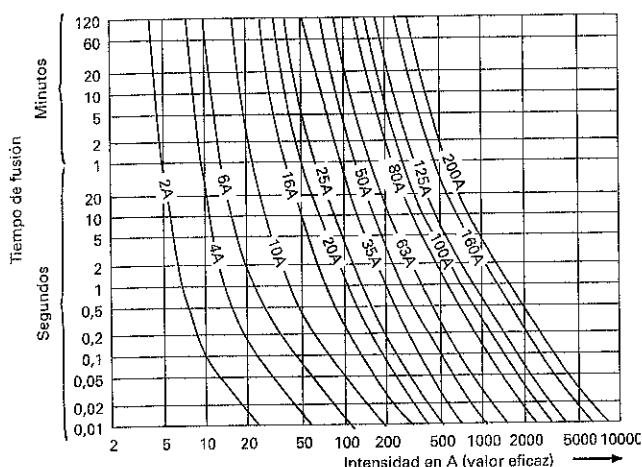


Figura 5.11. Curvas de fusión de una gama de cartuchos fusibles comerciales.

Así, por ejemplo, se puede apreciar que para una intensidad por el circuito de 25 A, el fusible de 2 A corta el circuito en un tiempo inferior a 0,01 segundos, el fusible de 6 A lo hace en un tiempo de 1 s, el de 10 A en 1 minuto, el de 16 A más de 120 minutos y el de 25 A no llega nunca a fundirse.

Otra de las características de los cartuchos fusibles calibrados es que son **selectivos**, lo que significa, tal como hemos podido apreciar en el ejemplo, que siempre funde más rápido aquel fusible que posee el menor calibre. Esto tiene una gran importancia en instalaciones con muchas ramificaciones, ya que ante un cortocircuito se consigue separar rápidamente de la red solamente la zona afectada y, además, en el tiempo más breve posible. Además no se perturba innecesariamente el servicio de energía al resto de los consumidores.

Ejemplo: 5.2

La potencia máxima que se prevé para la electrificación de un vivienda es de 5.750 W. Determinar el cartucho fusible necesario para la protección del contador y de la derivación individual si la tensión de suministro es de 230 V.

$$\text{Solución: } I = \frac{P}{V} = \frac{5.750}{230} = 25 \text{ A}$$

Si consultamos la gama de cartuchos fusibles comerciales de la Figura 5.10, el calibre del fusible que más se acerca es el de 25 A. Aunque si no queremos fusiones tempestivas podríamos seleccionar un calibre de 32 o 40 A, siempre y cuando no exista antes una protección de menos calibre.

Los fusibles resultan muy seguros en la protección de cortocircuitos, pero presentan el inconveniente de que son difíciles de reponer. Al fundirse el fusible queda inutilizado, por lo

que hay que encontrar otro de las mismas características y realizar la operación de recambio. En muchas ocasiones esta operación resulta engorrosa y si no se hace por un especialista, puede ser hasta peligrosa. Además, los fusibles reaccionan muy lentamente ante las sobrecargas. Por ejemplo, un fusible de 10 amperios tarda 2 minutos en fundirse cuando se le somete a un paso de corriente de sobrecarga de 20 amperios, según las curvas de la Figura 5.11. En ciertas aplicaciones este tiempo puede ser suficiente para destruir alguna parte vulnerable de la instalación.

5.3.5 Los interruptores automáticos

Los interruptores automáticos, también conocidos con el nombre de disyuntores, están sustituyendo en muchas aplicaciones a los fusibles, ya que protegen bien contra los cortocircuitos y actúan ante las sobrecargas más rápido y de una forma más selectiva. Así, por ejemplo, en las viviendas se instala un cuadro de mando y protección con varios interruptores automáticos. Cada uno de estos dispositivos protege de las sobrecargas y cortocircuitos a cada uno de los circuitos independientes de la vivienda. En la Figura 5.12 se muestra el aspecto de una gama comercial de interruptores automáticos, junto con sus características más relevantes.

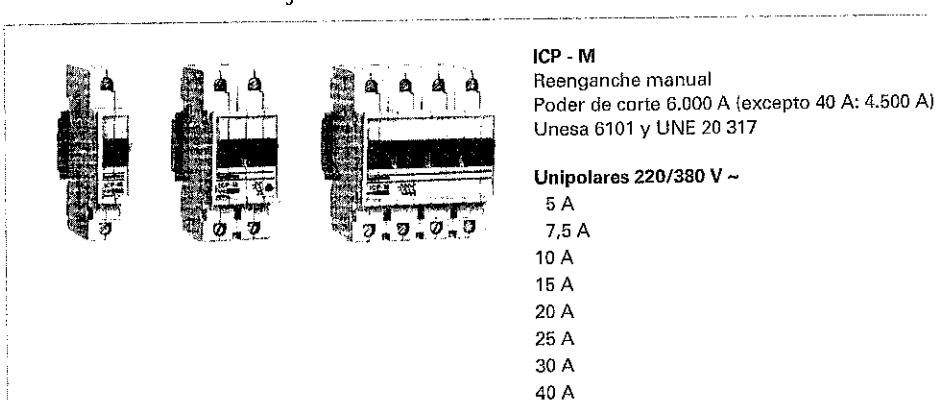


Figura 5.12. Gama comercial e interruptores automáticos calibrados en amperios.

Así, por ejemplo, en una vivienda con un nivel de electrificación básico, el número de circuitos que hay que proteger es 5: un pequeño interruptor automático de 10 A para la protección del circuito de puntos de iluminación; uno de 16 A para el circuito de tomas de corriente de uso general y frigorífico; uno de 25 A para el circuito de cocina y horno; uno de 20 A para el circuito de lavadora, lavavajillas y termo eléctrico y uno de 16 A para el circuito de tomas de corriente de los cuartos de baño, así como para las bases auxiliares del cuarto de cocina (Figura 5.13).

Los interruptores automáticos tienen la ventaja de que una vez que han abierto el circuito por sobrecarga o cortocircuito se pueden reponer manualmente con rapidez (una vez que se haya reparado la causa del fallo) y sin necesidad de utilizar recambios, como ocurre en el caso de los fusibles.

Al igual que los fusibles, los interruptores automáticos se fabrican calibrados en amperios. El calibre nos indica los amperios que pueden pasar por el interruptor de una forma permanente sin que éste abra el circuito; superada esta intensidad, el interruptor realiza la apertura del circuito. El tiempo de respuesta dependerá de las veces que se supere la intensi-

dad nominal del mismo. Para intensidades de sobrecargas este tiempo puede ser desde unos pocos segundos a unos pocos

minutos; para intensidades de cortocircuito la respuesta es mucho más rápida, del orden de milésimas de segundo.

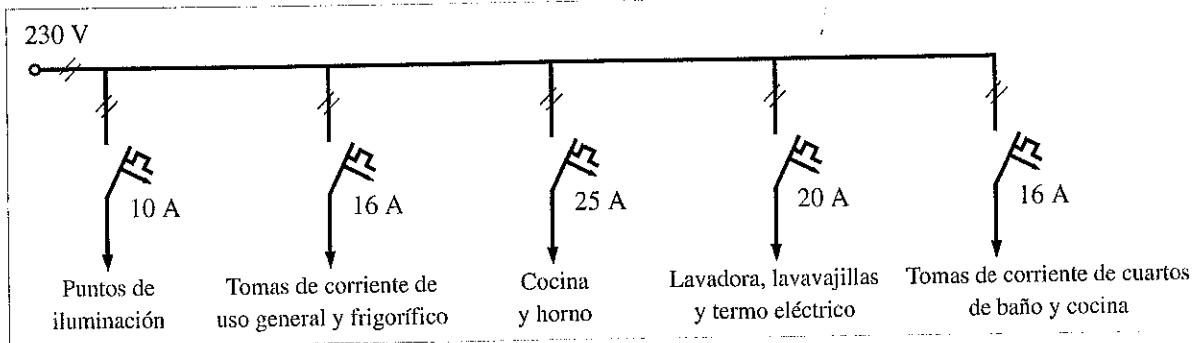


Figura 5.13. Interruptores automáticos protectores de los circuitos independientes de una vivienda de grado de electrificación elevada.

En la Figura 5.14 se muestra, como ejemplo, el aspecto de las curvas de disparo de los interruptores automáticos.

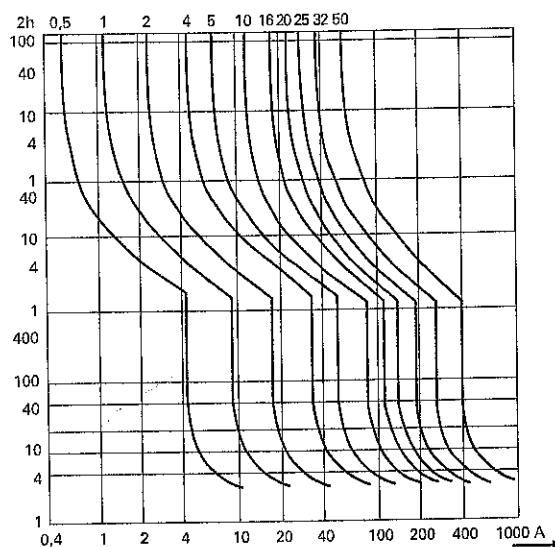


Figura 5.14. Curvas de disparo de una gama comercial de interruptores automáticos.

Los diferentes calibres de los interruptores automáticos también son selectivos.

5.3.6 Funcionamiento de un interruptor automático

El interruptor automático está compuesto por dos dispositivos de protección diferentes: el relé magnético y el relé térmico. Estos dos elementos están conectados en serie con el circuito a proteger, por lo que toda la corriente pasa por ambos.

Relé magnético (Figura 5.15): Se encarga de la protección de los cortocircuitos. Está constituido básicamente por una bobina de poca resistencia eléctrica. En su interior hay un núcleo de hierro que en posición de reposo se encuentra separado de su centro. Mientras la intensidad de corriente que atraviesa la bobina sea la nominal el interruptor permanece cerrado.

Cuando la intensidad crece rápidamente, hasta valores de cortocircuito, la bobina crea un campo magnético suficientemente fuerte como para succionar el núcleo móvil que, a su vez, provoca la apertura del interruptor.

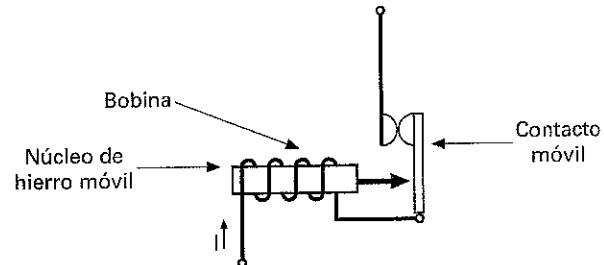


Figura 5.15. Relé magnético.

Relé térmico (Figura. 5.16): Se encarga de la protección de las sobrecargas. La corriente se hace pasar por un elemento bimetálico similar al de un termostato. Cuando la intensidad se eleva a valores considerados de sobrecarga, la lámina bimetálica se calienta por efecto Joule, deformándose y actuando sobre el sistema de apertura del interruptor.

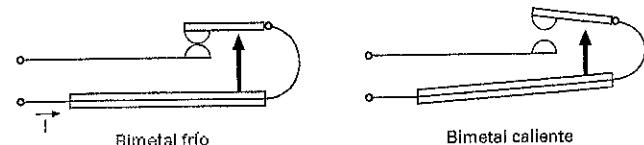
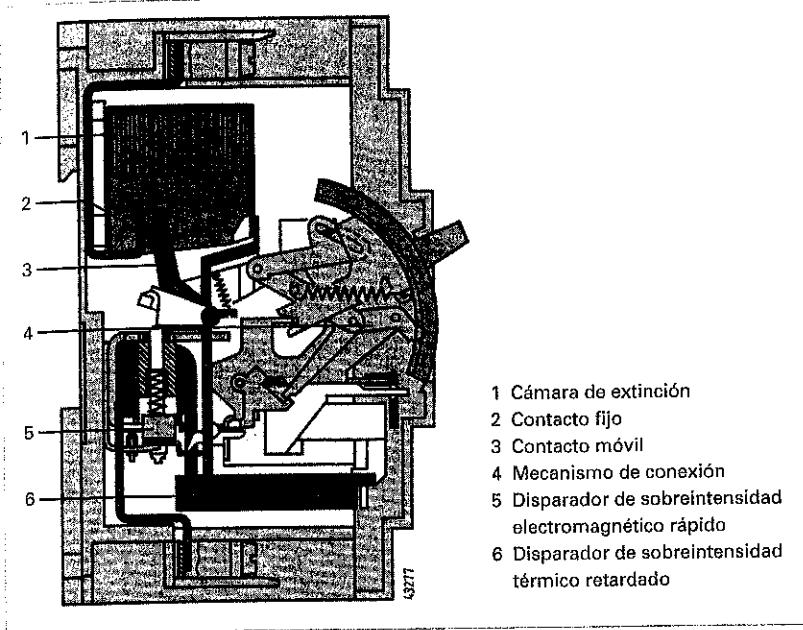


Figura 5.16. Relé térmico.

En la Figura 5.17 se muestra el aspecto interno de un interruptor automático (también llamado interruptor magnetotérmico), donde se incluye el relé magnético y el térmico conectados en serie.

El relé térmico garantiza la protección de las sobrecargas mucho mejor que el fusible. Así, por ejemplo un automático de 10 amperios tardaría 15 segundos en cortar el circuito cuando se dé una sobrecarga de 20 amperios, según las curvas de la Figura 5.14. Recordar que el fusible tardaba en esta misma situación 2 minutos.



5.3.7 Los motores pueden producir sobrecargas en su funcionamiento

Cuando un motor trabaja por encima de sus valores nominales se dice que está sometido a una sobrecarga. En otras palabras, cuando nosotros exigimos a un motor que arrastre una carga mecánica más alta que la nominal, éste lo hace a costa de absorber más intensidad de la red. Estas sobrecargas aumentan la temperatura de los bobinados del motor y si no se

cortan en un tiempo prudencial destruyen a los mismos (el aislante de los conductores de las bobinas es una especie de barniz que se destruye con facilidad a una cierta temperatura).

Tomemos, por ejemplo, el motor de un ascensor. Supongamos que el ascensor está preparado para mover a cuatro personas y sin embargo, se suben seis y, además pesadas. El motor que mueve el ascensor sigue funcionando, pero lo hace de una forma forzada y a costa de absorber una mayor intensidad de corriente de la red. La única forma de cortar esta sobrecarga, antes de que el motor se sobrecaliente e incluso llegue a quemarse, es incorporando en el circuito un relé térmico especial para la protección de motores (Figura 5.17).

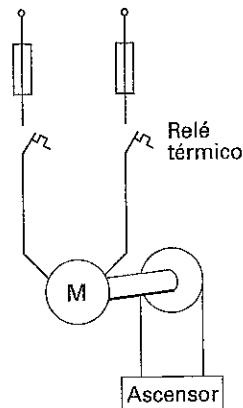


Figura 5.18. Relé térmico protegiendo un motor contra sobrecargas.

Actividades

1. Consigue catálogos comerciales sobre elementos de caldeo (resistencias calefactoras para hornos, cocinas, estufas, etc.), cocinas, hornos, sistemas de calefacción eléctrica, termos eléctricos, etc.; analiza sus características técnicas y su campo de aplicación.
2. Consigue catálogos comerciales sobre fusibles, interruptores automáticos y relés térmicos, analiza sus características técnicas y su campo de aplicación.
3. Con esta actividad vamos a comprobar que los motores no trabajan siempre a la misma potencia. Para llevártela a cabo necesitaremos un motor monofásico, un amperímetro, un vatímetro y un freno, por ejemplo, de polvo magnético, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 5.19. Con ayuda del profesor, arranca el motor y somételo a diferentes pares de frenado. Anota los resultados obtenidos de las diferentes lecturas de los aparatos de medida.

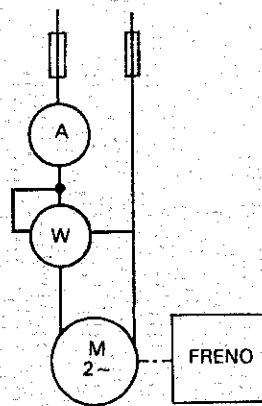


Figura 5.19. Comprobación práctica de los diferentes regímenes de trabajo de un motor.

Habrá podido comprobar, que:

- El motor cuando arranca absorbe una intensidad de corriente muy elevada, que se va suavizando cuando se alcanzan las revoluciones nominales del mismo.
- Estando el freno desactivado el motor no arrastra carga alguna, exceptuando la suya propia, por lo que *trabaja en vacío* y tanto la intensidad de corriente como la potencia a la que trabaja son inferiores a las nominales (las características nominales aparecen indicadas en la placa de características del motor).
- Según se va sometiendo al motor a pares de frenado crecientes (*trabajo en carga*), la intensidad y la potencia van aumentando, pudiendo superar, incluso, valores muy superiores a los nominales (*sobrecarga*).

Una vez analizado el funcionamiento del motor para diferentes regímenes de carga, alimenta el motor a través de un relé térmico regulado para interrumpir el circuito a la intensidad nominal del motor. Seguidamente arranca el motor y mediante el freno somételo a diferentes regímenes de carga hasta conseguir el disparo del térmico. Ahora aumenta la intensidad de disparo del relé térmico y repite el ensayo. Anota los resultados obtenidos y compáralos.

4. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnica>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.)

Autoevaluación

- 1) ¿Cómo se regula, habitualmente, la temperatura de los elementos de caldeo?
 - Con el termostato
 - Conectando resistencias en serie
 - Con el termopar
- 2) Indica las ventajas de la utilización de los interruptores automáticos.
 - Protegen adecuadamente en cortocircuitos y sobrecargas
- 3) Determinar el calibre del cartucho fusible necesario para la protección de cortocircuitos de un horno de 2.000 W a 400 V.
- 4) Teniendo en cuenta que la tensión de uso doméstico es 230 V, averigua la potencia que se puede conectar en los diferentes circuitos de una vivienda de grado básico sin que actúen los interruptores automáticos.

Circuitos Serie, Paralelo y Mixto

Introducción

El montaje de receptores en serie y paralelo ocupa un lugar especial dentro de la Electrotecnia. El cálculo de las magnitudes eléctricas que se dan en los circuitos, como tensión, intensidad, resistencia y potencia, depende de la forma en que están acoplados los receptores.

Por lo general, en la industria y en las viviendas, los receptores se instalan en paralelo. No obstante, en muchas ocasiones aparecen partes de la instalación que quedan interconectadas en serie, por lo que es muy importante realizar también un estudio detallado de esta forma de conexión.

Contenido

- Resolución de circuitos conectados en serie, paralelo y mixto.

Objetivos

- Distinguir entre acoplamiento en serie y en paralelo.
- Realizar los cálculos precisos para resolver un circuito eléctrico con varias cargas conectadas entre sí.
- Medir las magnitudes en un circuito serie paralelo y mixtos e interpretar y relacionar sus resultados.
- Explicar cualitativamente los fenómenos derivados de una alteración en un elemento de un circuito eléctrico sencillo y describir las variaciones previstas en los valores de tensión y corriente.

6.1 Acoplamiento de receptores en serie

Acoplar varios receptores en serie consiste en ir conectando el terminal de salida de uno con el de entrada del otro, sucesivamente.

En el esquema de la Figura 6.1 se han representado tres resistencias (R_1 , R_2 , R_3) conectadas en serie. Al cerrar el interruptor, el conjunto de estas tres resistencias quedará sometido a la tensión V del generador, lo que hará que surja una corriente eléctrica I , que se establecerá por todas las resistencias por igual, provocando en cada una de ellas las tensiones V_{AB} , V_{BC} y V_{CD} , respectivamente. De tal manera que la suma de dichas tensiones es igual a la aplicada al conjunto.

$$V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$$

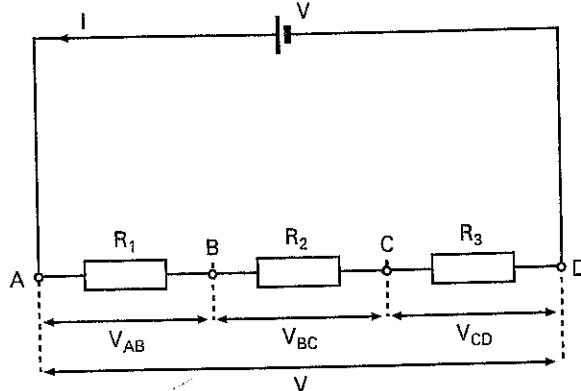


Figura 6.1. Circuito formado por tres resistencias en serie.

¿Por qué la intensidad que atraviesa todas las resistencias es la misma?

La corriente eléctrica es un flujo de electrones que, en este caso, se establece por el generador, el conductor, y las tres resistencias. Como los electrones no se quedan acumulados en ningún punto del circuito, los mismos que entran por el terminal de una resistencia, salen por otro terminal de la misma, para a continuación, entrar por el terminal de la siguiente resistencia, y así sucesivamente.

¿Por qué se reparte la tensión entre las resistencias?

La tensión que aparece entre dos puntos de un circuito surge gracias a la diferencia de cargas que existe entre los mismos. Sabemos que esta diferencia de cargas es la que produce la fuerza que impulsa a moverse a los electrones de un punto a otro del circuito. En un circuito serie la fuerza que provoca la tensión del conjunto irá perdiendo su efecto al realizar sucesivos trabajos en los receptores conectados en serie, y producirá lo que se conoce como caída de tensión en cada uno de los mismos. Lógicamente, cabe pensar que al ser igual la corriente para todos los receptores, necesitarán más fuerza de impulsión (más tensión) aquéllos que tengan mayor resistencia eléctrica.

¿Cómo se calculan estas caídas de tensión?

De la ley de Ohm tenemos que: $V = R \cdot I$

***Nota importante:** La ley de Ohm siempre se aplica entre dos puntos concretos del circuito. Así, por ejemplo, para determinar el valor de la tensión V_{AB} , habrá que aplicar esta ley entre los puntos A y B. Como entre estos puntos la resistencia es R_1 y la corriente I , tendremos que:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I$$

Por la misma razón: $V_{BC} = R_2 \cdot I$

$$V_{CD} = R_3 \cdot I$$

Por otro lado, como $V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$ y sustituyendo los valores de V_{AB} , V_{BC} , y V_{CD} en esta ecuación, nos queda la siguiente expresión:

$V = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + R_3 \cdot I$, operando: $V = (R_1 + R_2 + R_3) \cdot I$; despejando I :

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (\text{I})$$

Esta expresión indica que para calcular la intensidad que se establece en un circuito de resistencias en serie, basta con dividir la tensión total aplicada al circuito entre la suma de resistencias conectadas en serie.

Resistencia total o equivalente (R_T): se denomina así a la resistencia que produce los mismos efectos que todo el conjunto de resistencias (Figura 6.2).

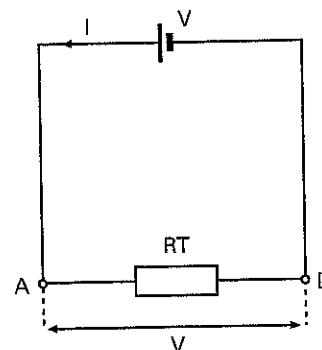


Figura 6.2. Resistencia total o equivalente.

En el circuito equivalente se cumple la ley de Ohm teniendo en cuenta toda la tensión y toda la resistencia:

$$\text{Luego: } I = \frac{V}{R_T} \quad (\text{II})$$

Si comparamos la expresión (I) y la (II) podemos deducir que la resistencia total o equivalente es igual a la suma de las resistencias de cada uno de los receptores:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

Potencia eléctrica de cada receptor: Se aplica la expresión general de potencia eléctrica $P = V \cdot I$, teniendo en cuenta que, al igual que hicimos al aplicar la ley de Ohm, siempre

se hace sobre los dos puntos concretos del circuito donde queremos calcular la potencia. De esta forma, tenemos que:

$$P_1 = V_{AB} \cdot I; \quad P_2 = V_{BC} \cdot I; \quad P_3 = V_{CD} \cdot I$$

La potencia total la calculamos sumando cada una de las potencias parciales:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

O empleando la expresión de potencia y aplicando la tensión total aplicada:

$$P_T = V \cdot I$$

Ejemplo: 6.1

Se conectan a una batería de acumuladores de 24 V dos resistencias en serie de 20Ω , 10Ω , respectivamente (Figura 6.3). Se quiere determinar: la intensidad que recorre el circuito, la tensión a la que queda sometida cada resistencia, la potencia de cada una de las resistencias y la potencia total del circuito.

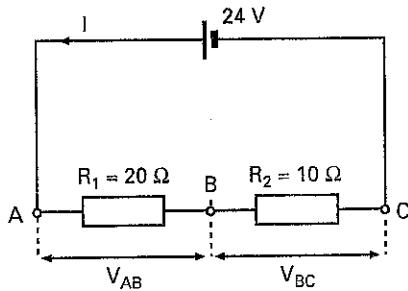


Figura 6.3

Solución: Primero, calculamos la resistencia total:

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots = 30\Omega$$

La intensidad será entonces:

$$I = \frac{V}{R_T} = \dots = 0,8\text{ A}$$

La tensión a que queda sometida cada resistencia, es:

$$V_{AB} = R_1 \cdot I = \dots = 16\text{ V}$$

$$V_{BC} = \dots = \dots = 8\text{ V}$$

Comprueba la igualdad:

$$V = V_{AB} + V_{BC} = \dots = 24\text{ V}$$

La potencia de cada resistencia, es:

$$P_1 = V_{AB} \cdot I = \dots = 12,8\text{ W}$$

$$P_2 = \dots = \dots = 6,4\text{ W}$$

La potencia total, es:

$$P_T = V \cdot I = 24 \cdot 0,8 = 19,2\text{ W}$$

Comprueba la igualdad:

$$P_T = P_1 + P_2 = \dots = 19,2\text{ W}$$

Ejemplo: 6.2

Se desea aprovechar unas lámparas de 110 V / 40 W para conectarlas a una red de 220 V, ¿Cuántas lámparas será necesario montar en serie? ¿Qué intensidad recorrerá el circuito? ¿Cuál será la potencia total consumida por el conjunto de lámparas? ¿Cuál será la resistencia de cada lámpara y la equivalente al conjunto de las mismas?

Solución: Como todas las lámparas son iguales y de la misma tensión, el número que hay que conectar en serie será (Figura 6.4):

$$\frac{220\text{ V}}{110\text{ V}} = 2 \text{ lámparas}$$

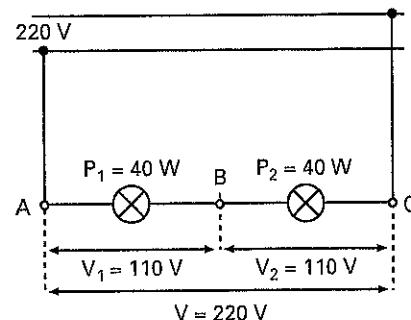


Figura 6.4

$$\text{La potencia total será: } P_T = 2 \cdot 40 = 80\text{ W}$$

La intensidad la podemos calcular así: $P_T = V \cdot I$, despejando:

$$I = \frac{P_T}{V} = \frac{80}{220} = 0,36\text{ A}$$

Como todas las lámparas son iguales, sus resistencias también lo serán.

$$R_1 = \frac{V}{I} = \frac{110}{0,36} = 305\Omega$$

$$R_T = 305 + 305 = 610\Omega$$

Ejemplo: 6.3

Para que una lámpara incandescente de 125 V / 40 W no se funda al conectarla a una red de 220 V se le conecta una resistencia en serie. Calcular el valor óhmico de esta resistencia, así como su potencia de trabajo.

Solución: Lo más importante para resolver este tipo de problemas es dibujar un esquema eléctrico donde se puedan ver las diferentes magnitudes del circuito eléctrico, como, por ejemplo, el que se muestra en al Figura 6.5.

Se puede deducir fácilmente que la tensión a que debe quedar la resistencia es $V_{AB} = 220 - 125 = 95\text{ V}$.

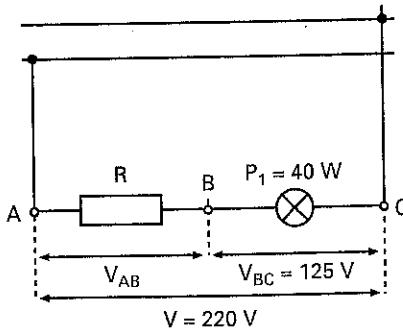


Figura 6.5

Aplicando la expresión de la potencia entre los bornes de la lámpara (puntos BC) determinamos la intensidad del circuito:

$$I = \frac{P_L}{V_{BC}} = \frac{40}{125} = 0,32 \text{ A}$$

Si aplicamos ahora la ley de Ohm entre los extremos de la resistencia (puntos AB) calculamos su valor ohmico.

$$R = \frac{V_{AB}}{I} = \frac{95}{0,32} = 297 \Omega$$

La potencia de esta resistencia es $P = V_{AB} \cdot I = 95 \cdot 0,32 = 30 \text{ W}$

Es importante tener en cuenta este último dato, ya que nos indica que a la vez que la resistencia provoca una caída de tensión de 95 V, lo hace a costa de producir un consumo de 30 W, que se disipa en forma de calor como una potencia perdida.

6.1.1 Aplicaciones prácticas del acoplamiento en serie

En algunas instalaciones de iluminación, como por ejemplo las luces de un árbol de navidad, se conectan las lámparas en serie. El principal inconveniente que se presenta es que cuando se funde una lámpara el circuito se interrumpe y, por tanto, dejan de lucir todas las demás.

Otra aplicación consiste en la construcción de "reostatos". Éstos son resistencias variables que al ser acopladas en serie con un receptor provocan una caída de tensión que se modifica al variar la resistencia del reostato, consiguiendo así regular la intensidad, tensión y potencia de dicho receptor (Figura 6.6).

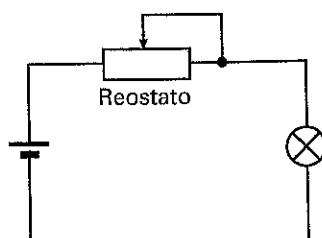


Figura 6.6. Al colocar una resistencia variable en serie con un receptor se consigue regular la intensidad, tensión y potencia del mismo.

Ejemplo: 6.4

Para regular la intensidad que recorre un receptor eléctrico de 10 ohmios de resistencia se conecta en serie con él un reostato. Determinar los valores ohmicos que habrá de tener dicho reostato para conseguir que la intensidad de corriente esté entre 1 y 10 A al aplicar al conjunto una tensión de 220 V.

Solución: Calcularemos primero la resistencia total del circuito serie formado por la resistencia R del receptor y R_r del reostato para que la corriente sea de 1 A al aplicar 220 V:

$$I = \frac{V}{R_T}, \text{ despejando } R_T = \frac{V}{I} = \frac{220}{1} = 220 \Omega$$

$$\text{Como } R_T = R + R_r, \text{ despejando } R_r = R_T - R = 220 - 10 = 210 \Omega$$

Para la corriente de 10 A tendremos que:

$$R_T = \frac{220}{10} = 22 \Omega \quad R_r = 22 - 10 = 12 \Omega$$

Por lo que el reostato deberá regular su resistencia entre 12 y 210 Ω.

La tensión y potencia que se dan en el receptor R entre estos dos valores será:

(a) Para I = 1 A

$$V_R = R \cdot I = 10 \cdot 1 = 10 \text{ V}$$

$$P_R = V_R \cdot I = 10 \cdot 1 = 10 \text{ W}$$

(b) Para I = 10 A

$$V_R = R \cdot I = 10 \cdot 10 = 100 \text{ V}$$

$$P_R = V_R \cdot I = 100 \cdot 10 = 1.000 \text{ W}$$

Por otro lado, al pasar corriente por el reostato éste produce una potencia P, que se pierde en forma de calor, y que será:

$$(a) \text{ Para } I = 1 \text{ A: } P_r = R_r \cdot I^2 = 210 \cdot 1^2 = 210 \text{ W}$$

$$(b) \text{ Para } I = 10 \text{ A: } P_r = R_r \cdot I^2 = 12 \cdot 10^2 = 1.200 \text{ W}$$

De este ejemplo se puede deducir que el reostato no es muy buena solución para regular corrientes de carga considerables, dado la elevada potencia perdida que se desarrolla en los mismos. En la práctica, hoy en día sólo se emplean reostatos o resistencias variables en aquellos circuitos en que las corrientes son muy pequeñas (del orden de algunos miliamperios), como es el caso de los potenciómetros, resistencias ajustables, etc, en aplicaciones de circuitos electrónicos. Las nuevas tecnologías han encontrado medios más eficaces de regulación a base de semiconductores.

6.2 Acoplamiento de receptores en paralelo

Acoplar varios receptores en paralelo (o derivación) es conectar los terminales de dichos terminales entre sí, tal como se muestra en la Figura 6.7.

En el esquema de la Figura 6.7 las resistencias están conectadas a los mismos puntos A y B. El montaje de receptores en paralelo se caracteriza porque todos ellos están sometidos a la misma tensión.

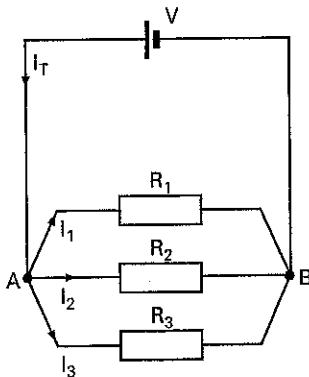


Figura 6.7. Esquema de conexión de tres resistencias acopladas en paralelo.

El generador suministra una corriente I_T que se reparte por cada una de las resistencias. I_1 por R_1 , I_2 por R_2 e I_3 por R_3 . Cumpliéndose que la corriente suministrada al circuito (I_T) es igual a la suma de corrientes (I_1 , I_2 , I_3) que fluyen por cada uno de los receptores conectados en paralelo.

La razón de que se cumpla esta expresión es debido a que los electrones que entran en el nudo (A) no quedan acumulados en él, por lo que toda la intensidad I_T que entra al nudo tiene que salir, también de él.

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

Para calcular las intensidades I_1 , I_2 e I_3 basta con aplicar la ley de Ohm entre los puntos A y B y en cada una de las resistencias correspondientes.

$$I_1 = \frac{V}{R_1} \quad I_2 = \frac{V}{R_2} \quad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

¿Cómo se determina la resistencia total o equivalente?

Sabemos que $I_T = I_1 + I_2 + I_3$; sustituyendo en esta expresión los valores de las intensidades parciales por su igualdad, tenemos que:

$$I_T = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} \text{ y sacando factor común a } V:$$

$$I_T = V \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (\text{I})$$

Por otro lado, sabemos que para calcular la corriente eléctrica que suministra el generador al conjunto del circuito, tendremos que tener en cuenta la resistencia equivalente (R_T), que es la que produce los mismos efectos que todas las resistencias acopladas en paralelo.

$$I_T = \frac{V}{R_T} \quad (\text{II}),$$

Si ahora comparamos las expresiones I y II, podemos llegar a la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \text{ y despejando:}$$

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

Para un número n de resistencias la expresión quedaría así:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

Para calcular las potencias se opera como ya conocemos:

$$P_1 = V \cdot I_1; \quad P_2 = V \cdot I_2; \quad P_3 = V \cdot I_3; \quad P_T = V \cdot I_T \text{ o } P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

Ejemplo: 6.5

A una pila de 9 voltios se le conectan dos resistencias en paralelo de 6 y 2 Ω , respectivamente. Calcular: a) la resistencia total; b) la intensidad de cada resistencia y del conjunto; c) la potencia de cada una, así como la total cedida por la pila (Figura. 6.8).

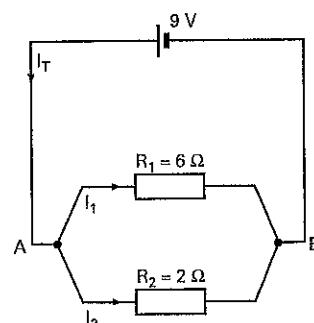


Figura 6.8.

Solución: a)

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{2}} = \frac{1}{\frac{1+3}{6}} = \frac{6}{4} = 1,5 \Omega$$

*Nota: Para sumar las fracciones $\frac{1}{6} + \frac{1}{2}$ se las ha reducido al mismo denominador.

Es importante señalar que la resistencia total o equivalente da como resultado un valor inferior a la más pequeña de las resistencias conectadas en paralelo. Este resultado es el esperado, ya que cuantos más circuitos derivados existan, habrá también más caminos por donde pueda pasar la corriente eléctrica y, por tanto, menos dificultad para el establecimiento de la intensidad total.

$$\text{b) } I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{9}{6} = 1,5 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \dots = 4,5 \text{ A}$$

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{9}{1,5} = 6 \text{ A}$$

Comprueba si el resultado obtenido al calcular la intensidad total es el mismo que sumando las intensidades:

$$I_T = I_1 + I_2 = \dots + \dots = 6 \text{ A}$$

$$\text{c) } P_1 = V \cdot I_1 = 9 \cdot 1,5 = 13,5 \text{ W}$$

$$P_2 = \dots = \dots = 40,5 \text{ W}$$

$$P_T = V \cdot I_T = 9 \cdot 6 = 54 \text{ W}$$

Comprueba si se obtiene el mismo resultado empleando la expresión:

$$P_T = P_1 + P_2 = \dots + \dots = 54 \text{ W}$$

Ejemplo: 6.6

Una línea eléctrica de 230 V alimenta a los siguientes receptores: una lámpara incandescente de 60 W, una cocina eléctrica de 3 KW y una estufa de 1 KW (Figura 6.9). Calcular: a) la intensidad que absorbe cada receptor de la red; b) resistencia de cada receptor; c) resistencia total.

Solución:

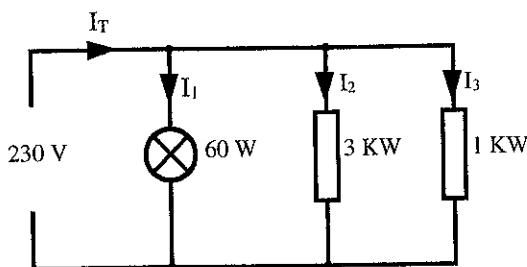


Figura 6.9.

a) Como todos los receptores están sometidos a la misma tensión se trata de un montaje en paralelo.

Como conocemos la potencia de cada receptor y la tensión a la que están sometidos, es fácil calcular la intensidad de cada uno.

$$I_1 = \frac{P_1}{V} = \frac{60}{230} = 0,26 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{P_2}{V} = \dots = 13,04 \text{ A}, \quad I_3 = \dots = \dots = 4,35 \text{ A}$$

La intensidad total la calculamos sumando estas intensidades:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 = 0,26 + \dots + \dots = 17,65 \text{ A}$$

d) Las resistencias de cada uno de los receptores las calculamos aplicando la ley de Ohm en los extremos de cada uno de los mismos:

$$R_1 = \frac{V}{I_1} = \frac{230}{0,26} = 884,6 \Omega;$$

$$R_2 = \frac{V}{I_2} = \dots = 17,6 \Omega; \quad R_3 = \dots = \dots = 52,9 \Omega$$

Como ya conocemos la intensidad total, para calcular la resistencia total o equivalente nos valdremos de la expresión:

$$\text{e) } R_T = \frac{V}{I_T} = \frac{230}{17,65} = 13 \Omega$$

Comprueba el resultado aplicando la expresión:

$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

6.3 Circuitos mixtos

Al igual que es posible conectar receptores en serie o en paralelo, en ocasiones pueden aparecer circuitos con receptores acoplados en serie mezclados con receptores acoplados en paralelo. Estos circuitos son los denominados mixtos. En la Figura 6.10 se muestra un ejemplo de ellos. Aquí las resistencias R_2 y R_3 están claramente conectadas en paralelo entre sí y, a su vez, su resistencia equivalente se conecta en serie con R_1 .

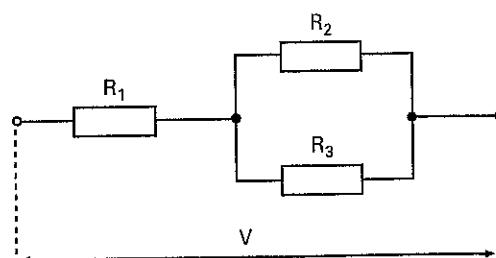


Figura 6.10. Receptores acoplados en forma mixta.

Para resolver este tipo de ejercicios hay que seguir los siguientes pasos:

a) Reducir a su circuito equivalente aquellas partes del circuito que estén claramente acopladas, bien en serie o en paralelo.

b) Dibujar sucesivamente los nuevos circuitos equivalentes obtenidos, indicando las magnitudes conocidas y desconocidas.

c) Calcular las magnitudes desconocidas del circuito desde los circuitos equivalentes más reducidos hasta el circuito original.

Ejemplo: 6.7

Determinar las tensiones, potencias e intensidades de cada una de las resistencias del circuito mixto de la Figura 6.11 si aplicamos entre los extremos AC del circuito una tensión de 24,8 V.

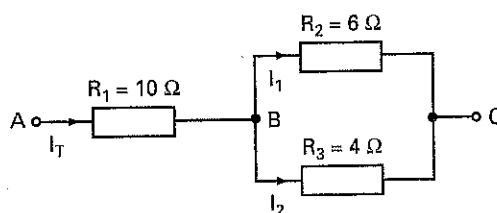


Figura 6.11

Como R_3 y R_2 están claramente conectadas en paralelo, determinaremos su resistencia equivalente que llamamos R_{12} :

$$R_{12} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{6} + \frac{1}{4}} = 2,4 \Omega$$

Ahora dibujamos el circuito equivalente al anterior, en el que se ha sustituido R_2 y R_3 por R_{12} (Figura 6.12). Observa que R_1 y R_{12} están conectados en serie.

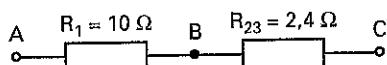


Figura 6.12

$$R_T = R_1 + R_{12} = 10 + 2,4 = 12,4 \Omega$$

Una vez reducidas todas las resistencias a su equivalente R_T , dibujamos el circuito final de la Figura 6.13 y calculamos con él la intensidad total del circuito.

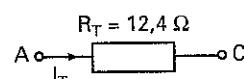


Figura 6.13

$$I_T = \frac{V}{R_T} = \frac{24,8}{12,4} = 2 \text{ A}$$

Aplicando la ley de Ohm en el circuito equivalente de la Figura 6.12 obtenemos las tensiones V_{AB} y V_{BC} :

$$V_{AB} = R_1 \cdot I_T = 10 \cdot 2 = 20 \text{ V}$$

$$V_{BC} = R_{12} \cdot I_T = 2,4 \cdot 2 = 4,8 \text{ V}$$

Una vez obtenidas estas tensiones, podemos calcular las intensidades I_1 e I_2 aplicando la ley de Ohm en el circuito original de la Figura 6.11.

$$I_1 = \frac{V_{BC}}{R_2} = \frac{4,8}{6} = 0,8 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{V_{BC}}{R_3} = \frac{4,8}{4} = 1,2 \text{ A}$$

Por último indicamos la tensión, intensidad y potencia que le corresponde a cada una de las resistencias:

$$P = V \cdot I$$

$$\mathbf{R}_1: (20 \text{ V}); (2 \text{ A}); \quad P_1 = 20 \cdot 2 = 40 \text{ W}$$

$$\mathbf{R}_2: (4,8 \text{ V}); (0,8 \text{ A}); \quad P_2 = 4,8 \cdot 0,8 = 3,84 \text{ W}$$

$$\mathbf{R}_3: (4,8 \text{ V}); (1,2 \text{ A}); \quad P_3 = 4,8 \cdot 1,2 = 5,76 \text{ W}$$

$$\mathbf{R}_T: (24,8 \text{ V}); (2 \text{ A}); \quad P_T = 24,8 \cdot 2 = 49,6 \text{ W}$$

Actividades

1. Consigue dos lámparas de 220 V/60 W y realiza en el laboratorio el montaje que se propone en el esquema eléctrico de la Figura 6.14:

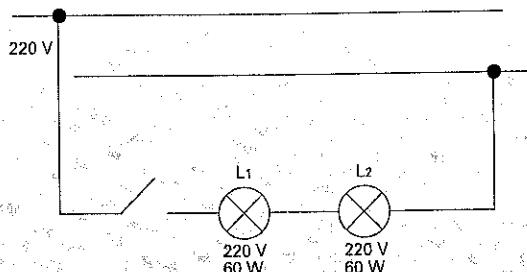


Figura 6.14

Una vez comprobado el funcionamiento del circuito, ¿lucen las lámparas menos ahora que cuando estaba una de ellas conectada a la red de 220 V?

¿Qué ocurre si retiramos una de las lámparas del porta-lámparas?

¿Por qué lucen ahora menos las lámparas?

Al estar conectadas las lámparas en serie aparecen diferentes tensiones en el circuito.

Mide con un voltímetro V_1 , V_2 , y V correspondientes a las tensiones de la lámparas L_1 , L_2 , y tensión total del circuito, así como la intensidad de corriente mediante un amperímetro (Figura 6.15).

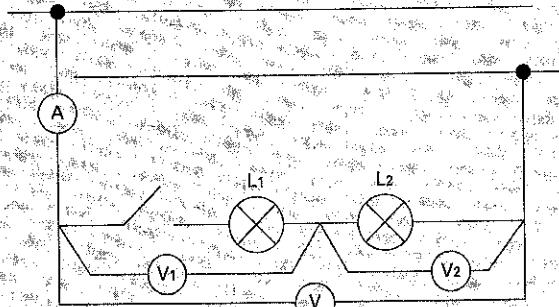


Figura 6.15

¿Es cierto que la tensión total V coincide con la suma de las tensiones V_1 y V_2 de ambas lámparas?

Una vez que ya conocemos la tensión aplicada a cada lámpara y la intensidad que circula por ellas, calcula la potencia consumida por cada una y la total absorbida de la red.

Potencia de la lámpara L_1 : $P_1 = V_1 \cdot I = \dots$ W

Potencia de la lámpara L_2 : $P_2 = V_2 \cdot I = \dots$ W

Potencia total: $P_T = P_1 + P_2 = \dots$ W

Otra forma de calcular la potencia total:

$$P_T = V \cdot I = \dots$$

¿Es la potencia P_1 , absorbida por lámpara L_1 menor que su potencia nominal (60 W)?....

¿Y la de la lámpara L_2 ?

En conclusión, al acoplar las lámparas en serie la tensión se reparte entre las mismas y, en consecuencia, la potencia a la que trabajan se ve también reducida. Por eso éstas lucen menos que si las acoplásemos directamente a la red. Por otro lado, si desconectamos una de las lámparas, la corriente del circuito queda interrumpida, y por tanto la otra deja de funcionar.

Con los datos obtenidos calcula mediante la ley de Ohm la resistencia de cada lámpara y la total.

¿Coincide el valor de la resistencia total calculada con el resultado de sumar R_1 más R_2 ?....

Sustituye las lámparas del circuito montado con anterioridad por otras de 125 V / 60 W y comprueba su funcionamiento conectando la instalación a una red de 220 V.

¿Cómo lucen las lámparas?....

¿Qué ocurriría si conectásemos una sola de estas lámparas a la red de 220 V?....

Toma las mismas medidas que para las lámparas de 220 V y vuelve a calcular y valorar los mismos parámetros.

2. Ahora monta en paralelo una lámpara de 220 V/60 W con una de 220 V/40 W y aliméntalas con una tensión de 220 V, tal como se muestra en el esquema de la Figura 6.16.

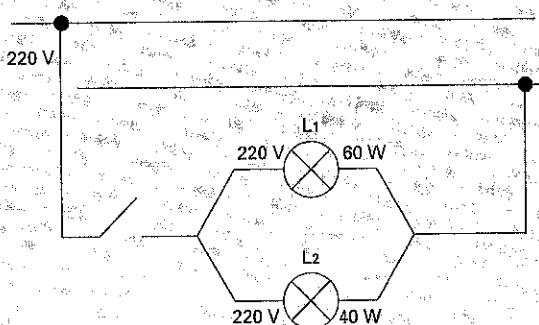


Figura 6.16

Una vez comprobado el funcionamiento del circuito, ¿lucen las lámparas igual que si estuviesen conectadas a una red de 220 V?

¿Qué ocurre si retiramos una de las lámparas del porta-lámparas?

Ahora, siguiendo el esquema de conexiones de la Figura 6.17 mide las tensiones y corrientes de las lámparas y del conjunto. Podrás comprobar que las dos lámparas están sometidas a la misma tensión, que por cada lámpara se establece una intensidad de corriente diferente y que la intensidad total coincide con la suma de las intensidades parciales de cada una de las lámparas.

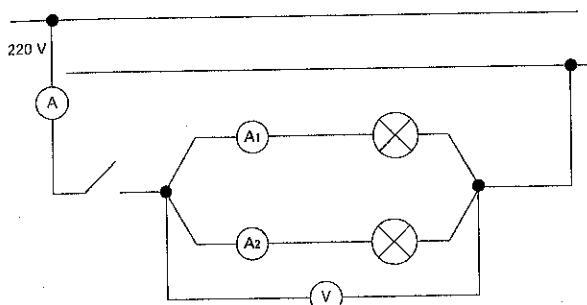


Figura 6.17

Con los datos obtenidos en las medidas determina la potencia de cada lámpara y la del conjunto, comprobando si se cumplen las relaciones estudiadas. Por último, aplicando la ley de Ohm que calcula la resistencia de cada lámpara y la total, comprueba si se cumple la expresión que relaciona las resistencias parciales con la total.

3. Consigue en el laboratorio de Electrotecnia un reostato y conéctalo en serie a una lámpara incandescente. Alimenta al conjunto con tensión, comprobando la regulación obtenida con el reostato. Por último conecta un amperímetro y un voltímetro para medir la tensión y corriente que pasa por la lámpara al realizar el proceso de regulación.
4. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Autoevaluación

- 1) Se conectan en serie tres resistencias de $200\ \Omega$, $140\ \Omega$, y $100\ \Omega$ a una red de 220 V. Determinar la intensidad, tensiones y potencias de cada una, así como la potencia y resistencia total.
- 2) Se conectan tres resistencias en serie de $10\ \Omega$, $5\ \Omega$ y $6\ \Omega$ a una fuente de alimentación. La caída de tensión en la resistencia de $5\ \Omega$ es de 5 V. ¿Cuál es la tensión de la fuente de alimentación?
- 3) La bobina de un electroimán está compuesta por 150 metros de hilo de cobre esmaltado de 1 mm de diámetro. Determinar el valor óhmico de la resistencia que habrá que conectar en serie para que la intensidad de corriente sea de 350 mA cuando se aplique una tensión continua de 12 V.
- 4) Se conectan en serie a una red de 220 V dos calefactores eléctricos con las siguientes características nº. 1: 500 W/220 V, nº. 2: 750 W/220 V. Determinar la resistencia total y de cada uno, la corriente por el circuito, así como la tensión y potencia de funcionamiento de cada uno de ellos.
- 5) Calcular las características que debe tener la resistencia que hay que conectar en serie a un receptor resistivo de características 9 V/10 W para poder conectarlo a una batería de 24 V sin que sufra daños.
- 6) Se conectan tres lámparas en paralelo de resistencias 6, 4 y $12\ \Omega$ a una batería de automóvil de 12 V. Calcular: a) la resistencia y potencia total; b) corrientes parciales y total.

- 7) Una instalación consta de cuatro lámparas, de potencias 25, 40, 60 y 100 W, respectivamente, conectadas en paralelo y alimentadas a 220 V. Determinar la resistencia total y la intensidad total del circuito.

- 8) Dos resistencias en paralelo dan como resultado 3 ohmios. Determinar una sabiendo que la otra vale 12 ohmios.

***Nota:** Este ejercicio se puede resolver aplicando la expresión particular para el caso de sólo dos resistencias conectadas en paralelo:

$$R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

- 9) Se conectan 20 resistencias de $1\ K\Omega$ cada una en paralelo a una fuente de alimentación de 500 voltios. Averiguar: a) resistencia equivalente; b) intensidad por cada resistencia e intensidad total; c) potencia de cada resistencia y potencia total.

***Nota:** Este ejercicio se puede resolver aplicando la expresión particular para el caso de un número n de resistencias iguales de valor R conectadas en paralelo:

$$R_T = \frac{R}{n}$$

- 10) Para poder graduar la potencia de trabajo de un horno eléctrico se han conectado tres resistencias con un conmutador de tres posiciones, tal como se indica en la Figura 6.18. La tensión de alimentación es de 220 V. Averiguar el valor ohmico de cada una de las resistencias para que las potencias en cada uno de los puntos de dicho conmutador sean las siguientes: punto (1), 1.000 W, punto (2), 2.000 W y punto (3), 3.000 W.

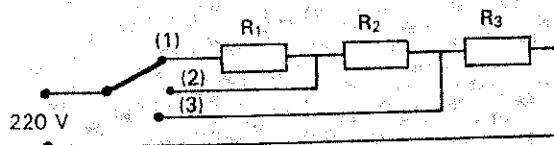


Figura 6.18

- 11) En un circuito serie:

- a) La resistencia equivalente es igual a la suma de las resistencias conectadas en serie
- b) La intensidad es igual para todos los receptores
- c) La tensión es igual para todos los receptores

- 12) En un circuito paralelo:

- a) La resistencia equivalente siempre es inferior a la de cualquier resistencia conectada en paralelo
- b) La intensidad es igual para todos los receptores
- c) La tensión es igual para todos los receptores

- 13) Calcula la resistencia equivalente al circuito de la Figura 6.19, así como la corriente y potencia que cedería una fuente de alimentación de 200 V conectada entre los extremos del mismo.

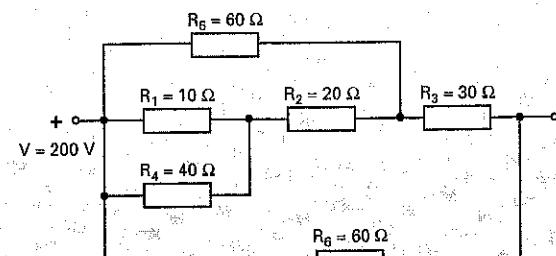


Figura 6.19

- 14) Calcula la tensión, intensidad y potencia de cada una de las resistencias, incluida la total, que aparecen en el circuito de la Figura 6.20.

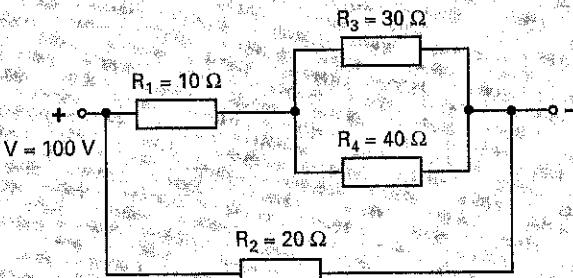


Figura 6.20

Resolución de Circuitos con Varias Mallas

Introducción

Hasta ahora, hemos estudiado métodos de resolución de circuitos eléctricos en los que únicamente existía una red de resistencias. En multitud de aplicaciones nos podemos encontrar con redes complejas, donde se interconectan resistencias con generadores. En estos casos, para llegar a la solución deseada es necesario emplear métodos de resolución específicos, como pueden ser las leyes de Kirchhoff, las transformaciones de un circuito de triángulo a estrella y viceversa, el teorema de superposición y el teorema de Thevenin.

Contenido

- ✓ Leyes de Kirchhoff.
- ✓ Resolución de circuitos mediante transformaciones de triángulo a estrella y viceversa.
- ✓ Teorema de superposición.
- ✓ Teorema de Thevenin.

Objetivos

- ✓ Realizar los cálculos precisos para resolver un circuito eléctrico con varias cargas o varios generadores conectados entre sí.
- ✓ Emplear el método más idóneo para la resolución de un circuito de C.C.
- ✓ Aplicar las leyes de Kirchhoff para la resolución de circuitos con varias mallas en C.C.
- ✓ Utilizar las transformaciones de triángulo a estrella y viceversa para la obtención de la resistencia equivalente de un circuito complejo.
- ✓ Resolver circuitos aplicando los reoremas de superposición y Thevenin.

7.1 Leyes de Kirchhoff

Estas leyes se utilizan para resolver circuitos eléctricos complejos, en los cuales existen interconectados varios generadores y receptores.

En el siguiente ejemplo se muestra un circuito de este tipo:

En el circuito de la Figura 7.1 se han conectado en paralelo dos baterías de acumuladores que suministran energía a una lámpara de 10 ohmios. La batería nº 1 produce una f.e.m. $E_1 = 12 \text{ V}$ con una resistencia interna $r_1 = 0,2 \Omega$. En la batería nº 2, $E_2 = 11 \text{ V}$, $r_2 = 0,1 \Omega$. Calcular la tensión que aparece en bornes de la lámpara, así como la intensidad y potencia de la misma. ¿Qué corriente cede cada una de las baterías? Este problema se puede resolver aplicando adecuadamente las leyes de Kirchhoff.

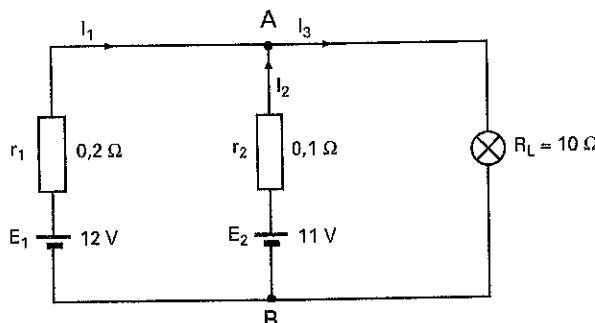


Figura 7.1

I^a ley de Kirchhoff

En cierto modo, esta ley ya la hemos estado aplicando para la resolución de los circuitos en paralelo. Dice así:

En todo circuito eléctrico, la suma de las corrientes que se dirigen hacia un nudo es igual a la suma de las intensidades que se alejan de él.

Un **nudo** es cualquier punto de un circuito donde se conectan más de dos conductores. En el ejemplo mostrado en la Figura 7.1 existen el nudo A y el nudo B.

En el nudo A se cumplirá que (Figura 7.2):

$$I_3 = I_1 + I_2$$

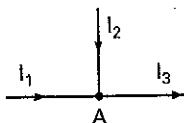


Figura 7.2. Nudo.

2^a ley de Kirchhoff

Esta otra ley también es conocida por todos nosotros, ya que la hemos aplicado en la resolución de circuitos en serie.

En un circuito cerrado la suma algebraica de las fuerzas electromotrices de los generadores es igual a la suma algebraica de las caídas de tensión en los receptores. Dado que tanto las f.e.m. como las caídas de tensión son al fin y al cabo diferencias de potencial, también se podría enunciar esta ley así:

A lo largo de todo camino cerrado o malla, correspondiente a un circuito eléctrico, la suma algebraica de todas las diferencias de potencial es igual a cero.

La única dificultad que encontramos para aplicar de esta última manera la 2^a ley de Kirchhoff es determinar qué diferencias de potencial son positivas respecto a las otras, y así conseguir igualarlas a cero.

Una **malla** es todo camino cerrado de un circuito eléctrico. En nuestro ejemplo se pueden apreciar claramente la malla M₁ y la malla M₂. Las hemos representado en el circuito mediante una flecha curvada que nos indica el recorrido de las mismas (Figura 7.4). La malla M₁ se cierra por la batería de 12 V junto con su resistencia interna de 0,2 ohmios, continúa por la resistencia interna de 0,1 ohmios de la segunda batería para acabar cerrando el circuito por la batería de 11 V. La malla M₂ lo hace por la batería de 11 V y su correspondiente resistencia interna de 0,1 ohmios y se cierra por la resistencia de 10 ohmios de la lámpara.

Antes de aplicar esta segunda ley, conviene establecer una regla de signos que nos indique las polaridades correctas de cada una de las diferencias de potencias que aparecen en cada malla.

Marcamos con una flecha la f.e.m. del generador (la punta de la flecha siempre nos indica el potencial positivo). La intensidad que parte del generador la indicamos con una flecha (sentido convencional de la corriente) del mismo sentido que la f.e.m. (Figura 7.3).

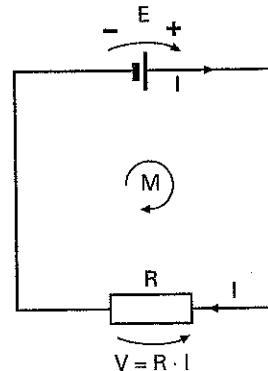


Figura 7.3. Polaridad de las diferencias de potencial en una malla.

Marcamos con otra flecha la caída de tensión en el receptor ($V = RI$); para que el terminal positivo de esta caída de tensión quede situado en la punta de la flecha, su sentido será siempre contrario al de la intensidad que recorre el mismo.

Si ahora aplicamos la 2^a ley de Kirchhoff a la malla formada, según el sentido marcado en la Figura 7.3, tendremos que: la fuerza electromotriz E se manifiesta en el mismo sentido que la malla M, luego será positiva; la caída de tensión RI se manifiesta en sentido contrario al de la malla, luego será negativa. De esta forma tendremos la siguiente ecuación:

$$E - RI = 0, \text{ ecuación que nos indica que, efectivamente: } E = RI$$

¿Cómo se aplican las leyes de Kirchhoff para la resolución de circuitos?

a) Se fijan provisionalmente el sentido de las intensidades de corriente por el circuito (una vez resuelto el sistema de

ecuaciones planteado, conoceremos el verdadero sentido de las mismas), partiendo del principio de que los generadores proporcionan corriente por su terminal positivo (sentido de corriente convencional).

b) La aplicación de la segunda ley requiere fijar previamente y de forma arbitraria, un sentido para recorrer cada una de las mallas. Las f.e.m. y las caídas de tensión se consideran positivas si la flecha que indica su sentido coincide con el marcado por nosotros en la malla, y negativa en el caso contrario.

c) Se aplicará la 1^a ley a todos los nudos del circuito excepto a uno (esto se hace para no escribir ecuaciones repetidas).

d) Se aplica la 2^a ley a tantas mallas o circuitos cerrados como sea necesario para disponer de un sistema de tantas ecuaciones como incógnitas.

Ejemplo: 7.1

Resolveremos ahora el ejemplo presentado al inicio en la Figura 7.1.

En un principio, se ha supuesto que las intensidades I_1 e I_2 parten de los generadores hacia la lámpara (según el sentido convencional) donde se juntan y forman I_3 . Los términos $0,2 I_1$ y $0,1 I_2$ corresponden a las caídas de tensión de los respectivos generadores ($V = r_i I$). El término $10 I_3$ corresponde a la tensión en bornes de la lámpara ($V_L = R \cdot I$) (Figura 7.4).

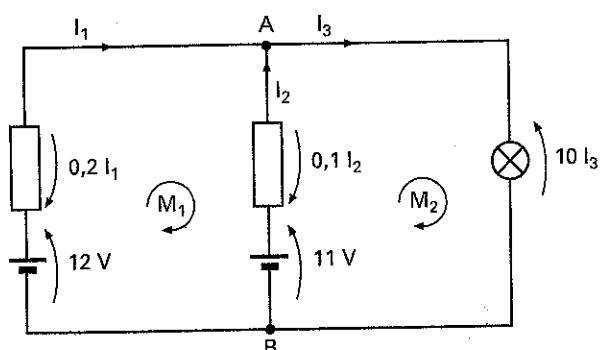


Figura 7.4

$$\text{Nudo A} \quad (1) \quad I_1 + I_2 = I_3$$

$$\text{Malla } M_1 \quad (2) \quad 12 - 0,2 I_1 + 0,1 I_2 - 11 = 0$$

$$\text{Malla } M_2 \quad (3) \quad 11 - 0,1 I_2 - 10 I_3 = 0$$

Al recorrer la malla M_1 , la caída de tensión $0,2 I_1$ y los 11 V del generador n° 2 quedan en sentido contrario a los 12 V del generador n° 1 y a la caída de tensión $0,1 I_2$.

Al recorrer la malla M_2 , la caída de tensión $0,1 I_2$ y la tensión en bornes de la lámpara $10 I_3$ quedan en sentido contrario a los 11 V del generador n° 2.

Ahora sólo nos queda resolver el sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas (I_1 , I_2 e I_3). Para ello, nos valemos de cualquiera de los métodos conocidos: reducción, sustitución e igualación. En nuestro caso sustituiremos los términos de la ecuación (1) en la ecuación (3). De esta forma eliminamos una ecuación y una incógnita:

$$(3) \quad 11 - 0,1 I_2 - 10 (I_1 + I_2) = 0, \text{ simplificando:}$$

$$(3) \quad 11 - 10 I_1 - 10,1 I_2 = 0, \text{ y con la ecuación n}^{\circ} 2:$$

$$(2) \quad 1 - 0,2 I_1 + 0,1 I_2 = 0$$

Al multiplicar la ecuación (2) por 101 y sumar este resultado a la ecuación (3) se elimina I_2 :

$$(3) \quad 11 - 10 I_1 - 10,1 I_2 = 0$$

$$(2) \quad 101 - 2,02 I_1 + 10,1 I_2 = 0$$

$$112 - 30,2 I_1 = 0$$

$$\text{de donde: } I_1 = \frac{112}{30,2} = 3,71 \text{ A}$$

Se sustituye este resultado en la ecuación (2), y se tiene,

$$1 - 0,2 (3,71) + 0,1 I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{0,2(3,71) - 1}{0,1} =$$

- 2,58 A, y en la ecuación (1) obtenemos:

$$I_3 = 3,71 - 2,58 = 1,13 \text{ A}$$

Que la corriente I_2 haya salido negativa nos indica que la batería de acumuladores n° 2 no está aportando energía a la lámpara. Por el contrario, está tomando 2,58 A de la batería n° 1. En este caso, esta corriente sirve para cargar los acumuladores de la n° 2.

La batería n° 1 aporta 1,13 A a la lámpara y 2,58 A a la batería n° 2 que se comporta como si fuese un receptor (recuerda que cuando la corriente queda en sentido contrario al de la tensión se trata de un receptor).

La tensión en bornes de la lámpara y su potencia es:

$$V_{AB} = R_L I_3 = 10 \cdot 1,13 = 11,3 \text{ V}$$

$$P_1 = V_{AB} I_3 = 11,3 \cdot 1,13 = 12,8 \text{ W}$$

Ejemplo: 7.2

Se conectan en serie tres baterías de acumuladores, tal como se muestra en el circuito de la Figura 7.5, para alimentar un horno de 5 ohmios de resistencia. Determinar la tensión en bornes del horno, así como su tensión y potencia.

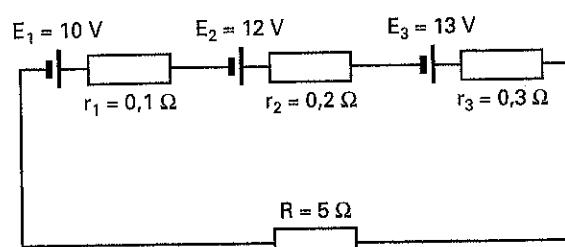


Figura 7.5

Solución: Primero marcamos el sentido de la corriente eléctrica y el de las diferentes d.d.p. del circuito (Figura 7.6). Como no hay más que una malla, la ecuación se compone aplicando la 2º ley de Kirchhoff:

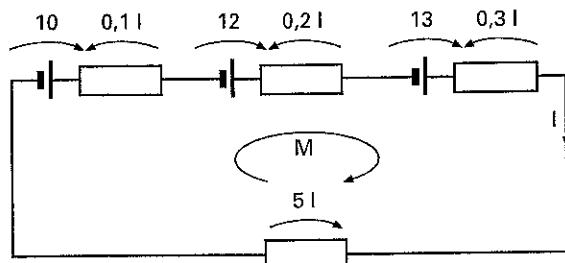


Figura 7.6

$$10 - 0,1 I + 12 - 0,2 I + 13 - 0,3 I - 5 I = 0$$

Agrupando términos:

$$(10 + 12 + 13) - I(0,1 + 0,2 + 0,3 + 5) = 0$$

y despejando, tenemos que: $I = \frac{35}{5,6} = 6,25 \text{ A}$

Tensión en bornes del horno: $V = R I = 5 \cdot 6,25 = 31,25 \text{ V}$

Potencia del horno: $P = V I = 31,25 \cdot 6,25 = 195 \text{ W}$

Ejemplo: 7.3

Se conectan en paralelo tres generadores de 24 V de resistencia interna 0,1 Ω, 0,2 Ω y 0,3 Ω respectivamente. Determinar la corriente que suministra cada generador a una carga de 10 Ω, así como la tensión y la potencia a la que trabaja la misma.

Solución: El circuito que corresponde al planteamiento de este ejemplo es el de la Figura 7.7, y las ecuaciones correspondientes son las que se indican a continuación:

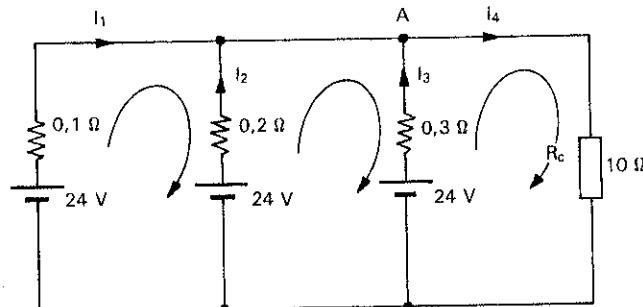


Figura 7.7

$$(1) I_1 + I_2 + I_3 = I_4$$

$$(2) 24 - 0,1 I_1 + 0,2 I_2 - 24 = 0$$

$$(3) 24 - 0,2 I_2 + 0,3 I_3 - 24 = 0$$

$$(4) 24 - 0,3 I_3 - 10 I_4 = 0$$

Al resolver este sistema de ecuaciones hemos obtenido los siguientes resultados:

$$I_1 = 1,29 \text{ A}; I_2 = 0,65 \text{ A}; I_3 = 0,43 \text{ A}; I_4 = 2,37 \text{ A}$$

Siguiendo los mismos pasos que en los ejercicios anteriores obtenemos la tensión y potencia en la resistencia de carga.

$$(V_{AB} = 23,7 \text{ V}; P = 56,2 \text{ W})$$

7.2 Resolución de circuitos mediante transformaciones de triángulo a estrella

En el circuito de la Figura 7.8 se pide encontrar la resistencia equivalente. Como podrás comprobar, no existe ninguna resistencia que esté conectada en serie ni en paralelo con otra. Una forma de resolver este ejercicio sería aplicar las leyes de Kirchhoff. Sin embargo, resulta más sencillo aplicar el método de transformar resistencias conectadas en triángulo a estrella.

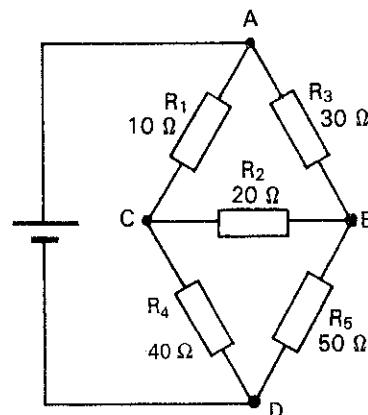


Figura 7.8

Observa cómo las resistencias R_1 , R_2 y R_3 forman un triángulo (Figura 7.9).

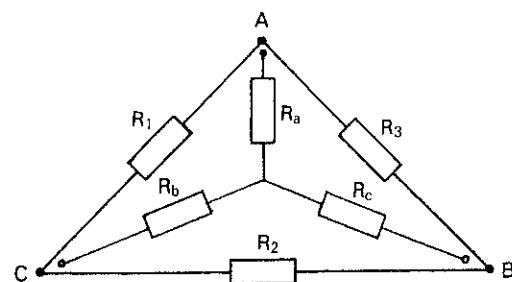


Figura 7.9. Transformación de triángulo a estrella.

Aplicando las leyes de Kirchhoff se pueden obtener las resistencias equivalentes de un circuito equivalente en forma de estrella. Las ecuaciones que corresponden a estas relaciones, son:

$$R_a = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_b = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_c = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

El valor óhmico de las resistencias equivalentes en estrella es igual al producto de las dos resistencias adyacentes del triángulo, dividido entre la suma de las tres resistencias del triángulo.

Aplicando estas ecuaciones al circuito de nuestro ejemplo, tendremos que:

$$R_a = \frac{10 \cdot 30}{10 + 20 + 30} = 5 \Omega$$

$$R_b = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20 + 30} = 3,33 \Omega$$

$$R_c = \frac{20 \cdot 30}{10 + 20 + 30} = 10 \Omega$$

Sustituyendo el circuito triángulo por el estrella nos queda el circuito equivalente de la Figura 7.10.

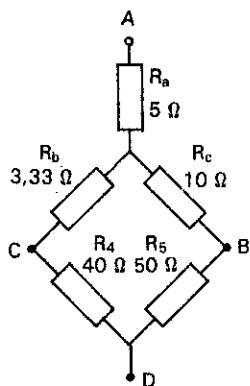


Figura 7.10

Para determinar la resistencia total de éste, vamos reduciendo las resistencias, tal como ya hicimos en los circuitos mixtos (véase las Figuras 7.11, 7.12 y 7.13).

$$R_{4b} = 3,33 + 40 = 43,33 \Omega$$

$$R_{5c} = 10 + 50 = 60 \Omega$$

$$R_p = \frac{43,33 \cdot 60}{43,33 + 60} = 25,2 \Omega$$

La resistencia equivalente será: $R_T = 5 + 25,2 = 30,2 \Omega$

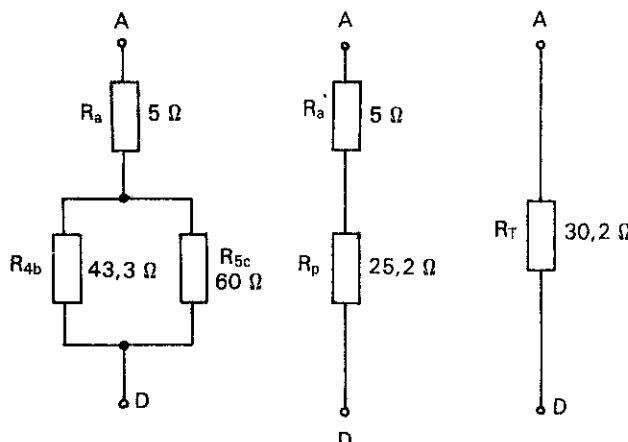


Figura 7.11.

Figura 7.12

Figura 7.13

7.3 Resolución de circuitos mediante transformaciones de estrella a triángulo

Existen ciertos circuitos donde es más interesante transformar una conexión de tres resistencias en estrella a triángulo. En estos casos las ecuaciones que se corresponden a esta transformación son las que se exponen a continuación (Figura 7.14).

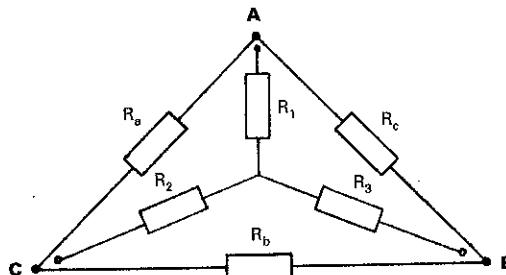


Figura 7.14. Transformación de estrella a triángulo.

$$R_a = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_3}$$

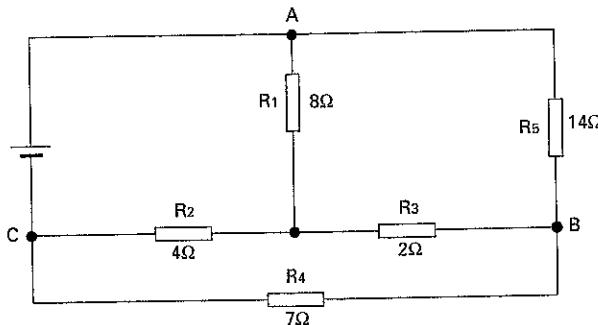
$$R_b = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_1}$$

$$R_c = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}{R_2}$$

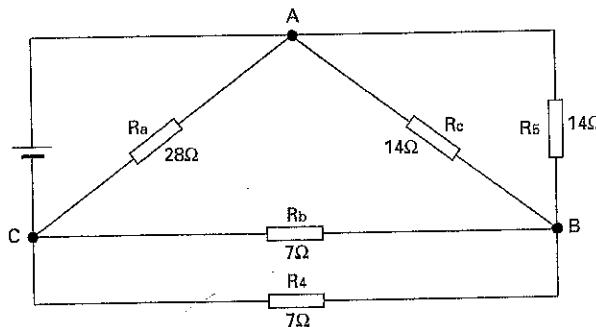
El valor de las resistencias del triángulo es igual a la suma de las resistencias de la estrella multiplicadas de dos en dos y divididos entre la resistencia que se encuentra en el lado opuesto de la estrella.

Ejemplos: 7.4

Determinar la resistencia equivalente del circuito de la Figura 7.15.


Figura 7.15

Se observa claramente que existe una estrella formada por las resistencias R_1 , R_2 y R_3 , que si transformamos a triángulo obtenemos un circuito equivalente más sencillo, como el que se muestra en la Figura 7.16.

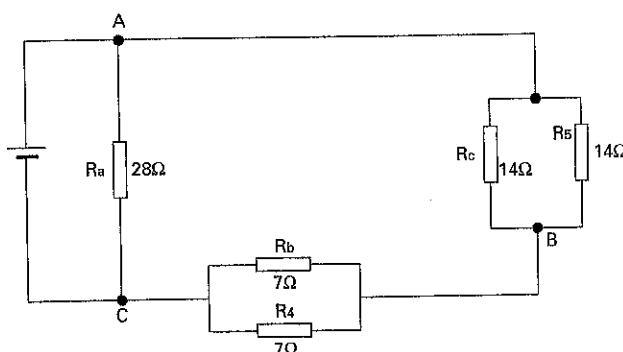

Figura 7.16

Las resistencias equivalentes del triángulo se obtienen aplicando las relaciones indicadas:

$$R_a = \frac{8 \cdot 4 + 4 \cdot 2 + 2 \cdot 8}{2} \quad 28 \Omega$$

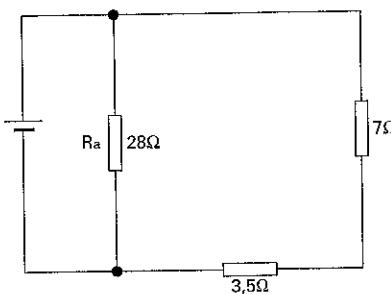
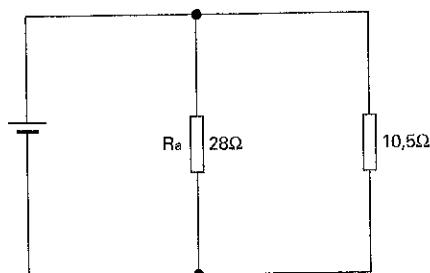
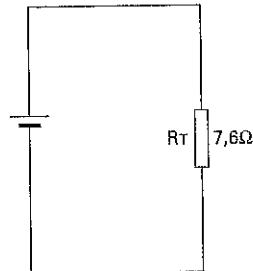
$$R_b = \frac{8 \cdot 4 + 4 \cdot 2 + 2 \cdot 8}{8} \quad 7 \Omega$$

$$R_c = \frac{8 \cdot 4 + 4 \cdot 2 + 2 \cdot 8}{4} \quad 14 \Omega$$


Figura 7.17

Si ordenamos un poco el circuito equivalente de la Figura 7.16 se obtiene el circuito de la Figura 7.17, que ya puedes resolver como un sencillo circuito mixto.

En las Figuras 7.18, 7.19 y 7.20 se dibujan los circuitos equivalentes hasta encontrar la resistencia total.


Figura 7.18

Figura 7.19

Figura 7.20

7.4 Teorema de la superposición

Mediante este teorema se pueden resolver circuitos similares a los que se resuelven mediante las leyes de Kirchhoff. Este teorema nos dice que en un circuito formado por varias fuentes de tensión o de corriente, la tensión o la corriente que se presenta en cualquier componente de dicho circuito es la suma de los efectos producidos por cada una de las fuentes trabajando independientemente. Para poder aplicar este teorema las magnitudes eléctricas deben ser lineales (la corriente debe ser proporcional a la tensión), así como tener en cuenta la polaridad de las mismas.

***Nota:** Se entiende por fuente ideal de tensión a aquella que produce una tensión de salida estable y que no varía con la resistencia de carga (la resistencia interna de una fuente ideal de tensión es cero). Por otro lado, una fuente ideal de

corriente proporciona al circuito una corriente estable que no se modifica para diferentes valores de la resistencia de carga (la resistencia interna de una fuente ideal de corriente es muy elevada).

El proceso de resolución de circuitos mediante el teorema de superposición suele ser el siguiente:

1º Se selecciona una de las fuentes del circuito para que actúe por separado del resto.

2º Para eliminar el resto de las fuentes se procede de tal forma que si es una fuente de tensión se sustituye cortocircuitándola; pero si es una fuente de corriente se sustituye por un circuito abierto.

3º Se calculan las corrientes de los circuitos correspondientes a cada fuente por separado, para posteriormente sumarlas y obtener el resultado buscado.

Ejemplo: 7.5

Determinar las corrientes proporcionadas por cada uno de los generadores del circuito de la Figura 7.21, así como la corriente que fluye por la carga de 10Ω .

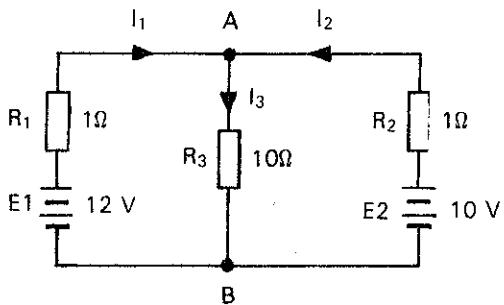


Figura 7.21

Solución: Primero aislamos del circuito la fuente de tensión E_1 . Para hacerlo cortocircuitamos la fuente E_2 , tal como se muestra en la Figura 7.22. Las corrientes que aparecen por este circuito equivalente, correspondientes a la fuente E_1 , las identificamos con el subíndice E_1 ($I_{1(E1)}$, $I_{2(E1)}$, $I_{3(E1)}$).

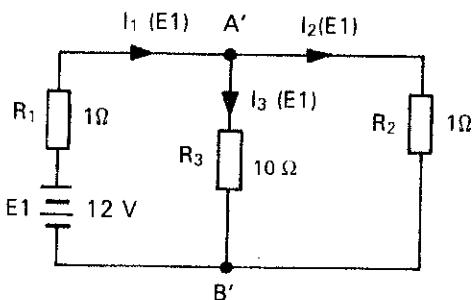


Figura 7.22

Seguidamente, se reducen las resistencias conectadas en serie y paralelo, como si de un circuito mixto se tratase, hasta encontrar un circuito equivalente, como el de la Figura 7.23, con una sola resistencia $R_{(E1)}$ y una fuente de tensión E_1 .

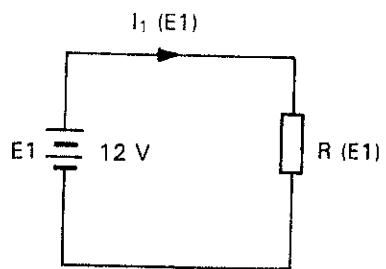


Figura 7.23

$$R_{(E1)} = R_1 + \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} = \dots = 1,91 \Omega$$

$$I_{1(E1)} = \frac{E_1}{R_{(E1)}} = \dots = 6,28 A$$

Para calcular las corrientes por las resistencias R_2 y R_3 será necesario conocer previamente la tensión $V_{A'B'}$ a la que están sometidas éstas:

$$V_{A'B'} = \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2} I_{1(E1)} = \dots = 5,71 V$$

$$I_{2(E1)} = \frac{V_{A'B'}}{R_2} = \dots = 5,71 A, I_{3(E1)} = \frac{V_{A'B'}}{R_3} = \dots = 0,57 A$$

Ahora repetimos el mismo proceso para aislar la fuente E_2 . En la Figura 7.24 cortocircuitamos la fuente E_1 , y en la Figura 7.25 encontramos su correspondiente circuito equivalente.

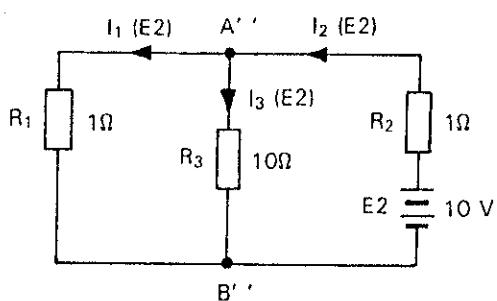


Figura 7.24

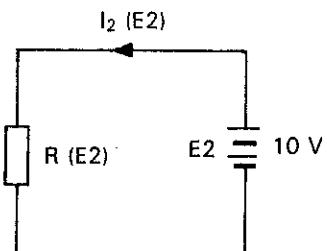


Figura 7.25

Los procesos para determinar las corrientes del circuito con la fuente E_2 son similares a los empleados anteriormente:

$$R_{(E2)} = R_2 + \frac{R_3 R_1}{R_3 + R_1} = \dots = 1,91 \Omega$$

$$I_{2(E2)} = \frac{E_2}{R_{(E2)}} = \dots = 5,24 \text{ A}$$

$$V_{A''B''} = \frac{R_3 R_1}{R_3 + R_1} \quad I_{2(E2)} = \dots = 4,76 \text{ V}$$

$$I_{1(E2)} = \frac{V_{A''B''}}{R_1} = \dots = 4,76 \text{ A}, \quad I_{3(E2)} = \frac{V_{A''B''}}{R_3} = \dots = 0,48 \text{ A}$$

Por último, superponemos los efectos producidos aisladamente por cada una de ellas, para lo que sumamos las corrientes obtenidas con cada una de las fuentes, teniendo en cuenta los sentidos de las corrientes obtenidas en cada uno de los circuitos correspondientes (véase Figuras 7.22 a 7.25).

$$I_1 = I_{1(E1)} - I_{1(E2)} = 6,28 - 4,76 = 1,52 \text{ A}$$

$$I_2 = I_{2(E2)} - I_{2(E1)} = 5,24 - 5,71 = -0,47 \text{ A}$$

$$I_3 = I_{3(E1)} + I_{3(E2)} = 0,57 + 0,48 = 1,05 \text{ A}$$

El signo negativo de la corriente I_2 nos indica que el generador, en vez de aportar corriente a la carga, la absorbe.

7.5 Teorema de Thevenin

Mediante este teorema es posible reducir una red compleja con varias cargas interconectadas entre sí y encontrar un circuito equivalente sencillo, en el que solamente aparezcan una fuente de tensión ideal con una resistencia en serie.

Supongamos que tenemos que calcular la corriente para diferentes valores óhmicos de la carga R_L conectada entre los extremos A y B de un circuito como el de la Figura 7.26.

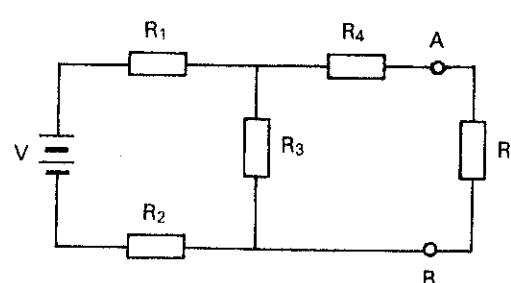


Figura 7.26

Con los métodos conocidos hasta ahora, habría que reducir el circuito hasta encontrar uno equivalente con una sola resistencia para cada uno de los valores de la carga R_L . Mediante el teorema de Thevenin basta con encontrar una sola vez un

circuito que contenga una fuente de tensión ideal V_{Th} en serie con una resistencia R_{Th} , y con los terminales abiertos en la conexión con la carga R_L (puntos A B de la Figura 7.27).

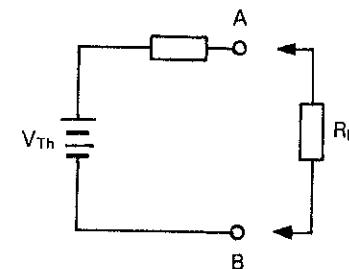


Figura 7.27. Circuito equivalente de Thevenin.

Una vez encontrado el circuito equivalente de Thevenin, bien fácil nos será calcular la corriente para cualquier valor de la carga R_L .

A la tensión que aparece cuando se desconecta la resistencia de carga se la conoce por el nombre de **tensión de Thevenin** (V_{th}). La resistencia que queda conectada en serie con la fuente de tensión del circuito equivalente es la **resistencia de Thevenin** (R_{th}), y es la que corresponde a los terminales A B de la carga cuando se han cortocircuitado todas las fuentes de tensión del circuito.

Ejemplo: 7.6

En el circuito de la Figura 7.28 se nos muestra el circuito equivalente de una fuente de alimentación; se trata de determinar la corriente y la tensión para los valores siguientes de la resistencia de carga R_L : a) $R_L = 10 \Omega$, b) $R_L = 20 \Omega$.

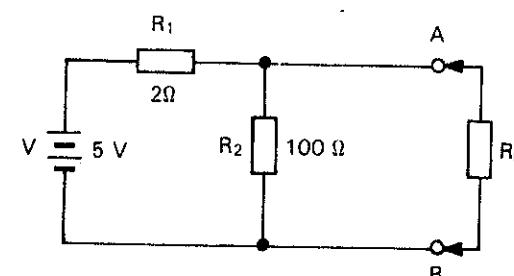


Figura 7.28

Solución: Lo primero que haremos será encontrar el circuito equivalente de Thevenin entre los extremos de la carga R_L . Para ello, primero cortocircuitamos la fuente de tensión de 5 V, según se muestra en el circuito de la Figura 7.29. Con este circuito es fácil calcular la resistencia de Thevenin, que se corresponderá con la que aparece entre los terminales A B.

Como las resistencias R_1 y R_2 están conectadas en paralelo:

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \dots = 1,96 \Omega$$

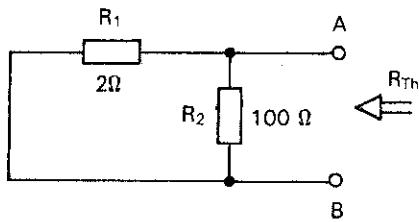


Figura 7.29

Para encontrar la tensión de Thevenin tendremos que recurrir al circuito equivalente de la Figura 7.30, donde la tensión V_{Th} a circuito abierto se corresponderá con la que aparece en los terminales A-B.

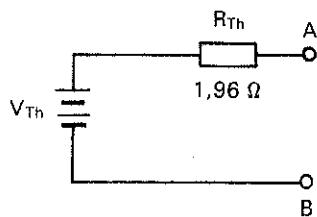


Figura 7.30

Volviendo al circuito original de la Figura 7.28, si eliminamos la resistencia de carga obtenemos el circuito de la Figura 7.31. Aquí se puede comprobar que la tensión de Thevenin buscada es la que aparece en la resistencia R_2 .

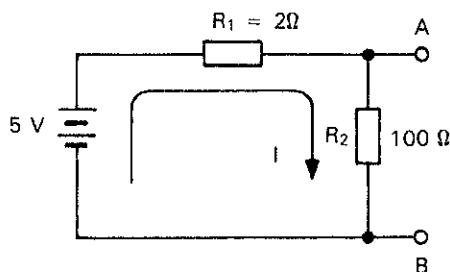


Figura 7.31

Primero calculamos la corriente por R_2 :

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2} = \frac{5}{2 + 100} = 0,049 \text{ A}$$

$$V_{Th} = V_{AB} = R_2 \cdot I = 100 \cdot 0,049 = 4,9 \text{ V}$$

Una vez obtenido el circuito equivalente de Thevenin (Figura 7.30) ya podemos calcular la corriente y tensión para las diferentes cargas conectadas entre los terminales A y B.

Al aplicar la carga de 10Ω entre los puntos A y B, tal como se muestra en la Figura 7.32, la corriente y la tensión que aparecerá en la misma, es:

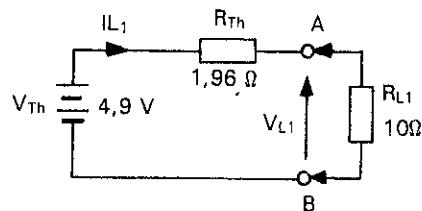


Figura 7.32

$$I_{L1} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_{L1}} = \frac{4,9}{1,96 + 10} = 0,41 \text{ A}$$

$$V_{L1} = I_{L1} \cdot R_{L1} = 0,41 \cdot 10 = 4,1 \text{ V}$$

Al conectar la carga de 20Ω tendremos que (Figura 7.33):

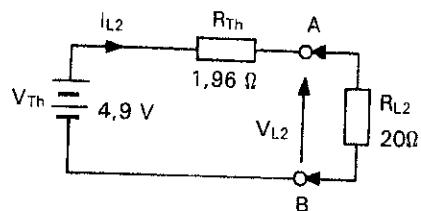


Figura 7.33

$$I_{L2} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_{L2}} = \dots = 0,22 \text{ A}$$

$$V_{L2} = I_{L2} \cdot R_{L2} = \dots = 4,46 \text{ V}$$

Actividades

- Monta un circuito donde aparezcan dos generadores y varias resistencias interconectadas. Calcula de forma teórica las diferentes tensiones y corrientes del circuito, para luego comprobarlo mediante un voltímetro y un amperímetro de una forma práctica en el circuito montado.
- Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este

capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) Determinar las corrientes que fluyen por el circuito de la figura 7.34.

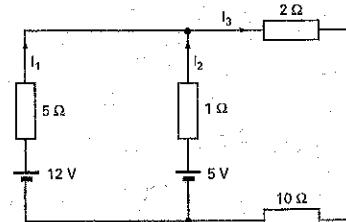


Figura 7.34

- 2) Averiguar la tensión que aparece en la carga de 8 ohmios del circuito de la figura 7.35.

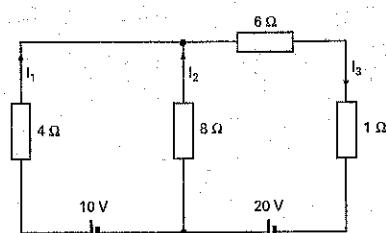


Figura 7.35

- 3) Encuéntrese la resistencia equivalente del circuito de la Figura 7.36.

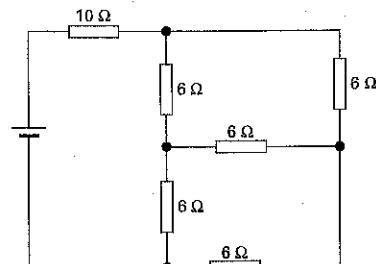


Figura 7.36

- 4) Determinar la resistencia equivalente entre los terminales A y B de la figura 7.37.

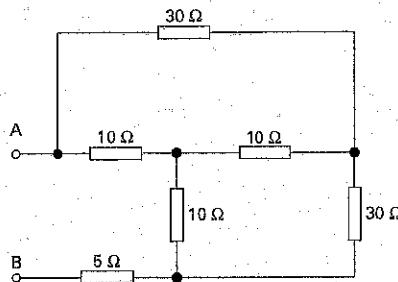


Figura 7.37

- 5) Determinar la intensidad de corriente y la tensión a la que quedará sometida cada una de las resistencias de carga: $R_{L1} = 100\ \Omega$, $R_{L2} = 500\ \Omega$, $R_{L3} = 10\ \Omega$ y $R_{L4} = 10\ \Omega$ y $R_{L5} = 3\ K\Omega$, cuando se conecten independientemente a los extremos de alimentación A B del circuito de la Figura 7.38.

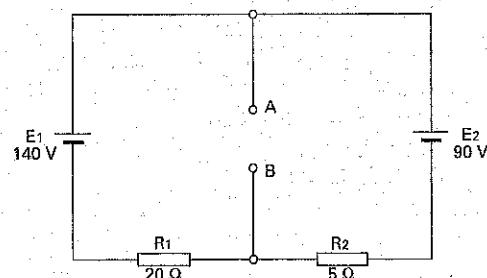
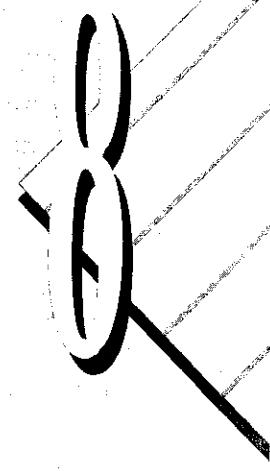


Figura 7.38

Efecto Químico de la Corriente Eléctrica. Pilas y Acumuladores



Introducción

Estudiaremos ahora los fenómenos que se dan en las disoluciones químicas en relación con la corriente eléctrica. Ya tuvimos ocasión de comprobar que al introducir dos metales diferentes en una disolución de ácido sulfúrico se producía una pequeña f.e.m., que se correspondía con el principio de funcionamiento de pilas y acumuladores. Pues bien, cuando aplicamos corriente a una disolución química, aparecen fenómenos, como la electrólisis, que pueden ser de gran utilidad para múltiples aplicaciones prácticas.

Contenido

- Electrólisis.
- Recubrimiento galvánicos.
- Pilas.
- Acumuladores.
- Agrupamiento de pilas y acumuladores.

Objetivos

- Describir los efectos químicos de la corriente eléctrica.
- Enumerar las aplicaciones prácticas de la electrólisis.
- Diferenciar entre pilas y acumuladores.
- Relacionar las características de pilas y acumuladores.
- Emplear los agrupamientos de generadores correctamente para conseguir un conjunto de unas determinadas características.

8.1 Electrólisis

Experiencia 8.1: Llena un pequeño recipiente con agua lo más pura posible (agua destilada); introduce un par de electrodos conectados a una fuente de alimentación de C.C. (Figura 8.1). Mediante un amperímetro conectado en serie comprueba la corriente del circuito. Se podrá comprobar cómo en este caso no pasa la corriente.

Ahora diluye en el agua, bien unas gotas de ácido sulfúrico o de ácido clorídico, o unas sales. Podrás comprobar que ahora sí hay corriente y que en ambos electrodos aparecen burbujas.

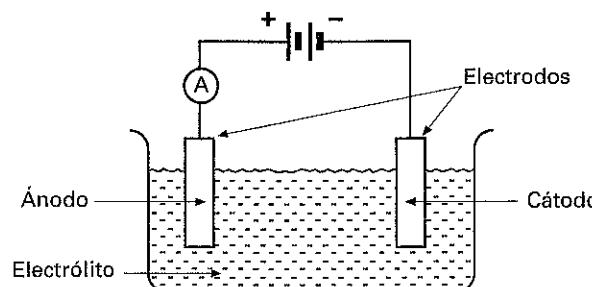


Figura 8.1. Comprobación experimental de la electrólisis.

De la Experiencia 8.1 se deduce que el agua pura tiene una resistencia eléctrica muy elevada y por tanto no conduce la corriente eléctrica. Sin embargo al añadir ácidos o sales al agua, hace que la disolución sea conductora de la electricidad.

A los líquidos que permiten el paso de la corriente eléctrica se les denomina **electrólitos**.

A los electrodos que están sumergidos en el electrólito se les conoce por el nombre de **ánodo** cuando están conectados al positivo y **cátodo** al negativo.

Si hiciésemos pasar corriente por un electrólito durante un tiempo se podría observar perfectamente que el ánodo disminuye de peso, mientras que el cátodo aumenta. También se puede apreciar que el burbujeo observado pertenece a la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno. A estos fenómenos de descomposición que se dan en los electrólitos cuando son recorridos por una corriente eléctrica se les denomina **electrólisis**.

El transporte de materia que se produce en los electrólitos al ser atravesados por una corriente eléctrica tiene multitud de aplicaciones, como son: la descomposición del agua, refinado de metales, separación de metales por electrólisis, anodizado, obtención de metales, recubrimientos galvánicos consistentes en depositar un fino baño de oro, plata, níquel, cromo, estaño, cinc, etc., en un cuerpo conductor.

8.2 Recubrimientos galvánicos

Mediante la aplicación de la electrólisis se consiguen recubrimientos o baños metálicos.

Este procedimiento consiste en conectar eléctricamente el objeto que va a recubrirse en el electrodo negativo. En el electrólito se disuelven las sales apropiadas con el metal que deseamos que se deposite en el objeto. Como electrodo positivo se utiliza una placa del mismo metal a recubrir.

Así, por ejemplo, si queremos realizar un recubrimiento o baño de plata en un objeto metálico, podemos utilizar nitrato de plata diluido como electrólito. Los átomos metálicos de plata se disocian como un ion positivo, que al paso de la corriente son arrastrados hacia el electrodo negativo donde se encuentra el objeto recubrir. Allí acaban depositándose y formando una fina capa de plata (Figura 8.2). De esta manera se pueden hacer baños de oro, níquel, cromo, zinc, etc.

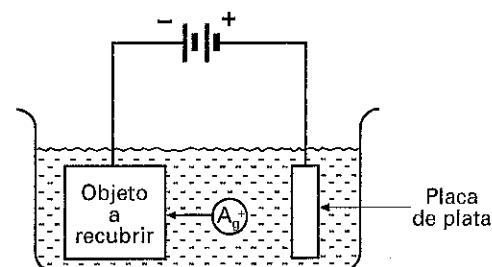


Figura 8.2. Proceso de recubrimiento galvánico.

8.3 Pilas eléctricas

Las pilas eléctricas son elementos que convierten la energía que se produce en una reacción química en energía eléctrica (Figura 8.3). Sus aplicaciones son ya de sobra conocidas por todos nosotros, y se reducen fundamentalmente a la alimentación de pequeños aparatos portátiles. El tipo de corriente que produce una pila es de corriente continua. El principal inconveniente que nos encontramos con las pilas es que una vez agotado su combustible químico, se vuelven inservibles y hay que desecharlas. Al contrario, los acumuladores funcionan de una forma similar al de las pilas, con la ventaja de que se pueden recargar multitud de veces, tan sólo con conectarlos durante un tiempo a una fuente de tensión continua (cargador de acumuladores).



Figura 8.3. Conjunto de pilas eléctricas comerciales.

Para construir un elemento básico de una pila, basta con introducir dos electrodos de diferentes metales en un electrólito. Al hacer esto aparece entre los electrodos una tensión eléctrica que depende de la naturaleza de los metales utilizados como electrodos y de la composición y concentración del electrólito.

El funcionamiento de una pila básica es así (Figura 8.4): el electrólito ataca al metal de los electrodos y los disuelve, pasando a la disolución como iones metálicos. Los iones metálicos adquieren siempre carga positiva (átomos metálicos con defecto de electrones), por lo que los electrodos, de donde

son arrancados los átomos que pasan a la disolución, siempre se quedan con un exceso de electrones, es decir con carga negativa.

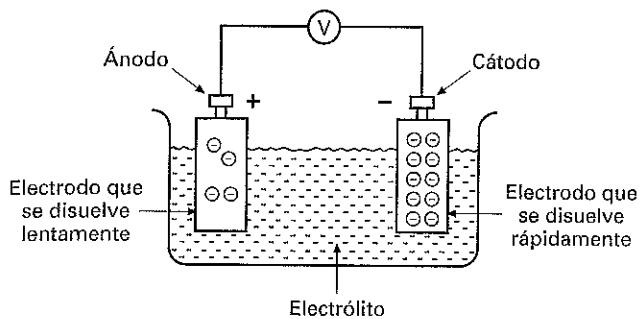


Figura 8.4. Pila elemental.

Dado que los dos electrodos son de diferente naturaleza, siempre existe uno de ellos que se disuelve más rápidamente que el otro, dando lugar a una carga más negativa en el electrodo que se disuelve en menos tiempo que en el que lo hace más lentamente.

El resultado es que aparece una diferencia de potencial entre ambos electrodos que puede ser utilizada para alimentar un receptor eléctrico.

8.3.1 Características de las pilas

Las características fundamentales de las pilas son las siguientes:

Fuerza electromotriz: La f.e.m. de la pila es la que se mide con un voltímetro de alta resistencia conectado entre los electrodos de la misma, evitando así que la corriente en la medida sea lo más pequeña posible y así evitar errores en la medida por caída de tensión en la resistencia interna de la pila. La f.e.m. de una pila depende fundamentalmente de los electrodos y del electrólito.

Capacidad: Cantidad total de electricidad que puede suministrar la pila hasta agotarse. La capacidad de una pila depende de los elementos que la constituyen, así como de sus dimensiones, y se mide en amperios·hora.

Resistencia interna: Este valor depende de las dimensiones de la pila y de la concentración y temperatura del electrólito, disminuyendo la resistencia interna al aumentar el tamaño de la pila. Este valor suele ser del orden de algunas décimas de ohmio.

8.3.2 Tipos de pilas eléctricas

Se pueden construir pilas combinando diferentes metales en sus electrodos y utilizando electrólitos variados. Así, se construyen las pilas Daniell, Volta, Leclanché, pilas secas tipo Leclanché, pilas secas de magnesio, pilas de óxido de mercurio, pila patrón de weston, pilas de oxígeno, pilas alcalinas de pirolusita, pilas en forma de botón, pilas de combustible, y muchas otras más. Las pilas pueden constituirse a partir de un electrólito líquido, aunque en la actualidad la tendencia es a

utilizar electrólitos inmovilizados mediante materias absorbentes (pilas secas) que confieren a las pilas mejores prestaciones.

8.4 Acumuladores

El principio de funcionamiento de los acumuladores es similar al de las pilas eléctricas (dos electrodos de diferente constitución sumergidos en un electrólito). La diferencia entre pilas y acumuladores está en que estos últimos se pueden recargar aplicando entre sus electrodos una diferencia de potencial perteneciente a una fuente de alimentación o cargador de baterías. De esta manera al hacer pasar corriente eléctrica por un acumulador descargado se consigue reponer las condiciones químicas iniciales.

Dependiendo del electrólito utilizado y de la constitución de los electrodos se pueden construir diferentes tipos de acumuladores. Según el tipo de electrólito utilizado los acumuladores pueden ser **ácidos** o **alcalinos**. En los ácidos se utiliza como electrólito una disolución de ácido sulfúrico (H_2SO_4), como es el caso de los acumuladores de plomo. En los alcalinos el electrólito suele ser hidróxido potásico (KOH), como es el caso de los acumuladores de níquel-cadmio y de níquel-hierro.

8.4.1 Acumuladores de plomo

Estos acumuladores constan de dos placas de plomo sumergidas en un electrólito formado por una disolución de agua destilada más ácido sulfúrico ($H_2SO_4 + H_2O$).

Cuando el acumulador está cargado, el electrodo negativo está constituido por una placa de gran superficie que aloja plomo puro (Pb) en estado esponjoso; y en el electrodo positivo la placa contiene dióxido de plomo (PbO_2) del color marrón oscuro. A su vez, la densidad del ácido sulfúrico es elevada, del orden de 1,2 a 1,28 g/cm³.

Si en estas condiciones conectamos un receptor entre ambas placas aparecerá una corriente eléctrica gracias a la f.e.m. generada por el mismo principio de funcionamiento de las pilas (Figura 8.5) (dos electrodos de diferente constitución sumergidos en un electrólito).

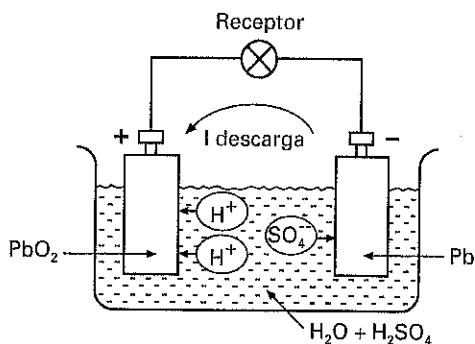


Figura 8.5. Acumulador de plomo cargado en estado de descarga.

En el proceso de descarga el ácido sulfúrico ataca químicamente ambas placas. Por un lado se disocia en 2 H y SO_4^{2-} ,

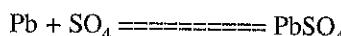
que al recombinarse con las placas produce las siguientes reacciones químicas:

Placa positiva:



El dióxido de plomo de la placa positiva al combinarse con el ácido sulfúrico se transforman en sulfato de plomo más agua.

Placa negativa:



El plomo de la placa negativa junto con el azufre y el oxígeno se transforman también en sulfato de plomo.

De aquí se deduce que, durante la descarga, las placas se van transformando en sulfato de plomo, mientras que en el electrólito cada vez hay menos ácido sulfúrico y más agua. Según van siendo las placas más iguales se produce menos f.e.m., llegando a la descarga total cuando ambas placas son totalmente de sulfato de plomo.

Proceso de carga: Al aplicar una fuente de alimentación al acumulador descargado, tal como se muestra en la Figura 8.6, la corriente eléctrica fluye por el acumulador en sentido contrario al de descarga y se producen reacciones inversas en las placas y en el electrólito, recuperándose el estado inicial:

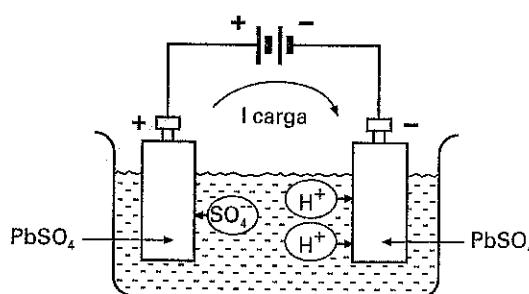
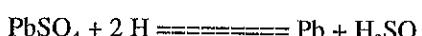


Figura 8.6. Acumulador de plomo descargado en estado de carga.

Placa positiva:



Placa negativa:



En el proceso de carga la placa positiva se vuelve a transformar en dióxido de plomo, y en la negativa en plomo puro. El electrólito aumenta la densidad del ácido sulfúrico.

8.4.2 Constitución de un acumulador

Un acumulador se puede constituir con una única célula. Dado que la tensión de una sola célula es baja (2 V en un acumulador de plomo), en la mayor parte de las aplicaciones prácticas se conectan varias células en serie y se introducen dentro de un mismo recipiente.

Los componentes básicos de que consta un acumulador, son (Figura 8.7):

- Recipiente y tapas
- Rejillas y placas
- Tapones
- Separadores
- Electrólito
- Conexiones entre celdas

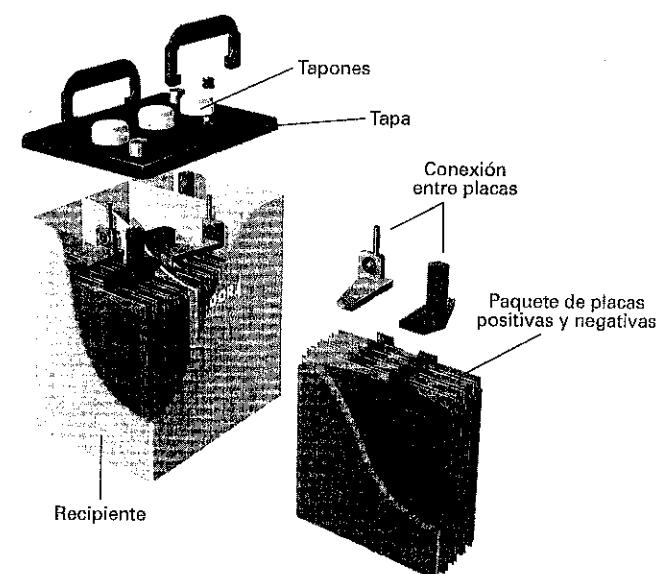


Figura 8.7. Constitución de un acumulador.

8.4.3 Capacidad de un acumulador

La capacidad de un acumulador nos indica la cantidad de electricidad que almacena el mismo. Ésta se mide en Amperios · hora (Ah) y se calcula mediante la expresión:

$$Q = I \cdot t$$

Ejemplo: 8.1

Una batería de acumuladores de plomo con una capacidad de 92 Ah se descarga en 10 horas. Determinar la corriente media de descarga.

Solución: $Q = I \cdot t$, despejando

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{92}{10} = 9,2 \text{ A}$$

La capacidad de un acumulador depende fundamentalmente de su tamaño, así como del número de células o elementos acoplados. Además de éstos, también influyen otros factores:

- Las bajas temperaturas disminuyen la capacidad
- Cuando exigimos que el acumulador ceda grandes cantidades de corriente, las reacciones químicas en las placas son más superficiales, por lo que el acumulador se descarga más rápido y disminuye su capacidad.

De aquí se deduce que la capacidad de un acumulador es mayor cuanto menor sea la intensidad de descarga

8.4.4 Tensión y corriente de carga de un acumulador

Para cargar una batería de acumuladores hay que conectar una fuente de alimentación de C.C. que proporcione una tensión superior a la nominal de la batería, situando el polo positivo de la fuente de alimentación con el positivo de la batería, y el negativo de la fuente con el negativo de la batería.

En este proceso, es importante vigilar que la corriente no supere los valores máximos recomendados por el fabricante. Este valor suele estar en torno al 10 % del valor de la capacidad del acumulador. Así, por ejemplo, para un acumulador con 80 Ah sería aconsejable no superar los 8 amperios de corriente de carga.

Por lo general, utilizaremos como fuente de alimentación, un cargador de baterías. Con él se fija la corriente máxima de carga, realizando un proceso automático de la regulación de carga y desconectándose una vez alcanzada la carga completa.

Ejemplo: 8.2

En el circuito que se muestra en la Figura 8.8 aparece el sistema de carga de una batería de acumuladores de un automóvil. Averiguar la tensión que debe proporcionar la fuente de alimentación (F.A.) para conseguir que la intensidad de carga de la batería sea de 15 A, teniendo en cuenta para ello que la resistencia interna de la misma es $0,2\ \Omega$, y que la fuerza electromotriz en el actual estado de carga es de 10 V.

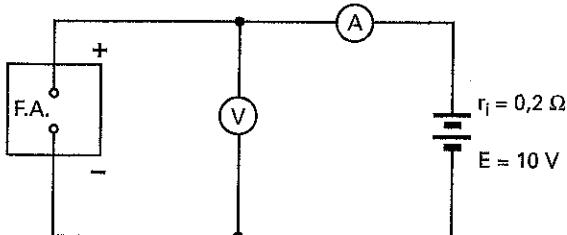


Figura 8.8

Solución: Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff al circuito cerrado formado, tendremos que la tensión (V) que tiene que proporcionar la fuente de alimentación será la suma de la f.e.m. (E) de la batería más la caída de tensión ($r I$) que se produce en la resistencia interna:

$$V = E + r \cdot I = 10 + 0,2 \cdot 15 = 13 \text{ V}$$

8.4.5 Tensión y corriente de descarga

Cuando se conecta un acumulador de plomo a un receptor, su tensión en bornes tiende a disminuir debido a la caída de tensión en su resistencia interna. Según se va descargando el acumulador, la tensión en bornes va disminuyendo, pudiendo llegar a desaparecer por completo. Por supuesto, es importante no llegar nunca a este extremo. De hecho, se recomienda no descender nunca de la **tensión límite de descarga**, que en el caso de un acumulador de plomo está en aproximadamente 1,8 voltios. Por debajo de esta tensión, el proceso de descarga tiende a formar cristales muy grandes de sulfato de plomo (SO_4Pb) en las placas (sulfatación de las placas), que hacen difícil su reconstitución en el proceso de carga.

Para evitar que una batería de acumuladores se descargue por debajo de la tensión límite de descarga se utilizan reguladores automáticos que vigilan constantemente la tensión y corriente en bornes de la batería, produciendo la desconexión de la misma en caso de alcanzar valores no recomendables

8.4.6 Resistencia interna

La resistencia interna de un acumulador de plomo es muy pequeña. Esto aporta ciertas ventajas e inconvenientes.

Al ser baja la resistencia interna, la caída de tensión que en ella se origina también lo es, por lo que la tensión en bornes es más estable con los cambios de corriente. Además las pérdidas de potencia son bajas.

Por otro lado, en caso de producirse un cortocircuito, esta pequeña resistencia interna provoca que la corriente sea muy elevada, pudiendo llegar a deformar las placas. En conclusión, se deben evitar los cortocircuitos con las protecciones adecuadas.

8.4.7 Vida de un acumulador

La duración de un acumulador no es ilimitada. Los largos períodos de almacenamiento sin recarga y la simple utilización del mismo, producen transformaciones en los electrodos, como la corrosión, sulfatación de placas, etc, que hacen que la capacidad del acumulador disminuya hasta valores no aceptables para su correcto funcionamiento. Además, los ciclos constantes de carga y descarga producen desprendimientos de materia activa de los electrodos, que acaban sedimentándose en el fondo del recipiente del electrólito, pudiendo llegar a provocar un cortocircuito entre ambas placas. El resultado es la inutilización definitiva del acumulador.

8.4.8 Autodescarga de un acumulador

Cuando un acumulador no se usa durante un largo período de tiempo se produce una disminución de su capacidad. A este hecho se le conoce como autodescarga.

La descarga espontánea de los acumuladores es mucho mayor que en las pilas. Para evitar que los efectos de la autodescarga puedan dañar a un acumulador almacenado durante largo tiempo conviene llevar a cabo recargas periódicas que

compensen las pérdidas provocadas por la autodescarga. Así, por ejemplo, en un acumulador de plomo se produce una perdida en torno al 100% de su capacidad en un año debido a la autodescarga. En los acumuladores alcalinos estos valores son inferiores, y rondan el 30 % por año.

El factor que más influye en la autodescarga es la temperatura, de tal forma que si se desea almacenar una batería de acumuladores durante un largo periodo es conveniente hacerlo a bajas temperaturas.

8.4.9 Acumuladores alcalinos

En los acumuladores alcalinos el electrólito que se utiliza consiste en una solución de hidróxido potásico (KOH). Según el material que se emplee en las placas se pueden construir diferentes tipos de acumuladores, con la idea de encontrar las características idóneas para cada una de las aplicaciones posibles. En la Tabla 8.1 se da una relación de los diferentes tipos de acumuladores alcalinos.

ACUMULADORES ALCALINOS		
Electrodo positivo de óxido de níquel	Electrodo positivo de óxido de plata	Electrodo positivo de hidrógeno
Níquel-cadmio	Plata-clínco	Níquel-hidrógeno
Níquel-hierro	Plata-cadmio	Plata-hidrógeno
Níquel-zinc	Plata-hierro	

Tabla 8.1.

Dentro de estos acumuladores los más utilizados hasta ahora son los de níquel-cadmio y el de níquel-hierro. Los acumuladores con electrodos de plata resultan muy caros, aunque sus buenas características los hace ideales para aplicaciones de interés estratégico (satélites, equipos militares, etc).

8.5 Conexión de pilas y acumuladores

Al igual que con los receptores, las pilas, acumuladores, y en general, cualquier tipo de generador, pueden ser conectados en serie, paralelo o mixto. El resultado obtenido de estos agrupamientos es muy útil cuando se desea aumentar la tensión o la intensidad que suministra un generador.

Antes de estudiar el resultado de estas conexiones, vamos a estudiar algunas de las características típicas de un generador.

8.5.1 Tensión en bornes del generador

Cuando el generador suministra corriente al circuito exterior se produce una cierta caída de tensión en la resistencia interna del generador, de tal forma que la tensión que aparece en bornes del generador es menor que la f.e.m. del mismo (Figura 8.9):

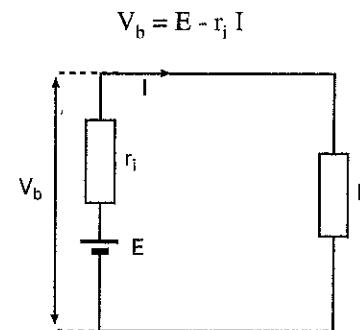


Figura 8.9. Tensión en bornes del generador.

En estas condiciones, la tensión que suministra un generador irá disminuyendo según vaya aumentando la intensidad de la carga.

8.5.2 Potencia del generador

En la resistencia interna también se produce una pérdida de potencia, que se transforma en calor por efecto Joule y que reduce el rendimiento del generador.

Potencia perdida por el generador:

$$P_p = r_i I^2$$

La potencia total que cede el generador al circuito será la suma de la potencia que se pierde en la resistencia interna más la que aparece en la carga.

Para calcularla aplicamos la expresión de la potencia utilizando la fuerza electromotriz en el primer término (la f.e.m. se corresponde con toda la tensión que proporciona el generador) y la corriente en el segundo.

Potencia total cedida por el generador:

$$P_T = EI$$

$$P_T = P_u + P_p$$

Al receptor se le entrega una potencia que es inferior a la total generada. Esta potencia útil es igual al producto de la tensión en bornes del generador por la corriente.

Potencia útil cedida a la carga:

$$P_u = V_b I$$

8.5.3 Rendimiento eléctrico de un generador

Es la relación que existe entre la potencia útil que suministra el generador al circuito y la potencia total que éste desarrolla. Se representa por la letra griega η . Si expresamos el rendimiento porcentualmente, tendremos que:

$$\eta_{eléctrico} = \frac{P_u}{P_T} \cdot 100$$

Ejemplo: 8.3

Una batería de acumuladores de automóvil posee una f.e.m. de 12 V y una resistencia interna de 0,2 Ω. Determinar la tensión que aparecerá en bornes de la misma cuando se le conecte a una carga resistiva de 3 Ω. Hacer un balance de las potencias entregadas por el generador y determinar el rendimiento eléctrico.

Solución: Para calcular la intensidad tenemos en cuenta que a la resistencia de la carga se le suma la interna del propio generador:

$$I = \frac{E}{R + r_i} = \frac{12}{3 + 0,2} = 3,75 \text{ A}$$

$$V_b = E - r_i I = 12 - 0,2 \cdot 3,75 = 11,25 \text{ V}$$

$$P_p = r_i I^2 = 0,2 \cdot 3,75^2 = 2,8 \text{ W}$$

$$P_T = E I = 12 \cdot 3,75 = 45 \text{ W}$$

$$P_u = V_b I = 11,25 \cdot 3,75 = 42,2 \text{ W}$$

Comprobaremos si se cumple que

$$P_T = P_u + P_p = 42,2 + 2,8 = 45 \text{ W}$$

El rendimiento eléctrico será, entonces:

$$\eta_{\text{eléctrico}} = \frac{P_u}{P_T} \cdot 100 = \frac{42,2}{45} \cdot 100 = 93,8 \%$$

Este resultado nos indica que de cada 100 W que produce el generador, 93,8 W son útiles.

8.5.4 Conexión de generadores en serie

La conexión de generadores en serie se utiliza cuando queremos aumentar la tensión de salida. Esta forma de conexión es muy utilizada en las baterías de acumuladores, donde se consigue la tensión de salida buscada a base de conectar varios acumuladores en serie.

Esta conexión consiste en agrupar los generadores uno seguido del otro conectándolos entre sí por sus polos contrarios y dejando dos terminales libres, que constituyen el positivo y negativo del agrupamiento. En la Figura 8.10 se muestra la conexión de 3 acumuladores en serie.

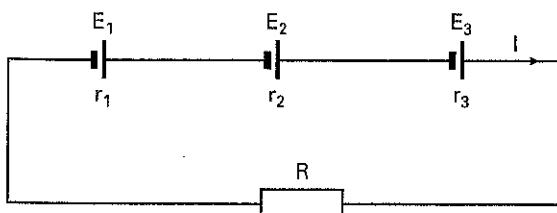


Figura 8.10. Agrupamiento de generadores en serie.

En la conexión en serie se cumple que:

- La fuerza electromotriz del conjunto es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de cada uno de los generadores.

$$E = E_1 + E_2 + E_3$$

- La resistencia interna del conjunto es igual a la suma de las resistencias internas de cada uno de los generadores.

$$r = r_1 + r_2 + r_3$$

- La intensidad de la corriente eléctrica es igual en todos los generadores.

Ejemplo: 8.4

Una batería está compuesta por 6 acumuladores conectados en serie. La f.e.m. de cada acumulador es de 1,5 voltios y su resistencia interna de 0,1 ohmios. Calcular: a) la corriente y tensión que aparecerá al conectar una carga de 5 ohmios de resistencia; b) la tensión en bornes vacío (sin conectar carga); c) intensidad si se cortocircuita la carga (unir eléctricamente mediante un conductor los dos terminales de la batería).

$$\text{Solución: } E = E_1 + E_2 + \dots + E_6 = 6 \cdot 1,5 = 9 \text{ V}$$

$$r = r_1 + r_2 + \dots + r_6 = 6 \cdot 0,1 = 0,6 \Omega$$

El agrupamiento de los acumuladores en serie equivale entonces a uno solo de f.e.m. 9 V y resistencia interna 0,6 Ω.

- a) La corriente la determinamos aplicando la ley de Ohm entre los extremos de la batería:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{9}{5 + 0,6} = 1,61 \text{ A}$$

La tensión en la carga la calculamos aplicando la ley de Ohm entre sus extremos:

$$V = R \cdot I = 5 \cdot 1,61 = 8 \text{ V}$$

- b) Cuando se abre el circuito de alimentación, la corriente se interrumpe, y por tanto la caída de tensión en la resistencia interna de los acumuladores se hace cero, apareciendo en la salida una tensión igual a la fuerza electromotriz:

$$V_b = E - rI = 9 - 0,6 \cdot 0 = 9 \text{ V}$$

- c) Al provocar el cortocircuito la resistencia del receptor se vuelve aproximadamente igual a cero, por lo que la corriente que se alcanza es igual a:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{9}{0 + 0,6} = 15 \text{ A}$$



8.5.5 Conexión de generadores en paralelo

La conexión de generadores en paralelo se utiliza cuando queremos aumentar la corriente de salida manteniendo la tensión constante. En la Figura 8.11 se han conectado tres generadores electroquímicos en paralelo.

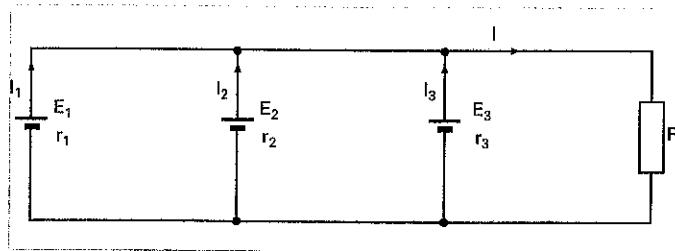


Figura 8.11. Agrupamiento de generadores en paralelo.

La conexión en paralelo posee las siguientes características:

- Para que todos los generadores aporten energía deberán poseer la misma f.e.m.
- La f.e.m. equivalente al conjunto es la misma que la de los generadores acoplados.
- Si deseamos que todos los generadores aporten la misma corriente y potencia, además de ser igual su f.e.m., también deberán ser iguales sus resistencias internas.
- La intensidad que suministra el conjunto de generadores es igual a la suma de las intensidades que aporta cada generador.

Ejemplo: 8.5

Se conectan en paralelo tres generadores de 12 V de f.e.m. y 0,3 de resistencia interna. Determinar la intensidad y tensión que aparecerá en los terminales del conjunto al conectar una resistencia de 4 ohmios. ¿Qué corriente aporta cada generador?

Solución: Determinaremos primero la f.e.m. y la resistencia interna equivalente del acoplamiento:

$$E = E_1 = E_2 = E_3 = 12 \text{ V}$$

Como las resistencias están conectadas en paralelo y son iguales:

$$r = \frac{0,3}{3} = 0,1 \Omega$$

De lo que resulta que el acoplamiento en paralelo de los tres generadores equivale a uno solo de 12 V de f.e.m. y 0,1 ohmios de resistencia interna.

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{12}{4 + 0,1} = 2,93 \text{ A}$$

La tensión que aparece en los terminales del conjunto de generadores, es:

$$V_b = E - rI = 12 - 0,1 \cdot 2,93 = 11,7 \text{ V}$$

La corriente que suministra cada generador, es:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{I}{3} = \frac{2,93}{3} = 0,98 \text{ A}$$

Actividades

1. Consigue catálogos comerciales de diferentes pilas y acumuladores, analiza sus características y clasifícalos por su campo de aplicación.
2. Conecta un acumulador a una carga y mide la tensión y la corriente. Después mide con un voltímetro la f.e.m. del acumulador, para lo cual habrá que retirar la carga. Con los datos obtenidos en el ensayo, determina: la resistencia interna, caída de tensión, potencia útil, total y perdida, así como el rendimiento del acumulador.
3. Conecta varios acumuladores o pilas en serie y comprueba mediante un voltímetro el aumento de tensión conseguido. Repite la misma operación conectando los acumuladores en paralelo y suministrando energía a una carga, comprobando cómo se reparte la corriente total entre cada uno de los mismos.
4. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Autoevaluación

- 1) ¿Cómo se les denomina a los electrodos de un proceso electrolítico?
 - Cátodo al positivo y ánodo al negativo
 - Ánodo al positivo y cátodo al negativo
- 2) Los recubrimientos galvánicos consisten en:
 - Disociar el agua mediante electrólisis
 - Depositar un metal en un objeto conductor mediante electrólisis
- 3) ¿Qué elementos fundamentales se necesitan para construir una pila eléctrica?
 - Dos electrodos de diferente naturaleza y un electrólito
 - Dos electrodos de la misma naturaleza y un electrólito
- 4) ¿Cómo se mide la f.e.m. de una pila?
 - Mediante un voltímetro de alta resistencia, haciendo la medida a la intensidad de régimen nominal
 - Mediante un voltímetro de baja resistencia
 - Mediante un voltímetro de alta resistencia interna conectado entre los electrodos de la pila y sin conectar carga alguna (régimen de funcionamiento en vacío)
- 5) ¿Qué diferencias fundamentales existen entre una pila y un acumulador?
 - Los acumuladores duran más que las pilas
 - Los acumuladores son más resistentes que las pilas
 - Los acumuladores tienen una mayor capacidad que las pilas
- 6) Una batería de acumuladores de plomo con una capacidad de 110 Ah alimenta un tubo fluorescente de 20 W. Si la tensión media en el proceso de descarga es de 12 V, determinar el tiempo de descarga de la misma.
- 7) Se conectan en serie 10 generadores de C.C. de características iguales, siendo la f.e.m. de cada uno 2 voltios y su resistencia interna de 0,12 ohmios. Calcular: a) tensión en bornes en vacío; b) tensión y corriente si se conecta una carga de 8 ohmios; c) rendimiento eléctrico del conjunto de generadores para dicha carga; d) corriente de cortocircuito; e) tensión en bornes del conjunto cuando suministra una corriente de 2 amperios.
- 8) Resolver las mismas cuestiones planteadas en la ejercicio de Autoevaluación 8.7 si en vez de conectar los generadores en serie los acoplamos en paralelo.
- 9) Una batería de acumuladores está formada por 10 elementos conectados en serie de 2,5 V y 0,015 Ω. Se conecta un receptor entre sus extremos y se miden 17,5 V. Determinar: a) intensidad; resistencia y potencia de la carga; b) potencia útil cedida por cada generador.
- 10) ¿Cuántos generadores de $E = 24$ V y $r = 0,2 \Omega$ hay que conectar en serie para conseguir una tensión de 220 V en una resistencia de carga de 22Ω ?
 - 10 generadores.
 - 9 generadores
 - No es posible la conexión

11) ¿Cuántos generadores con las mismas características que en el ejercicio anterior hay que conectar en paralelo para conseguir que la resistencia de carga de $0,22\ \Omega$ conectada a sus extremos trabaje a 22 V ?

- a) 5 generadores
- b) 10 generadores.
- c) 4 generadores

12) ¿Cuántos generadores de $E = 4,5\text{ V}$ y $r = 0,1\ \Omega$ y cómo se tendrán que conectar para conseguir una tensión a la salida de 9 V al suministrar 3 A a una carga.

- a) 4 generadores conectados en circuito mixto: dos ramas en paralelo y cada una de ellas compuesta por dos generadores conectados en serie
- b) 2 generadores conectados en serie
- c) 6 generadores conectados en circuito mixto: tres ramas en paralelo y cada una de ellas compuesta por dos generadores conectados en serie

Los Condensadores

Introducción

El condensador es un dispositivo muy utilizado en la electricidad, sobre todo en aplicaciones de circuitos electrónicos. Pero, ¿qué función cumple el condensador en un circuito? Se puede decir que un condensador es un elemento capaz de almacenar pequeñas cantidades de energía eléctrica para devolverla cuando sea necesaria.

Las aplicaciones de los condensadores son muy amplias. A continuación, se indican algunas de ellas.

- Aprovechando el tiempo que tardan en cargarse se pueden construir circuitos de acción retardada (temporizadores electrónicos, etc.).*
- Como ya estudiaremos más adelante, se utilizan como filtros en los rectificadores (dispositivos que convierten la C.A. en C.C.). Con ellos se consigue que la tensión obtenida sea más continua.*
- Realización de los circuitos llamados oscilantes y del fenómeno de resonancia. Sintonía en radiodifusión.*
- Supresión de parásitos en radiodifusión (ruidos que producen los motores de explosión de los automóviles).*
- Corrección del factor de potencia en los sistemas de corriente alterna.*

Contenido

- ✓ Funcionamiento y estructura del condensador.*
- ✓ Capacidad de un condensador.*
- ✓ Carga y descarga de un condensador.*
- ✓ Tipos de condensadores.*
- ✓ Asociación de condensadores.*

Objetivos

- ✓ Describir el funcionamiento y la función de los condensadores.*
- ✓ Evaluar los procesos de carga y descarga de un condensador.*
- ✓ Seleccionar adecuadamente las magnitudes de un condensador.*
- ✓ Reconocer los tipos de condensadores.*
- ✓ Calcular la capacidad equivalente al asociar condensadores en serie y en paralelo.*

9.1 Funcionamiento de un condensador

Experiencia 9.1: Toma una pila de 4,5 V y conéctala a un condensador electrolítico de $2.200 \mu\text{F}$ (microfaradios), teniendo cuidado en no equivocarte con las conexiones de los polos (Figura 9.1).

Seguidamente, separa el condensador de la pila y mide la tensión entre sus terminales. Podrás comprobar que el voltímetro indica una tensión de 4,5 V.

A continuación, conecta el condensador a los terminales de un diodo led (diodos que emiten una pequeña radiación luminosa cuando son recorridos por una pequeña intensidad de corriente eléctrica), cuidando de respetar las polaridades. Podrás comprobar que el led se enciende durante un instante.

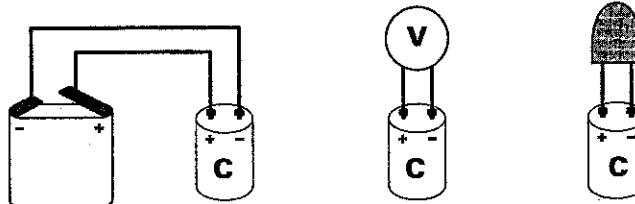


Figura 9.1

La primera parte de la Experiencia 9.1 demuestra que al conectar la pila con el condensador, éste se carga de energía eléctrica y que la tensión con que ha sido cargado dicho condensador coincide con la tensión de la pila. La segunda parte de esta experiencia hace patente la descarga del condensador a través del diodo led que se enciende durante el pequeño instante que dura la descarga.

Para construir un condensador basta con montar dos placas metálicas conductoras separadas por un material aislante, denominado dieléctrico, como el aire, papel, cerámica, mica, plástico, etc (Figura 9.2). Normalmente, este dieléctrico se dispone en forma de lámina muy fina para conseguir que las placas metálicas, denominadas armaduras, se encuentren lo más próximas unas de otras.

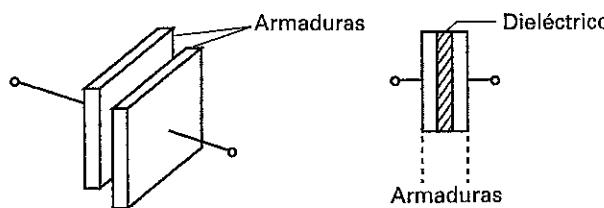


Figura 9.2. Constitución de un condensador.

El condensador se carga de electricidad, según los siguientes fundamentos. Si conectamos las armaduras de un condensador como se indica en el circuito de la Figura 9.3, los electrones en exceso del polo negativo de la pila se dirigirán a la armadura A, cargándola negativamente. A su vez, en la parte interna de la armadura B se producirá una acumulación de cargas positivas por inducción electrostática (recuerda que las

placas están muy próximas y, que por lo tanto, existe una gran atracción entre las cargas eléctricas de ambas armaduras debido a la acción del campo eléctrico). Por otro lado, la carga negativa acumulada en la parte externa de la armadura B es atraída por el polo positivo de la pila, lo que completa la carga del condensador. Una vez que esto suceda, ya no habrá más movimiento de electrones, a no ser que se aumente la tensión de la pila.

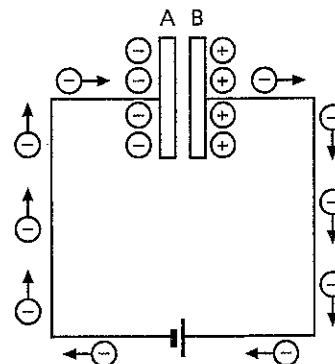


Figura 9.3. Carga de un condensador.

Una vez cargado el condensador, si se le desconecta de la fuente de energía eléctrica, la acumulación de cargas se mantiene gracias a que sigue existiendo la fuerza de atracción entre las armaduras cargadas debido a la diferencia de cargas (Figura. 9.4).

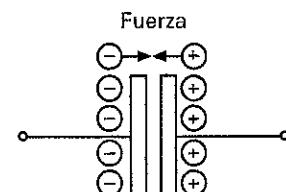


Figura 9.4. Condensador cargado.

¿Qué ocurriría si una vez cargado el condensador aplicásemos al mismo una tensión mayor? Al aumentar la tensión aplicada, aumentan las fuerzas de atracción entre las cargas de las armaduras, y por tanto aparece una nueva corriente, que carga el condensador hasta alcanzar la nueva tensión aplicada.

¿Qué ocurre si conectamos un condensador en serie en un circuito de corriente continua? Sólo existe corriente eléctrica mientras se carga el condensador, por lo que una vez que se termina la carga se interrumpe el circuito. Por tanto, se puede decir que un condensador no deja pasar la corriente continua.

¿Qué ocurre si conectamos un condensador en serie en un circuito de corriente alterna? El condensador se carga mientras aumente la tensión entre sus placas, y se descarga cuando la tensión acumulada es superior a la aplicada. Con lo cual en C.A. el condensador se carga y descarga en cada mitad del ciclo, haciendo fluir por el circuito corriente en todo momento. En conclusión, un condensador sí que permite el paso de la corriente alterna, aunque como ya estudiaremos más adelante, se produce una distorsión o desfase en el tiempo entre la tensión y la corriente.

9.2 Capacidad de un condensador

Se denomina capacidad de un condensador a la propiedad que éstos poseen de almacenar mayor o menor cantidad de electricidad.

La cantidad de cargas que puede almacenar un condensador depende, fundamentalmente, de la tensión aplicada entre sus armaduras y de sus características constructivas.

Para entender mejor esto vamos a comparar la capacidad de almacenar cargas de un condensador con la capacidad de almacenar aire de un globo.

Para que el aire entre en un globo es necesario insuflarlo con una cierta presión, de tal forma que, según aumentemos dicha presión, mayor será la cantidad de aire que conseguiremos almacenar en dicho globo (Figura 9.5).

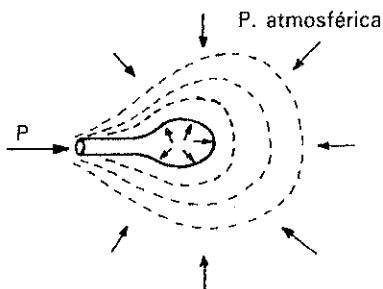


Figura 9.5. Comparación entre el llenado de un globo y la carga de un condensador.

En conclusión, la cantidad de aire que es posible introducir en un globo depende del tamaño del globo y de la presión aplicada al mismo. Por supuesto, si la presión aplicada fuese superior a la que pueden soportar las paredes elásticas del globo, éste estallaría en pedazos.

Si ahora comparamos el concepto de presión aplicado al globo con el de tensión aplicado a las armaduras de un condensador, resultará que la cantidad de cargas almacenadas por un condensador será mayor al aumentar dicha tensión. Debe tenerse en cuenta que las cargas fluyen a las armaduras debido a la diferencia de cargas o tensión que le proporciona la pila o el generador.

Por otro lado, cuanto mayor sea la superficie del dieléctrico, menor la distancia que separa las armaduras y mejor la calidad del aislante, mayor será la capacidad de almacenar cargas del condensador.

Si llamamos Q a la cantidad de carga almacenada por el condensador, C a la capacidad del condensador y V a la tensión entre las armaduras, resulta que:

$$Q = C \cdot V$$

Q = Culombios

C = Faradios

V = Voltios

La unidad de capacidad es el faradio (F). Se puede decir que un condensador posee la capacidad de un faradio cuando almacena una carga de un culombio al aplicar una tensión de un voltio entre sus placas.

El faradio es una unidad muy grande, por lo que se utilizan submúltiplos, correspondientes a su millonésima parte, millonésima parte y billonésima parte, que reciben los nombres de:

- **Microfaradio (μF)** $1 \mu F = 1/1.000.000 = 0,000001 = 10^{-6} F$
- **Nanofaradio (nF)** $1 nF = 1/1.000.000.000 = 0,000000001 = 10^{-9} F$
- **Picofaradio (pF)** $1 pF = 1/1000000000000 = 0,000000000001 = 10^{-12} F$

Ejemplo: 9.1

Calcular la carga eléctrica almacenada por un condensador de $2.200 \mu F$ de capacidad cuando se le conecta a una pila de 4,5 V.

Solución: Lo primero que hacemos es cambiar las unidades:

$$\frac{2.200 \mu F}{1.000.000} = 0,0022 F$$

$$Q = C \cdot V = 0,0022 \cdot 4,5 = 0,0099 \text{ culombios}$$

La capacidad de un condensador es mayor cuanto más grande sea la superficie de sus armaduras, ya que al aumentar la superficie de cargas enfrentadas aumenta la carga del mismo. Por otro lado, la capacidad es menor cuanto mayor sea la distancia que separan a las mismas, ya que las cargas se mantienen sujetas en las armaduras gracias a la atracción que se produce entre ellas por el efecto de las diferencias de cargas. Si la distancia entre éstas fuera grande, apenas habría atracción y la capacidad disminuiría.

Por último, se ha comprobado que, según sea la substancia aislante que se introduce entre las armaduras, la capacidad también varía. Este factor se mide con la constante dieléctrica de la substancia que se utiliza como aislante.

La expresión matemática que relaciona la capacidad con sus características constructivas, es:

$$C = \frac{\epsilon}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{S}{d}$$

– S = superficie de las armaduras en m^2

– d = espesor del dieléctrico en m

– ϵ = constante dieléctrica de la substancia aislante

En la Tabla 9.1 aparecen reflejados los valores de la constante dieléctrica de los materiales más comunes.

Substancia	ϵ	Substancia	ϵ
Aire	1	Ebonita	2,5 a 3,2
Petróleo	2	Poliéster	3
Aceite mineral	2,2 a 2,4	Mica	3 a 6
Parafina	1,9 a 2,3	Porcelana	4,5 a 6
Papel	2 a 2,8	Vidrio	5 a 10
Madera	2,8	Baquelita	5,6 a 8,5

Tabla 9.1. Constante dieléctrica de diferentes aislantes.

Ejemplo: 9.2

Calcular la capacidad de un condensador si sus placas son de $0,1 \text{ m}^2$, la distancia entre placas de $0,3 \text{ mm}$ y el dielectrico es de: a) aire; b) poliéster.

Solución: Para un dieléctrico de aire tenemos que:

$$C = \frac{\epsilon}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{S}{d} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{0,1}{0,0003} = \\ 2,95 \cdot 10^9 \text{ F} = 2,95 \text{ nF}$$

$$0,3 \text{ mm} = 0,3/1000 = 0,0003 \text{ m}$$

Si utilizamos como dieléctrico el poliéster obtendremos una capacidad tres veces superior, ya que $\epsilon = 3$.

9.3 Carga de un condensador

Con ayuda del circuito de la Figura 9.6 vamos a estudiar el proceso de carga y descarga de un condensador.

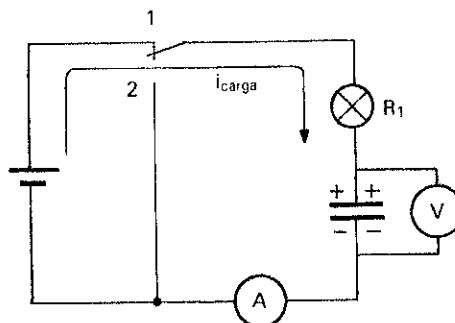


Figura 9.6. Ensayo para estudiar el proceso de carga de un condensador.

La lamparita de resistencia (R_1) se ha conectado en serie con el circuito para retardar el proceso de carga, (Figura 9.6). El amperímetro (A) nos indicará la intensidad de carga y el voltímetro (V) la tensión a que queda sometido el condensador en todo momento. Cuando el commutador se posiciona en el punto (1) el condensador se pone en contacto con el generador y comienza su proceso de carga.

En el primer momento la diferencia de cargas que existe en el condensador es cero y, por lo tanto, al no haber nada que se oponga al establecimiento de la corriente, la intensidad que indicará el amperímetro en el primer momento de conexión será igual a:

$$i_{\max} = \frac{E}{R_1}$$

Según se va cargando el condensador la tensión de éste irá creciendo, tal como lo podríamos comprobar con el voltímetro. En consecuencia, la diferencia de potencial que existe entre el generador y el condensador se hace más pequeña y, por consiguiente se irá reduciendo la intensidad de carga. Cuando el condensador alcanza la misma tensión que el generador se completa el ciclo de carga y la intensidad de corriente queda interrumpida.

En las curvas de carga de la Figura 9.7 se puede apreciar claramente este proceso.

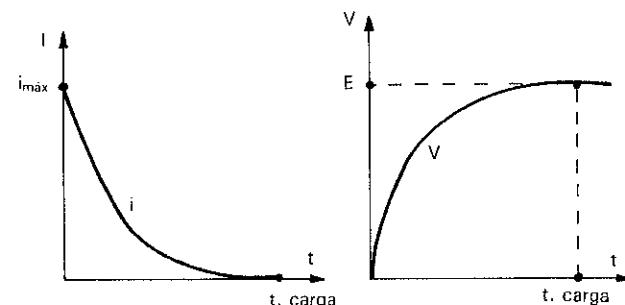


Figura 9.7. Curvas de carga de un condensador.

En conclusión, un condensador en C.C. sólo deja pasar la corriente durante el corto período de tiempo que dura su carga. Al cabo de este tiempo actúa como un interruptor abierto.

9.4 Descarga de un condensador

Al cambiar de posición el conmutador (Figura 9.8), el condensador se descarga por la lámpara.

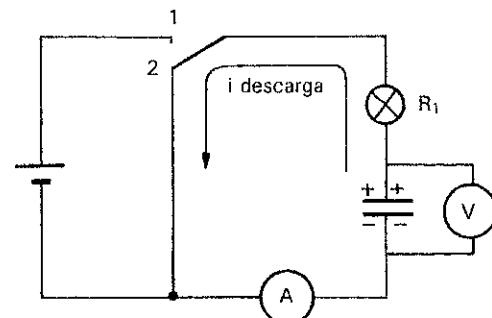


Figura 9.8. Proceso de descarga del condensador.

En un primer momento la intensidad es grande, ya que el condensador tiene toda la tensión (la misma que la del generador). Según se va descargando el condensador, la tensión se va reduciendo y, con ella la intensidad de la corriente. Cuanto

do el condensador se descarga totalmente la intensidad y la tensión se anulan, tal como se ha representado en las curvas de descarga de la Figura 9.9.

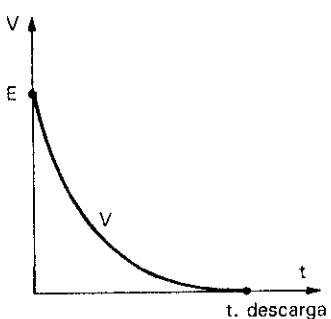


Figura 9.9. Curva de descarga de un condensador.

9.5 Constante de tiempo de carga y descarga de un condensador

Se conoce por constante de tiempo al tiempo que invierte el condensador en adquirir el 63% de la carga total. La constante de tiempo de condensador es igual al producto $R \cdot C$. Esta constante es igual de válida para calcular el tiempo de descarga de un condensador. En la teoría un condensador tardaría un tiempo infinito en cargarse o descargarse totalmente; en la práctica se puede comprobar que transcurrido un tiempo igual a *cinco constantes de tiempo* se puede dar por terminado prácticamente el 100% del proceso de carga o descarga del condensador.

Ejemplo: 9.3

Determinar la constante de tiempo del condensador del circuito de la Figura 9.10. Calcular también el tiempo de carga completa del condensador.

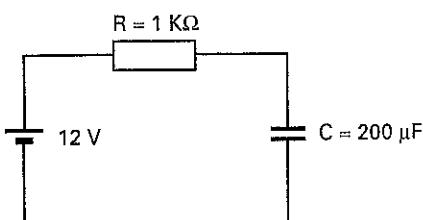


Figura 9.10

Solución: La constante de tiempo será igual a:

$$\tau = R \cdot C = 1.000 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 0,2 \text{ segundos}$$

El tiempo total de carga se dará para cinco constantes de tiempo:

$$t = 5 \cdot \tau = 5 \cdot 0,2 = 1 \text{ segundo}$$

9.6 Tensión de trabajo y de perforación del dieléctrico

¿Recuerdas cómo el globo descrito anteriormente, al aumentar la presión estallaba en pedazos? De igual forma, si un condensador es sometido a una tensión excesiva, el dieléctrico no podrá soportarlo y se perforará. Tengase en cuenta que las armaduras están muy próximas y un aumento de la tensión produce, a su vez, un aumento de atracción entre las cargas de ambas armaduras.

De aquí surge el concepto de **tensión de perforación**, que se define como la tensión máxima que es capaz de soportar un condensador sin que se destruya su dieléctrico.

Por supuesto, no es recomendable que la tensión a la que trabaja un condensador sea mayor que la de perforación. De aquí nace el concepto de **tensión de trabajo**, que se define como la tensión a la que puede funcionar un condensador de una forma permanente sin sufrir daños. Esta tensión es la que se encuentra indicada en la superficie de los condensadores.

La tensión de trabajo de un condensador tiene una gran incidencia en las dimensiones de éstos. Cuanta más tensión de trabajo posea el condensador, mayor tiene que ser el espesor del dieléctrico, lo que hace que haya que aumentar, en estos casos, la superficie de las placas para conseguir una capacidad considerable. De tal forma, que podremos encontrar condensadores de baja tensión y elevada capacidad que presenten un tamaño similar al de otros de elevada tensión y pequeña capacidad.

9.7 Tipos de condensadores

Existe una amplia gama de diferentes tipos de condensadores en el mercado, de los que conviene conocer sus principales características, con objeto de poder utilizarlos para la aplicación más idónea.

Al igual que las resistencias, existen condensadores variables a los que se les puede modificar su valor capacitivo. Estudiaremos aquí los condensadores fijos, que son los de más extensa aplicación.

Condensadores de plástico (Figura 9.11). Actualmente son muy utilizados. Estos condensadores utilizan normalmente como dieléctrico el poliéster y el estiroflex. Su utilización tiene la ventaja de conseguir capacidades relativamente elevadas a tensiones que lleguen hasta 1.000 V y capacidades desde un nanofaradio hasta algunos microfaradios.

Condensadores cerámicos (Figura 9.11). Estos condensadores utilizan como dieléctrico compuestos cerámicos de una constante dieléctrica muy elevada. Con ellos se consiguen valores desde algunos picofaradios hasta los 100 nF. Soportan poca tensión.

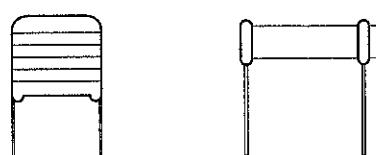


Figura 9.11. Condensadores de plástico y cerámica.

Condensadores electrolíticos (Figura 9.12). Estos condensadores se diferencian bastante del resto por sus características constructivas. Están constituidos por una lámina de aluminio y otra de plomo sumergidas en una solución de cloruro de amonio (electrólito). Son condensadores con los que se consiguen capacidades elevadas en un volumen reducido (desde $1\mu F$ hasta decenas de miles de microfaradios). Una de las características que diferencia a los condensadores electrolíticos de los demás es que tienen polaridad, es decir, no pueden invertirse las conexiones indicadas en la superficie del componente, ni, por tanto, aplicarse corriente alterna. En caso contrario, el condensador se perfora. En la actualidad se fabrican condensadores electrolíticos de tántalo, que reducen el tamaño para la misma capacidad que uno de aluminio. Además, el electrólito suele ser seco.

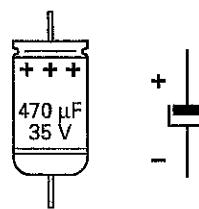


Figura 9.12. Condensadores electrolíticos.

9.8 Asociación de condensadores

En el caso de que un condensador no disponga de la capacidad o tensión de trabajo adecuada para nuestras necesidades, se pueden acoplar entre sí en serie o paralelo y así conseguir las características deseadas.

9.8.1 Asociación de condensadores en serie

La tensión aplicada al conjunto se reparte entre los terminales de cada uno de los condensadores (Figura 9.13), de tal forma que se cumple la relación: $V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$. Con esta disposición cada uno de los condensadores trabaja a una tensión más baja que la aplicada al conjunto de los mismos. Sin embargo la capacidad total obtenida es inferior a la de cualquiera de ellos. Se cumple que:

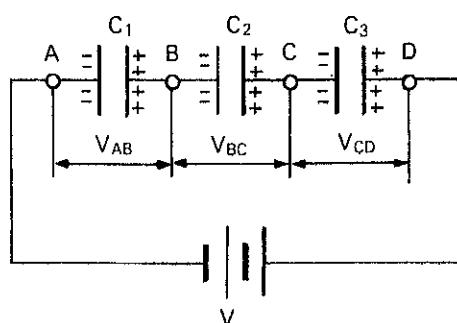


Figura 9.13. Asociación de condensadores en serie.

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

Veamos como se llega a este resultado:

Como el circuito es serie no existe más que una sola intensidad, y como el tiempo de carga (t) es igual para todos los condensadores, si llamamos Q_1 , Q_2 y Q_3 a la carga que consigue cada condensador respectivo, y Q_T a la carga total, tendremos que:

$$I = \frac{Q_1}{t} = \frac{Q_2}{t} = \frac{Q_3}{t} = \frac{Q_T}{t},$$

de lo que se deduce que $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_T$.

Por otro lado, tenemos que $Q = V \cdot C$, despejando V , tenemos que:

$$V_{AB} = \frac{Q_1}{C_1}, \quad V_{BC} = \frac{Q_2}{C_2}, \quad V_{CD} = \frac{Q_3}{C_3}, \quad V = \frac{Q_T}{C_T}$$

Sustituyendo estos términos en la expresión de las tensiones:

$V = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$, tenemos que:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3}$$

Como las cargas son iguales:

$$\frac{Q}{C_T} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \Rightarrow \\ \frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

De lo que se deduce la expresión de la capacidad total o equivalente C_T indicada al principio.

Ejemplo: 9.4

Se conectan en serie tres condensadores de $4\mu F$, $8\mu F$ y $12\mu F$ a una fuente de alimentación de $100 V$ en C.C. Calcular la capacidad conseguida por el conjunto, así como la tensión a la que trabaja cada uno de los condensadores.

Solución:

$$C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = \dots = 2,18 \mu F$$

$$Q_T = V \cdot C_T = \dots = 2,18 \cdot 10^{-4} \text{ culombios} = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$V_{AB} = \frac{Q_1}{C_1} = \dots = 54,5 \text{ V}, \quad V_{BC} = \dots = 27,25 \text{ V}$$

$$V_{CD} = \dots = 18,25 \text{ V}$$

*Nota: no olvidar que hay que operar con faradios.

La capacidad del conjunto se ha visto reducida; en compensación, los condensadores trabajan a menos tensión que los 100 voltios aplicados al conjunto.

Ejemplo: 9.5

Se dispone de un número ilimitado de condensadores de $100 \mu\text{F}$ de capacidad y 50 V de tensión de trabajo. ¿Cuántos condensadores de este tipo sería necesario acoplar para conseguir un equivalente con una tensión de trabajo de 200 V y una capacidad de $25 \mu\text{F}$? ¿Cómo hay que acoplarlos?

Solución: Al acoplar cuatro condensadores $100 \mu\text{F}$ en serie se consigue una capacidad equivalente igual a:

$$C_T = \frac{100}{4} = 25 \mu\text{F}$$

Al ser iguales los condensadores la tensión se reparte por igual en cada condensador:

$$V = \frac{200}{4} = 50 \text{ V}$$

Con esta solución hemos conseguido conectar a una tensión de 200 V condensadores que sólo soportan 50 V . Por supuesto se ha hecho a costa de reducir la capacidad de $100 \mu\text{F}$ a $25 \mu\text{F}$.

9.8.2 Asociación en paralelo

En este acoplamiento, la tensión a la que quedan sometidos todos los condensadores es la misma y coincide con la aplicada al conjunto (Figura 9.14).

La capacidad aumenta cuando se les conecta en paralelo. Se cumple que:

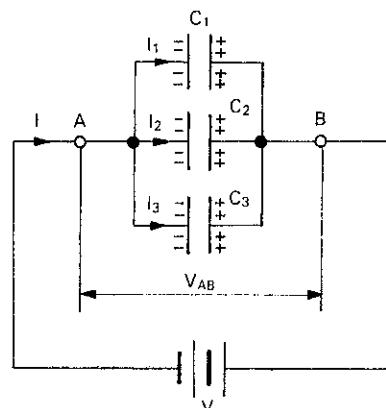


Figura 9.14. Asociación de condensadores en paralelo.

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

Ejemplo: 9.6

Se acoplan en paralelo tres condensadores de $4 \mu\text{F}$, $8 \mu\text{F}$ y $12 \mu\text{F}$ a una fuente de alimentación de 100 V en C.C. Averiguar la capacidad del conjunto, así como la tensión a la que trabajan los condensadores.

Solución: La capacidad total conseguida es:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = \dots = 24 \mu\text{F}$$

La tensión de trabajo de los condensadores es igual para todos: 100 V .

Con este montaje hemos conseguido aumentar la capacidad mientras que la tensión de trabajo permanece invariable.

Ejemplo: 9.7

Determinar cuántos condensadores de $20 \mu\text{F}$ de capacidad y 5 V de tensión de trabajo hay que conectar para conseguir un equivalente de $20 \mu\text{F}/10 \text{ V}$.

Solución: Al conectar dos condensadores en serie se consigue aumentar la tensión hasta 10 V a costa de reducir la capacidad a $10 \mu\text{F}$. Si ahora conectamos otra rama de dos condensadores en serie que, a su vez, estén conectados en paralelo con la otra rama conseguiremos aumentar la capacidad hasta los $20 \mu\text{F}$ sin modificar la tensión, tal como se indica en la Figura 9.15.

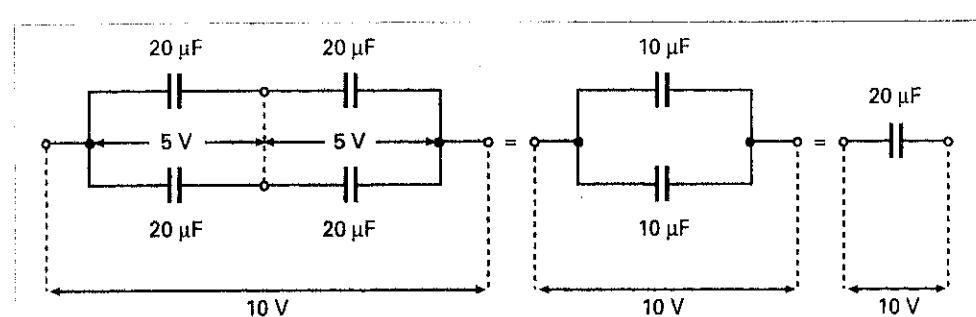


Figura 9.15

Actividades

1. Consigue diferentes tipo de condensadores e identifica su características más relevantes.
2. Conecta un condensador de gran capacidad con una resistencia en serie, tal como se indicaba en el circuito de la Figura 9.6 y mediante un voltímetro y un amperímetro comprueba cómo evoluciona la tensión y corriente en el proceso de carga y descarga del condensador. Calcula el valor teórico de la constante de carga y comprueba experimentalmente si se cumple dicha relación.
3. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este

capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

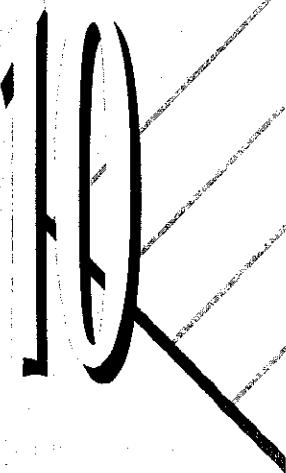
Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.)

Autoevaluación

- 1) ¿Cuáles son las características que hay que conocer para definir un condensador comercial?
 - a) Capacidad y potencia
 - b) Capacidad, tipo de dieléctrico, separación entre placas
 - c) Tipo, capacidad y tensión de trabajo
- 2) ¿Qué ocurre si en un circuito de una lámpara alimentada por una fuente de alimentación de C.C. intercalamos en serie un condensador?
 - a) La lámpara se enciende durante un instante y luego se apaga totalmente
 - b) La lámpara se enciende normalmente
 - c) La lámpara se enciende y se apaga constantemente
- 3) ¿Qué ventajas conlleva el uso de condensadores electrolíticos?
 - a) Soportan tensiones de trabajo fuertes
 - b) Se consiguen altas capacidades y se pueden emplear en C.A.
 - c) Se consiguen altas capacidades
- 4) ¿Qué ventajas aporta la conexión de condensadores en serie?
 - a) Se aumenta la capacidad del conjunto de condensadores acoplados
- b) Se consigue aumentar la tensión de trabajo del conjunto de condensadores acoplados
- c) Se aumenta la tensión y la capacidad
- 5) ¿Qué puede ocurrir cuando se supera la tensión de trabajo de un condensador?
 - a) El condensador se calienta
 - b) El condensador cambia la capacidad nominal
 - c) El condensador se puede perforar y destruir
- 6) Calcular la carga eléctrica que almacena un condensador de $1.000 \mu\text{F}$ cuando es sometido a las siguientes tensiones: 4 V, 20 V y 100 V, respectivamente.
- 7) ¿Qué espesor deberá tener el dieléctrico de un condensador plano de porcelana ($\epsilon = 5,5$) para conseguir una capacidad de 1 nF , si posee unas armaduras con unas dimensiones de $50 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$?
- 8) Determinar la constante de tiempo y el tiempo que invierte un condensador de $100 \mu\text{F}$ cargado con 24 V en descargarse totalmente a través de una resistencia de 100Ω .
- 9) Se dispone de un número ilimitado de condensadores de $10 \mu\text{F}$ de capacidad y 5 V de tensión de trabajo. ¿Cuántos condensadores de este tipo sería necesario acoplar para conseguir un equivalente con una tensión de trabajo de 20 V y una capacidad de $2,5 \mu\text{F}$? ¿Cómo hay que acoplarlos?

- a) 4 condensadores en paralelo
- b) 4 condensadores en serie
- 10) ¿Y para conseguir un equivalente con una capacidad de $5 \mu\text{F}$ y una tensión de trabajo de 20 V?
- a) 8 condensadores agrupados en 2 ramas en paralelo consistentes en 4 condensadores conectados en serie.
- b) 16 condensadores agrupados en 4 ramas de 4 condensadores en serie. Las ramas se conectan en paralelo.
- 11) ¿Y para conseguir un equivalente con la misma capacidad ($10 \mu\text{F}$) y una tensión de trabajo de 15 V?
- a) 9 condensadores agrupados en 3 ramas de 3 condensadores en serie. Las ramas se conectan entre sí en serie.
- b) condensadores agrupados en 3 ramas de 3 condensadores en serie. Las ramas se conectan entre sí en paralelo.
- 12) Se conectan en serie un condensador de $6 \mu\text{F}$ con otro de $3 \mu\text{F}$ a una tensión de 100 V. Se trata de calcular la capacidad y la carga del conjunto formado, así como la carga y tensión de cada condensador.
- 13) Se conectan en paralelo un condensador de $5 \mu\text{F}$ con uno de $15 \mu\text{F}$ a una tensión de 100 V. Calcular la capacidad y la carga del conjunto formado, así como la carga de cada condensador.

Magnetismo y Electromagnetismo



Introducción

El magnetismo tiene que ver con fenómenos de atracción y repulsión que se dan con los imanes y con los materiales ferromagnéticos, y el electromagnetismo con fenómenos magnéticos que aparecen cuando los conductores y bobinas son recorridos por una corriente eléctrica. El estudio de estas dos ciencias es importante, ya que aprovechando estos fenómenos se pueden construir electroimanes, transformadores, motores, generadores de electricidad como las dinamos y alternadores, altavoces, relés y contactores, cerraduras electromagnéticas, cocinas de inducción, detectores de metales, electroválvulas y un sinfín más de aplicaciones.

Contenido

- *Imanes.*
- *Campo magnético de un imán.*
- *Electromagnetismo.*
- *Magnitudes magnéticas.*
- *Curva de magnetización.*
- *Histéresis magnética.*
- *Cálculo de circuitos magnéticos.*
- *Electroimanes.*

Objetivos

- Entender los efectos de los campos magnéticos.
- Determinar el espectro magnético de un imán.
- Relacionar las magnitudes fundamentales básicas de un campo magnético con sus unidades de medida y entender su importancia en un circuito magnético.
- Determinar la relación existente entre las corrientes eléctricas y los campos magnéticos.
- Determinar el sentido de las líneas de fuerza de un campo electromagnético, así como la intensidad y densidad del mismo.
- Apreciar la importancia de la permeabilidad magnética en la construcción de núcleos para electroimanes.
- Interpretar la curva de magnetización y el ciclo de histéresis, determinando la saturación magnética, así como las pérdidas originadas en las sustancias magnéticas.
- Utilizar los electroimanes para aplicaciones prácticas.

10.1 Imanes

Si tomamos un imán e intentamos acercar diferentes objetos metálicos, podremos observar que éste atrae con fuerza sólo aquellos objetos que sean de hierro o de acero. Este fenómeno también se da con el níquel y el cobalto. A estos materiales que son susceptibles de ser atraídos por un imán se les conoce por el nombre de **materiales ferromagnéticos**.

Las aplicaciones de los imanes son muy variadas, ya que con ellos se pueden producir fuerzas mecánicas considerables. Así, por ejemplo se pueden utilizar como separadores magnéticos que separan materiales magnéticos de no magnéticos. Otras aplicaciones de los imanes son pequeñas dinamos, micrófonos, altavoces, aparatos de medida analógicos y pequeños motores eléctricos de C.C.

10.1.1 Polos de un imán

Si depositamos una cantidad de limaduras de hierro sobre un imán recto, como el de la Figura 10.1, podremos observar que aparece una mayor concentración de éstas en los extremos del imán. A su vez también se puede comprobar cómo esta concentración disminuye hacia el centro, hasta desaparecer prácticamente en el centro.

Las zonas donde se produce la mayor atracción se denominan polos magnéticos. La zona donde no hay atracción se denomina línea neutra.

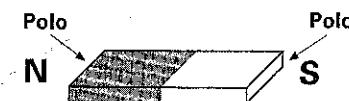


Figura 10.1. Polos de un imán.

10.1.2 Brújula

Una brújula es una aguja imantada que puede girar libremente en su eje central (Figura 10.2). Si nosotros dejamos girar libremente a la aguja imantada de una brújula, ésta se orientará siempre con un extremo hacia el polo norte terrestre y el otro hacia el sur. De aquí proviene el nombre de los polos de un imán. Al extremo de la aguja que se orienta hacia el norte geográfico terrestre se le denomina **polo norte**, y al otro **polo sur**.

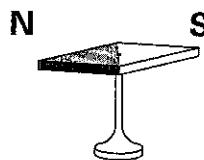


Figura 10.2. Brújula.

Dado que en los imanes los polos del mismo nombre desarrollan fuerzas de repulsión y los de diferente nombre de atracción, mediante una brújula será fácil determinar los nombres de los polos. Para ello bastará con acercar la brújula a unos de los polos del imán y comprobar si existe atracción o repulsión del polo norte de la misma.

10.1.3 Clases de imanes

En la naturaleza se pueden encontrar **imanes naturales**, como la magnetita, que posee ciertas propiedades magnéticas. Ahora bien, si lo que deseamos es potenciar dichas propiedades se pueden fabricar **imanes artificiales** a partir de substancias ferromagnéticas.

A su vez, los imanes artificiales, o substancias magnetizadas, dependiendo del tipo de substancia utilizada, una vez magnetizados pueden mantener durante largo tiempo sus propiedades magnéticas (**imanes permanentes**) o sólo cuando están sometidos a la acción de un campo magnético (**imanes temporales**).

Como ejemplo de imanes temporales tenemos el hierro puro, y como imán permanente, el acero. Mediante una sencilla experiencia se puede comprobar que al acercar un trozo de acero (por ejemplo un destornillador) a un imán, el acero queda magnetizado, apreciándose sus propiedades de atracción aunque retiremos el imán de dicho trozo de acero. Sin embargo, si utilizamos un trozo de hierro para la experiencia (por ejemplo un clavo de hierro), éste manifiesta propiedades de atracción hacia otros materiales sólo cuando está bajo la acción del campo magnético del imán; una vez retirado el imán, dicho trozo de hierro pierde prácticamente todas las propiedades magnéticas adquiridas.

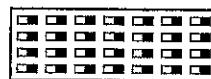
Para la construcción de imanes permanentes se utilizan aleaciones de acero-tungsteno, acero-cobalto, acero al titanio, hierro-níquel-aluminio-cobalto, etc.

Los imanes temporales son de gran utilidad para la construcción de núcleos para electroimanes, motores, generadores y transformadores. En estos casos se emplea la chapa de hierro aleada, por lo general, con silicio.

10.1.4 Teoría molecular de los imanes

Si rompemos un imán en dos, las dos partes resultantes son dos imanes completos con sus polos correspondientes. Si volviésemos a romper una de estas partes obtendríamos otros dos nuevos imanes. Este proceso se puede repetir multitud de veces, hasta alcanzar lo que vendremos a llamar **molécula magnética**.

Según esta teoría, se puede suponer que un imán está compuesto de moléculas magnéticas perfectamente orientadas con los polos respectivos del imán (Figura 10.3 a). Un trozo de hierro sin imantar está compuesto de moléculas magnéticas totalmente desorientadas (Figura 10.3 b).



a



b

Figura 10.3. Moléculas magnéticas de un imán (a) y de un trozo de hierro (b).

Esta teoría nos servirá de gran ayuda para comprender fenómenos complejos, como la permeabilidad, la saturación magnética, histéresis, etc., que estudiaremos más adelante.

Gracias a esta teoría también podremos entender más fácilmente el comportamiento de los materiales magnéticos utiliza-

dos para la elaboración de imanes permanentes y artificiales. En el caso de los imanes permanentes, aparece una especie de rozamiento interno entre las moléculas magnéticas que dificulta el retorno al estado inicial una vez orientadas y magnetizadas. Al contrario, en los imanes temporales las moléculas magnéticas se ordenan y desordenan con facilidad, en función de la influencia ejercida por la acción de un campo magnético externo al mismo.

Las propiedades magnéticas de los imanes se ven alteradas por la temperatura; así, por ejemplo, el hierro puro pierde totalmente su magnetismo por encima de los 769 °C. Por otro lado, si golpeamos fuertemente una trozo de acero imantado se puede modificar su propiedades magnéticas. Esto es debido a que los golpes pueden cambiar el orden de las moléculas magnéticas.

10.1.5 Campo magnético de un imán

Se puede decir que el campo magnético es el espacio, próximo al imán, en el cual son apreciables los fenómenos magnéticos originados por dicho imán.

El campo magnético de un imán es más intenso en unas partes que otras. Así, por ejemplo, el campo magnético adquiere su máxima intensidad en los polos, disminuyendo paulatinamente según nos alejamos de ellos. Para poder hacernos una idea del aspecto que tiene el campo magnético, o sea, de su espectro magnético, realiza la siguiente experiencia:

Experiencia 10.1: Se toma un imán sobre el que se coloca un lámina de plástico transparente y se espolvorea con limaduras de hierro, procurando que queden uniformemente repartidas por toda la superficie de la lámina de plástico transparente. Las limaduras de hierro se orientan sobre la misma dibujando la forma del campo magnético (Figura 10.4).

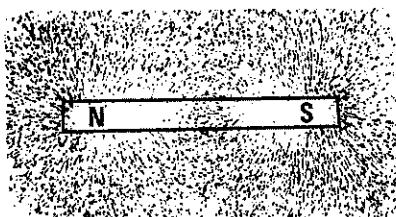


Figura 10.4. Espectro magnético de un imán.

Observa que hay más limaduras concentradas en los extremos, y que existen unas cadenas de limaduras formando unas líneas que van de un polo a otro. A estas cadenas se las conoce por el nombre de **líneas de fuerza del campo magnético**.

Las líneas de campo se pueden dibujar tal como se muestra en la Figura 10.5. La líneas de fuerza únicamente representan la forma del campo magnético. Ahora bien, por motivos de convencionalismos teóricos, se les da un sentido de circulación, de tal forma que se dice que las líneas de campo salen por el polo norte del imán, recorren el espacio exterior y entran por el polo sur. El sentido de circulación de estas líneas por el interior del imán es de sur a norte.

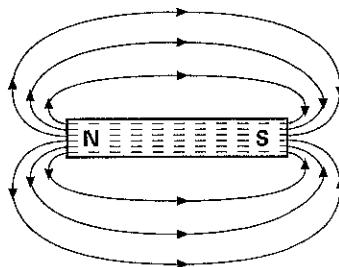


Figura 10.5. Líneas de fuerza del campo magnético.

La visualización de las líneas de campo resulta muy interesante, ya que conociendo su dirección podemos determinar la polaridad del campo magnético. Además, la mayor o menor concentración de las mismas nos indica lo intenso que es el campo en una determinada zona.

En la Figura 10.6 se puede observar que cuando acercamos dos imanes por sus polos iguales, las líneas de campo se repelen.

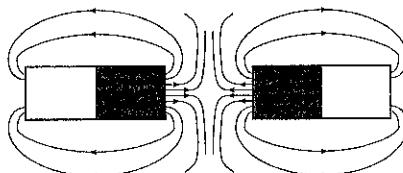


Figura 10.6. Repulsión de dos imanes.

Sin embargo, si acercamos dos imanes por sus polos opuestos (Figura 10.7), las líneas de campo se establecen en la misma dirección y se suman.

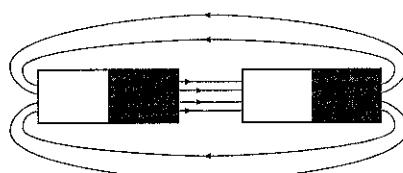


Figura 10.7. Atracción de dos imanes.

10.2 Electromagnetismo

Los imanes producen un campo magnético considerable, pero para ciertas aplicaciones éste resulta todavía muy débil. Para conseguir campos más intensos utilizaremos bobinas fabricadas con conductores eléctricos, que al ser recorridos por una corriente eléctrica desarrollan campos magnéticos, cuya intensidad depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente y del número de espiras de la bobina.

10.2.1 Campo magnético creado por un conductor cuando es atravesado por una corriente eléctrica

Si nosotros espolvoreamos limaduras de hierro sobre una hoja de papel que es atravesada por un conductor por donde

circula una corriente eléctrica (Figura 10.8), observaremos que las limaduras se orientan y forman un espectro magnético de forma circular (Figura 10.9).

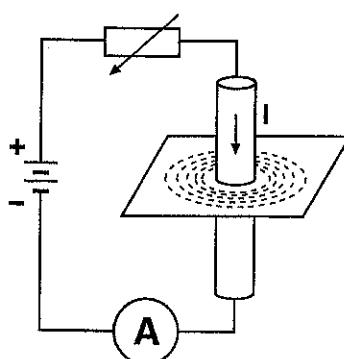


Figura 10.8.

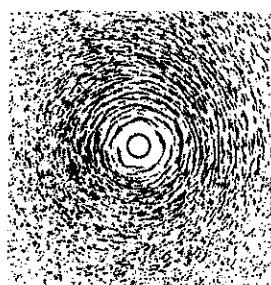


Figura 10.9. Espectro magnético de un conductor.

Esto demuestra que cuando un conductor es atravesado por una corriente eléctrica, a su alrededor aparece un campo magnético. Observando el espectro del campo magnético se puede apreciar que las líneas de fuerza toman la forma de círculos concéntricos que se cierran a lo largo de todo el conductor.

Si situamos varias agujas imantadas alrededor del conductor, podremos observar que su orientación depende del sentido de la corriente. Para determinar el sentido de las líneas de fuerza de una forma sencilla, se aplica la regla del sacacorchos o de Maxwell que dice así: *El sentido de las líneas de fuerza, concéntricas al conductor, es el que indicaría el giro de un sacacorchos que avanzase en el mismo sentido que la corriente* (Figura 10.10).



Figura 10.10. Regla del sacacorchos o de Maxwell.

***Nota:** Para aplicar correctamente esta regla se emplea el sentido convencional de la corriente.

La intensidad del campo magnético desarrollado por el conductor depende fundamentalmente de la intensidad de la corriente que fluye por el conductor. A más intensidad de corriente, más intensidad de campo.

10.2.2 Campo magnético en un conductor en forma de anillo

Un conductor recto produce un campo magnético muy disperso y, por tanto, muy débil. La forma de conseguir que el campo magnético sea más fuerte es disponiendo el conductor en forma de anillo.

El sentido de las líneas de fuerza de una parte del conductor se suma a la del otro, formando un campo magnético mucho más intenso en el centro de la espira (Figura 10.11). En la Figura 10.12 se puede apreciar el efecto de concentración de las líneas de campo en el centro del anillo al que, como en otras ocasiones, se le ha realizado el espectro magnético con limaduras de hierro.

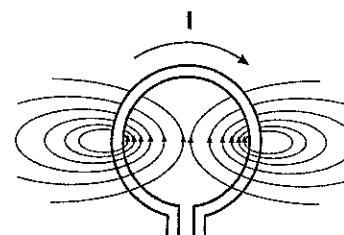


Figura 10.11.

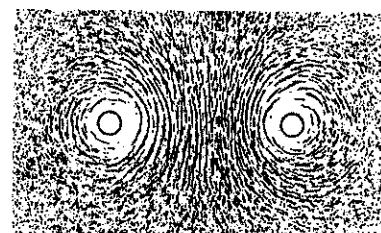


Figura 10.12. Espectro magnético de una espira.

10.2.3 Campo magnético formado por una bobina

En una bobina, el campo magnético de cada espira se suma al de la siguiente, concentrándose éste en el centro de la misma. El campo resultante es uniforme en el centro de la espira y mucho más intenso que en el exterior. En los extremos de la bobina se forman polos magnéticos (Figura 10.13).

Para determinar el sentido de las líneas de fuerza se aplica la regla del sacacorchos, pero de otra forma. Basta con girar el sacacorchos, en el mismo sentido de giro que la corriente eléctrica por las espiras. El sentido de avance del sacacorchos

nos indica el sentido de las líneas de fuerza. Una vez determinado este sentido, bien fácil es determinar los polos de la bobina (el polo norte estará situado en el extremo por donde salen las líneas de fuerza, y el sur por donde entran).

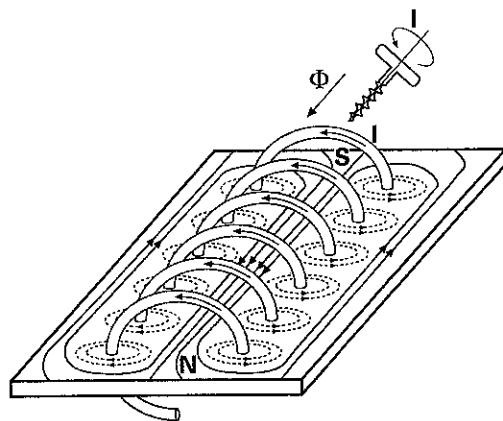


Figura 10.13. Campo magnético de una bobina.

10.3 Magnitudes magnéticas

Al igual que para definir el comportamiento de un circuito eléctrico utilizamos las magnitudes eléctricas, para definir los campos electromagnéticos utilizamos las magnitudes magnéticas.

10.3.1 Flujo magnético (Φ)

El campo magnético se representa a través de las líneas de fuerza. La cantidad de estas líneas se le denomina flujo magnético.

Se representa por la letra griega Φ ; sus unidades son:

- **El weber (Wb)**, en el sistema internacional.
- El maxvelio, en el sistema cgs (Mx).

La relación que existe entre ambas unidades es $1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ Mx}$.

10.3.2 Inducción magnética (B)

La inducción magnética se define como la cantidad de líneas de fuerza que atraviesan perpendicularmente la unidad de superficie. En cierta forma, nos indica lo densas que son las líneas de fuerza, o lo concentradas que están, en una parte del campo magnético.

Se representa por la letra griega B ; sus unidades son:

- **La tesla (T)**, en el sistema internacional.
- El gaus (Gs), en el sistema cgs.

La relación que existe entre ambas unidades es $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$.

Se dice que existe una inducción de una tesla cuando el flujo de un weber atraviesa perpendicularmente una superficie de un metro cuadrado.

$$1 \text{ tesla} = \frac{1 \text{ weber}}{1 \text{ m}^2}$$

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

Ejemplo: 10.1

¿Cuál es la inducción magnética existente en la cara plana del polo de un imán recto de 30 cm^2 de superficie cuando es atravesado por un flujo magnético de $0,009 \text{ Wb}$? Expresar el resultado en teslas.

$$\text{Solución: } B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,009}{0,003} = 3 \text{ T}$$

$$30 \text{ cm}^2 = 30 / 10.000 = 0,003 \text{ m}^2$$

Ejemplo: 10.2

¿Cuál será el flujo magnético que existe en el campo magnético producido por una bobina si ésta tiene un núcleo de 20 cm^2 de superficie y la inducción magnética en la misma es de 1,5 teslas?

Solución: Despejando de la fórmula general:

$$\Phi = B \cdot S = 1,5 \cdot 0,002 = 0,003 \text{ Wb} = 3 \text{ mWb} \text{ (miliweber)}$$

10.3.3 Fuerza magnetomotriz (\mathcal{F})

Se puede decir que es la capacidad que posee la bobina de generar líneas de fuerza en un circuito magnético. La fuerza magnetomotriz aumenta con la intensidad de la corriente que fluye por la bobina y con el número de espiras de la misma.

$$\mathcal{F} = N \cdot I$$

\mathcal{F} = Fuerza magnetomotriz en amperio-vuelta (Av)

N = Número de espiras

I = Intensidad de corriente (A)

Ejemplo: 10.3

Para el funcionamiento de un electroimán se necesita una fuerza magnetomotriz de 500 Av. Indicar dos posibilidades de conseguirlo.

Solución: Si fabricamos una bobina con 500 espiras, el número de amperios que tendremos que hacer pasar por ella será de:

$$\mathcal{F} = N \cdot I, \text{ despejando } I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{500}{500} = 1 \text{ A}$$

$$\text{¿y si la fabricamos con 100 espiras? } I = \frac{500}{100} = 5 \text{ A}$$

Para la fabricación de electroimanes muy potentes, como por ejemplo los que se utilizan para suspender en un colchón magnético un tren de alta velocidad sobre un monorail, se necesitan fuerzas magnetomotrices muy elevadas. Es decir, bobinas con muchas espiras que son atravesadas por grandes intensidades de corriente. Para evitar fabricar bobinas de grandes dimensiones se utilizan materiales superconductores. De esta forma se consiguen potenteísimos campos magnéticos con pocas espiras y corrientes de miles de amperios, que no calientan los superconductores por el efecto Joule por carecer éstos de resistencia eléctrica.

10.3.4 Intensidad de campo magnético (H)

Nos indica lo intenso que es el campo magnético. La intensidad de campo en una bobina depende de la fuerza magnetomotriz ($N \cdot I$). Ahora bien, cuanto más larga sea la bobina, más se dispersan las líneas de campo, dando como resultado una intensidad de campo más débil; por lo que se puede decir que, para una fuerza magnetomotriz constante, la intensidad de campo (H) es inversamente proporcional a la longitud media de las líneas de campo, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$H = \frac{N \cdot I}{L}$$

H = Intensidad del campo en amperio-vuelta/metro (Av/m)

N = N° de vueltas de la bobina

I = Intensidad de la corriente (A)

L = Longitud de la bobina (m)

Ejemplo: 10.4

Calcular la intensidad del campo en el interior de la bobina de la Figura 10.14. El número de espiras de la misma es de 300 y la corriente 10 A.

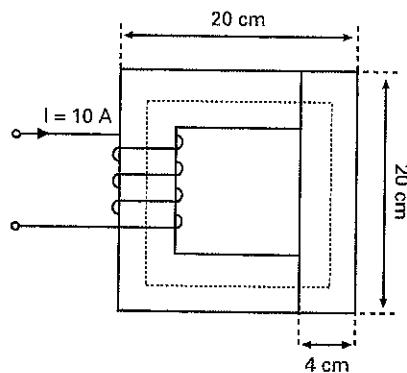


Figura 10.14

Solución: Primero determinamos la línea media por donde se van a establecer las líneas de campo. Para ello observamos las dimensiones del núcleo de la bobina:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}$$

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{300 \cdot 10}{0,64} = 4.687,5 \text{ Av/m}$$

10.3.5 Reluctancia (\mathfrak{R})

La reluctancia de un material nos indica si éste deja establecer las líneas de fuerza en mayor o menor grado. Los materiales no ferromagnéticos, como el aire, poseen una reluctancia muy elevada. En cierta forma la reluctancia es un concepto similar al de resistencia en un circuito eléctrico, hasta tal punto que podemos establecer una ley de Ohm para los circuitos magnéticos el flujo que se establece en un circuito magnético es proporcional a la fuerza magnetomotriz proporcionada por la bobina e inversamente proporcional a la reluctancia del medio por donde se establecen las líneas de fuerza del campo magnético:

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathfrak{R}}$$

Esta expresión también se conoce por **ley de Hopkinson**

La reluctancia es una característica propia de cada material magnético, y de la ley de Hopkinson se deduce que:

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi}$$

Las unidades que le corresponden son: Av/Wb

Ejemplo 10.5

Calcular la reluctancia que posee el núcleo de un electroimán si al hacer circular 5 A por la bobina de 1.000 espiras se ha establecido un flujo magnético de 5 mWb.

Solución: La fuerza magnetomotriz de la bobina del electroimán es:

$$\mathcal{F} = N \cdot I = 1.000 \cdot 5 = 5.000 \text{ Av}$$

Si se establecen en el núcleo de hierro 5 mWb significa que su reluctancia es:

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi} = \frac{5.000}{0,005} = 1.000.000 \text{ Av/Wb}$$

10.4 Curva de magnetización. Saturación magnética

Cuando se somete una substancia a la acción de un campo magnético creciente H , la inducción magnética que aparece en la misma también aumenta en una relación determinada. Por lo general, esta relación (B - H) no es constante, por lo que es de gran utilidad conocer la curva de magnetización, que representa el valor de la inducción en función de la intensidad de campo en cada material.

En la curva de la Figura 10.15 se ha representado la relación B - H de un hierro dulce. En ella se puede apreciar que para valores de intensidad de campo de hasta 2000 Av/m (tramo a-b), la inducción magnética crece proporcionalmente hasta 0,2 T. A partir de este punto aparece un punto de inflexión en la curva, y a aumentos de la intensidad de campo le corresponden aumentos pequeñísimos de inducción magnética. A partir de ese punto se dice que el hierro ha alcanzado la **saturación magnética**.

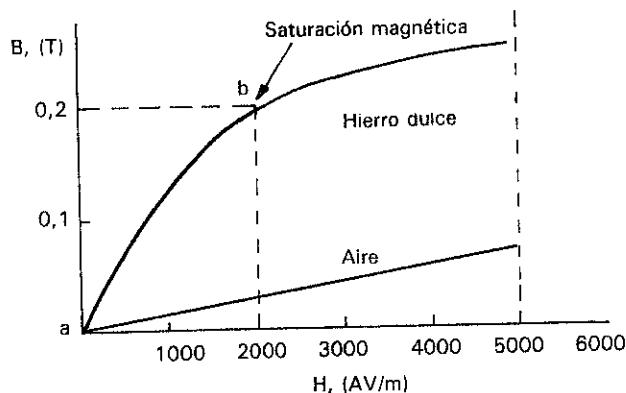


Figura 10.15. Curva de magnetización.

Para explicar el fenómeno de la saturación magnética se puede recurrir a la teoría molecular de los imanes: cuando se introduce en una bobina un núcleo de una substancia ferromagnética y se hace circular una corriente eléctrica por dicha bobina, aparece un campo magnético en su interior, de intensidad H , que orienta un cierto grado las moléculas magnéticas de dicha substancia; lo que refuerza el campo con una inducción B . Un aumento de la intensidad de la corriente trae como consecuencia un aumento de H ; lo que hace orientarse un poco más las moléculas magnéticas que se ve reflejado en un nuevo aumento de la inducción. Si seguimos aumentando la intensidad de la corriente, y con ella H , llega un momento en que las moléculas magnéticas están ya totalmente orientadas, y por mucho que se aumente la intensidad del campo, éste ya no se ve reforzado. Se ha alcanzado la saturación magnética.

En la Figura 10.15 también se ha incluido la curva de magnetización del aire, donde se observa un crecimiento pequeño pero constante de la inducción magnética alcanzada respecto a la intensidad de campo de la bobina.

10.5 Permeabilidad magnética

Se puede comprobar experimentalmente que al introducir en el núcleo de una bobina una barra de hierro, se aprecia un

notable aumento de las propiedades magnéticas de dicha bobina. Por esta razón, siempre que deseemos producir campos magnéticos intensos utilizaremos núcleos de hierro, como es el caso de los electroimanes.

Cuando se introduce en el núcleo de una bobina una substancia ferromagnética, se aprecia un aumento de líneas de fuerza en el campo magnético. Si llamamos B_0 a la inducción magnética que produce el electroimán con un núcleo de aire, y B a la inducción magnética conseguida al introducir una substancia ferromagnética, tendremos que:

$$B = \mu_r \cdot B_0$$

μ_r es el poder que posee la substancia ferromagnética de multiplicar las líneas de campo. A este parámetro se le conoce por el nombre de permeabilidad. En este caso, se trata de la **permeabilidad relativa** con respecto al aire o al vacío.

Este fenómeno lo podemos explicar valiéndonos de la teoría molecular de los imanes: la bobina con núcleo de aire produce un número determinado de líneas de fuerza. Al introducir un trozo de hierro, éste se ve sometido a la acción de estas líneas de fuerza y sus moléculas magnéticas tienden a orientarse. El núcleo de hierro ahora es un imán temporal que refuerza la acción del campo magnético original.

En la práctica, es más usual utilizar el concepto de **permeabilidad absoluta** (μ). Ésta nos relaciona la intensidad de campo que produce la bobina (H) con el nivel de inducción magnética alcanzado al introducir una substancia ferromagnética en el núcleo.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

O lo que es lo mismo: $B = \mu \cdot H$, donde se puede apreciar el poder multiplicador de la permeabilidad.

Las unidades de permeabilidad en el SI se dan en Henrios/metro (H/m).

Cada substancia magnética tiene su propio coeficiente de permeabilidad. Cuanto mayor es este coeficiente, mejores propiedades magnéticas poseerán estas substancias. Como ya estudiaremos a continuación, la permeabilidad de los materiales no es constante, y depende sobre todo de los niveles de inducción a que se someta a los mismos.

La **permeabilidad del aire o el vacío** en el S.I. es:

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Con esta expresión relacionamos la permeabilidad absoluta con la relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Ejemplo: 10.6

Determinar la permeabilidad absoluta y relativa que aparecerá en el núcleo de hierro de un electroimán si se ha

medido un flujo magnético de 5 mWb. Los datos que se conocen son: $N = 500$ espiras; $I = 15$ A; longitud media del núcleo = 30 cm; superficie recta del núcleo = 25 cm^2 .

Solución: Primero calculamos la inducción magnética:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,005}{0,0025} = 2 \text{ T}$$

La intensidad de campo en la bobina es:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{500 \cdot 15}{0,3} = 25.000 \text{ Av/m}$$

La permeabilidad absoluta es entonces:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{2}{25.000} = 0,00008 \text{ H/m}$$

La permeabilidad relativa:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{0,00008}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 64$$

Este último resultado nos indica que las líneas de campo son 64 veces mayor con el núcleo de hierro que con un núcleo de aire.

Ejemplo: 10.7

Una bobina posee 300 espiras, una longitud de 24 cm y está bobinada sobre un cilindro de 35 cm^2 de sección. Determinar la inducción (el flujo magnético alcanzado) si el núcleo es de aire y se hace circular por la bobina una corriente de 20 A.

Solución: Primero determinamos la intensidad del campo magnético generado por la bobina:

$$H = \frac{N \cdot I}{L} = \frac{300 \cdot 20}{0,24} = 25.000 \text{ Av/m}$$

Aplicando el concepto de permeabilidad absoluta, tendremos que el nivel de inducción alcanzado con un núcleo de aire es:

$$B = \mu_0 \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 25.000 = 0,03 \text{ T}$$

El flujo magnético para una sección transversal de la bobina de 35 cm^2 es:

$$\Phi = B S = 0,03 \cdot 35 \cdot 10^{-4} = 0,105 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} = 0,105 \text{ mWb}$$

Los datos obtenidos en los ensayos de magnetización de diferentes substancias se pueden reflejar también en una Tabla como la 10.1.

B (T)	H (Av/m)		
	Hierro torrado	Chapa normal	Chapa al silicio
0,1	80	60	90
0,3	120	65	140
0,5	160	100	170
0,7	230	180	240
0,9	400	360	350
1,1	650	675	530
1,3	1000	1200	1300
1,5	2400	2200	5000
1,6	5300	3500	9000
1,7	7000	6000	15500
1,8	11000	10000	27500
1,9	17000	16000	
2	27000	32000	

Tabla 10.1. Relación entre H y B para diferentes niveles de inducción de varias substancias ferromagnéticas.

Con la ayuda de los datos de la Tabla 10.1 es posible comprobar que la permeabilidad de un material no es constante. Tomemos, por ejemplo, la chapa de silicio y calculemos la permeabilidad para los siguientes niveles de inducción: a) 0,7 T; b) 1,3 T, y c) 1,8 T.

$$a) \mu = \frac{B}{H} = \frac{0,7}{240} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ H/m}$$

$$b) \mu = \dots = 1 \cdot 10^{-3} \text{ H/m}, \quad c) \mu = \dots = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ H/m}$$

En conclusión, la permeabilidad se hace más pequeña según nos acercamos a los niveles de saturación magnética.

10.6 Histéresis magnética

El estudio de la histéresis tiene una gran importancia en los materiales magnéticos, ya que este fenómeno produce pérdidas en los núcleos de los electroimanes cuando son sometidos a la acción de campos magnéticos alternos. Estas pérdidas se transforman en calor y reducen el rendimiento de los dispositivos con circuitos magnéticos, como transformadores, motores, generadores, etc.

La palabra histéresis significa remanencia. Después de someter a una substancia ferromagnética a la acción de un campo magnético, cuando éste desaparece, la substancia manifiesta todavía un cierto nivel de inducción magnética, que recibe el nombre de **magnetismo remanente**.

En la Figura 10.16 se muestra el aspecto de la curva de magnetización de una substancia ferromagnética cuando es sometida a intensidades de campo magnético alternos.

En el punto **0** la substancia no ha sido magnetizada nunca y, en consecuencia, la inducción magnética es nula.

En el tramo (**0-a**) se va aumentando la intensidad de campo H , con lo que se consiguen valores crecientes de inducción hasta llegar a la saturación.

En el tramo (**a-b**) se va reduciendo la intensidad de campo en la bobina. La inducción también se reduce, pero no en la misma proporción que antes. En el punto (**b**) se ha anulado la intensidad de campo, sin embargo, la substancia manifiesta todavía un cierto magnetismo remanente (B_r).

En el tramo (**b-c**) se invierte el sentido del campo magnético (esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente eléctrica que alimenta la bobina del ensayo). En el punto (**c**) la inducción es cero; se ha conseguido eliminar por completo el magnetismo remanente. Para ello, ha habido que aplicar una intensidad de campo (H_c), conocida por el nombre de **campo coercitivo**.

En el tramo (**c-d**) se sigue aplicando una intensidad de campo negativo, con lo que se consiguen niveles de inducción negativos hasta alcanzar la saturación.

En los tramos (**d-e**), (**e-f**) y (**f-a**) se completa el ciclo de histéresis. La curva no pasa otra vez por el punto (**0**) debido a la histéresis.

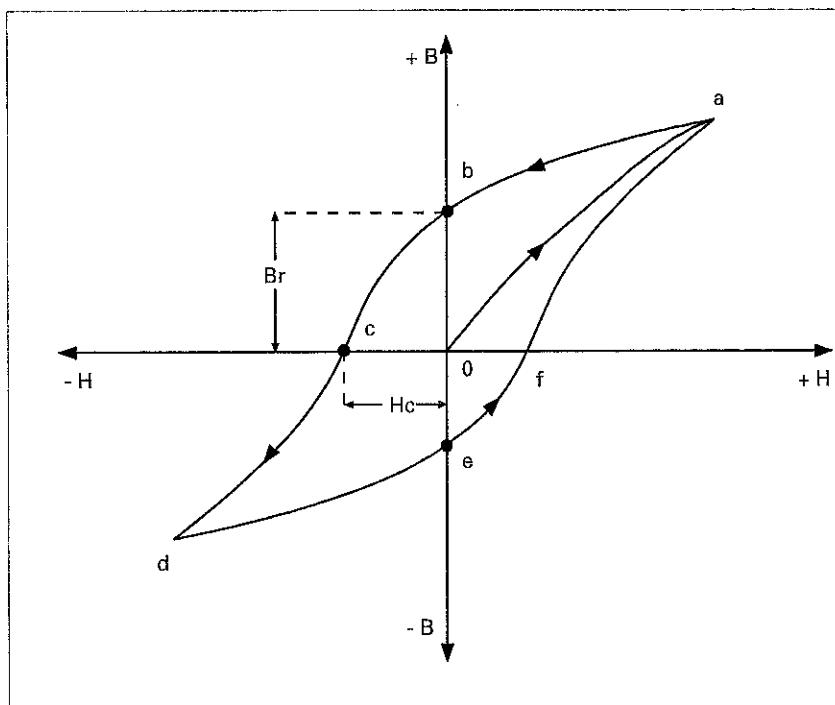


Figura 10.16. Ciclo de histéresis.

Las pérdidas que se originan en los materiales ferromagnéticos debido a la histéresis son proporcionales al área del ciclo. Si nos fijamos en el ciclo, este área aumenta en gran medida cuando el campo coercitivo H_c es grande. Por esta razón, cuando se eligen materiales ferromagnéticos para la construcción de aparatos que van a funcionar con corriente alterna, se procura que posean un campo coercitivo lo más pequeño posible.

Sin embargo, para la fabricación de imanes permanentes se eligen materiales que posean un campo coercitivo lo más grande posible.

Las pérdidas por histéresis en materiales sometidos a campos producidos por corrientes alternas aumentan con la frecuencia (cuantos más ciclos de histéresis se den por segundo, más calor se producirá).

También la histéresis se puede explicar mediante la teoría molecular de los imanes: al someter a un trozo de hierro a un campo alterno, las moléculas magnéticas se ven forzadas a girar en uno y otro sentido, produciéndose una especie de rozamiento molecular que produce calor. Este calor es más grande cuanto más se resisten las moléculas a cambiar de posición.

10.7 Cálculo de circuitos magnéticos

Se puede decir que un circuito magnético es por donde se establecen las líneas de campo. Para determinar la fuerza magnetomotriz (los amperios-vuelta) que debe aportar una bobina a un circuito magnético para conseguir un determinado nivel de inducción magnética se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Como } H = \frac{N \cdot I}{L},$$

de aquí se deduce que:

$N \cdot I = H \cdot L$, o lo que es lo mismo:

$$\mathcal{F} = H \cdot L$$

Con esta última expresión, y con la ayuda de las curvas de magnetización o de tablas, como la 10.1 ya podemos resolver algunas cuestiones.

Ejemplo: 10.8

En la figura se muestran las dimensiones de un circuito magnético fabricado con chapa al silicio. Se necesita obtener un nivel de inducción magnética de 1,3 T. Calcular la corriente que tendrá que recorrer la bobina si ésta posee 750 espiras.

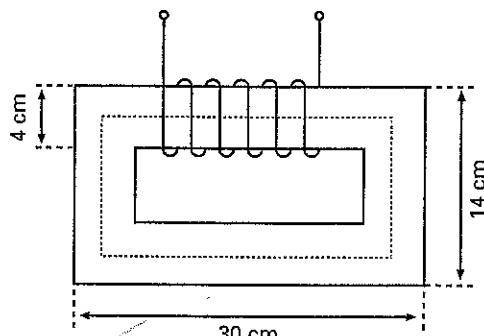


Figura 10.17

Solución: Consultando la Tabla 10.1 tenemos que para conseguir una inducción de 1,3 T en chapa al silicio se necesita una intensidad de campo igual a $H = 1.300 \text{ Av}$.

Según se desprende de la Figura 10.17 la longitud media de las líneas de campo, es:

$$L = 26 + 10 + 26 + 10 = 72 \text{ cm} = 0,72 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria será entonces:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 1.300 \cdot 0,72 = 936 \text{ Av}$$

La intensidad de la corriente:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{936}{750} = 1,25 \text{ A}$$

En el caso de que el circuito magnético esté compuesto por diferentes partes, se suman las fuerzas magnetomotoras de cada una de las diferentes partes del circuito magnético.

Ejemplo: 10.9

El circuito magnético de la Figura 10.18 está fabricado con hierro forjado. Se desea obtener en el entrehierro

(espacio sin hierro, donde las líneas de campo se tienen que establecer con gran dificultad por el aire) una inducción magnética de 0,9 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho entrehierro y que no se dispersa, determinar la intensidad de corriente que habrá que proporcionar a la bobina de 500 espiras.

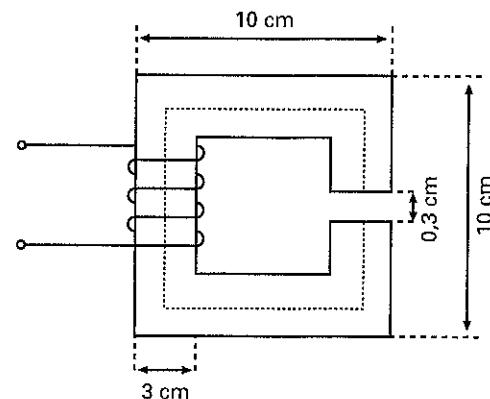


Figura 10.18

Solución: La intensidad de campo necesaria para conseguir una inducción de 0,9 T en la parte del circuito magnético formado por el hierro forjado es, según la Tabla 10.1, de 400 Av/m.

La longitud media del circuito formado por hierro, es:

$$L_{\text{Fe}} = 7 + 7 + 7 + 6,7 = 27,7 \text{ cm} = 0,277 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz que necesita el hierro, es:

$$\mathcal{F}_{\text{Fe}} = H_{\text{Fe}} \cdot L_{\text{Fe}} = 400 \cdot 0,277 = 111 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en el aire o entrehierro la calculamos aplicando el concepto de permeabilidad y recordando que la permeabilidad del aire es $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,9}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 716.197 \text{ Av/m}$$

Teniendo en cuenta que la longitud en el entrehierro es 0,3 cm (0,003 m), la fuerza magnetomotriz que necesita este tramo del circuito magnético es:

$$\mathcal{F}_{\text{aire}} = H \cdot L = 716.197 \cdot 0,003 = 2.149 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz necesaria para todo el circuito magnético será, por tanto:

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_{\text{Fe}} + \mathcal{F}_{\text{aire}} = 111 + 2.149 = 2.260 \text{ Av}$$

La intensidad de la bobina de 500 espiras, es:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{2.260}{500} = 4,52 \text{ A}$$

10.8 Electroimanes

Un electroimán consiste en un núcleo de hierro rodeado de una bobina, que se imanta a voluntad cuando hacemos pasar una corriente eléctrica, y se desmantiña en el momento que interrumpimos esta corriente (Figura 10.19).

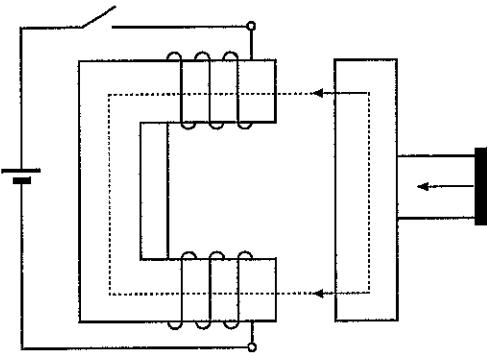


Figura 10.19

La fuerza con la que atrae un electroimán a una pieza de hierro móvil (armadura) a través del aire o entrehierro se puede calcular con la ayuda de la siguiente expresión:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S$$

F = Fuerza de atracción en Kp

B = Inducción en el núcleo en T

S = Superficie de contacto entre el núcleo y el hierro móvil en m²

Ejemplo: 10.10

Determinar la fuerza con la que atraerá el electroimán de la Figura 10.20 a la armadura de hierro si la inducción que aparece en el núcleo es de 1,5 T.

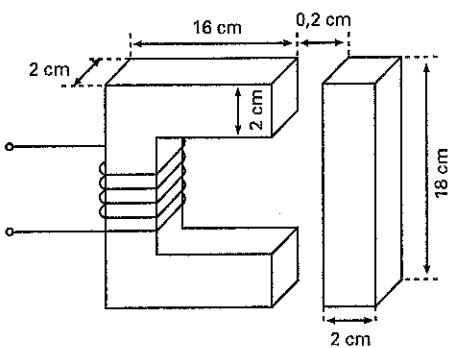


Figura 10.20

Solución:

La superficie de atracción de uno de los polos, es:

$$S = 2 \cdot 2 = 4 \text{ cm}^2$$

Como vamos a calcular la fuerza de atracción de los dos polos, la superficie será entonces:

$$S = 2 \cdot 4 = 8 \text{ cm}^2 = 0,0008 \text{ m}^2$$

La fuerza de atracción del electroimán, es:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S = 40.000 \cdot 1,5^2 \cdot 0,0008 = 72 \text{ Kp}$$

Ejemplo: 10.11

Se desea conseguir que el electroimán de la Figura 10.20 desarrolle una fuerza de atracción de 2,88 Kp. Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado y que la bobina posee 344 espiras, calcular la intensidad de corriente eléctrica para conseguirla.

Solución: Determinaremos primero la inducción magnética que se tiene que dar en el entrehierro:

$$F = 40.000 \cdot B^2 \cdot S, \text{ despejando:}$$

$$B = \sqrt{\frac{F}{40.000 \cdot S}} = \sqrt{\frac{2,88}{40.000 \cdot 0,0008}} = 0,3 \text{ T}$$

Consultando en la Tabla 10.1, tenemos que para conseguir 0,3 T en chapa normal necesitamos aplicar una intensidad de campo igual a 120 Av/m.

La longitud media del núcleo de chapa es:

$$L = 16 + 16 + 16 + 16 = 64 \text{ cm} = 0,64 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para chapa es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 120 \cdot 0,64 = 77 \text{ Av}$$

La intensidad de campo en el aire es:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,3}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 238.732 \text{ Av/m}$$

La longitud media del entrehierro es:

$$L = 0,2 + 0,2 = 0,4 \text{ cm} = 0,004 \text{ m}$$

La fuerza magnetomotriz para el entrehierro es:

$$\mathcal{F} = H \cdot L = 238.732 \cdot 0,004 = 955 \text{ Av}$$

La fuerza magnetomotriz para todo el circuito es:

$$\mathcal{F} = 77 + 955 = 1.032 \text{ Av}$$

Dado que la bobina es de 344 espiras, la intensidad con la que habrá que alimentarla es:

$$I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{1.032}{344} = 3 \text{ A}$$

10.8.1 Aplicaciones prácticas de los electroimanes

Según como se disponga el núcleo de los electroimanes, éstos pueden ser de culata (Figura 10.21) o de núcleo móvil (Figura 10.22). En los electroimanes el núcleo suele ser de un material ferromagnético con un bajo campo coercitivo, de tal forma, que sólo se imanta cuando las bobinas están siendo recorridas por una corriente eléctrica. En los dos tipos de electroimanes la parte móvil es atraída hacia el núcleo mientras alimentamos a la bobina con corriente eléctrica.

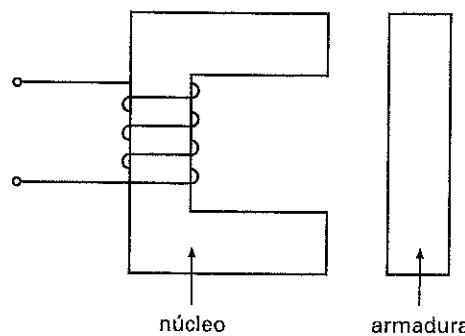


Figura 10.21. Electroimán de culata.

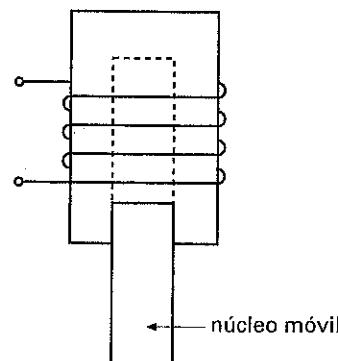


Figura 10.22. Electroimán de núcleo móvil.

Las aplicaciones de los electroimanes son muy variadas. Seguidamente, exponemos algunas de las más relevantes:

Frenos magnéticos: Se aplican sobre todo en ascensores, montacargas y grúas. Las zapatas de frenado se abren mediante un electroimán cuando existe una situación normal, es decir, cuando hay tensión en la red. Si por causa de una avería desaparece el suministro de energía eléctrica, las zapatas se cierran sobre la superficie de un tambor, con lo que frenan el sistema e impiden la caída al vacío de la carga.

Electroválvulas: La válvula abre o cierra el circuito hidráulico o neumático según sea o no alimentada la bobina del electroimán que lleva incorporado. La aplicación de las electroválvulas esta muy extendida en todo tipo de aplicaciones

industriales, donde la automatización de los fluidos tiene una gran importancia.

Por ejemplo, las lavadoras automáticas tienen una electroválvula para abrir el circuito de admisión de agua.

Timbres. Los timbres se utilizan para producir señales acústicas.

Sistemas que separan los materiales magnéticos de los no magnéticos: Se utilizan para separar el acero y el hierro del carbón, piedras o minerales, así como para separar los residuos de acero de la arena de moldeo y las virutas y limaduras de los talleres mecánicos.

Relés y contactores: El contactor se podría definir como un interruptor de múltiples contactos que se puede accionar a distancia. El funcionamiento de este dispositivo es como sigue (Figura 10.23). Cuando cerramos el interruptor simple, la bobina es atravesada por la corriente eléctrica y genera un campo magnético que hace que el núcleo atraiga a la armadura, arrastrando consigo a los contactos móviles. El resultado es que estos contactos cambian de posición y se cierran.

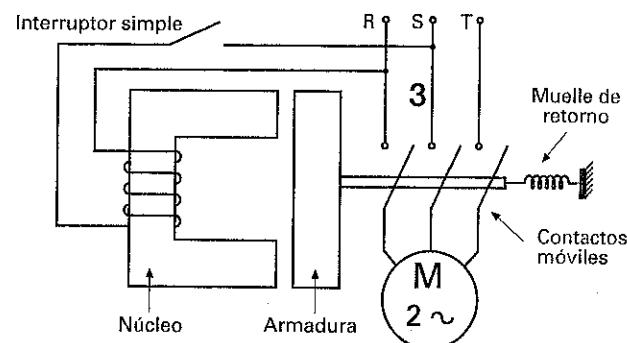


Figura 10.23. Contactor accionando un motor eléctrico trifásico.

La corriente eléctrica que necesita la bobina para crear el campo magnético necesario para que la armadura atraiga hacia sí al núcleo es muy pequeña en relación a la corriente que va a circular por los contactos principales que alimentan al motor.

En la actualidad se investiga en la creación de nuevos materiales ferromagnéticos por diferentes procedimientos de laboratorio con el objeto de darles a éstos ciertas características que los hagan útiles para el desarrollo de aplicaciones especiales. Como por ejemplo:

– Conductores eléctricos que poseen una propiedad conocida como "magnetoresistencia". Es decir, materiales en los que la resistencia eléctrica varía cuando son sometidos a la acción de un campo magnético. Esto puede tener aplicaciones como, por ejemplo, elementos sensibles o detectores de campos magnéticos, detectores de proximidad magnéticos, etc.

– Etiquetado magnético para evitar el robo de artículos en grandes almacenes.

Actividades

- Consigue los materiales necesarios para la observación del espectro magnético de imanes e electroimanes, así como la comprobación de las propiedades magnéticas más significativas (atracción y repulsión entre imanes, polaridad de los campos magnéticos generados por conductores y bobinas, etc). Comprueba también cómo se multiplican las líneas de campo al introducir en una bobina con núcleo de aire una substancia ferromagnética.
- Consigue diferentes dispositivos que funcionen gracias al electromagnetismo, como por ejemplo, un contactor, una electroválvula, un timbre, un interruptor automático, etc. Analiza las partes que los constituyen e intenta comprobar y explicar su funcionamiento.
- Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Autoevaluación

- Corrientes eléctricas elevadas
 - Golpes y excesos de la temperatura
 - Disminución de la temperatura
- 2) ¿Cómo se consigue aumentar el nivel de inducción magnética en una bobina con núcleo de aire?
- Introduciendo una substancia ferromagnética en el núcleo
 - Sólo es posible aumentar la inducción magnética aumentando la intensidad por la bobina
- 3) ¿Cómo es la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos?
- Es un valor constante
 - Depende de la inducción magnética alcanzada por los materiales
- 4) Para la construcción de núcleos de electroimanes, transformadores y motores empleamos preferentemente:
- Acero
 - Hierro
- 5) Si un material ferromagnético posee una permeabilidad relativa de 100, calcular su permeabilidad absoluta.
- 6) Un circuito magnético con núcleo de hierro forjado posee una longitud de 10 cm y una sección transversal de 3 cm^2 . La bobina tiene 100 espiras y es alimentada por una corriente de 1 A. Con la ayuda de la Tabla 10.1, averiguar: H, B, Φ , μ , \mathcal{R} y F .
- 7) Un núcleo de acero con una inducción de 1,2 T posee una permeabilidad de $4 \cdot 10^{-3} \text{ H/m}$. La longitud de la bobina es de 25 cm y la superficie recta del núcleo es de 5 cm^2 . Calcular el flujo magnético, la intensidad de campo y la fuerza magnetomotriz.
- 8) El núcleo rectangular de la Figura 10.24 es de chapa al silicio con una sección transversal de 25 cm^2 . La bobina

posee 500 espiras y es atravesada por una corriente de 10 A. Con la ayuda de los datos presentados en su correspondiente curva de magnetización (Tabla 10.1), determinar B, Φ y F .

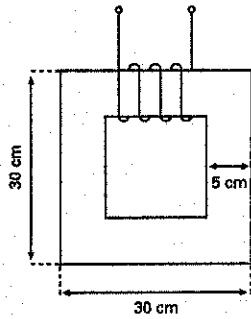


Figura 10.24

- 9) ¿Cuántos amperios habrá que hacer pasar por la bobina del Ejercicio 10.8 para que exista un flujo magnético de 4 mWb?
- 10) El circuito magnético de la Figura 10.25 está fabricado con chapa magnética normal. Se desea obtener en el entrehierro una inducción magnética de 1,1 T. Suponiendo que todo el flujo se conduce por dicho entrehierro y que no se dispersa, determinar el número de espiras con la que habrá que fabricar la bobina si se quiere suministrar una corriente de 2 A.

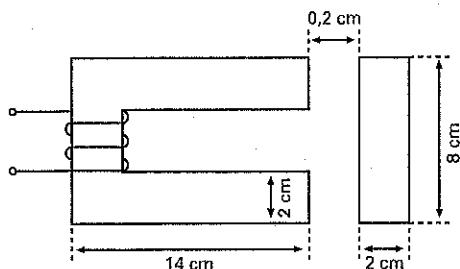


Figura 10.25

- 11) Determinar la fuerza con la que atraerá un electroimán a la armadura de hierro si la inducción que aparece en el núcleo es de 1,3 T y la superficie total de contacto entre el núcleo y el hierro móvil es de 4 cm^2 .
- 12) Se desea conseguir que el electroimán de un contactor desarrolle una fuerza de atracción al bloque de contactos móviles de 2 Kp. Teniendo en cuenta que el núcleo está fabricado con hierro forjado, que la bobina posee 1.000 espiras y que las dimensiones y forma del circuito magnético de dicho electroimán son las que se muestran en la Figura 10.26, calcular la intensidad de corriente eléctrica para conseguirlo.

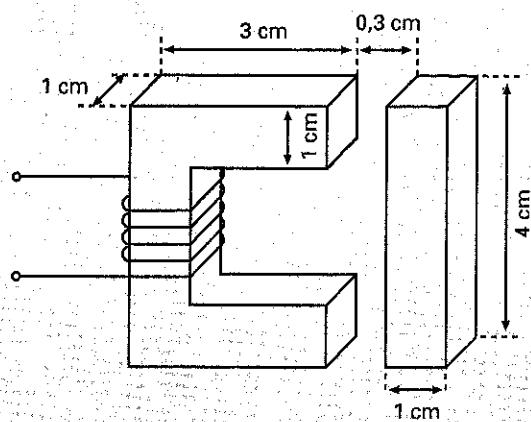


Figura 10.26

Interacción entre la Corriente Eléctrica y un Campo Magnético

Introducción

Cuando movemos un conductor dentro de un campo magnético se produce en el conductor una separación de cargas eléctricas que da lugar a una f.e.m., conociendo a este fenómeno como inducción electromagnética.

Gracias al fenómeno de la inducción electromagnética, descubierto por Faraday en 1832, es posible la generación de grandes cantidades de energía eléctrica mediante los alternadores (generadores de C.A.). Aprovechando este fenómeno también funcionan las dinamos (generadores de C.C.), los transformadores y muchos más dispositivos que estudiaremos con más detalle más adelante.

En un generador eléctrico se produce una f.e.m. cuando se mueven conductores eléctricos en el seno de un campo magnético. Pues bien, los motores funcionan con el principio inverso:

Cuando un conductor está inmerso en el seno de un campo magnético y por él hacemos circular una corriente eléctrica, aparecen unas fuerzas de carácter electromagnético que tienden a desplazarlo.

Contenido

- Inducción electromagnética.
- Corrientes parásitas o de Foucault.
- Autoinducción. Bobinas.
- Fuerza electromagnética.

Objetivos

- Describir los procesos que se dan en la inducción electromagnética y aplicarlos al principio de funcionamiento de los generadores electromagnéticos, transformadores, etc.
- Detectar los efectos que producen las corrientes parásitas o de Foucault en los núcleos de hierro sometidos a campos variables, y encontrar las fórmulas para evitarlos.
- Apreciar los efectos de autoinducción que se producen en las bobinas.
- Analizar los fenómenos que se dan en la apertura y el cierre de un circuito con bobina.
- Comprender la importancia del coeficiente de autoinducción de una bobina.
- Describir la fuerza que se desarrolla en un conductor recorrido por corriente eléctrica cuando está en el seno de un campo magnético, y relacionarlo con el principio de funcionamiento del motor eléctrico y de los aparatos de medida analógicos.

11.1 Inducción electromagnética

Cuando nos referimos a la inducción electromagnética estamos hablando de “producción de electricidad por acción magnética”; es decir, “cuando se mueve un conductor eléctrico en el seno de un campo magnético aparece una fuerza electromotriz que se muestra como una tensión eléctrica en los extremos de dicho conductor (Figura 11.1)."

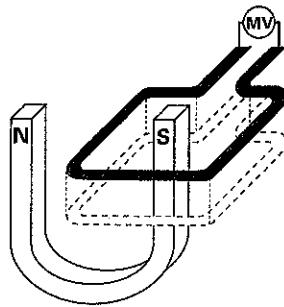


Figura 11.1. Al mover el conductor en el campo magnético del imán se genera una f.e.m.

Así, por ejemplo, para producir C.C. se utiliza la dinamo (Figura 11.2). Los conductores eléctricos del rotor producen una fuerza electromotriz al moverse dentro del campo magnético del estator. Si el circuito está cerrado, aparece una corriente eléctrica que se extrae del rotor mediante un anillo metálico partido (colector de delgas) sobre los que se apoyan unos contactos deslizantes (escobillas de grafito).

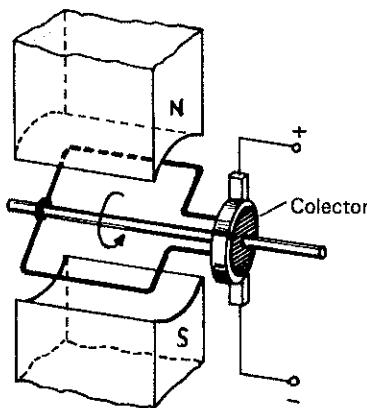


Figura 11.2. Dinamo elemental.

11.1.1 Experiencia de Faraday

Para realizar esta experiencia se necesita un imán, una bobina y un miliamperímetro de cero central (aparato de medida muy sensible, donde la aguja indicadora se mueve hacia un lado u otro de la escala dependiendo del sentido de la corriente). La bobina la suspendemos entre los polos del imán, tal como se muestra en la Figura 11.3, de tal manera que pueda moverse y cortar la líneas de campo magnético.

Si movemos el conductor de tal manera que corte perpendicularmente a las líneas de campo, se puede observar que la aguja del miliamperímetro se desvía hacia un lado durante el movimiento, indicando el paso de una corriente en la bobina. Si ahora movemos el conductor en sentido contrario, la aguja

del miliamperímetro se desvía también hacia el lado contrario.

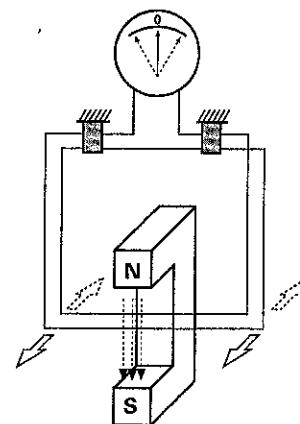


Figura 11.3. Montaje para realizar la experiencia de Faraday.

De aquí se deduce que cuando se mueven conductores, de tal manera que corten perpendicularmente las líneas de un campo magnético, se produce una f.e.m. inducida. Si se cierra el circuito aparece una corriente eléctrica. También observamos que el sentido de esta corriente depende del movimiento relativo de los conductores respecto al campo magnético.

Si ahora movemos los conductores en sentido paralelo a la líneas de campo (hacia arriba y hacia abajo según la Figura 11.3) se puede observar que el miliamperímetro no detecta el paso de corriente. También podemos observar que cuanto más rápido movamos la bobina, mayores son los valores de la corriente medida.

De aquí se deduce que sólo se produce f.e.m. mientras los conductores corten el campo magnético. Además la f.e.m. depende de la velocidad relativa de corte de los conductores respecto al campo magnético, aumentando la f.e.m. con dicha velocidad.

Además se observa que al aumentar el número de espiras de la bobina, también aumenta la f.e.m. inducida. Lo mismo ocurre si aumentamos el nivel de inducción del campo magnético.

En resumen, se puede decir, que la f.e.m. inducida que se produce en una bobina cuando en su movimiento corta perpendicularmente las líneas de un campo magnético regular es igual a:

$$e_{inducida} = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Donde N es el número de espiras de la bobina y la expresión $\Delta\Phi/\Delta t$ nos indica la variación del flujo cortado por la bobina respecto al tiempo; es decir, lo rápido que varía el flujo magnético en los conductores.

Conviene indicar que se puede generar una f.e.m. inducida tanto si se mueven conductores en el seno de un campo magnético fijo, como si lo que se mueve es el campo magnético y se dejan fijos a los conductores. También se consigue f.e.m. inducida en los conductores si se les aplica un campo magnético variable, por ejemplo, proveniente de una bobina al que se le aplica corriente alterna.

Ejemplo: 11.1

Una bobina de 100 espiras se mueve cortando perpendicularmente un campo magnético. La variación de flujo experimentado en dicho movimiento es uniforme y va de 2 mWb a 10 mWb en un intervalo de tiempo de 0,5 segundos. Averiguar la f.e.m. inducida.

Solución: $\Delta\Phi = \text{variación de flujo} = 10 - 2 = 8 \text{ mWb}$

$\Delta t = \text{tiempo en el que varía el flujo} = 0,5 \text{ s}$

$$e_{\text{inducida}} = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100 \frac{0,008}{0,5} = 1,6 \text{ V}$$

La fórmula de la f.e.m. inducida también se puede expresar de otra forma. Para un conductor de longitud L que se desplaza perpendicularmente a las líneas de un campo magnético de inducción B a una velocidad v, tenemos que:

$$e_{\text{inducida}} = BLv$$

e = f.e.m. inducida en voltios

B = inducción magnética en teslas

L = longitud del conductor en metros

v = velocidad perpendicular en m/s

Ejemplo: 11.2

Un conductor se desplaza a una velocidad lineal de 5 m/s en el seno de un campo magnético fijo de 1,2 teslas de inducción. Determinar el valor de la f.e.m. inducida en el mismo si posee una longitud de 0,5 m.

Solución: $e = B L v = 1,2 \cdot 0,5 \cdot 5 = 3 \text{ V}$

11.1.2 Sentido de la f.e.m. inducida. Ley de Lenz

La ley de Lenz indica que “el sentido de la corriente inducida en un conductor es tal que tiende a oponerse a la causa que la produjo” (principio general de acción y reacción).

Este efecto, se puede comprobar experimentalmente de la siguiente manera: si instalamos una dinamo o alternador acoplado a la rueda de una bicicleta estática y nos ponemos a pedalear, podremos comprobar que resulta bastante fácil mover los pedales. Si ahora conectamos a la dinamo un lámpara de 40 W, sentiremos una mayor resistencia al movimiento de los pedales, la cual aumenta todavía más si conectamos una lámpara de 100 W.

Lo que hemos comprobado experimentalmente es que cuando los conductores de la dinamo se mueven en el seno de un campo magnético, si el circuito está cerrado, aparece una corriente eléctrica que alimenta la lámpara. Esta corriente produce, a su vez, un campo magnético de polaridad tal que tiende a oponerse a las variaciones del campo magnético

inductor. Así, por ejemplo, si este campo magnético tendiese a crecer, la corriente inducida en el conductor generaría un campo magnético de sentido contrario que tendería a contrarrestar dicho aumento. En el caso de la dinamo de la bicicleta, lo que se observa es que cuando aumenta la corriente por los conductores se aprecia una cierta resistencia al movimiento de los mismos.

Para determinar el sentido de la corriente inducida en un conductor que se desplaza perpendicularmente en el seno de un campo magnético resulta un tanto complejo la aplicación directa de la ley de Lenz. Un método mucho más sencillo es aplicar la **Regla de Fleming de la mano derecha**.

Para aplicar esta regla se utilizan los tres dedos de la mano derecha, tal como se indica en la Figura 11.4: el **pulgar** se coloca en ángulo recto con respecto al resto de la mano indicando el sentido de desplazamiento del conductor (**movimiento**). El **índice** se coloca perpendicular al pulgar, indicando el sentido del flujo magnético (**campo**). El **corazón** se coloca en un plano perpendicular al formado por el pulgar y el índice y nos indica el sentido que toma la corriente inducida (sentido convencional de la corriente) al mover el conductor en el seno del campo magnético (**corriente**).

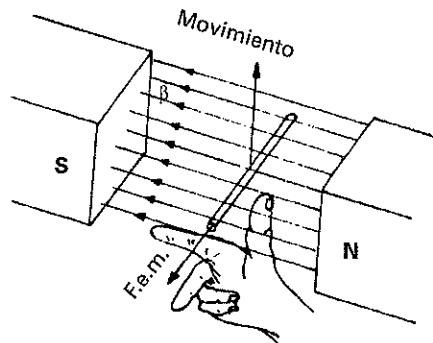


Figura 11.4. Regla de la mano derecha para determinar el sentido de la f.e.m. inducida.

Una forma sencilla de no olvidarse de esta regla es aplicando la siguiente regla nemotécnica: **mo-ca-co** que significa movimiento, campo, corriente (Figura 11.5).

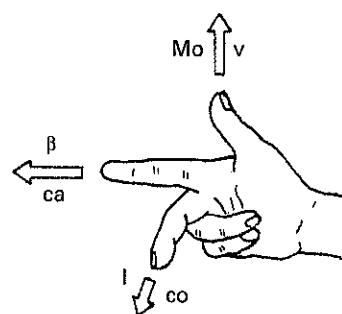


Figura 11.5. Regla de la mano derecha.

Gracias a esta sencilla regla podremos responder a estas sencillas preguntas:

¿Qué ocurre si invertimos el sentido de giro de una dinamo?: Al moverse los conductores en sentido contrario al ante-

rior, la corriente también se invertirá, dando como resultado una inversión en la polaridad de los bornes de salida del generador.

¿Qué ocurre si invertimos la polaridad del campo magnético inductor de una dinamo? Si aplicamos la regla de la mano derecha observaremos que al invertir el campo también se invierte el sentido de la corriente.

Ejemplo: 11.3

El sentido de la corriente inducida en el conductor eléctrico de la Figura 11.6 se ha determinado aplicando la regla de la mano derecha.

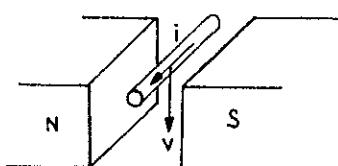


Figura 11.6

11.1.3 Fuerza electromotriz inducida en un circuito próximo

Los campos magnéticos variables que desarrollan los conductores cuando son recorridos por corrientes variables pueden inducir fuerzas electromotrices al atravesar otros conductores que se encuentren en su proximidad.

Para entender este fenómeno podemos realizar una sencilla experiencia, que consiste en colocar dos bobinas muy cerca una de la otra, tal como se muestra en la Figura 11.7. En los extremos de la bobina B conectamos un galvanómetro de cero central. A su vez, en la bobina A conectamos primeramente un generador de C.C. Al cerrar el interruptor en la bobina A, se puede observar cómo el galvanómetro acusa el paso de una pequeña corriente por la bobina B que persiste sólo durante un pequeño período de tiempo. Si ahora abrimos el interruptor podremos comprobar que el galvanómetro vuelve a detectar el paso de corriente, pero ahora en sentido contrario.

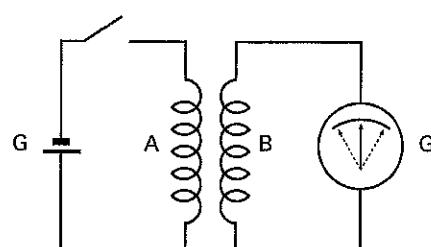


Figura 11.7. Comprobación experimental de la f.e.m. inducida en un circuito próximo.

La explicación de este fenómeno la tenemos que encontrar en la inducción electromagnética.

Al cerrar el interruptor, por la bobina A aparece una corriente que tiende a crecer desde cero hasta su valor nominal, lo que origina en la misma un campo magnético variable y creciente. Al estar la bobina B muy próxima a la A, dicho campo magnético la atraviesa, produciéndose el principio de inducción electromagnética (conductores sometidos a la acción de un campo magnético variable) que da como resultado una fuerza electromotriz y una corriente eléctrica en la bobina B. Esta corriente sólo se produce mientras el campo magnético sea variable, es decir, mientras la corriente por la bobina A esté creciendo, hecho que ocurre sólo durante un pequeño período de tiempo.

Al abrir el interruptor el proceso se repite, pero a la inversa. La corriente por la bobina A tiende a desaparecer, lo mismo que el campo magnético. En la bobina B aparece una f.e.m. de inducción, mientras que el campo magnético sea variable (en este caso decreciente). El galvanómetro acusa el paso de una corriente eléctrica. Pero en este caso de sentido contrario al anterior, hecho que se explica fácilmente con la ley de Lenz.

Si ahora sustituimos el generador de C.C., por uno de C.A. y el galvanómetro por un voltímetro de C.A., al cerrar el interruptor podremos observar que el voltímetro conectado a la bobina B indica una determinada tensión. Si ahora sustituimos la bobina B por una de más espiras, se puede observar que la tensión de salida aumenta.

La explicación de esta experiencia hay que volver a buscarla en la inducción electromagnética. Ahora la bobina A es recorrida por una corriente variable, lo que produce, a su vez, un campo variable que atraviesa en todo momento a la bobina B. En consecuencia, en esta bobina se produce constantemente una f.e.m. de inducción. Si aumentamos el número de espiras en la bobina B, la fuerza electromotriz inducida aumenta.

Gracias a este principio funcionan los transformadores eléctricos, que estudiaremos más adelante. Además con él podemos dar explicación a muchos fenómenos que aparecen en torno a las corrientes y campos magnéticos variables. Así, por ejemplo, se puede entender que es peligroso aproximarse demasiado a elementos conductores que estén en las cercanías de líneas de transporte de alta tensión, ya que los fuertes campos magnéticos variables producidos por sus conductores se establecen en un determinado radio de acción e inducen una elevada f.e.m. en todos aquellos conductores que atraviesa. Para evitar accidentes conviene conectar a tierra todos aquellos elementos metálicos que se encuentren en las proximidades de dichas redes.

11.1.4 Aplicaciones prácticas de la inducción electromagnética

La principal aplicación de la inducción electromagnética es sin duda la producción de energía eléctrica en grandes cantidades mediante los alternadores. Además, gracias a este fenómeno funcionan los transformadores eléctricos.

Existen muchas más aplicaciones, como por ejemplo, los relés diferenciales, pinza amperimétrica, hornos de inducción, etc.

11.2 Corrientes parásitas o de Foucault

Si observamos detenidamente los núcleos magnéticos de transformadores, motores y electroimanes de C.A., podremos observar que éstos están construidos con chapa magnética. Esto se hace así para evitar el efecto perjudicial de las corrientes parásitas o de Foucault.

Este efecto aparece sobre todo cuando se utilizan corrientes alternas. Cuando estas corrientes variables recorren los bobinados de electroimanes, transformadores, motores o generadores, el núcleo de hierro queda sometido a la acción de un campo magnético variable. Dado que el metal del núcleo es un buen conductor de la corriente eléctrica, se genera en él una f.e.m. inducida. Esta f.e.m. produce, a su vez, unas corrientes de circulación por el hierro, llamadas corrientes parásitas o de Foucault, que se cierran, formando cortocircuitos, por las secciones transversales de dicho núcleo (Figura 11.8).

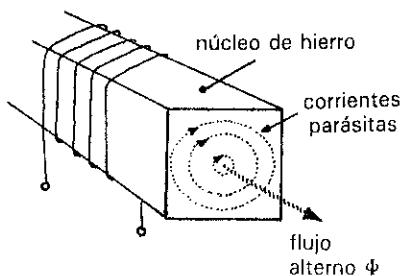


Figura 11.8. Corrientes parásitas en un núcleo de hierro macizo sometido a campos magnéticos variables.

Estas corrientes pueden llegar a alcanzar valores bastante elevados debido a la baja resistencia del hierro. En consecuencia, el núcleo se calienta por efecto Joule.

El calor generado por estas corrientes puede llegar a ser muy elevado, especialmente en núcleos sometidos a flujos magnéticos alternos de considerable frecuencia, como es el caso de todos los transformadores, motores y generadores de corriente alterna.

Este fenómeno reduce considerablemente el rendimiento de las máquinas eléctricas, incluso puede llegar a calentar núcleos de gran sección hasta llegar al rojo vivo.

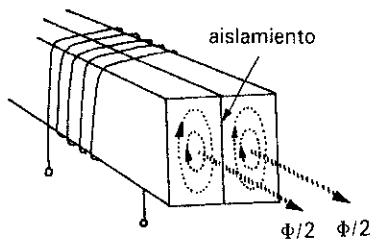


Figura 11.9. Al dividir en dos partes el núcleo de hierro se consigue dividir también el flujo en la misma proporción, por lo que la corriente inducida en cada una de las partes queda igualmente reducida.

La forma de minimizar al máximo estas corrientes consiste en dividir longitudinalmente el núcleo y aislar eléctricamente cada una de las partes (Figura 11.9), formando un

paquete de chapas magnéticas, tal como se muestra en la Figura 11.10. De esta forma se consigue que cada una de estas divisiones o chapas abarque menos flujo, con lo que la f.e.m. inducida se reduce y, con ella, las corrientes parásitas.

Las chapas utilizadas para formar el núcleo son de un espesor de menos de un milímetro y se aislan eléctricamente entre sí mediante una fina capa de barniz. Además, a estas chapas magnéticas se les alea con silicio en un pequeño porcentaje para elevar la resistividad y, así, reducir considerablemente estas pérdidas.

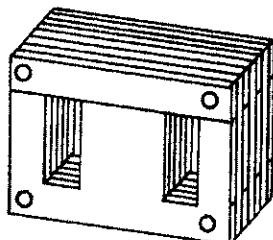


Figura 11.10. Núcleo de un transformador formado por chapas magnéticas apiladas.

Cuanto mayor sea la frecuencia de los campos alternos a los que se somete a los núcleos de hierro más se calentarán los mismos por efecto de las corrientes parásitas. El empleo de altas frecuencias limita considerablemente el uso de metales conductores en los núcleos de bobinas.

Aprovechando este fenómeno y el de histéresis se pueden construir **hornos eléctricos de inducción para fundir chatarra** (Figura 11.11). El funcionamiento de éstos es muy sencillo: la chatarra se deposita en un recipiente al que se somete a la acción de un fuerte campo magnético alterno de frecuencia elevada creado por un electroimán. El calor aparece directamente en los compuestos ferromagnéticos de la chatarra en los que se inducen dichos campos alternos. Los repetidos ciclos de histéresis y las fuertes corrientes parásitas, que circulan por los compuestos metálicos de la chatarra, elevan fuertemente la temperatura de la misma hasta fundirla.

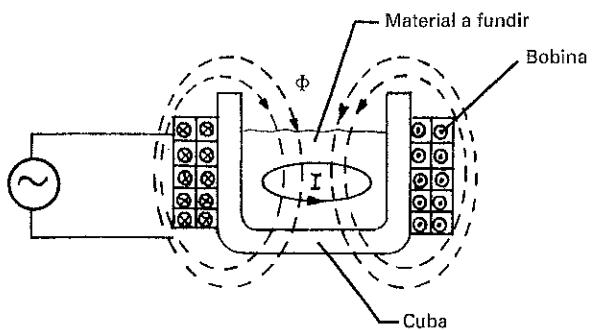


Figura 11.11. Horno de inducción.

Las modernas cocinas domésticas de inducción funcionan mediante un sistema similar. El calor necesario para la cocción de los alimentos aparece directamente en el recipiente metálico que se utiliza, mientras que la placa permanece fría. Para el control de la potencia de estos elementos se regula la frecuencia del campo alterno aplicado.

11.3 Autoinducción. Bobinas

Seguro que habrás podido observar en alguna ocasión que al abrir los contactos de un interruptor aparece entre los mismos una *chispa de ruptura*. Esta chispa es mucho más fuerte en el caso de que el interruptor corte la corriente que alimenta a una bobina (motores, transformadores, etc.). Estos fenómenos tienen que ver fundamentalmente con la *autoinducción*.

La autoinducción, como su palabra indica, significa inducirse a sí misma f.e.m. Cuando por una bobina circula una corriente eléctrica que es variable, ésta genera, a su vez, un campo magnético también variable que corta a los conductores de la propia bobina. Esto origina en los mismos una f.e.m. inducida, llamada f.e.m. de autoinducción que, según la ley de Lenz, tendrá un sentido tal que siempre se opondrá a la causa que la produjo.

Según esto, al cerrar el interruptor de un circuito que alimenta una bobina (Figura 11.12), aparece una corriente eléctrica por la bobina que tiene que aumentar de cero hasta su valor nominal en un tiempo relativamente corto. Esta variación de corriente por la bobina genera en sus conductores un flujo magnético creciente que, al cortar a los mismos, provoca una f.e.m. de autoinducción. El sentido de esta f.e.m. es tal que impide que el flujo se establezca y, por tanto, la intensidad sufre una oposición y se retrasa (la tensión provocada por la autoinducción tiende a restar los efectos de la tensión de la batería). Cuando la intensidad se estabiliza, la f.e.m. de autoinducción desaparece y en la bobina aparece el flujo correspondiente.

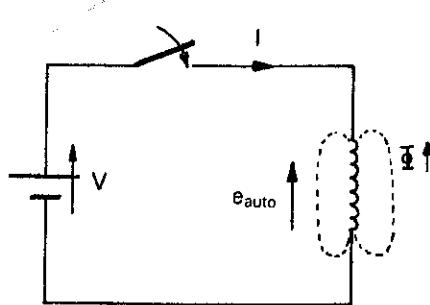


Figura 11.12. Cierre de un circuito con bobina.

Al abrir el interruptor (Figura 11.13), el flujo magnético que abraza a la bobina tiende a desaparecer, lo que origina una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que no deja que ni el flujo ni la corriente desaparezca (la f.e.m. de autoinducción cambia de sentido y tiende a sumarse a la tensión de la batería). La tensión que aparece entre los contactos suele ser tan grande que provoca una chispa de ruptura entre los mismos. El valor de la f.e.m. de autoinducción se hace mayor al aumentar la velocidad con que abrimos los contactos del interruptor y cuanto mejor sea la capacidad de la bobina de generar flujo magnético.

Las chispas de ruptura acortan la vida de los contactos de todos los dispositivos que tengan que cortar un circuito en carga, tal como interruptores de maniobra, interruptores automáticos, relés de contactos, contactores, etc.

Una forma de alargar la vida de los mismos consiste en reducir la resistencia de contacto al mínimo, para lo cual se

recubre de plata la superficie de contacto. A su vez, se procura que el arco formado en la apertura se estire rápidamente con la intención de aumentar el aislamiento entre los contactos, además se consigue enfriarlo en poco tiempo. Este último se consigue construyendo los dispositivos de apertura con muelles de recuperación.

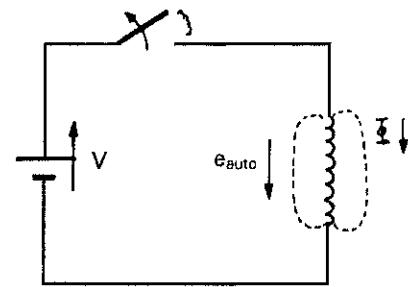


Figura 11.13. Apertura de un circuito con bobina.

En cierta forma, una bobina se puede comparar a un volante de inercia. Cuando el flujo magnético tiende a crecer en la misma, se carga de energía magnética. Al cortar la corriente, el flujo tiende a desaparecer, devolviendo la energía acumulada.

11.3.1 Coeficiente de autoinducción

La f.e.m. de autoinducción de una bobina depende de la rapidez con que cambia el flujo en la misma, es decir:

$$e_{auto} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Ahora bien, dependiendo de la capacidad de generar flujo de la bobina, esta f.e.m. tendrá un valor u otro. El coeficiente de autoinducción de una bobina nos dice la capacidad que tiene una bobina de generarse a sí misma f.e.m. de autoinducción.

$$e_{auto} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

L = coeficiente de autoinducción en henrios (H)

En esta expresión se puede apreciar que la f.e.m. de autoinducción aumenta con el coeficiente de autoinducción y con la rapidez con que varía la intensidad de corriente.

El coeficiente de autoinducción de una bobina se puede expresar como la relación entre el flujo magnético generado por la misma y la intensidad de corriente que ha sido necesaria aplicarla. Para un número de espiras N , tendremos que:

$$L = N \frac{\Phi}{I}$$

El coeficiente de autoinducción de una bobina depende de sus características constructivas. Se consiguen bobinas con

coeficientes de autoinducción altos con núcleos de alta permeabilidad y gran número de espiras.

Ejemplo: 11.4

Calcular el valor de la f.e.m. de autoinducción que desarrollará una bobina con un coeficiente de autoinducción de 50 milihenrios si se le aplica una corriente que crece regularmente desde cero hasta 10 A en un tiempo de 0,01 segundos.

$$\text{Solución: } e_{\text{auto}} = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0,05 \frac{10}{0,01} = 50 \text{ V}$$

Ejemplo: 11.5

Una bobina que posee 500 espiras produce un flujo magnético de 10 mWb cuando es atravesada por una corriente de 10 amperios. Determinar el coeficiente de autoinducción de la misma.

$$\text{Solución: } L = N \frac{\Phi}{I} = 500 \frac{0,01}{10} = 0,5 \text{ H}$$

Aprovechando el efecto de la f.e.m. autoinducida en una bobina se pueden construir dispositivos sencillos que consiguen elevar fuertemente la tensión, como por ejemplo el encendido de lámparas fluorescentes mediante la combinación de una reactancia y un cebador que abre y cierra un contacto muy rápidamente.

11.4 Fuerza sobre una corriente eléctrica en el seno de un campo magnético

En un generador eléctrico se produce una f.e.m. cuando se mueven conductores eléctricos en el seno de un campo magnético. Pues bien, los motores funcionan con el principio inverso.

Cuando un conductor está inmerso en el seno de un campo magnético y por él hacemos circular una corriente eléctrica, aparecen fuerzas de carácter electromagnético que tienden a desplazarlo.

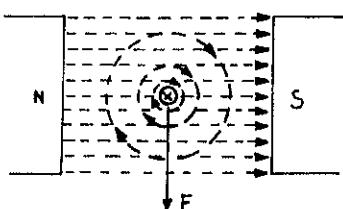


Figura 11.14. Fuerza que aparece en un conductor recorrido por una corriente eléctrica cuando está inmerso en un campo magnético.

En la Figura 11.14 se puede ver un conductor eléctrico atravesado por una corriente entrante y sometido a la acción del campo magnético de un imán. La corriente eléctrica del conductor produce a su vez un campo magnético circular que interactúa con el del imán y hace que el conductor se desplace en dirección perpendicular al campo magnético principal (en nuestro ejemplo las líneas de fuerza del conductor tienden a concentrarse en la parte inferior, lo que provoca una fuerza sobre el conductor que lo empuja hacia abajo).

Se observa que si cambiamos el sentido de la corriente o el del campo, también cambia el sentido de la fuerza.

Para determinar el sentido de la fuerza se aplica la regla de Fleming de la mano izquierda (Figura 11.15). Se aplica utilizando el mismo procedimiento que seguimos para la mano derecha, teniendo en cuenta que se utiliza el sentido convencional de la corriente.

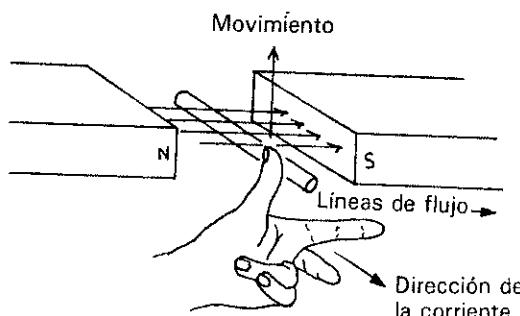


Figura 11.15. Regla de la mano izquierda para determinar el sentido de la fuerza.

El valor de la fuerza aumenta con la intensidad de la corriente, con el valor de la inducción del campo magnético y con la longitud del conductor.

$$F = B \cdot L \cdot I$$

F = Fuerza (Nw)

B = Inducción (T)

L = Longitud del conductor (m)

I = Intensidad (A)

Ejemplo: 11.6

El conductor de la Figura 11.16 tiene una longitud de 0,5 metros y está inmerso en un campo magnético de 1,3 teslas de inducción. Averiguar el sentido de desplazamiento del mismo, así como la fuerza que desarrollará cuando circulen por él una intensidad entrante de 10 A.

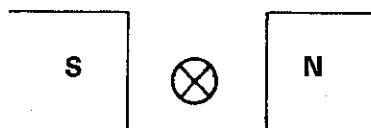


Figura 11.16

Solución: Aplicando la regla de la mano izquierda averiguamos que el conductor se desplazará hacia arriba.

$$F = B \cdot L \cdot I = 1,3 \cdot 0,5 \cdot 10 = 6,5 \text{ Nw}$$

Gracias a este principio desarrollado por Laplace, Biot y Savart se pueden construir multitud de dispositivos, como por ejemplo: todo tipo de motores eléctricos, aparatos de medida analógicos, altavoces, etc.

En un motor de C.C. se consigue que cada uno de los conductores opuestos de la bobina desarrolle un par de fuerzas que hace girar el motor (Figura 11.17).

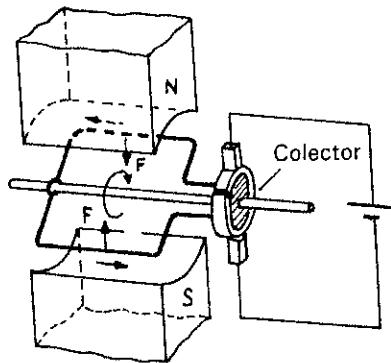


Figura 11.17. Motor de C.C.

En un instrumento de medida de bobina móvil se consigue que el par de fuerza que desarrollan los conductores de la bobina sea proporcional a la corriente a medir. El equilibrio entre la fuerza antagonista del muelle y dicho par hace que la aguja se desplace por la escala graduada indicando el resultado de la medida (Figura 11.18).

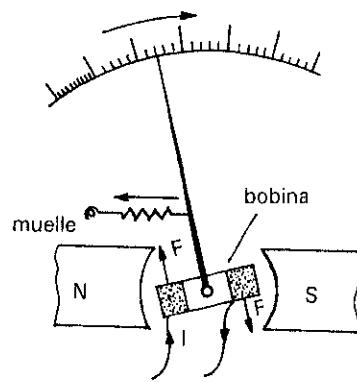


Figura 11.18. Instrumento de medida analógico.

Actividades

1. Consigue los elementos necesarios en el laboratorio de Electrotecnia y lleva a cabo la experiencia de Faraday. Comprueba también la fuerza electromotriz inducida en circuitos próximos.
2. Suspende una bobina en el seno del campo magnético de un imán. Comprueba que al hacer circular una C.C. por la misma, en ella aparecen fuerzas que tienden a desplazarla.
3. Busca información sobre las cocinas de inducción e investiga algo más sobre su funcionamiento.

4. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) La inducción electromagnética se produce cuando:
 - a) Se mueven conductores en dirección perpendicular a un campo magnético fijo
 - b) Se mueven conductores en dirección paralelo a un campo magnético fijo
 - c) Se somete a conductores fijos a la acción de un campo magnético variable
- 2) El valor de la f.e.m. inducida en un conductor aumenta con:
 - a) Depende exclusivamente de lo intenso que sea el campo magnético
 - b) Con la velocidad y el nivel de inducción electromagnética del campo
 - c) Lo rápido que varía el flujo que corta el conductor
- 3) ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.19?
 - a) Saliente
 - b) Entrante
 - c) Nula

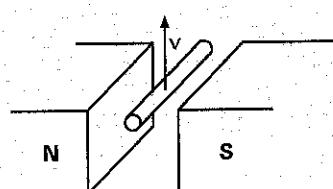


Figura 11.19

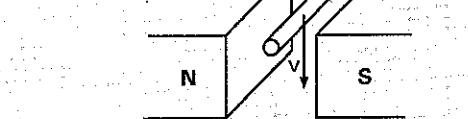


Figura 11.20

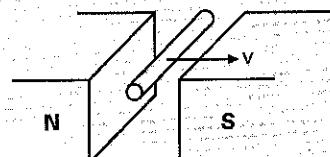


Figura 11.21

- 4) ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.20?
 - a) Saliente
 - b) Entrante
 - c) Nula
- 5) ¿Cuál es el sentido de la corriente en el conductor de la Figura 11.21?
 - a) Saliente
 - b) Entrante
 - c) Nula
- 6) ¿Qué ocurriría si utilizásemos un transformador diseñado para trabajar a una frecuencia europea de 50 Hz en una red eléctrica americana de 60 Hz?
 - a) No influiría en su normal funcionamiento
 - b) Al aumentar la frecuencia de la corriente se ve

- potenciado el efecto de las corrientes parásitas y el núcleo del transformador tendería a calentarse algo más de lo habitual
- 7) Calcular la f.e.m. inducida en una bobina de 300 espiras cuando es sometida a un cambio regular de flujo de 30 mWb a 60 mWb en un tiempo de 20 ms.
 - 8) Un conductor recto se mueve perpendicularmente en el seno de un campo magnético de 0,95 teslas a una velocidad de 5 m/s. Determinar el valor de la f.e.m. inducida si la longitud del mismo es de 15 cm.
 - 9) ¿Cuál será el coeficiente de autoinducción de una bobina que, al ser sometida a un cambio de corriente de 1 a 10 A en 40 ms, produce una f.e.m. de autoinducción de 220 V?
 - 10) ¿En qué dirección y con qué fuerza se desplazará el conductor de la Figura 11.22 cuando sea recorrido por una intensidad de 25 A si la inducción magnética es de 1,6 T y su longitud es de 50 cm?

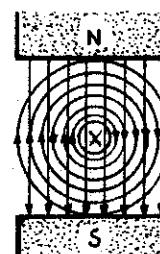


Figura 11.22

La Corriente Alterna



Introducción

En la actualidad la forma que se ha impuesto para la generación, transporte y consumo de la energía eléctrica es la de la corriente alterna. Este tipo de corriente, frente a la corriente continua, presenta una serie de ventajas que la hacen ideal para la mayoría de las aplicaciones.

Contenido

- Generación de una C.A. senoidal.
- Valores fundamentales de la C.A.
- Circuito con resistencia pura en C.A.
- Circuito con bobina pura en C.A.
- Reactancia inductiva.
- Circuito con condensador puro en C.A.
- Reactancia capacitiva.

Objetivos

- Definir los procesos que se dan en la generación de una corriente alterna.
- Identificar los valores fundamentales de una C.A., así como seleccionar el instrumento de medición adecuado para su medida.
- Manejar adecuadamente el osciloscopio para medir las magnitudes asociadas a un C.A. senoidal.
- Explicar los procesos que se dan en un circuito de C.A. al conectar resistencias, bobinas y condensadores.

12.1 Ventajas de la corriente alterna

En los inicios del desarrollo de los sistemas eléctricos, la electricidad se producía en forma de corriente continua mediante las dinamos. Este tipo de generador resulta bastante más complejo y difícil de mantener que los alternadores, ya que necesitan para extraer la energía eléctrica del rotor (parte del generador en movimiento giratorio) de un colector en forma de anillo metálico subdividido en el que frotan escobillas de grafito. Además la energía no se podía transportar a largas distancias, dado que no existía un sistema práctico que fuese capaz de elevar y reducir la tensión de grandes cantidades de energía (recordar que para transportar grandes cantidades de energía eléctrica se necesita elevar la tensión para conseguir que la intensidad de la corriente no sea muy grande. Así se evita el uso de grandes secciones en los conductores y se reducen las pérdidas por efecto Joule).

Los alternadores han sustituido en su totalidad a las dinamos, ya que, por un lado, evitan el uso de colectores (la energía eléctrica se produce directamente en el estator del generador) y por otro, producen corriente alterna que se puede elevar y reducir con facilidad gracias a los transformadores eléctricos (éstos necesitan de corrientes variables para funcionar).

En cuanto al consumo de energía eléctrica, los motores de C.A. son más sencillos y robustos que los de C.C. y resultan apropiados para la mayoría de las aplicaciones. En aquellos casos en que se hace necesario el uso de la corriente continua (alimentación de aparatos electrónicos, tratamientos electroquímicos, recarga de baterías de acumuladores, motores de C.C.) la conversión de C.A. a C.C. es sencilla y barata gracias a los rectificadores a base de diodos.

12.2 Producción de una corriente alterna

Dado que la C.A. sigue las variaciones de la función senoidal, antes de abordar su estudio, conviene que realices previamente un pequeño repaso a los siguientes conocimientos de matemáticas: funciones trigonométricas (seno, coseno y tangente), ángulos complejos, la función senoidal, variaciones de las funciones trigonométricas con el ángulo, representación vectorial y operaciones con vectores.

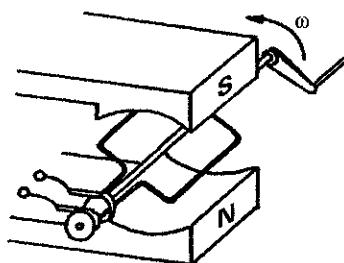


Figura 12.1. Alternador elemental.

En la Figura 12.1 se muestra el aspecto de un alternador elemental. Consta de un campo magnético fijo producido por un imán, dentro del cual se hace girar un conductor eléctrico en forma de espira. Al cortar los conductores en su movimiento giratorio en el campo magnético, se produce en los

mismos una fuerza electromotriz de inducción que se muestra como una tensión V en los extremos de la espira. Para poder conectar dichos extremos a un receptor eléctrico es necesario utilizar un par de anillos conductores unidos eléctricamente con los mismos y situados en el eje de giro de la espira. Los receptores se conectan a través de unas escobillas fijas de grafito que mediante frotamiento consiguen un aceptable contacto eléctrico con los anillos colectores.

Se puede comprobar que la tensión que aparece en los terminales de la espira es variable y posee la forma de una senoidal, tal como se muestra en la Figura 12.2.

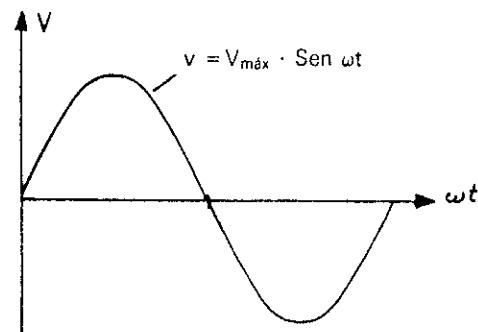


Figura 12.2. Representación de una tensión senoidal.

Una corriente alterna senoidal se caracteriza por que el valor de la corriente y de la tensión en cada instante cambia de valor e incluso de sentido, siguiendo un ciclo repetitivo según la función senoidal.

El valor instantáneo de la tensión es:

$$v = V_{\max} \cdot \sin \omega t$$

Donde V_{\max} es el valor más alto que alcanza la tensión, ω es la velocidad angular que suministra el alternador y t es el tiempo.

Para poder comprender mejor estas variables vamos a estudiar cómo se consigue generar esta forma de onda senoidal mediante un alternador elemental como el de la Figura 12.1.

La espira gira en el seno de un campo magnético a una cierta velocidad angular ω , que la mediremos en radianes por segundo (Figura 12.3).

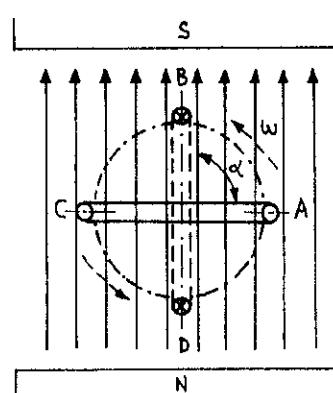


Figura 12.3. Espira que gira dentro de un campo magnético.

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

La velocidad angular ω nos indica el ángulo α girado por la espira en la unidad de tiempo.

En su giro los conductores de la espira cortan el campo magnético, por lo que aparecen en los mismos una f.e.m. inducida. Si observamos atentamente las distintas posiciones que toma la espira respecto al campo magnético, podremos comprobar que el corte de ésta respecto al campo magnético no siempre es perpendicular. Es más, sólo se produce ese caso en los puntos B y D. En los puntos A y C los conductores se mueven paralelamente al campo magnético, por lo que aquí la f.e.m. es cero. Al moverse el conductor entre cualquiera de estos puntos aparece un ángulo de corte que está entre 0° y 90° ; ¿qué f.e.m se produce entonces? (Figura 12.4).

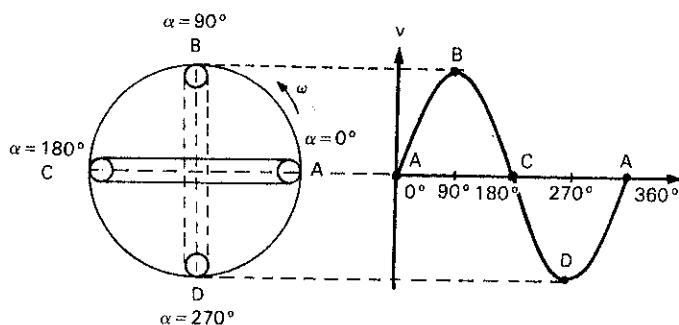


Figura 12.4. Al girar la espira se produce una tensión senoidal.

Para poder averiguarlo, tendremos que determinar primero cuál es el valor de la **f.e.m. inducida en un conductor cuando se mueve con un ángulo γ respecto a la perpendicular de las líneas de fuerza del campo magnético**.

El conductor de la Figura 12.5 se mueve con una velocidad (v) y un ángulo (γ) respecto a la perpendicular de las líneas de fuerza. Como para producir f.e.m. inducida debemos mover el conductor perpendicularmente, descomponemos (v) en su componente perpendicular (v_p). Al aplicar las reglas trigonométricas obtenemos el siguiente resultado:

$$v_p = v \cos \gamma$$

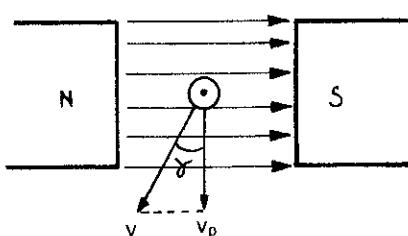


Figura 12.5. F.e.m. inducida en un conductor que se mueve en dirección oblicua al campo magnético.

La f.e.m. inducida tendrá entonces un valor de:

$$e = B L v_p, \text{ de donde: } e = B L v \cos \gamma$$

e = F.e.m. inducida en voltios

B = Inducción magnética en teslas

L = Longitud del conductor en metros

v = Velocidad del conductor en m/s

$\cos \gamma$ = Coseno del ángulo con el que se mueve el conductor respecto a la perpendicular de las líneas de fuerza magnéticas

Veamos lo que ocurre ahora cuando el **conductor se mueve en sentido giratorio en el seno de un campo magnético**.

El conductor gira con la velocidad angular ω (Figura 12.6)

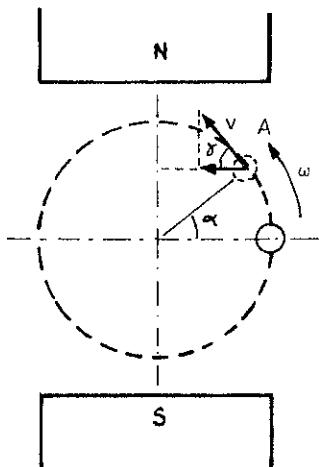


Figura 12.6. F.e.m. de un conductor que gira dentro de un campo magnético.

En el punto A se mueve con una velocidad tangencial (v). Si descomponemos esta velocidad en su componente perpendicular respecto a las líneas de campo, tendremos que:

$$e = B L v \cos \gamma$$

Ahora podemos relacionar el ángulo de giro α con el de la componente perpendicular γ , que como son complementarios:

$\cos \gamma = \sin \alpha$, de donde se deduce que:

$e = B L v \sin \alpha$, y como $\alpha = \omega t$, nos queda que:

$$e = B L v \sin \omega t$$

Los valores de B , L y v suelen ser constantes en un alterador y coinciden con el valor máximo de la f.e.m. De esta forma podemos expresar el valor instantáneo de la f.e.m. en el conductor así:

$$e = E_{\max} \operatorname{sen} \omega t$$

A ω se la conoce por el nombre de pulsación de la corriente y se expresa en radianes/segundo la f.e.m. sigue los cambios de la función senoidal, tal como se puede comprobar en la Figura 12.7.

Punto A: el conductor se mueve en dirección paralela a las líneas de fuerza, $\sin 0^\circ = 0$ y, por tanto, $e = 0$.

Punto B: el conductor se mueve con un ángulo de 45° y la fuerza electromotriz alcanza un valor intermedio:

$$e = E_{\max} \sin 45^\circ$$

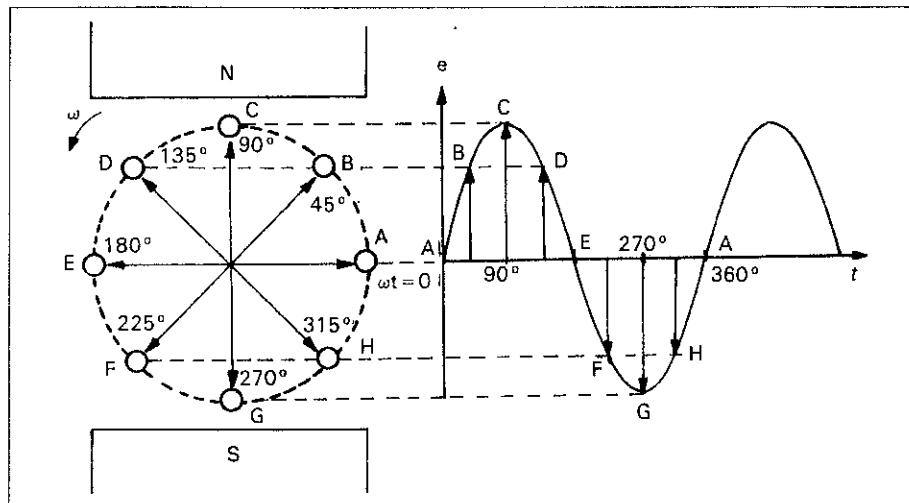


Figura 12.7. Generación de una f.e.m. senoidal.

Punto **C**: el ángulo es de 90° , se alcanza el valor máximo de la f.e.m.; $e = E_{\text{máx}} \cdot \text{sen } 90^\circ = E_{\text{máx}}$

Punto **D**: el ángulo es de 135° y la f.e.m. alcanza el mismo valor que en el punto **B**.

Punto **E**: El ángulo es de 180° y el conductor se mueve en dirección paralela a las líneas de fuerza, por lo que $e = 0$.

Punto **F**: Se invierte el sentido del movimiento del conductor y, con él, el de la f.e.m. (aplicar regla de la mano derecha).

Punto **G**: Se alcanza el valor máximo negativo:

$$e = E_{\text{máx}} \cdot \text{sen } 270^\circ = -E_{\text{máx}}$$

Punto **A**: Se completa una vuelta completa del conductor y con ella se cubre un ciclo completo.

En la práctica y con el fin de eliminar los anillos colectores, los alternadores se construyen de tal forma que lo que se pone en movimiento de giro son las piezas polares que producen el campo magnético inductor. En el estator se sitúan los conductores donde se genera la f.e.m. de inducción cuando son cortados por el campo magnético en movimiento (Figura 12.8).

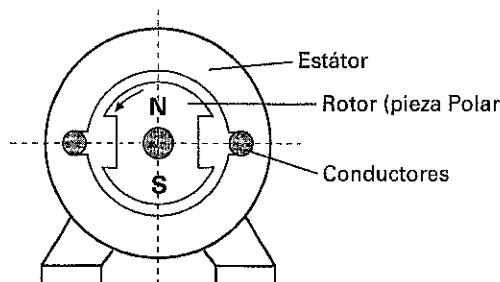


Figura 12.8. Alternador elemental donde los conductores permanecen fijos y el campo magnético es móvil.

12.3 Valores característicos de la C.A.

Al representar en un gráfico la tensión que aparece en un alternador en función del tiempo o del ángulo de giro, apare-

ce una curva que se conoce como senoide. Esto es así, porque la tensión queda en función del seno del ángulo α de giro. Para estudiar todos los valores que se dan en una tensión senoidal vamos a tomar como ejemplo una C.A. como la que disponemos en nuestras viviendas, de 230 V y de frecuencia 50 ciclos por segundo. En la Figura 12.9 se muestra el aspecto que presentaría la misma en la pantalla de un osciloscopio.

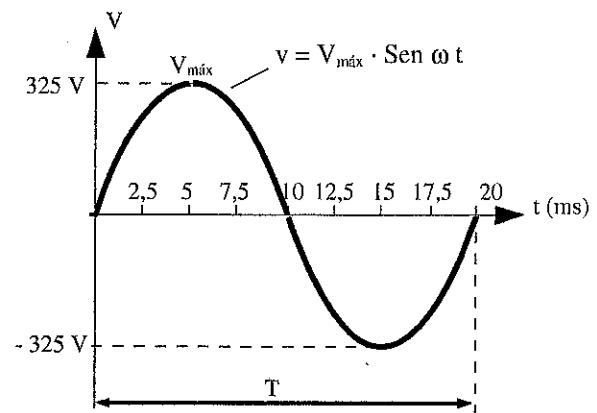


Figura 12.9. Representación de una C.A. senoidal industrial.

12.3.1 Valor instantáneo

Es el valor que toma la tensión en cada instante del tiempo siguiendo la función senoidal:

$$v = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen } \omega t$$

En el ejemplo de la Figura 12.9 existen todos aquellos valores instantáneos comprendidos entre 0 y 325 V y entre 0 y -325 V.

Ejemplo: 12.1

¿Cuál sería la tensión instantánea de nuestro ejemplo para un ángulo de giro de 30° del alternador elemental?

$$\text{Como } \omega t = \alpha, \quad v = 325 \cdot \text{sen } 30^\circ = 162,5 \text{ V}$$

12.3.2 Valor máximo de la tensión

La tensión senoidal alcanza diferentes valores según la posición relativa de los conductores respecto al campo magnético. Varía a cada instante, de tal forma que por cada ciclo es dos veces nula y dos veces máxima (pero de sentido opuesto $+V_{\text{máx}}$ y $-V_{\text{máx}}$). Se conoce como valor máximo al mayor de todos ellos, y que en el gráfico se da en las crestas de la senoidal. En nuestro ejemplo este valor es de 325 V.

12.3.3 Tensión eficaz

Dado que la tensión cambia constantemente (en nuestro ejemplo desde 0 V a 325 V) se hace necesario determinar un valor intermedio que represente a la tensión para realizar los cálculos y medidas; nos referimos a la tensión eficaz. En nuestro ejemplo, la tensión eficaz es 230 V y es el que mide un voltímetro de C.A. La tensión eficaz también se puede definir como aquélla que en las mismas condiciones produce los mismos efectos caloríficos en una resistencia eléctrica que una tensión continua del mismo valor.

Para una C.A. senoidal, se puede demostrar que la tensión eficaz es $\sqrt{2}$ más pequeña que la tensión máxima:

$$V_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$$

12.3.4 Intensidad eficaz

Al igual que ocurre con la tensión, la intensidad de la corriente también varía según una función senoidal, siendo dos veces nula y dos veces máxima por cada ciclo del alternador. La intensidad eficaz es el valor intermedio que produce los mismos efectos energéticos que una corriente continua del mismo valor. Además es la que indican los amperímetros de C.A. Aplicando la ley de Ohm tendríamos que:

$$I_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{ef}}}{R}, \quad \text{siendo} \quad I_{\text{ef}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$$

Ejemplo: 12.2

¿Cuál es el valor eficaz de una tensión alterna si su valor máximo es 325 V?

$$\text{Solución: } V_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{325}{\sqrt{2}} = 230 \text{ V}$$

Ejemplo: 12.3

¿Cuál es el valor máximo de una tensión alterna de 125 V?

$$\text{Solución: } V_{\text{máx}} = V_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2} = 125 \cdot \sqrt{2} = 177 \text{ V}$$

Ejemplo: 12.4

Conectamos una resistencia de 100 ohmios a una red de C.A. de 230 V. Determinar el valor eficaz y máximo de la intensidad de la corriente.

Solución: Siempre que nos indiquen el valor de la tensión o corriente de una C.A. se refiere al valor eficaz, que en nuestro ejemplo es de 230 V. De esta forma el valor eficaz de la corriente lo calculamos aplicando la ley de Ohm:

$$I_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{ef}}}{R} = \frac{230}{100} = 2,3 \text{ A}$$

$$I_{\text{máx}} = I_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2} = 2,3 \cdot \sqrt{2} = 3,25 \text{ A}$$

El conocimiento de los valores máximos que alcanza la tensión de una C.A. es muy importante, ya que es necesario seleccionar los aislantes adecuados para aparatos y conductores eléctricos que sean capaces de soportar dichos valores máximos.

12.3.5 Valor medio del ciclo completo

Si realizamos la media de todos los valores en un ciclo completo, dado que la mitad son positivos y la otra negativos, obtendremos un resultado de cero. Es por eso que, como un aparato de C.C. mide exclusivamente el valor medio, al realizar una medida con un voltímetro o amperímetro de C.C. en un sistema de C.A. obtendremos una medida de cero.

12.3.6 Ciclo o período

En el alternador elemental estudiado al comienzo de este capítulo, se podría decir que cada vuelta que da la espira produce un ciclo. El período es el tiempo que transcurre en un ciclo completo. Se representa por la letra T y se mide en segundos.

En el ejemplo de la Figura 12.9 se puede comprobar que el período es de 20 milésimas de segundo. Este tiempo es bastante pequeño, y en el caso de que lo produjese nuestro alternador elemental, significaría que tardaría solamente en completar una vuelta 20 ms.

¿Cuántas vueltas dará nuestro alternador elemental en un tiempo de 1 segundo?

Como por cada vuelta se invierten 0,02 segundos, en 1 segundo tendremos:

$$\frac{1}{0,02} = 50 \text{ vueltas}$$

En este caso se podría decir que el alternador gira a 50 vueltas por segundo y produce una C.A. senoidal de 50 ciclos por segundo.

12.3.7 Frecuencia

Es el número de ciclos que se producen en un segundo. Se representa por la letra f y se mide en Hertzios (Hz) o en ciclos/segundo.

De esta definición es fácil deducir que, en el caso del alternador elemental la frecuencia es de 50 Hz y que coincide con las revoluciones por segundo de la espira. También se deduce que para calcular la frecuencia, conocido el período, emplearemos la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{T}$$

Ejemplo: 12.5

¿Cuál será el valor de la frecuencia de una C.A. senoidal si mediante un osciloscopio determinamos que su período es de 0,010 segundos?

$$\text{Solución: } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,010} = 100 \text{ Hz}$$

Ejemplo: 12.6

Determinar el período que le corresponde a la frecuencia de la red eléctrica americana si su frecuencia es de 60 Hz.

Solución:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0,01666 \text{ s} = 16,66 \text{ ms}$$

Para medir la frecuencia se utiliza el frecuencímetro.

Ejemplo: 12.7

En la Figura 12.10 se muestra el esquema de conexiones de un frecuencímetro y un voltímetro de C.A. conectados a la entrada de un cuadro de distribución. Las lecturas de estos aparatos de medida son 40 Hz y 500 V, respectivamente. Determinar el período y el valor máximo de la tensión.

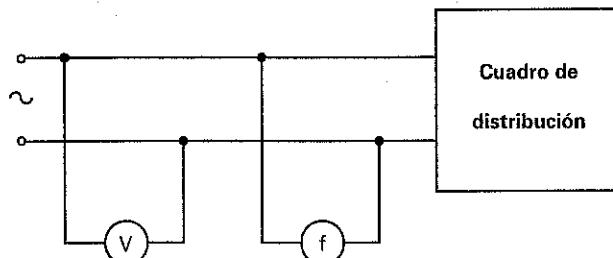


Figura 12.10

$$\text{Solución: } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40} = 0,025 \text{ s}$$

$$V_{\max} = V_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2} = 500 \cdot \sqrt{2} = 707 \text{ V}$$

12.3.8 Relación entre la frecuencia y la velocidad angular

La frecuencia está relacionada directamente con la velocidad angular ω a la que gira el alternador. Para que un alterna-

dor, con un par de polos, produzca, por ejemplo, una frecuencia de 50 Hz, necesita girar a una velocidad (n) de 50 revoluciones por segundo. La velocidad angular que le correspondería en este caso sería la siguiente:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{50 \cdot 2\pi}{1} = 100\pi \text{ rad/s}$$

Otra forma de verlo sería así: en una revolución se cubre un tiempo igual a un período ($t = T$) y un ángulo igual a 2π radianes ($\alpha = 2\pi$):

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T}, \quad \text{como } f = \frac{1}{T}$$

$$\boxed{\omega = 2\pi f}$$

Ejemplo: 12.8

¿Qué valor instantáneo alcanzará una tensión de 50 Hz si el valor máximo es de 311 y el tiempo de 0,003 s?

Solución: Primero calculamos la velocidad angular:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 100 \cdot \pi \text{ rad/s}$$

El valor instantáneo a los 0,003 s se calcula así:

$$v = V_{\max} \cdot \sin \omega t = 311 \cdot \sin (100 \cdot \pi \cdot 0,003 \text{ rad}) = 311 \cdot \sin (54^\circ) = 251,6 \text{ V}$$

* **Nota:** se ha transformado el ángulo en radianes a grados para operar el seno.

12.4 Receptores elementales en corriente alterna

Ahora vamos a estudiar el comportamiento de los receptores elementales cuando son sometidos a una corriente alterna. Dentro de la multitud de receptores que se pueden construir existen tres elementos claramente diferenciados. Nos referimos a las resistencias, bobinas y condensadores. Estos receptores se comportan de diferente manera, según se les aplique corriente continua o alterna.

12.4.1 Circuito con resistencia pura

Los circuitos con resistencia aparecen prácticamente en todo tipo de receptores, ya que hay que tener en cuenta que los propios conductores con los que se diseñan los receptores siempre poseen algo de resistencia. Por supuesto, los receptores que utilizan básicamente las resistencias son los calefactores.

En corriente continua: Recordemos que cuando una corriente continua fluye por una resistencia, ésta se calienta. Para calcular el valor de la corriente aplicamos la ley de Ohm:

$$\boxed{I = \frac{V}{R}}$$

I = Intensidad en amperios

V = Tensión en voltios

R = Resistencia en ohmios

La potencia que aparece en la resistencia se transforma en energía calorífica y se calcula mediante la expresiones:

$$P = V \cdot I$$

$$P = R \cdot I^2$$

P = Potencia en vatios

En corriente alterna: Una resistencia pura se comporta de forma similar en corriente alterna que en continua. En este caso también se cumple la ley de Ohm, pero ahora se aplica con los valores eficaces de la corriente y la tensión, que son los que indicarían un amperímetro y un voltímetro, respectivamente (Figura 12.11).

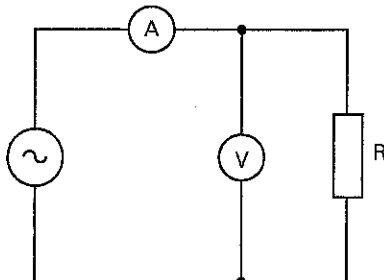


Figura 12.11

$$I = \frac{V}{R}$$

I = Intensidad eficaz en amperios

V = Tensión eficaz en voltios

R = Resistencia en ohmios

De esta manera, se puede deducir que, para una tensión determinada aplicada a una resistencia, la intensidad eficaz que aparece en corriente alterna es del mismo valor que la intensidad de corriente continua que recorre el mismo circuito.

Es por eso que la potencia que se desarrolla en C.A. es igual que la que se desarrolla en C.C. Hecho que se puede comprobar experimentalmente. Si conectamos un vatímetro para medir la potencia a la que trabaja una resistencia óhmica pura, podremos verificar que la lectura del vatímetro es la misma para C.C. que para C.A., siempre y cuando utilicemos los mismos valores de tensión e intensidad en C.C. que los eficaces de C.A.

$$P = V \cdot I$$

$$P = R \cdot I^2$$

P = Potencia en vatios

Dado que la tensión que aplicamos a la resistencia varía según la forma de una senoide, si aplicásemos la ley de Ohm a todos estos valores, obtendremos una intensidad de corriente eléctrica que también es una senoide, tal como se muestra en la Figura 12.12.

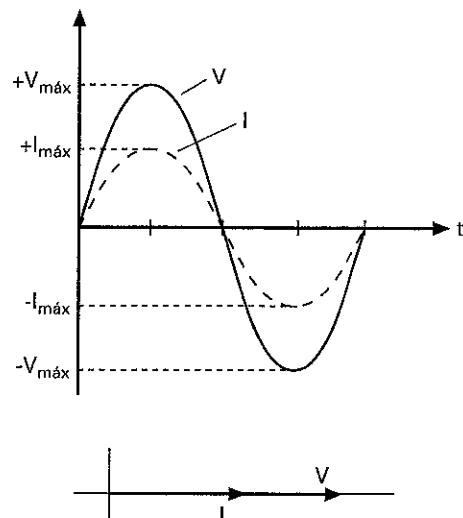


Figura 12.12. Representación de la tensión y corriente en una resistencia.

Si observamos detenidamente la representación gráfica de la tensión e intensidad podremos comprobar que, cuando el valor de la tensión V aumenta o disminuye, también lo hace el de la corriente I , alcanzando los valores máximos y nulos en el mismo instante de tiempo. En este caso se puede decir que la corriente y la tensión están en fase.

En el gráfico inferior de la Figura 12.12 se ha representado el diagrama vectorial de V y de I . Estas magnitudes aparecen dibujadas como dos vectores que giran a la velocidad ω en el sentido contrario a las agujas de un reloj; el valor instantáneo de las mismas es el que correspondería a la proyección de estos vectores en el eje Y. Para que la representación sea correcta es necesario dibujar estos vectores con una longitud que sea proporcional a los valores de la tensión e intensidad.

Ejemplo: 12.9

Determinar la corriente y potencia que aparecerán en una resistencia pura de 50 ohmios si la sometemos a una tensión alterna senoidal de 220 V. Dibujar el diagrama vectorial.

Solución: Mientras no nos indiquen ninguna otra referencia, la tensión a la que se refiere el enunciado de este problema es el valor eficaz. De esta forma el valor eficaz de la intensidad de la corriente, es:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ A}$$

La potencia la podemos calcular así:

$$P = R \cdot I^2 = 50 \cdot 4,4^2 = 968 \text{ W}$$

El diagrama vectorial lo dibujamos a una determinada proporción de los valores $I = 4,4 \text{ A}$ y $V = 220 \text{ V}$, tal como se muestra en la Figura 12.13.

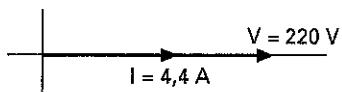


Figura 12.13

12.5 Circuito con bobina

Las bobinas están presentes en todos aquellos receptores en los que sea necesario la producción de un campo magnético. Nos referimos a los electroimanes, contactores, motores, reactancias de arranque de lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de mercurio, vapor de sodio, etc.), transformadores, etc.

Para el estudio del comportamiento de la bobina vamos a partir del hecho de que su resistencia es cero. Hecho, que como se podrá entender, es en la mayoría de las aplicaciones falso, ya que los conductores con los que se construyen habitualmente las bobinas son de cobre, por lo que siempre tienen una determinada resistencia.

En corriente continua: Si conectamos una bobina a una tensión continua, en ella aparece una corriente eléctrica que queda únicamente limitada por la resistencia que posean los conductores con los que haya sido fabricada. Según la ley de Ohm: $I = V/R$. Dado que esta resistencia suele ser pequeña, si aplicamos una tensión elevada a la bobina, aparece una fuerte corriente por la misma, desarrollándose una fuerte potencia que puede llegar a destruirla por el fuerte calor generado.

En corriente alterna: Si conectamos la misma bobina a una tensión alterna, se puede comprobar experimentalmente que ahora la corriente que fluye por la misma es más bien moderada. Si conectamos un vatímetro podríamos comprobar que el consumo de potencia es prácticamente nulo, a pesar de la existencia de una cierta corriente. De aquí se puede sacar la conclusión de que la bobina desarrolla una cierta oposición a la corriente eléctrica de carácter diferente a la resistencia óhmica.

Todos estos fenómenos se deben al efecto de autoinducción de la bobina:

Cuando la bobina es recorrida por una corriente alterna, aparece una corriente variable, y por tanto un campo magnético también variable (Figura 12.14). Dado que las líneas de fuerza del flujo magnético, que ella misma genera, cortan a sus propios conductores, surge una f.e.m. de autoinducción que, según la ley de Lenz, se va a oponer a la causa que la produjo. Es decir, se opone en todo momento a los cambios de corriente.

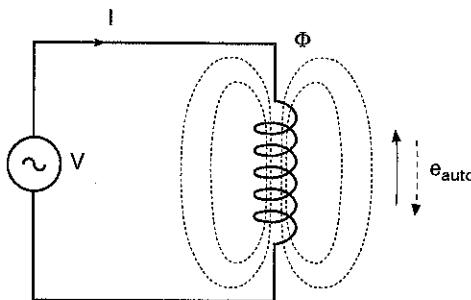


Figura 12.14. La f.e.m. de autoinducción de la bobina se opone a la corriente.

Cuando la corriente, siguiendo las variaciones de la función senoidal, tiende a crecer, el campo magnético también lo hace. Aparece entonces una f.e.m. que se opone a que la corriente se establezca, provocando un efecto de retraso en la corriente eléctrica respecto de la tensión (al conectar una bobina a una tensión alterna, la tensión aparece inmediata-

mente, mientras que la corriente tarda un cierto tiempo en establecerse). En estas condiciones la bobina se está cargando de energía en forma de campo magnético creciente.

Cuando la corriente se ha establecido con su valor máximo por la bobina, la f.e.m. de autoinducción se hace cero. Pero cuando la corriente empieza a disminuir, también lo hace el campo, y entonces se genera una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que se opone a que la corriente desaparezca. Ahora la bobina descarga hacia el generador la energía que había acumulado en forma de campo magnético decreciente.

Realmente, una bobina pura (sin resistencia óhmica) devuelve toda la energía que ha utilizado para crear el campo magnético y, en consecuencia, la potencia media que consume es cero.

En la Figura 12.15 se ha representado a la corriente eléctrica con un retraso de 90° respecto de la tensión. Observa cómo, efectivamente, cuando la intensidad quiere crecer la tensión es máxima, siendo en este momento cuando se carga la bobina.

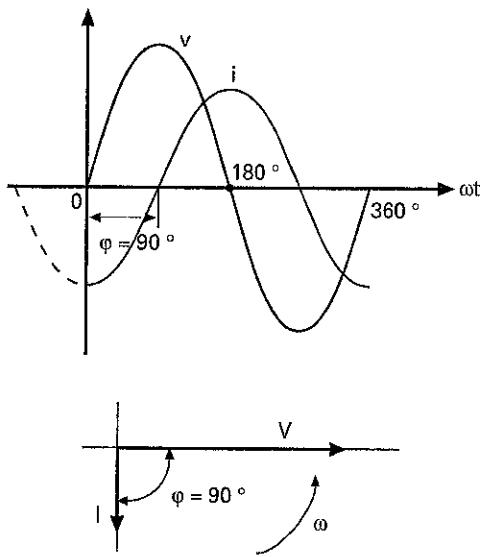


Figura 12.15. Diagrama vectorial de V e I en una bobina pura.

En este caso se dice que la intensidad está desfasada en retraso respecto a la tensión en un cuarto de ciclo, es decir ángulo ϕ de 90° .

Una bobina pura retrasa un ángulo de 90° a la corriente respecto de la tensión.

12.5.1 Reactancia inductiva de una bobina

Como la oposición que presenta la bobina a la corriente alterna tiene que ver con los fenómenos de autoinducción, ésta será mayor cuanto mayor sea el coeficiente de autoinducción L y más rápidas sean las variaciones de la corriente alterna, es decir la frecuencia f . Si llamamos reactancia inductiva X_L a la oposición que presenta la bobina a la corriente, tendremos que:

$$X_L = 2\pi f L$$

X_L = Reactancia inductiva en ohmios

f = Frecuencia en hertzios

L = Coeficiente de autoinducción en henrios

Para calcular el valor eficaz de la corriente en una bobina aplicaremos la siguiente expresión, que es muy similar a la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{X_L}$$

12.5.2 Potencia en una bobina

Tal como indicábamos al principio de este tema, si se mide la potencia de una bobina pura al aplicarla una C.A., se puede comprobar que el vatímetro indica una potencia igual a cero.

Al contrario que ocurre en una resistencia, en una bobina pura no se produce ningún consumo de energía calorífica. La corriente que recorre la bobina sirve únicamente para generar el campo magnético.

En realidad lo que ocurre es que, al intentar crecer la corriente por la bobina, también lo hace el campo magnético, produciéndose un consumo de energía eléctrica. En este caso la energía fluye del generador de C.A. hacia la bobina y es cuando decimos que ésta se está cargando de energía electromagnética. Una vez alcanzada la corriente máxima y el flujo máximo, éstos tienden a disminuir siguiendo la trayectoria senoidal, desarrollándose una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que genera una energía eléctrica que, ahora, fluye desde la bobina hacia el generador. En este caso, la bobina devuelve la energía al generador. De esta manera tenemos que la bobina no consume realmente la energía, simplemente la toma prestada durante un cuarto de ciclo para generar su campo electromagnético, para devolverla en el siguiente cuarto de ciclo.

Dado que el vatímetro mide el valor medio de la potencia y ésta es positiva durante un cuarto de ciclo y negativa en el siguiente, éste no indica ninguna potencia.

Aunque la bobina no consuma energía real para su funcionamiento, las constantes cargas y descargas de la misma hacen que circule una determinada corriente por los conductores y, por tanto, también aparece una potencia que fluctúa por los mismos, que llamaremos **potencia reactiva** (Q_L).

En una bobina: $Q_L = X_L I^2$ (VAR) (volti-amperios-reactivos).

Ejemplo: 12.10

Se conecta una bobina con un coeficiente de autoinducción de 0,2 henrios a una red de C.A. de 50 Hz, tal como se muestra en la Figura 12.16. Si el voltímetro indica una tensión de 125 V, averiguar las lecturas del amperímetro y el vatímetro, así como la potencia reactiva de la bobina. Dibujar el diagrama vectorial

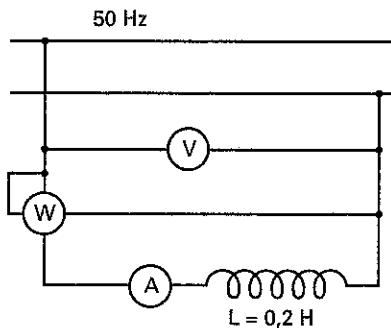


Figura 12.16

Solución: Primero determinamos la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi f L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,2 = 62,8 \Omega$$

La intensidad de la corriente eléctrica quedará limitada por el valor de esta reactancia.

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{125}{62,8} = 2 \text{ A}$$

La lectura del amperímetro es de 2 A, que se corresponde con el valor eficaz de la corriente.

Con estos valores ya podemos dibujar el diagrama vectorial (Figura 12.17). Para ello tendremos en cuenta que la bobina produce un retraso de 90° a la corriente respecto de la tensión.

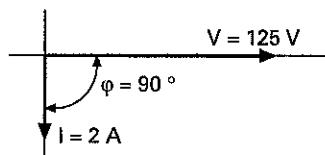


Figura 12.17

La potencia reactiva la calculamos con la expresión:

$$Q_L = X_L I^2 = 62,8 \cdot 2^2 = 251 \text{ VAR}$$

Como se trata de una bobina pura, el vatímetro indica cero vatios.

12.6 Circuito con condensador

Los condensadores no son receptores que se utilicen tan habitualmente en C.A. como las resistencias y las bobinas. Sin embargo son muy útiles, por ejemplo, para contrarrestar los fenómenos negativos que producen las potencias reactivas de las bobinas.

En corriente continua. Cuando aplicamos C.C. a un condensador, éste se carga de energía eléctrica, haciendo fluir corriente eléctrica por el circuito sólo durante dicha carga. De esta forma, se puede decir que un condensador no permite el paso de la corriente continua.

En corriente alterna. Si conectamos un condensador a una tensión alterna (Figura 12.18), se puede comprobar experimentalmente que ahora sí fluye corriente de una forma cons-

tante. Si conectásemos un vatímetro, al igual que ocurre con el circuito con bobina, podríamos comprobar como el consumo de potencia es nulo, a pesar de la existencia de una cierta corriente. De aquí se puede sacar la conclusión de que el condensador, lo mismo que la bobina, no consume potencia.

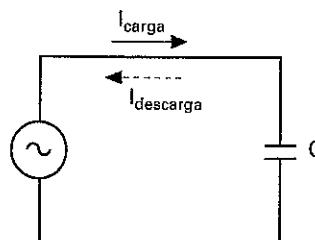


Figura 12.18. El condensador se carga y descarga al aplicarle C.A.

Estudiemos con detenimiento los fenómenos que se dan. Cuando aplicamos la tensión al condensador, como éste está totalmente descargado, aparece en el mismo una fuerte corriente de carga. Según se carga el condensador, la tensión que aparece en él va aumentando mientras disminuye la corriente. Cuando se completa la carga la corriente es cero y la tensión alcanza su valor máximo. Se habrá podido observar en esta explicación, que en un condensador primero aparece la corriente, siendo la tensión cero (nivel de carga inicial cero) y según se va cargando el mismo la tensión crece y la corriente disminuye. Por esta razón, se puede decir que el condensador adelanta la corriente en el tiempo respecto de la tensión. En el diagrama vectorial este desfase se corresponde a un ángulo de 90° en ciclo (Figura 12.19).

Cuando la tensión aplicada al condensador comienza su descenso, éste descarga la energía acumulada en el $1/4$ de ciclo anterior, apareciendo una corriente de descarga por el circuito.

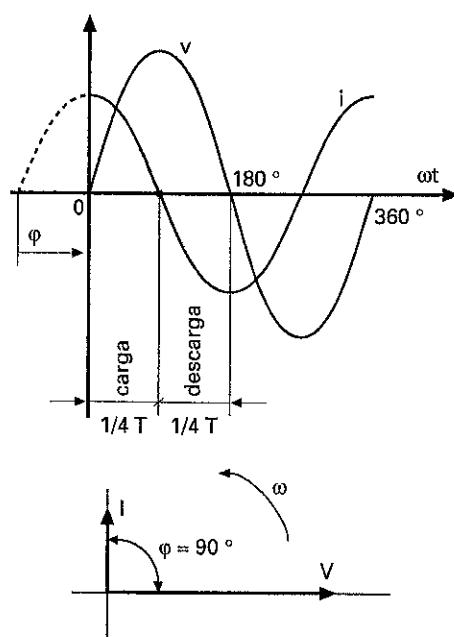


Figura 12.19. Diagrama vectorial de V e I en un condensador.

Un condensador puro adelanta un ángulo de 90° a la corriente respecto de la tensión.

12.6.1 Reactancia capacitiva de un condensador

Un condensador, en C.A., hace que fluya constantemente una corriente eléctrica por el circuito debido a las constantes cargas y descargas del mismo. Es importante hacer notar que esta corriente nunca llega a atravesar el dieléctrico del condensador, pero sí existe por los conductores que lo alimentan.

Como el establecimiento de la corriente eléctrica en un condensador cuando le es aplicado una C.A. tiene que ver con los fenómenos de carga y descarga del mismo, dicha corriente será mayor cuanto mayor sea la capacidad del condensador y más rápidas sean dichas cargas y descargas, es decir la frecuencia f . Si llamamos reactancia capacitiva X_C a la oposición que presenta el condensador a la corriente, tendremos que:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

X_C = Reactancia capacitiva en ohmios

f = Frecuencia en hertzios

C = Capacidad del condensador en faradios

$$I = \frac{V}{X_C}$$

Para calcular el valor eficaz de la corriente en un condensador aplicaremos la expresión similar a la ley de Ohm:

12.6.2 Potencia en un condensador

Al igual que ocurre con la bobina, si se mide con un vatímetro la potencia de un condensador al conectarlo a una C.A., se puede comprobar que éste indica una potencia igual a cero.

En un condensador tampoco se produce ningún consumo de energía calorífica. Este hecho se debe a que en el primer cuarto de ciclo el condensador se carga de energía eléctrica en forma de carga electrostática, por lo que la energía fluye del generador de C.A. al condensador. En el siguiente cuarto de ciclo el condensador se descarga hacia el generador, devolviendo al mismo la energía acumulada. Al igual que con la bobina, el condensador no consume realmente la energía, simplemente la toma prestada durante un cuarto de ciclo, para devolverla en el siguiente cuarto de ciclo. Por esta razón el vatímetro, que indica el valor medio de la potencia instantánea, indica una potencia igual a cero.

La corriente que fluye hacia el condensador sirve sólo para producir las cargas y descargas constantes del mismo. Además, aquí también aparece una potencia reactiva Q_C producida por la energía que se intercambia entre el condensador y el generador.

En un condensador: $Q_C = X_C I^2$ (VAR) (volti-amperios-reactivos).

Se puede comprobar que cuando la bobina descarga su energía eléctrica acumulada en forma de campo electromagnético

nético, se produce el ciclo de carga del condensador. En conclusión, se puede decir que la potencia reactiva del condensador es negativa respecto a la bobina y que, por tanto sus efectos se compensan. Este aspecto habrá que tenerlo en cuenta cuando conectemos en un mismo circuito bobinas con condensadores.

Ejemplo: 12.11

Se conecta un condensador de $75 \mu\text{F}$ una red de C.A. de 50 Hz, tal como se muestra en la Figura 12.20. Si el voltímetro indica una tensión de 220 V, averiguar las lecturas del amperímetro y el vatímetro, así como la potencia reactiva del condensador. Dibujar el diagrama vectorial.

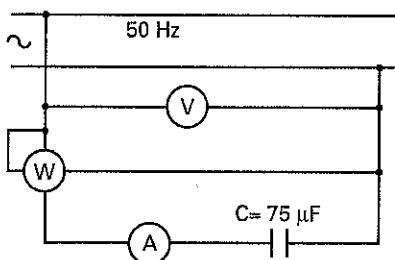


Figura 12.20

Solución: Primero determinamos la reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 75} = 42,4 \Omega$$

La intensidad de la corriente eléctrica quedará limitada por el valor de esta reactancia.

$$I = \frac{V}{X_C} = \frac{220}{42,4} = 5,2 \text{ A}$$

La lectura del amperímetro es de 5,2 A.

Con estos valores dibujamos el diagrama vectorial (Figura 12.21). Para ello tendremos en cuenta que el condensador produce un adelanto de 90° a la corriente respecto de la tensión.

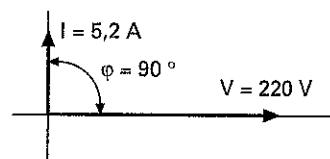


Figura 12.21

La potencia reactiva la calculamos con la expresión:

$$Q_C = X_C I^2 = 42,4 \cdot 5,2^2 = 1.146 \text{ VAR}$$

Como se trata de un condensador, el vatímetro indica cero vatios.

Actividades

1. Consigue un generador de funciones (instrumento muy utilizado en electrónica que sirve para producir tensiones variables a diferentes frecuencias) y, a modo de ejercicio práctico, comprueba con un osciloscopio los valores de las magnitudes asociadas a las tensiones senoidales de diferentes frecuencias (véase figura 12.22).

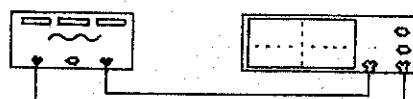


Figura 12.22. Esquema de conexiones de un osciloscopio midiendo las magnitudes asociadas a tensiones senoidales proporcionadas por un generador de funciones.

Antes de realizar la medida necesitaremos conocer en qué consiste un osciloscopio.

El osciloscopio es un aparato de medida que ya a ser indispensable para el análisis y comprobación de los valores que se dan en una tensión variable. Su aplicación en el campo de la electrónica se hace indispensable. Un osciloscopio lo que hace es mostrar en su pantalla la forma que posee una determinada tensión o corriente eléctrica. Es decir, representa en un eje de coordenadas las variaciones de estas magnitudes en función del tiempo.

Así, por ejemplo, la imagen que aparecería en la pantalla del mismo al aplicarle una tensión alterna senoidal sería la mostrada en la Figura 12.23.

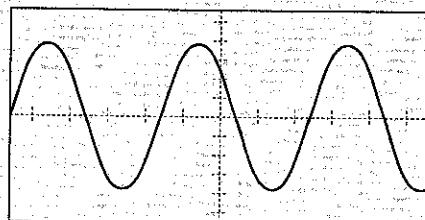


Figura 12.23. Imagen de una tensión senoidal en un osciloscopio.

Así, por ejemplo, en el caso de que la imagen que aparece en la pantalla fuese la de la Figura 12.24, los grados de desviación serían: atenuador vertical: 4 V/div; base de tiempos: 1 ms/div, el valor máximo y eficaz de la tensión, así como el período y la frecuencia la calcularemos así:

$$V_{\max} = 3 \text{ div} \cdot 4 \text{ V/div} = 12 \text{ V}$$

$$V_{\text{eficaz}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \dots = 8,5 \text{ V}$$

$$T = 8 \text{ div} \cdot 1 \text{ ms/div} = 0.008 \text{ s}, f = 1/T = \dots = 125 \text{ Hz}$$

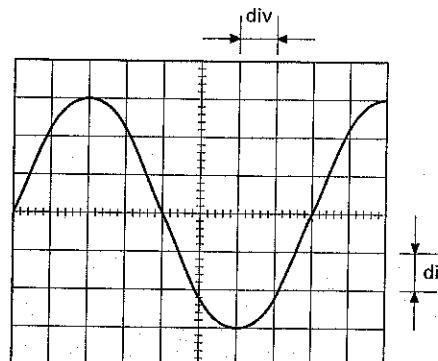


Figura 12.24

Para ampliar conocimientos sobre el manejo del osciloscopio conviene que antes realices un estudio más completo del mismo, como el que se propone en el Capítulo 16 de esta obra.

2. Con este sencillo ejercicio práctico comprobaremos los ángulos de desfase que provocan las bobinas puras y los condensadores.

Consigue una bobina con un coeficiente de autoinducción elevado y de baja resistencia ohmica. Conectaremos el canal A del osciloscopio en derivación con la bobina; de esta forma, conseguimos que aparezca por este canal la tensión senoidal aplicada.

Como el osciloscopio sólo mide tensiones, conectamos una resistencia de medida, de bajo valor ohmico, en serie con la bobina, con el fin de medir en ella la caída de tensión ($V = R_{\text{medida}} I$), que será proporcional a la corriente a medir. Para llevar a cabo esta operación, se conecta el canal B del osciloscopio, por la entrada vertical, en derivación con la resistencia de medida (Figura 12.25).

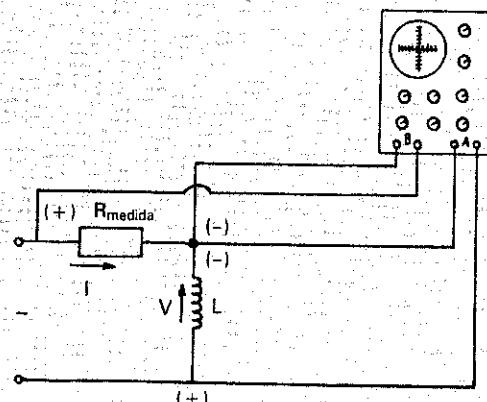


Figura 12.25. Medida de V e I con un osciloscopio.

***Nota:** Las puntas de prueba de ambos canales poseen una conexión interior en común en el terminal (-). Para evitar que se cortocircuiteen las señales es conveniente

conectar al mismo punto del circuito este terminal, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 12.25. El resultado de este condicionante es que la tensión y la corriente quedan en oposición, es decir desfasados 180° . Para poder visualizar correctamente la señal en la pantalla del osciloscopio hay que invertir la señal del canal B mediante el control de inversión de la polaridad.

¿Se consiguen exactamente 90° de desfase entre V e I?

¿Por qué razón el ángulo de desfase provocado es algo menor de 90° ?

Sustituye la bobina por un condensador y, teniendo en cuenta las mismas consideraciones, visualiza en el osci-

loscopio la tensión y la corriente por el mismo, determinando el ángulo de desfase entre V e I.

3. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.)

Autoevaluación

- 1) ¿A qué se debe que un alternador produzca una tensión que cambia constantemente de valor y de sentido?
 - Los electrones son empujados a moverse según gira el alternador
 - A que los conductores en su giro cortan el campo magnético con diferentes ángulos
- 2) ¿Qué indica un voltímetro de C.C. al ser conectado a una red de C.A.?
 - El valor eficaz
 - El valor máximo
 - Cero
- 3) ¿De todos los valores que compone una C.A. senoidal, cuál es el que se utiliza siempre para cálculos y medidas?
 - El valor eficaz
 - El valor medio
 - El valor máximo
- 4) ¿Por qué es interesante conocer el valor máximo de la tensión en un sistema de C.A.?
 - Es el que se utiliza comúnmente para realizar cálculos y medidas
 - Es el que hay que tener en cuenta para la elección de los aislantes
 - De él depende el valor de la frecuencia
- 5) ¿De los componentes que a continuación se exponen, cuál de ellos produce un adelanto de 90° a la corriente respecto de la tensión?
 - Una bobina
 - Un condensador
 - Una resistencia
- 6) Las bobinas y condensadores no consumen realmente energía eléctrica. ¿Cómo se denomina a la potencia eléctrica que intercambian con el generador?
 - Potencia activa
 - Potencia aparente
 - Potencia reactiva
- 7) Cuando se conecta una resistencia a una red de C.A. se produce un desfase entre la tensión y la corriente de:
 - 0°
 - 90°
 - 45°
- 8) Con un voltímetro de C.A. se mide una tensión de 100 V, ¿cuál es el valor máximo de la tensión?
- 9) Averiguar la frecuencia de una C.A. si su período es de 5 ms.
- 10) Determinar la tensión máxima que deberá soportar un aislador de una línea de transporte de energía eléctrica si la tensión eficaz entre fases es de 220.000 V.
- 11) Al medir con un osciloscopio una tensión alterna, obtenemos la señal que se indica en la Figura 12.26. Estando el atenuador vertical en 10 V/div y la base de tiempos en 5 ms/div, determinar el valor máximo, el valor eficaz, el período, la frecuencia y el valor instantáneo a los 5 ms.

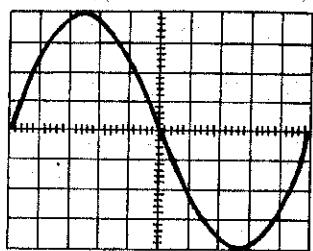


Figura 12.26

- 12) Una espira gira a 1.500 revoluciones/minuto en el seno del campo magnético formado por un par de polos. ¿Cuál será la velocidad angular, la frecuencia y el período de la tensión alterna inducida en dicha espira?
- 13) El valor máximo de una tensión senoidal es de 311 V, para una frecuencia de 50 Hz. Encontrar los valores instantáneos de la tensión para los tiempos: 1 ms, 3 ms, 5 ms, 6 ms, 10 ms, 11 ms, 13 ms, 20 ms y situar los mismos en un gráfico de la onda senoidal.
- 14) Si una tensión senoidal posee un valor de 90 V a los 30° del ciclo, encuéntrese el valor eficaz de la misma.
- 15) Al conectar un osciloscopio a una fuente de tensión senoidal aparece en su pantalla la imagen de la Figura 12.27. Averiguar la lectura de los siguientes aparatos de medida conectados a la misma fuente: a) un voltímetro de C.A.; b) un voltímetro de C.C.; c) un frecuencímetro.
- 16) Las características eléctricas de una plancha eléctrica son: $R = 50 \Omega$, $V = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Calcular la intensidad, la potencia y la energía consumida por ella en 8 horas.
- 17) Una bobina pura posee un coeficiente de autoinducción de 0,4 H. Se la conecta a una red de C.A. de 380 V y 60 Hz. Calcular la reactancia inductiva, la intensidad, la potencia reactiva y la energía consumida en 8 horas.
- 18) Se conecta un condensador de $200 \mu\text{F}$ a un alternador de 100 Hz y 50 V. Determinar la intensidad de la corriente y la potencia reactiva.

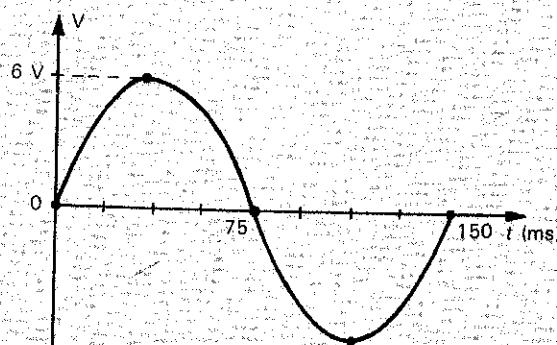


Figura 12.27

Circuitos Serie R-L-C en C.A.

19
18
17

Introducción

Al igual que en C.C. conectábamos en serie resistencia, en C.A. es fácil encontrar circuitos que consistan en bobinas, resistencias y condensadores conectados en serie. Para la resolución de estos circuitos siempre habrá que tener en cuenta los desfases que producen las bobinas y condensadores.

Contenido

- ▷ Circuito serie R-L.
- ▷ Potencias en C.A.
- ▷ Circuito serie R-C.
- ▷ Circuito serie R-L-C.
- ▷ Mejora del factor de potencia.
- ▷ Caída de tensión en líneas monofásicas de C.A.

Objetivos

- ▷ Resolver circuitos serie de circuitos de C.A.
- ▷ Distinguir y calcular los tres tipos de potencia de un circuito de C.A., así como encontrar y seleccionar adecuadamente los sistemas para la corrección del factor de potencia.
- ▷ Calcular la sección de los conductores en líneas monofásicas de C.A. teniendo en cuenta su caída de tensión.

13.1 Acoplamiento en serie de bobinas y resistencias

En la práctica es difícil encontrar circuitos que sean exclusivamente inductivos, ya que para la fabricación de las bobinas se utilizan hilos metálicos conductores (normalmente de cobre) con una cierta resistencia. Este tipo de circuitos es muy común, como es el caso de los motores, circuitos de arranque en las lámparas fluorescentes, contactores, electroimanes, etc.

En la Figura 13.1 se ha representado el circuito equivalente de una bobina real, que en este caso está formado por una resistencia de valor óhmico R conectada en serie con una bobina pura de reactancia X_L .

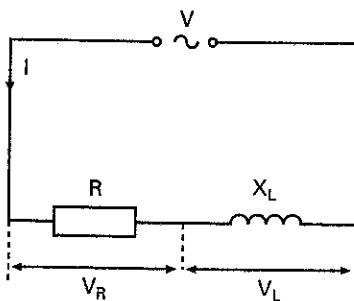


Figura 13.1. Circuito serie R-L.

Si a este circuito le conectamos una serie de aparatos de medida, tal como se muestra en la Figura 13.2 y aplicamos una tensión alterna al conjunto, se obtienen las siguientes conclusiones:

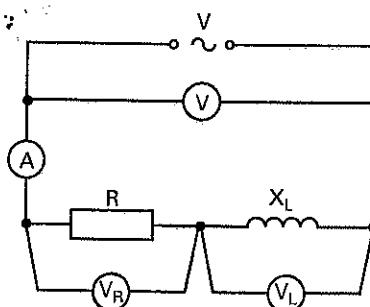


Figura 13.2

– Dado que se trata de un circuito serie, aparece una única corriente I por el circuito que queda reflejada en el amperímetro A . El valor de esta corriente depende de la combinación de los valores de R y X_L , de tal forma que, cuanto mayores sean éstos, menor es la corriente.

La combinación de los efectos limitadores de la corriente producidos por la resistencia y la bobina se le conoce por el nombre de impedancia y se representa por la letra Z .

Para determinar el valor de la corriente en el circuito ahora aplicamos la ley de Ohm de esta manera:

$$I = \frac{V}{Z}$$

Los voltímetros V_R y V_L nos indican respectivamente las tensiones que aparecen en la resistencia y la bobina. Se puede comprobar experimentalmente que en ambos casos se cumple la ley de Ohm para corriente alterna, de lo que se deduce que:

$$V_R = R I$$

$$V_L = X_L I$$

Dado que se trata de un circuito serie, cabría pensar que la lectura del voltímetro V , que indica la tensión total aplicada, tendría que ser la suma de las lecturas de los voltímetros $V_R + V_L$. Al hacer la experiencia comprobamos que esta relación no se cumple. ¿Cuál es la explicación?

En realidad sí se cumple que la tensión total aplicada al circuito es igual a la suma de las tensiones que aparecen en la resistencia y la bobina, pero de forma vectorial:

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_L$$

Hay que pensar que la bobina produce un desfase en las magnitudes eléctricas que hace que estas tensiones no varíen al mismo tiempo, por lo que para sumarlas habrá que conocer su situación en el diagrama vectorial.

Para que el diagrama vectorial sea más fácil de interpretar vamos a tomar como referencia la intensidad, ya que ésta es común a los dos receptores. Para ello situamos el vector I con un ángulo de cero grados, tal como se muestra en la Figura 13.3.

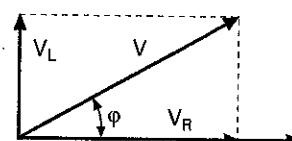


Figura. 13.3. Diagrama vectorial de un circuito R-L.

Dado que la resistencia óhmica no provoca ningún tipo de desfase, dibujamos en el diagrama vectorial la caída de tensión V_R en fase con la intensidad de corriente.

Una bobina provoca un retraso de 90° de la corriente respecto de la tensión. Como hemos dibujado a la corriente en el ángulo cero, habrá que situar el vector de la tensión en la bobina V_L adelantado respecto a la misma un ángulo de 90° .

Una vez situados correctamente en el diagrama los vectores de tensión, la tensión del conjunto V la obtenemos haciendo la suma vectorial de V_R y V_L . Si se observa el resultado obtenido podemos comprobar que la tensión V queda adelantada un ángulo ϕ respecto de la corriente.

Dicho de otra manera: en un circuito R-L la corriente queda retrasada un ángulo ϕ respecto de la tensión, que ya no es 90° como en el caso de la bobina pura. El valor de este ángulo dependerá de los valores de la resistencia respecto de la bobina. Así, por ejemplo, si en un circuito es mucho mayor la resistencia que la reactancia de la bobina este ángulo será pequeño. Al contrario, si predomina la reactancia inductiva sobre la resistencia el ángulo alcanzará valores próximos a los 90° .

13.1.1 Triángulo de tensiones

Observando el diagrama vectorial de la Figura 13.3 detectamos que los vectores de las tensiones forman un triángulo rectángulo, donde V es la hipotenusa y V_R y V_L los catetos, tal como se muestra en la Figura 13.4. Si aplicamos el teorema de Pitágoras a este triángulo podemos obtener la siguiente relación:

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$$

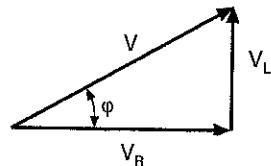


Figura 13.4. Triángulo de tensiones.

13.1.2 Triángulo de impedancias

Vamos a expresar en el triángulo de tensiones las relaciones de la ley de Ohm, tal como se muestra en la Figura 13.5. Si ahora dividimos cada uno de los lados de este triángulo entre la intensidad I , común a todo ellos, obtendremos el triángulo de impedancias que se muestra en la Figura 13.6.

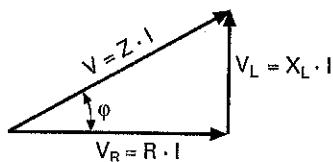


Figura 13.5

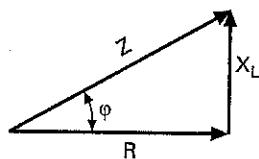


Figura 13.6. Triángulo de impedancias.

Con el triángulo de impedancias podemos obtener el valor de la impedancia Z :

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Para determinar el ángulo ϕ de desfase entre V e I se puede utilizar la relación trigonométrica de la tangente:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{X_L}{R}$$

Una vez obtenida la tangente, mediante unas tablas trigonométricas o una calculadora científica, se determina el ángulo que le corresponde.

Ejemplo: 13.1

El circuito equivalente de la bobina de un contactor es el que se representa en la Figura 13.7. El circuito consta de una resistencia de 20 ohmios y de una bobina pura con un coeficiente de autoinducción de 50 milihenrios. Se trata de averiguar los valores de Z , I , ϕ , V_R y V_L si aplicamos una tensión senoidal de 125 voltios y 50 hertzios. Dibujar el diagrama vectorial de V e I .

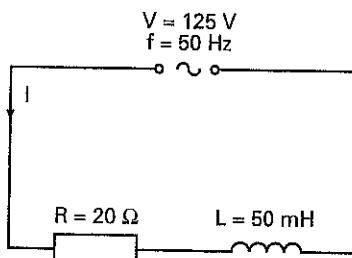


Figura 13.7

$$\text{Solución: } X_L = 2\pi f L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,05 = 15,7 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 15,7^2} = 25,4 \Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{125}{25,4} = 4,9 \text{ A}$$

$$V_R = R I = 20 \cdot 4,9 = 98 \text{ V}$$

$$V_L = X_L I = 15,7 \cdot 4,9 = 76,9 \text{ V}$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{X_L}{R} = \frac{15,7}{20} = 0,79,$$

que le corresponde un ángulo ϕ de 38°

El ángulo de desfase es de 38° de retraso de la corriente respecto de la tensión, tal como se ha representado en el diagrama vectorial correspondiente en la Figura 13.8.

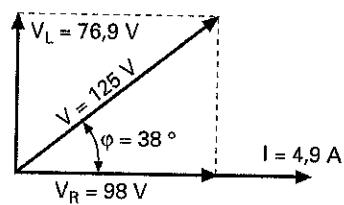


Figura 13.8

13.1.3 Potencia en un circuito R - L

En un circuito con resistencia y bobina se puede observar que existe un consumo de energía eléctrica que se transforma en calor a causa de la resistencia R . Por otro lado, en la bobina se producen constantes cargas y descargas de energía en forma de campo electromagnético. Esto da lugar a que en el mismo circuito coexisten diferentes tipos de potencias:

Potencia activa: Este tipo de potencia es el que se transforma en calor en la resistencia. Se puede decir que es la única potencia que realmente se consume en el circuito y por tanto, es la que debe aportar el generador al mismo.

Esta potencia es la que miden los vatímetros y en una resistencia se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P = R \cdot I^2$$

Su unidad de medida es el vatio (W). Para calcular la potencia activa de cualquier circuito podemos utilizar la siguiente expresión:

$$P = VI \cos \phi$$

Potencia reactiva: Es la potencia con la que se carga y descarga constantemente la bobina. Realmente es una potencia que no se consume, únicamente se intercambia entre el generador y la bobina, haciendo fluir una corriente extra por los conductores de alimentación. En una bobina la potencia reactiva se calcula mediante la expresión:

$$Q_L = X_L \cdot I^2$$

Su unidad de medida es el voltio-amperio-reactivo (VAR.). Para calcular la potencia reactiva de cualquier circuito utilizamos la expresión:

$$Q = VI \sin \phi$$

Potencia aparente: Es la potencia total que transportan los conductores que alimentan al circuito. Dado que en un circuito R-L existe potencia activa y reactiva, por los conductores que alimentan a dicho circuito se transportan ambas potencias. Si sumamos vectorialmente estas potencias obtendremos la potencia aparente.

Se suele representar por la letra S y su unidad de medida el voltio-amperio (VA). Para calcular la potencia aparente de cualquier circuito utilizamos la expresión:

$$S = VI$$

Triángulo de potencias: Al igual que hacíamos con las tensiones e impedancias, también se puede construir un triángulo que relacione las tres potencias que se dan en un circuito de C.A. Si partimos, por ejemplo, del triángulo de impedancias (Figura. 13.9 a) y multiplicamos a los vectores del mismo por I^2 (Figura 13.9 b) obtendremos el triángulo de potencias de la Figura 13.9 c.

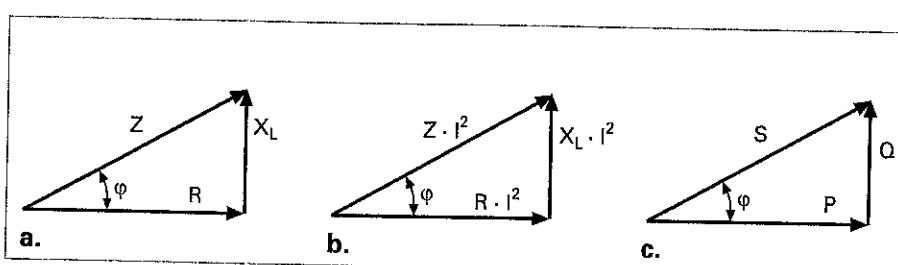


Figura 13.9. Triángulo de potencias.

Del triángulo de potencias se deduce que la potencia aparente también es igual a:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

13.1.4 Factor de potencia (FP)

Este valor nos indica la relación que existe entre la potencia activa y la aparente:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \phi$$

Si observamos el triángulo de potencias (Figura 13.9 c), comprobamos que el factor de potencia coincide con el valor del coseno de ϕ .

De alguna manera el factor de potencia o coseno de ϕ (ángulo de desfase entre V e I) nos indica la cantidad de potencia activa que existe en un circuito respecto a la potencia total aparente.

Ejemplo: 13.2

Se conectan en serie una bobina de reactancia inductiva igual a 20 ohmios con una resistencia de 40 ohmios a una tensión de 100 V. Averiguar la potencia activa, reactiva y aparente del circuito, así como el factor de potencia. Dibujar el triángulo de potencias y valorar el significado del FP obtenido.

Solución: Con la ayuda del triángulo de impedancias (véase Figura 13.10) averiguamos la impedancia del circuito, el $\cos \phi$ y el ángulo ϕ de desfase entre V e I.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 20^2} = 44,7 \Omega$$

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{44,7} = 0,89$$

Le corresponde un ángulo $\phi = 27^\circ$.

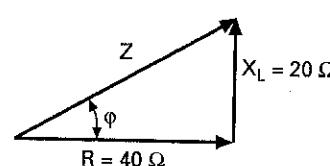


Figura 13.10

Ahora ya podemos calcular la intensidad del circuito:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{100}{44,7} = 2,2 \text{ A}$$

Las diferentes potencias del circuito, son:

$$P = VI \cos \phi = 100 \cdot 2,2 \cdot 0,89 = 196 \text{ W}$$

$$Q = V I \sin \varphi = 100 \cdot 2,2 \cdot \sin 27^\circ = 100 \text{ VAR}$$

$$S = V I = 100 \cdot 2,2 = 220 \text{ VA}$$

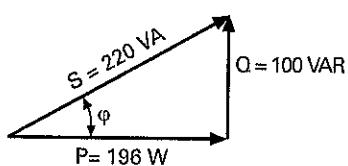


Figura 13.11

En la Figura 13.11 se ha dibujado el triángulo de potencias correspondiente. El factor de potencia resultante es 0,89, valor que está más próximo a la unidad que al cero. Esto nos indica que en el circuito predomina la potencia activa frente a la reactiva. Otra interpretación podría ser la siguiente: de cada 100 unidades de potencia aparente, 89 son de potencia activa.

Ejemplo: 13.3

Las características de una lámpara fluorescente son las siguientes: $P = 40 \text{ W}$, $V = 220 \text{ V}$, $\cos \varphi = 0,6$. Determinar la intensidad, la potencia reactiva y aparente y el circuito equivalente.

Solución: Para el cálculo de la intensidad nos valemos de la fórmula general de potencia activa:

$$P = V I \cos \varphi \Rightarrow I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{40}{220 \cdot 0,6} = 0,3 \text{ A}$$

El ángulo φ que le corresponde al factor de potencia de 0,6 es igual a 53° .

Con estos datos ya podemos calcular la potencia reactiva y aparente de la lámpara.

$$Q = V I \sin \varphi = 220 \cdot 0,3 \cdot \sin 53^\circ = 53 \text{ VAR}$$

$$S = V I = 220 \cdot 0,3 = 66 \text{ VA}$$

El circuito equivalente de una lámpara fluorescente se puede dibujar como una reactancia inductiva y una resistencia en serie (Figura 13.12). Para determinar los valores de R y X_L , utilizamos las fórmulas ya conocidas:

$$P = R I^2 \Rightarrow R = \frac{P}{I^2} = \frac{40}{0,3^2} = 444 \Omega$$

$$Q_L = X_L I^2 \Rightarrow X_L = \frac{Q_L}{I^2} = \frac{53}{0,3^2} = 589 \Omega$$

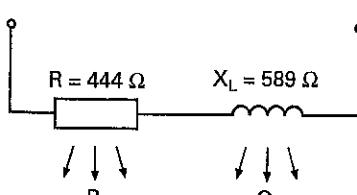


Figura 13.12

13.2 Acoplamiento en serie de resistencias y condensadores

En la Figura 13.13 se ha representado el circuito formado por una resistencia de valor óhmico R conectada en serie con un condensador de reactancia X_C .

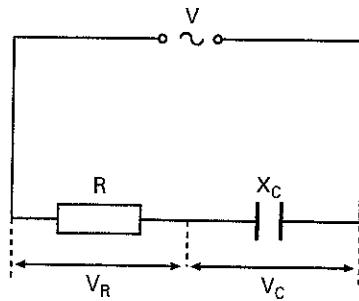


Figura 13.13. Circuito serie R-C.

Al igual que ocurría con el circuito R-L, aquí aparece una sola corriente eléctrica I que queda limitada por la impedancia del circuito Z .

$$I = \frac{V}{Z}$$

En la resistencia aparece una caída de tensión V_R y en el condensador V_C .

$$V_R = R I$$

$$V_C = X_C I$$

Aquí también se cumple que la tensión total aplicada al circuito es igual a la suma vectorial de las caídas de tensión que se dan en la resistencia y el condensador:

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_C$$

Para dibujar el diagrama vectorial (véase Figura 13.14) de estas magnitudes eléctricas tenemos en cuenta que la caída de tensión V_R queda en fase con la intensidad. Por otro lado, el condensador provoca un adelanto de 90° de la corriente respecto de la tensión. Como hemos dibujado a la corriente en el ángulo cero, habrá que situar el vector de la tensión V_C del condensador retrasado respecto a la corriente un ángulo de 90° .

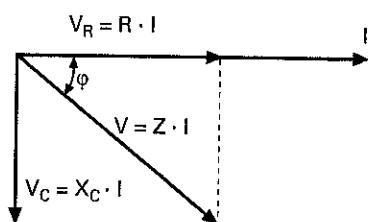


Figura 13.14. Diagrama vectorial de un circuito R-C.

En el diagrama vectorial observamos que la corriente I queda adelantada un ángulo φ respecto a la tensión.

De este diagrama vectorial se deduce el triángulo de impedancia de la Figura 13.15. Con él ya podemos determinar el valor de la impedancia y el del ángulo de desfase por cualquiera de las relaciones trigonométricas.

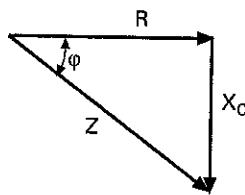


Figura 13.15. Triángulo de impedancias.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

En cuanto a las potencias que se dan en el circuito, indicar que en la resistencia se produce potencia activa que se transforma en calor. Por otro lado, en el condensador aparece una potencia reactiva provocada por las constantes cargas y descargas del mismo. Al dibujar el triángulo de potencias (Figura 13.16) observamos que la potencia reactiva Q_C queda invertida, lo que nos indica que ésta posee un valor negativo respecto a la potencia reactiva que producen las bobinas.

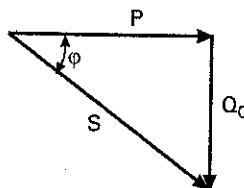


Figura 13.16. Triángulo de potencias.

Ejemplo: 13.4

En el circuito de la Figura 13.17 se muestra un circuito serie R-C. Averiguar la lectura de los aparatos de medida, así como la intensidad de la corriente, potencia activa, potencia aparente y el factor de potencia. Dibujar el diagrama vectorial correspondiente.

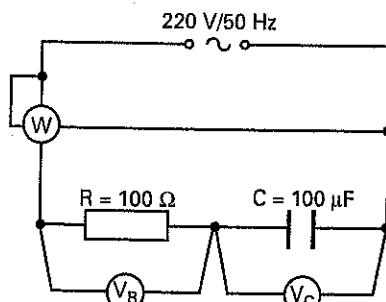


Figura 13.17

$$\text{Solución: } X_C = \frac{1}{2 \pi f C} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100} = 31,8 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{100^2 + 31,8^2} = 105 \Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{105} = 2,1 \text{ A}$$

$$V_R = RI = 100 \cdot 2,1 = 210 \text{ V}$$

$$V_C = X_C I = 31,8 \cdot 2,1 = 67 \text{ V}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{31,8}{100} = 0,32$$

Le corresponde un ángulo $\varphi = 17,7^\circ$.

$$P = V I \cos \varphi = 220 \cdot 2,1 \cdot \cos 17,7^\circ = 440 \text{ W}$$

$$Q = V I \sin \varphi = 220 \cdot 2,1 \cdot \sin 17,7^\circ = 140 \text{ VAR}$$

$$S = V I = 220 \cdot 2,1 = 462 \text{ VA}$$

$$\text{FP} = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{440}{462} = 0,95$$

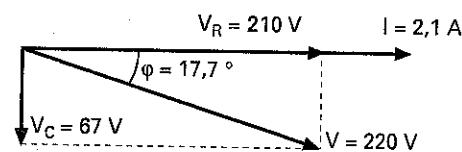


Figura 13.18

El ángulo de desfase es de $17,7^\circ$ de adelanto de la corriente respecto de la tensión, tal como se muestra en diagrama vectorial de la Figura 13.18.

Ejemplo: 13.5

Para evitar que un pequeño soldador para circuitos impresos de 125 V/100 W se funda al conectarlo a una red de C.A. de 220 V/50 Hz, se le conecta en serie un condensador. Determinar las características de dicho condensador.

Solución: Para hacernos una idea de cómo resolver este problema, primero dibujamos el circuito (Figura 13.19). Para ello tenemos en cuenta que el soldador consta de una resistencia R sometida a una tensión de 125 V y que desarrolla una potencia de 100 W.

Con la ayuda del triángulo de tensiones (Figura 13.20) podemos averiguar el factor de potencia y la tensión V_C que aparece en el condensador.

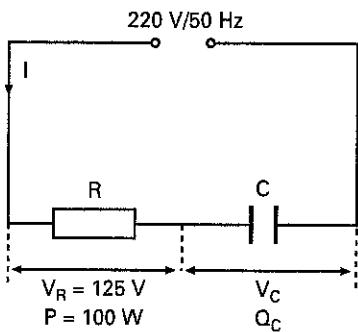


Figura 13.19

$$\cos \varphi = \frac{V_R}{V} = \frac{125}{220} = 0,57$$

$$V_C = \sqrt{V^2 - V_R^2} = \sqrt{220^2 - 125^2} = 181 \text{ V}$$

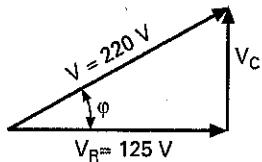


Figura 13.20

Con estos datos ya podemos averiguar la corriente eléctrica:

$$P = V I \cos \varphi \Rightarrow I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{100}{220 \cdot 0,57} = 0,8 \text{ A}$$

Aplicamos la ley de Ohm al condensador para determinar su reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{V_C}{I} = \frac{181}{0,8} = 226 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 226} = 14 \mu\text{F}$$

Las características del condensador son de $14 \mu\text{F}/181 \text{ V}$.

Como el condensador no consume potencia activa, el rendimiento alcanzado por este método para provocar una caída de tensión en un elemento resistivo es infinitamente mayor que si hubiésemos colocado una resistencia en serie con el soldador.

13.3 Circuito serie R-L-C

En la Figura 13.21 hemos conectado en serie una resistencia R , una bobina con una reactancia inductiva X_L y un condensador con una reactancia capacitiva X_C .

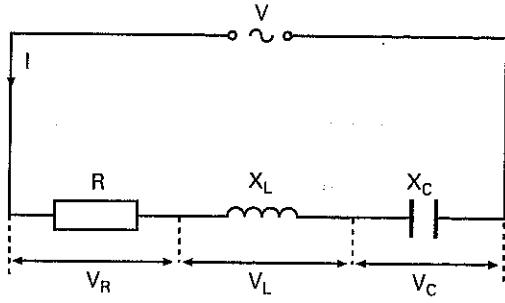


Figura 13.21. Circuito serie R-L-C.

En la Figura 13.22 se ha dibujado el diagrama vectorial correspondiente a este circuito. Al situar en el diagrama las caídas de tensión en la bobina y condensador (V_L y V_C) se observa que éstas quedan en oposición, por lo que la suma vectorial de estas tensiones se convierte en una resta aritmética.

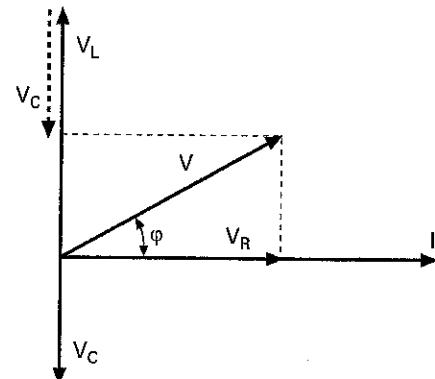


Figura 13.22. Diagrama vectorial de circuito R-L-C.

$$V_R = R I$$

$$V_L = X_L I$$

$$V_C = X_C I$$

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_L + \vec{V}_C$$

De este diagrama se obtiene el triángulo de impedancias de la Figura 13.23, donde se observa que las reactancias de la bobina y condensador quedan también en oposición

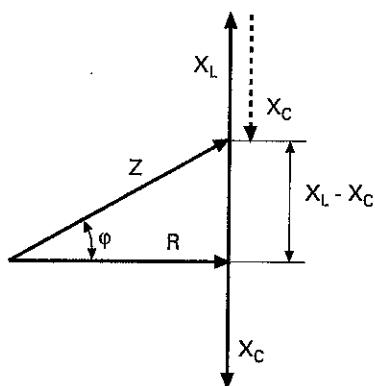


Figura 13.23. Triángulo de impedancias.

Para construir el triángulo de impedancias de la Figura 13.23 se ha supuesto que la reactancia inductiva X_L es más grande que la reactancia X_C del condensador. Al obtener la impedancia Z del circuito observamos que los efectos que pudiera provocar la reactancia del condensador quedan compensados por la reactancia de la bobina. El resultado es que el circuito se comporta como si únicamente tuviese una bobina de reactancia igual a $(X_L - X_C)$. Del triángulo de impedancias se deduce que:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Una vez obtenida la impedancia ya se puede calcular la intensidad de la corriente eléctrica:

$$I = \frac{V}{Z}$$

Al predominar, en este caso, la reactancia inductiva sobre la capacitiva, se produce un ángulo de retraso φ de la corriente respecto de la tensión. Para calcular este ángulo nos valemos del triángulo de impedancias al que aplicamos cualquiera de las funciones trigonométricas conocidas.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Las potencias se pueden calcular por las fórmulas ya conocidas. Aquí es importante observar que cuando la bobina se descarga de potencia reactiva, parte de la misma sirve para la carga del condensador. En el siguiente cuarto de ciclo, el condensador devuelve esta potencia reactiva a la bobina. Si tuviésemos que dibujar el triángulo de potencias, situaríamos la potencia reactiva del condensador Q_C en oposición con la de la bobina Q_L . De tal forma que sus efectos queden compensados, tal como se muestra en la Figura 13.24.

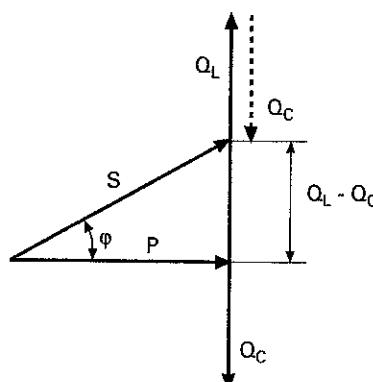


Figura 13.24. Triángulo de potencias.

Ejemplo: 13.6

Averiguar los valores de Z , I , V_R , V_L , V_C , P , Q , S y el factor de potencia del circuito serie R-L-C de la Figura 13.25. Dibujar el diagrama vectorial.

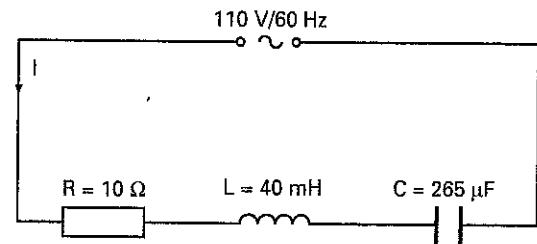


Figura 13.25

Solución:

$$X_L = 2\pi f L = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0,04 = 15 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 265} = 10 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{10^2 + (15 - 10)^2} = 11 \Omega$$

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{110}{11} = 10 A$$

$$V_R = R I = 10 \cdot 10 = 100 V$$

$$V_L = X_L I = 15 \cdot 10 = 150 V$$

$$V_C = X_C I = 10 \cdot 10 = 100 V$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{15 - 10}{10} = 0,5$$

le corresponde un ángulo $\varphi = 26,6^\circ$.

$$P = V I \cos \varphi = 110 \cdot 10 \cdot \cos 26,6^\circ = 984 W$$

$$Q = V I \sin \varphi = 110 \cdot 10 \cdot \sin 26,6^\circ = 493 VAR$$

$$S = V \cdot I = 110 \cdot 10 = 1.100 VA$$

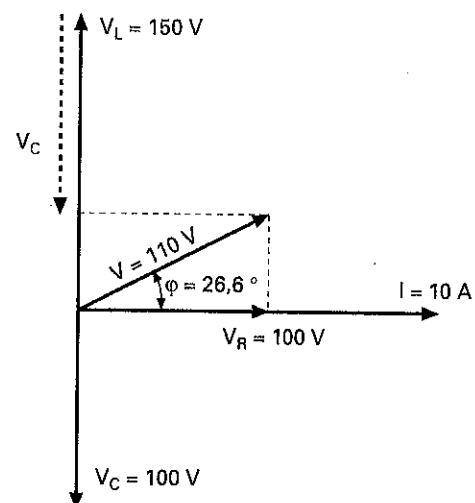


Figura 13.26

En la Figura 13.26 se muestra el diagrama vectorial correspondiente al circuito. Aquí se observa que la corriente queda retrasada un ángulo de $26,6^\circ$ respecto a la tensión, hecho que nos indica que el circuito es predominantemente inductivo.

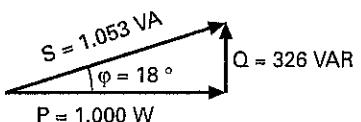


Figura 13.26

13.4 Importancia práctica del $\cos \varphi$

Pongamos como ejemplo un motor monofásico de 1.000 W a 220 V con un $\cos \varphi = 0,6$. Estos datos nos indican que el motor desarrolla una potencia mecánica equivalente a los 1.000 W de potencia activa suministrados por la red eléctrica. Por otro lado, el factor de potencia está bastante por debajo de la unidad, lo que nos muestra la presencia de una potencia reactiva elevada causada por el efecto de la autoinducción de los bobinados. Hay que pensar que la potencia reactiva no se transforma en trabajo útil en el motor, simplemente sirve para generar el campo electromagnético, para luego ser devuelta al generador. Este trasiego de energía reactiva del generador al motor y viceversa, hace que la compañía suministradora de energía eléctrica tenga que proporcionar una potencia aparente por la red eléctrica muy superior a la que realmente se consume. En consecuencia, se produce un aumento de corriente por los conductores de la línea que repercute directamente en los costos de las instalaciones eléctricas propiedad de las compañías.

En nuestro ejemplo (Figura 13.27):

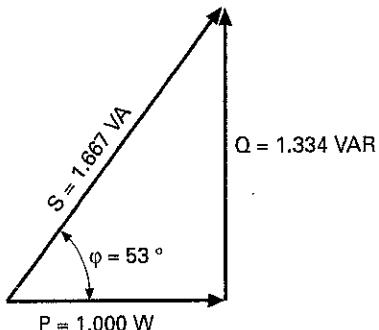


Figura 13.27

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1.000}{0,6} = 1.667 \text{ VA}$$

$$Q = S \cdot \operatorname{sen} \varphi = 1.667 \cdot 0,8 = 1.334 \text{ VAR}$$

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{1.000}{220 \cdot 0,6} = 7,6 \text{ A}$$

De los datos obtenidos se deduce que el motor produce un consumo de 1.000 W, pero necesita de un suministro de 1.667 VA por la línea para funcionar.

Si por algún método consiguiésemos mejorar el factor de potencia hasta, por ejemplo, 0,95 obtendríamos los siguientes valores (Figura 13.28):

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{1.000}{0,95} = 1.053 \text{ VA}$$

$$Q = S \cdot \operatorname{sen} \varphi = 1.053 \cdot 0,31 = 326 \text{ VAR}$$

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{1.000}{220 \cdot 0,95} = 4,8 \text{ A}$$

De lo que se deduce que al acercar el factor de potencia a la unidad obtenemos una reducción de corriente considerable, así como de la potencia aparente y reactiva.

Para contrarrestar el consumo excesivo de potencia reactiva de carácter inductivo y así reducir también la potencia aparente y la corriente por la línea se instalan condensadores conectados en paralelo con los receptores, tal como se muestra en la Figura 13.29.

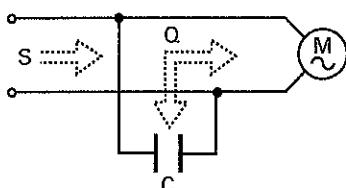


Figura 13.29. Corrección del factor de potencia mediante condensadores.

Los condensadores compensan parte de la potencia reactiva de las bobinas. Hay que pensar que en el instante en que las bobinas descargan su energía reactiva, los condensadores se cargan con la misma. En el siguiente cuarto de ciclo, los condensadores devuelven esta energía acumulada a las bobinas para que puedan desarrollar los campos electromagnéticos. De esta forma se evita que parte de la energía reactiva de las bobinas tenga que fluir constantemente por los conductores de la línea, desde el generador hasta las mismas y viceversa.

Las compañías eléctricas no facturan la energía reactiva, pero exige que los consumidores trabajen con un factor de potencia cercano a la unidad (en torno a $\cos \varphi = 0,9$). Para ello disponen de equipos de medida para determinar el FP medio utilizado durante el período de facturación. Dado que la energía reactiva no se cobra, lo que se hace es aplicar un recargo en el precio de KWh consumido a los clientes que trabajen con un FP por debajo del recomendado.

En resumen, con la mejora del FP se consigue reducir la potencia aparente de la red sin modificar la potencia activa, lo que trae consigo una reducción de la intensidad de corriente por la línea de suministro de energía. Ello aporta considerables ventajas, como son: reducción de la sección de los conductores en la línea, reducción de la caída de tensión, y reducción de las pérdidas de potencia en los conductores.

13.5 Corrección del factor de potencia mediante condensadores

Las instalaciones industriales suelen utilizar normalmente receptores de tipo inductivo, como por ejemplo, motores, lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de mercurio, vapor de sodio, etc), transformadores, electroimanes, etc. Para compensar la energía reactiva producida por estos elementos utilizaremos un condensador (o varios) acoplados en batería, de tal forma que el coseno de φ final obtenido sea próximo a la unidad.

Para el cálculo de la potencia reactiva de estos condensadores o de su capacidad vamos a utilizar el siguiente ejemplo. Se trata de mejorar el factor de potencia de un motor monofásico de 1.000 W/220 V con un factor de potencia de 0,6 hasta conseguir un factor de potencia de 0,95. Para ello conectamos un condensador de potencia reactiva Q_C y capacidad C en paralelo con el motor, tal como se muestra en la Figura 13.29.

La solución de este problema comienza con la búsqueda de la potencia reactiva Q_C , que deberá poseer el condensador para pasar de un factor de potencia de 0,6 a 0,95. Para ello nos vamos a valer del triángulo de potencias que hemos dibujado en la Figura 13.30.

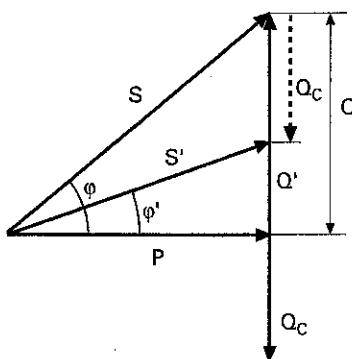


Figura 13.30. Triángulo de potencias en la mejora del factor de potencias.

Llamamos φ al ángulo que corresponde al factor de potencia inicial de 0,6 y φ' al ángulo del factor de potencia que deseamos obtener de 0,95. Q es la potencia reactiva inicial del motor, al que le tenemos que restar la potencia reactiva Q_C del condensador.

Una vez mejorado el factor de potencia obtenemos una potencia reactiva reducida:

$$Q' = Q - Q_C, \text{ de donde } Q_C = Q - Q' \quad (\text{I})$$

En los dos triángulos de potencia que se obtienen se cumple que:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}, \text{ de donde: } Q' = P \operatorname{tg} \varphi' \quad (\text{II})$$

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{Q'}{P} \text{ de donde: } Q' = P \operatorname{tg} \varphi' \quad (\text{III})$$

Sustituyendo las ecuaciones II y III en la ecuación I obtenemos la expresión final:

$$Q_C = P \cdot \operatorname{tg} \varphi - P \cdot \operatorname{tg} \varphi'$$

Calcularemos ahora la potencia reactiva que es necesario que tenga la batería de condensadores para corregir el FP de nuestro ejemplo:

El ángulo φ que le corresponde al $\cos 0,6$ es 53° .

El ángulo φ' que le corresponde al $\cos 0,95$ es 18° .

$$Q_C = P \operatorname{tg} \varphi - P \operatorname{tg} \varphi' =$$

$$1.000 \cdot \operatorname{tg} 53^\circ - 1.000 \cdot \operatorname{tg} 18^\circ = 1.002 \text{ VAR}$$

Para determinar la capacidad del condensador y la corriente eléctrica que lo alimenta, tenemos en cuenta que el condensador está acoplado directamente a la red a una tensión de 220 V y con una potencia reactiva de 1.002 VAR, tal como se muestra en la Figura 13.31. En este caso se cumple que la potencia reactiva del condensador es igual a:

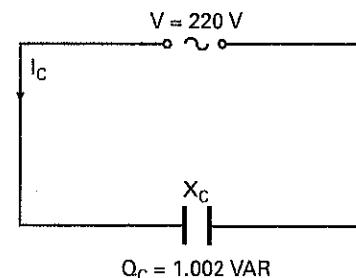


Figura 13.31

$$Q_C = V I_C, \text{ de donde } I_C = \frac{Q_C}{V} = \frac{1.002}{220} = 4,55 \text{ A}$$

Una vez averiguada la corriente que fluye hacia el condensador, si aplicamos la ley de Ohm para C.A. entre sus extremos, podremos averiguar la reactancia capacitiva del mismo:

$$I_C = \frac{V}{X_C} \text{ de donde } X_C = \frac{V}{I_C} = \frac{220}{4,55} = 48,35 \Omega$$

La capacidad correspondiente al condensador para una frecuencia de 50 Hz es igual a:

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 48,35} = 66 \mu F$$

En conclusión, se necesita un condensador de $66 \mu F$ a 220 V con una potencia reactiva de 1 KVAR. En el caso de no ser posible conseguir estas características con un sólo condensador, se recurre al acoplamiento de varios condensadores, dando como resultado una batería de condensadores.

Ejemplo: 13.7

En una instalación industrial se mide un factor de potencia de 0,7. Dimensionar la batería de condensadores para mejorar el factor de potencia hasta 0,9. Los datos de dicha instalación son los siguientes: potencia instalada 15 KW, frecuencia 50 Hz, tensión entre fases 400 V. Calcular también la corriente eléctrica por la línea antes y después de mejorar el factor de potencia.

Solución: Primero determinamos la potencia reactiva de la batería de condensadores para corregir el factor de potencia de 0,7 a 0,9:

El ángulo φ que le corresponde al $\cos 0,7$ es $45,6^\circ$.

El ángulo φ' que le corresponde al $\cos 0,9$ es $25,8^\circ$.

$$Q_C = P \operatorname{tg} \varphi - P \operatorname{tg} \varphi' =$$

$$15.000 \cdot \operatorname{tg} 45,6^\circ - 15.000 \cdot \operatorname{tg} 25,8^\circ = 8.066 \text{ VAR}$$

Como la batería de condensadores está acoplada directamente a la red a una tensión de 400 V y con una potencia reactiva de 8.066 VAR, la corriente por la misma será igual a:

$$I_C = \frac{Q_C}{V} = \frac{8.066}{400} = 20 \text{ A}$$

El conocimiento del valor de esta corriente es importante para dimensionar los conductores que alimentan a la batería de condensadores, así como para seleccionar las protecciones y dispositivos de control.

La reactancia capacitiva del condensador será entonces:

$$X_C = \frac{V}{I_C} = \frac{400}{20} = 20 \Omega$$

La capacidad correspondiente al condensador para una frecuencia de 50 Hz es igual a:

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 20} = 159 \mu F$$

Las características de la batería de condensadores son:

$159 \mu F - 400 \text{ V} - 8 \text{ KVAR}$.

La corriente antes de mejorar el factor de potencia es:

$$I_{\cos \varphi = 0,7} = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{15.000}{400 \cdot 0,7} = 53,6 \text{ A}$$

La corriente después de mejorar el factor de potencia es:

$$I_{\cos \varphi = 0,9} = \frac{P}{V \cos \varphi'} = \frac{15.000}{400 \cdot 0,9} = 41,7 \text{ A}$$

13.5.1 Tipos de compensación de la energía reactiva

La compensación de energía reactiva se lleva siempre a cabo mediante la conexión de condensadores en paralelo con la carga a compensar. En una instalación eléctrica con muchas cargas de carácter inductivo se puede llevar esta compensación de dos formas diferentes:

a) Compensación individual: Se conecta un condensador en paralelo con cada carga inductiva a compensar (Figura 13.32).

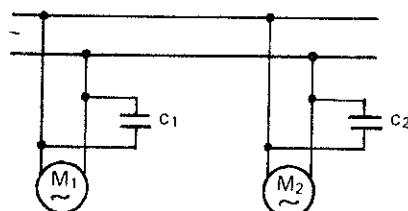


Figura 13.32. Compensación individual de potencia reactiva.

b) Compensación central: Se conecta una gran batería de condensadores en paralelo con la línea general para compensar la potencia reactiva de todo el conjunto de la instalación eléctrica (Figura 13.33). Como la potencia reactiva a compensar de la instalación depende de las cargas que estén conectadas en cada momento, se hace necesario la utilización de baterías automáticas de condensadores que sean capaces de conectar y desconectar escalonadamente grupos de condensadores. Al dispositivo que es capaz de medir en todo momento el FP de la instalación y conecta automáticamente los condensadores necesarios, se le conoce por el nombre de regulador de potencia reactiva.

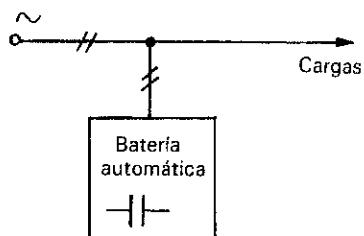


Figura 13.33. Compensación central de potencia reactiva mediante batería automática de condensadores.

La compensación individual resulta muy costosa y se utiliza fundamentalmente para lámparas de descarga (se les incorpora el condensador directamente en el equipo de arranque y

se las conoce como lámparas de AF (alto factor). En instalaciones industriales con muchos receptores resulta mucho más ventajoso la compensación central con baterías automáticas de condensadores.

13.6 Caída de tensión en las líneas eléctricas monofásicas de C.A.

Al igual que ocurría en las líneas bifilares de C.C., en las líneas de C.A. se produce una caída de tensión en los conductores, que habrá que tener en cuenta a la hora de calcular la sección de los mismos. El procedimiento a seguir es muy similar al llevado a cabo para líneas de C.C., aunque difiere en un aspecto: para cargas, por lo general inductivas, aparece un ángulo φ de desfase entre V e I que interviene en el cálculo de la caída de tensión.

En C.C. la caída de tensión se calculaba mediante la expresión:

$\Delta V = R_L I$; para una línea monofásica demostraremos que esta caída de tensión es igual a $\Delta V = R_L I \cos \varphi$.

En el circuito de la Figura 13.34 se cumple que:

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_b + \vec{R}_L I$$

$R_L I$ representa la caída de tensión óhmica en la línea.

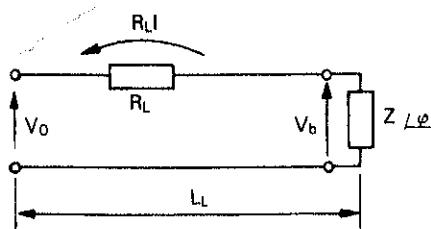


Figura 13.34. Caída de tensión en una línea de C.A.

Dibujamos el diagrama vectorial correspondiente a una carga inductiva, con un desfase de φ° entre V e I (Figura 13.35).

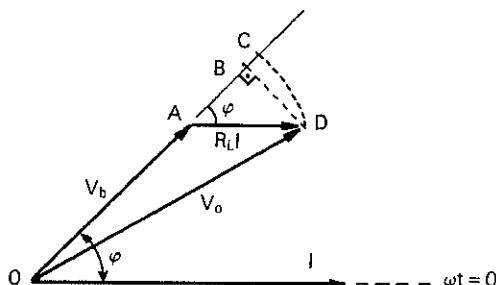


Figura 13.35. Diagrama vectorial para el cálculo de la caída de tensión.

La caída de tensión en la línea es la diferencia, en valores absolutos, entre la tensión V_0 al principio de línea y la del final de la misma V_b :

$$\Delta V = V_0 - V_b = OD - OA = OC - OA$$

Como el tramo BC es muy pequeño, lo podemos despreciar y podemos decir con aproximación que:

$$\Delta V = OC - OA \approx OB - OA = AB$$

como $AB = R_L I \cos \varphi \Rightarrow$

$$\boxed{\Delta V = R_L I \cos \varphi}$$

ΔV = Caída de tensión (V)

R_L = Resistencia de la línea (Ω)

I = Corriente eficaz por línea (A)

$\cos \varphi$ = FP de la carga

Si al igual que hacíamos en C.C. sustituimos la resistencia R_L por la expresión general de resistencia de un conductor y despejamos la sección, obtenemos la siguiente expresión:

$$\boxed{S = \frac{\rho 2 L_L I \cos \varphi}{\Delta V}}$$

ρ = Resistividad del conductor ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

ΔV = Caída de tensión máxima en la línea (V)

L_L = Distancia de la carga al punto de alimentación (m)

I = Intensidad por la línea (A)

S = Sección del conductor de la línea (mm^2)

$\cos \varphi$ = FP de la carga

Ejemplo: 13.8

Se necesita averiguar la sección más recomendable para la instalación de un motor de características: 10 KW; $\cos \varphi = 0,8$; 400 V. La longitud de la línea es de 50 metros y se trata de dos conductores de cobre unipolares aislados con PVC bajo tubo. La caída de tensión máxima admisible es del 1 %.

Solución: Primero calculamos la corriente por la línea:

$$I = \frac{P}{V \cos \varphi} = \frac{10.000}{400 \cdot 0,8} = 31 \text{ A}$$

La caída de tensión máxima admisible en voltios, es:

$$\Delta V = \frac{400}{100} 1\% = 4 \text{ V}$$

La sección de los conductores para que se produzca como máximo esta caída de tensión es:

$$S = \frac{\rho 2 L_L I}{\Delta V} \cos \varphi = \frac{0,017 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 31}{4} \cdot 0,8 = 10,5 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 16 mm². Si consultamos la intensidad máxima admisible para este conductor podremos comprobar que es de 54 A (Tabla 4.2), bastante superior a los 33 A que fluyen por el conductor.

Actividades

1. Realiza el montaje de un circuito serie con bobinas, condensadores y resistencias. Utiliza el polímetro para medir las intensidades y tensiones de las diferentes partes del circuito; y con las relaciones estudiadas en apartados anteriores, averigua la impedancia, ángulo de desfase entre V e I y factor de potencia. Comprueba también las relaciones entre las tensiones del circuito y dibuja los correspondientes diagramas vectoriales. Consigue un osciloscopio y comprueba los ángulos de desfase que se produce en cada uno de los elementos, así como el desfase total entre V e I .

2. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

1) ¿Qué elementos producen potencia reactiva en un circuito de C.A.?

- a) Un horno eléctrico
- b) Un motor
- c) Un contactor

2) La potencia aparente se mide en:

- a) VAR
- b) VA
- c) W

3) ¿Qué nombre se le da a la potencia que realmente se transforma en energía útil en el receptor?

- a) Potencia activa
- b) Potencia aparente
- c) Potencia reactiva

4) ¿Cuál es la razón por la que se eleva el factor de potencia de las instalaciones eléctricas?

- a) Para reducir la potencia que transportan las líneas eléctricas
- b) Para aumentar la potencia aparente y reducir la corriente por la línea
- c) Para reducir la potencia aparente y la corriente por la línea de alimentación

5) Se conectan en serie una resistencia de $50\ \Omega$ y una bobina de 250 mH a una red de C.A. de $220\text{ V}, 50\text{ Hz}$. Averiguar: Z , I , ϕ , V_R , V_L , P , Q , S , FP y dibujar el diagrama vectorial.

6) Se conectan en serie una resistencia de $10\text{ k}\Omega$ y un condensador de 150 nF a una red de C.A. de $100\text{ V}, 60\text{ Hz}$. Averiguar: I , V_R , V_C , P , Q , S , FP y dibujar el diagrama vectorial.

7) Se conectan en serie una resistencia de $10\ \Omega$, un condensador de $100\ \mu\text{F}$ y una bobina de 200 mH a un generador de C.A. de $220\text{ V}, 50\text{ Hz}$. Averiguar: I , V_R , V_C , V_L , P , Q , S , FP y dibujar el diagrama vectorial. ¿Qué tipo de reactancia predomina en el circuito?

8) El motor de un montacargas posee las siguientes características: $P = 2\text{ KW}$; $V = 125\text{ V}$; $I = 22\text{ A}$. Averiguar el factor de potencia.

9) El alumbrado de una nave industrial consiste en 20 lámparas de vapor de mercurio de 500 W cada una con un factor de potencia de $0,6$ a 230 V y 50 Hz . Averiguar las características de la batería de condensadores para conseguir elevar el factor de potencia de la instalación hasta $0,95$, así como la intensidad de corriente de la instalación antes y después de la corrección del factor de potencia.

10) Una lámpara fluorescente de 20 W , 220 V y 50 Hz posee un FP de $0,6$. ¿Qué condensador habrá que conectar a la misma para que trabaje a un FP de $0,9$?

11) Para que una lámpara incandescente de $125\text{ V}/60\text{ W}/50\text{ Hz}$ no se funda al conectarla a una red de 220 V , se conecta en serie con ella un condensador. Averiguar las características del condensador.

12) Se conectan en serie las bobinas de dos contactores a $220\text{ V}, 50\text{ Hz}$ de las siguientes características: bobina nº 1 ($R = 20\ \Omega$; $0,8\text{ H}$); bobina nº2 ($28\ \Omega$; $0,6\text{ H}$). Calcular la corriente que fluye por las mismas, la tensión aplicada a cada bobina, el factor de potencia del conjunto, las potencias del conjunto y la capacidad del condensador que habrá que conectar en paralelo para conseguir corregir el FP del conjunto a $0,95$.

13) Calcular la sección con la que habrá que instalar los conductores de la línea que conecta el contador de energía, situado en el cuarto de contadores, con el cuadro general de mando y protección, instalado en el interior de una vivienda. Para ello tendremos en cuen-

ta los siguientes datos: vivienda situada en el quinto piso de un edificio; la longitud aproximada de la línea es de 25 m, los conductores son de cobre, unipolares, aislados con PVC e instalados bajo conducto; la demanda de potencia máxima que se prevé es de 5.750 W a 230 V y con un $\cos \varphi = 0,8$; la caída de tensión máxima que se admite es del 1 %.

- 14) Calcular la sección de una línea monofásica de 250 m que transmite la potencia de 5 KW a 230 V con un FP de 0,85. La caída de tensión máxima de tensión que se admite es del 5%. La línea es de dos conductores de cobre unipolares instalados bajo tubo. Calcular también la densidad de corriente.

Resolución de Circuitos Paralelos y Mixtos C.A.

Introducción

La característica fundamental en los sistemas donde conectamos los receptores en paralelo es que éstos quedan sometidos a la misma tensión. Esta forma de conexión es la que se utiliza cuando se conectan varios receptores a una línea eléctrica en una instalación eléctrica.

Para el cálculo de circuitos mixtos utilizaremos el cálculo vectorial con números complejos, que, como ya veremos más adelante, consiste en tratar las impedancias, tensiones y corrientes como vectores representados por un número complejo. Por lo demás, la resolución de estos circuitos es similar a los ya estudiados en C.C.

Contenido

- *Instalaciones monofásicos de varios receptores.*
- *Resolución de circuitos de C.A. mediante el cálculo vectorial con números complejos.*
- *Operaciones con números complejos.*
- *Circuitos oscilantes.*
- *Resonancia.*

Objetivos

- *Resolver problemas prácticos de instalaciones eléctricas con redes monofásicas de C.A.: cálculo de protecciones, sección de conductores, etc.*
- *Calcular las magnitudes eléctricas en circuitos paralelos y mixtos de C.A.*
- *Interpretar los procesos que se dan en un circuito resonante.*

14.1 Acoplamiento de receptores en paralelo en C.A.

La característica fundamental en los sistemas donde conectamos los receptores en paralelo es que éstos quedan sometidos a la misma tensión. En la Figura 14.1 se muestra un circuito donde se ha conectado una rama R-C en paralelo con una rama R-L.

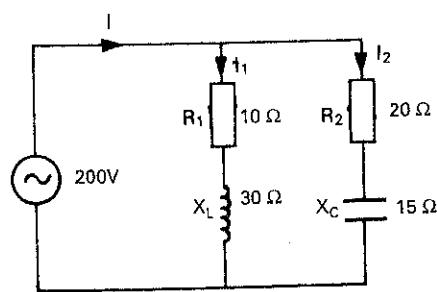


Figura 14.1. Acoplamiento de receptores en paralelo en C.A.

Para resolver este circuito, en el diagrama vectorial (Figura 14.2), se toma como referencia la tensión V en común con las dos ramas y se calculan por separado las intensidades I_1 e I_2 de cada circuito derivado. La intensidad total I que debe suministrar el generador al circuito se obtiene de la suma vectorial de ambas intensidades:

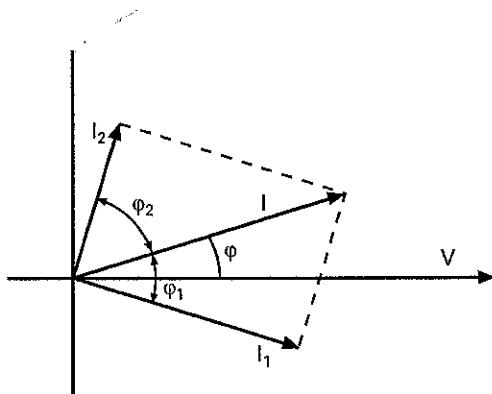


Figura 14.2. Diagrama vectorial.

$$I_1 = \frac{V}{Z_1} \quad I_2 = \frac{V}{Z_2} \quad \vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2$$

La resolución de este tipo de circuitos se complica todavía mucho más cuando se interconectan receptores en forma mixta. Por esta razón vamos a utilizar los números complejos para resolver estos ejercicios. Los números complejos, que estudiaremos en siguientes apartados, se comportan como vectores. Las operaciones básicas de suma, multiplicación y división de estos números simplifica enormemente los cálculos de este tipo de circuitos.

Seguidamente estudiaremos un caso particular y de carácter práctico de receptores acoplados en paralelo, en el que la resolución vendrá dada por el método de la suma de potencias.

14.2 Instalaciones monofásicas de varios receptores

En este caso se trata de calcular la potencia total instalada, el factor de potencia y la intensidad total de una instalación monofásica en la se conectan varias cargas de potencia activa y FP conocidos, como por ejemplo en la instalación de la Figura 14.3.

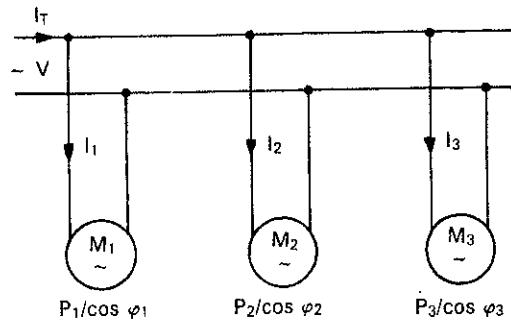


Figura 14.3. Instalaciones monofásicas de varios receptores.

Para resolver estos circuitos basta con averiguar la potencia activa y reactiva de cada uno de los receptores. Seguidamente, se dibuja el triángulo de potencias de cada una de las cargas y se procede a la suma vectorial de las potencias, tal como se muestra en la Figura 14.4.

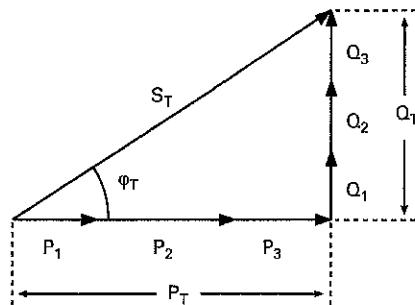


Figura 14.4. Suma vectorial de potencias.

De esta suma se obtiene el triángulo de potencias correspondiente a la potencia total, donde se cumple que:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

(si hubiese una carga de carácter capacitivo su potencia reactiva se restaría a las de carácter inductivo)

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$$

$$\cos \phi_T = \frac{P_T}{S_T}$$

Ejemplo: 14.1

La instalación eléctrica de una nave industrial consta de los siguientes receptores, conectados a una línea monofásica

de 400 V, 50 Hz: (1) motor monofásico de 10 KW, $\cos \varphi = 0,7$; (2) 30 lámparas incandescentes de 60 W cada una; (3) 50 lámparas de vapor de mercurio de 200 W, $\cos \varphi = 0,6$ cada una (Figura 14.5).

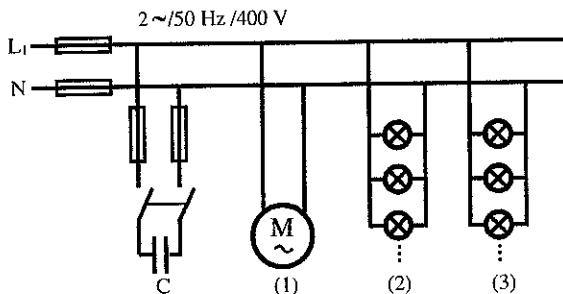


Figura 14.5

Averiguar: a) potencia total de la instalación y FP; b) calibre de los fusibles generales de la línea; c) sección de los conductores, teniendo en cuenta que la línea consta de dos conductores unipolares de PVC instalados bajo tubo; d) características de la batería de condensadores para corregir el FP hasta 0,95; e) calibre de los fusibles de la batería de condensadores; f) porcentaje de reducción de la intensidad de corriente por la línea principal al conectar la batería de condensadores.

Solución:

(1) Determinamos primero la potencia reactiva del motor:

Según el triángulo de potencias (Figura 14.6):

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = 10.000 \cdot \operatorname{tg} 45,57^\circ = 10.202 \text{ VAR}$$

$$\varphi_1 = \arccos 0,7 = 45,57^\circ$$

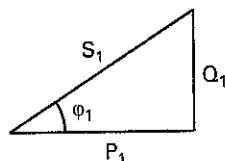


Figura 14.6

(2) Hacemos lo mismo para las lámparas incandescentes:

$$P_2 = 30 \cdot 60 \text{ W} = 1.800 \text{ W}$$

$Q_2 = 0$ VAR (las lámparas incandescentes poseen una carga resistiva pura y no producen potencia reactiva)

(3) La lámparas de vapor de mercurio poseen una reactancia para el arranque y sí producen potencia reactiva.

$$P_3 = 50 \cdot 200 \text{ W} = 10.000 \text{ W}$$

$$Q_3 = P_3 \operatorname{tg} \varphi_3 = 10.000 \cdot \operatorname{tg} 53,13^\circ = 13.333 \text{ VAR}$$

$$\varphi_3 = \arccos 0,6 = 53,13^\circ$$

Ahora sumamos las potencias:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 = 10.000 + 1.800 + 10.000 = 21.800 \text{ W}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 10.202 + 0 + 13.333 = 23.535 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{21.800^2 + 23.535^2} = 32.080 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{21.800}{32.080} = 0,68$$

$$I_T = \frac{P_T}{V \cdot \cos \varphi_T} = \frac{21.800}{400 \cdot 0,68} = 80 \text{ A}$$

a) Potencia instalada: 32,08 KVA; FP = 0,68.

b) Calibre de los fusibles: 100 A o más.

c) Sección de los conductores de la línea general: 35 mm² (para este cálculo sólo se ha tenido en cuenta la $I_{\max, adm}$, que según recomendaciones del REBT es de 86 A para dos conductores de 35 mm² instalados bajo tubo).

d) Calculamos ahora la batería de condensadores:

$$Q_C = P_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi_T') = 21.800 \cdot (\operatorname{tg} 47,16^\circ - \operatorname{tg} 18,19^\circ) = 16.346 \text{ VAR.}$$

$$\varphi_T = \arccos 0,68 = 47,16^\circ$$

$$\varphi_T' = \arccos 0,95 = 18,19^\circ$$

$$Q_C = V_C I_C \Rightarrow I_C = \dots = \dots = 41 \text{ A}$$

$$I_C = \frac{V_C}{X_C} \Rightarrow X_C = \dots = \dots = 9,76 \Omega$$

$$C = \dots = \dots = 326 \mu\text{F}$$

Batería de condensadores: (16,3 KVAR, 326 μF, 400 V) (consultando en un catálogo de baterías automáticas podríamos elegir una con tres escalones de: 2,5 KVAR; 5 KVAR; 10 KVAR).

e) Calibre de los fusibles de los condensadores:

$$1,6 \cdot 41 = 65,6 \text{ A} \Rightarrow (80 \text{ A})$$

*Nota: Los elementos de protección para condensadores deben dimensionarse como mínimo 1,6 veces la intensidad nominal de los mismos; de esta forma evitaremos la fusión intempestiva de los fusibles en la conexión (al conectar la batería de condensadores a la red, aparece una corriente de carga muy brusca que puede fundir los fusibles).

f) Intensidad con la batería de condensadores conectada:

$$P_T = V I_T \cos \varphi_T \Rightarrow I_T = \dots = \dots = 57 \text{ A}$$

Porcentaje de reducción de la corriente:

$$\frac{80 - 57}{80} \cdot 100 = 28,8\%$$

14.3 Resolución de circuitos de C.A. mediante el cálculo vectorial con números complejos.

Mediante la utilización de los números complejos podemos resolver, sin dificultad, circuitos en los que aparecen combinaciones de circuitos en serie y paralelo, como por ejemplo, el circuito de la Figura 14.7.

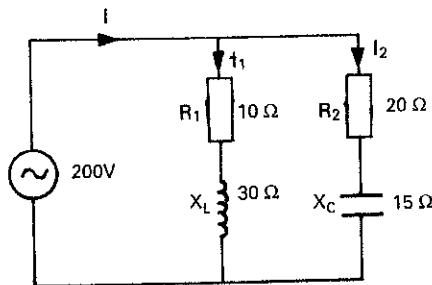


Figura 14.7

Un número complejo puede representar un vector en un sistema cartesiano. Como todas las magnitudes en C.A. se pueden trazar como vectores, si aprendemos a operar con los números complejos, podremos resolver los circuitos de C.A. aplicando los mismos métodos que para C.C.; en vez de utilizar números reales en las operaciones utilizaremos números complejos.

Los números complejos, como por ejemplo $a + jb$, constan de una parte real (a), y una parte imaginaria (b) (Figura 14.8).

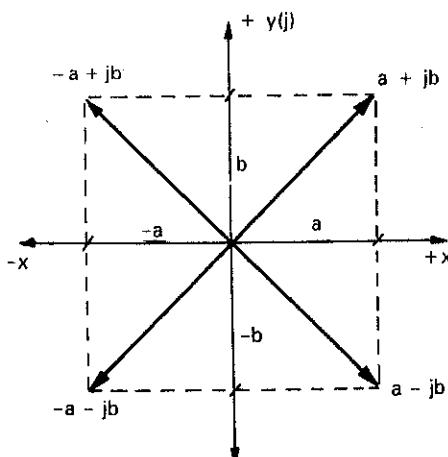


Figura 14.8. Representación vectorial de un número complejo.

Los números reales positivos se representan sobre la derecha del eje (x), y los negativos a la izquierda de este mismo eje.

Los números imaginarios positivos se representan sobre la parte superior del eje (y), y los negativos en su parte inferior.

Los números imaginarios representan a la raíz cuadrada de los números negativos: $j = \sqrt{-1}$

De esta forma tenemos que: $j \cdot j = -1$

14.3.1 Representación de un número complejo

Sea, por ejemplo, el circuito serie R-L de la Figura 14.9, del cual se quiere determinar su impedancia en forma compleja.

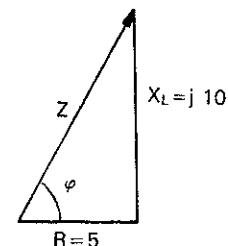
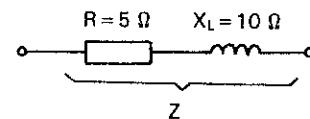


Figura 14.9

Su representación en forma algebraica sería:

$$Z = a + jb = 5 + j10; \quad R = \text{es la parte real} = 5$$

$$X_L = \text{es la parte positiva imaginaria} = j10$$

Su representación módulo argumental o polar sería:

$$Z = m\angle\varphi, \text{ donde } m \text{ es el módulo y } \varphi \text{ el ángulo o argumento (Figura 14.10).}$$

$$m = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\varphi = \arctan \frac{b}{a}$$

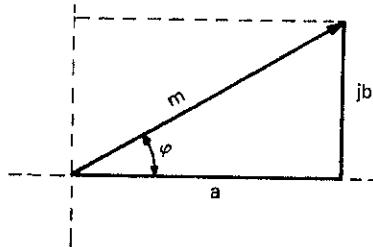


Figura 14.10

En nuestro ejemplo, la impedancia Z sería:

$$m = \sqrt{5^2 + 10^2} = 11,18\Omega$$

$$\varphi = \arctan \frac{10}{5} = 63,4^\circ$$

$$Z = 11,18\angle63,4^\circ$$

Ejemplo: 14.2

Representar en forma algebraica y en forma módulo argumental la impedancia del circuito R-C de la Figura 14.11.

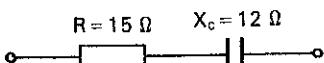


Figura 14.11

Solución: Primero dibujamos el triángulo de impedancias (Figura 14.12).

$$Z = 15 - j12$$

$R =$ es la parte real = 15

$X_C =$ es la parte imaginaria negativa = $-j12$

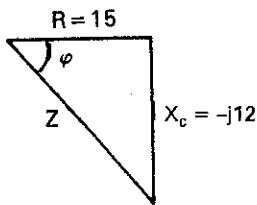


Figura 14.12

La representación en forma polar quedaría:

$$m = \sqrt{15^2 + 12^2} = 19,2\Omega \quad \varphi = \arctg \frac{-12}{15} = -38,7^\circ$$

$$Z = 19,2 \angle -38,7^\circ$$

Para transformar un número complejo de forma polar a forma algebraica operaremos de la siguiente forma:

$$Z = m\angle = m(\cos \varphi + j \sin \varphi) = a + jb$$

14.3.2 Operaciones con números complejos

Antes de pasar a la resolución de circuitos eléctricos, nos será muy útil repasar las operaciones básicas con números complejos.

Suma: De la suma de dos números complejos se obtiene otro número complejo, que tiene por parte real la suma de las partes reales y, por parte imaginaria la suma de las partes imaginarias. Por ejemplo:

$$(5 + j10) + (15 - j12) = (5 + 15) + j(10 - 12) = 20 - j2$$

La forma algebraica es la única forma práctica de sumar y restar.

Producto: Para la forma algebraica, el resultado es otro número complejo que se obtiene utilizando las reglas habituales del álgebra junto con las reglas correspondientes de los números imaginarios. Por ejemplo:

$$(4 + j5) \cdot (3 + j2) = 4 \cdot 3 + 4 \cdot j2 + j5 \cdot 3 + j5 \cdot j2 = 12 + j8 + j15 - 10 = 2 + j23$$

Para la forma polar, el resultado es otro número complejo, cuyo módulo se obtiene multiplicando los módulos y el ángulo mediante la suma de los ángulos. Por ejemplo:

$$4 \angle 30^\circ \cdot 5 \angle 25^\circ = 4 \cdot 5 \angle (30 + 25)^\circ = 20 \angle 55^\circ$$

Cociente: Para la forma algebraica, el resultado se obtiene multiplicando el numerador y el denominador por el conjugado del denominador, de esta forma se consigue transformar este último en un número real, para posteriormente llevar a cabo el cociente de la manera algebraica habitual.

*Nota: el conjugado de un número complejo se consigue invirtiendo el signo de la parte imaginaria. Así, por ejemplo, el conjugado de $7 + j9$ será $7 - j9$.

Al multiplicar un número complejo por su conjugado, se obtiene un número real, y su valor es la suma de los cuadrados de la parte real e imaginaria. Por ejemplo:

$$(7 + j9) \cdot (7 - j9) = 7^2 - j63 + j63 + 9^2 = 7^2 + 9^2 = 130$$

Veamos un ejemplo de cociente:

$$\begin{aligned} \frac{4 + j5}{2 + j3} &= \frac{(2 - j3) \cdot (4 + j5)}{(2 - j3) \cdot (2 + j3)} \\ &= \frac{23 - j2}{2^2 + 3^2} = \frac{23 - j2}{13} = 1,77 - j0,15 \end{aligned}$$

Para la forma polar, el resultado es otro número complejo, cuyo módulo se obtiene del cociente de los módulos y el ángulo mediante la resta de los ángulos. Por ejemplo:

$$20 \angle 80^\circ : 5 \angle 60^\circ = \frac{20}{5} \angle (80 - 60)^\circ = 4 \angle 20^\circ$$

14.3.3 Aplicación de los números complejos a la resolución de circuitos

Como ya hemos visto en los ejemplos utilizados, la impedancia Z de un circuito se escribe como un número complejo, que tiene por parte real el valor óhmico de la resistencia R , y por parte imaginaria el valor de la reactancia X , siendo ésta positiva para las inductivas puras y negativa para las capacitivas (Figura 14.13).

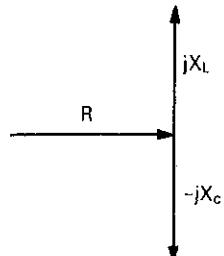


Figura 14.13. Valor complejo de las impedancias de un circuito.

Como la impedancia es una cantidad compleja, se puede expresar en forma algebraica y en forma polar:

$$Z = R + jX = \sqrt{R^2 + X^2} \angle \arctg X/R$$

Los acoplamientos en serie y paralelo en C.A. se resuelven utilizando los mismos procedimientos que para C.C., teniendo en cuenta que en todas las operaciones utilizaremos números complejos.

Impedancias en serie (Figura 14.14):

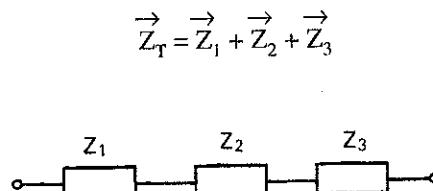


Figura 14.14

Impedancias en paralelo (Figura 14.15)

$$\frac{1}{\vec{Z}_T} = \frac{1}{\vec{Z}_1} + \frac{1}{\vec{Z}_2} + \frac{1}{\vec{Z}_3}$$

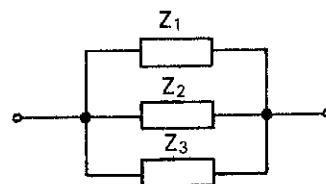


Figura 14.15

Ejemplo: 14.3

Del circuito serie R-L-C de la Figura 14.16, averiguar la impedancia, intensidad, ángulo de desfase y potencias.

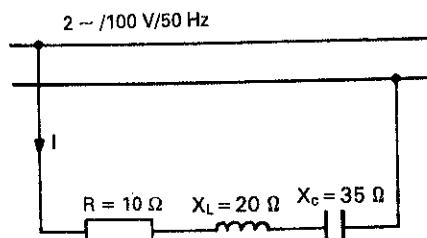


Figura 14.16

Solución: La impedancia equivalente o total en forma algebraica será:

$$Z = 10 + j20 - j35 = 10 - j15$$

(esta expresión nos indica que la impedancia equivalente consta de una resistencia de 10Ω en serie con un condensador de 15Ω de reactancia capacitativa)

Pasamos la impedancia a forma polar:

$$Z = \sqrt{10^2 + 15^2} \angle \arctg 15/10 = 18 \angle -56,3^\circ$$

(Esta expresión indica que el valor modular de la impedancia es de 18Ω y que el ángulo φ es de $-56,3^\circ$).

La corriente la determinamos mediante la ley de Ohm:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{100 \angle 0^\circ}{18 \angle -56,3^\circ} = 5,6 \angle 56,3^\circ$$

(Esta expresión indica que el valor modular de la corriente es de $5,6 \text{ A}$ y que la corriente va adelantada un ángulo φ de $56,3^\circ$ respecto de la tensión aplicada, como corresponde a un circuito capacitivo.)

Calculamos ahora la potencia del sistema aplicando las expresiones habituales:

$$P = V I \cos \varphi = 100 \cdot 5,6 \cdot \cos 56,3 = 311 \text{ W}$$

$$Q = V I \sin \varphi = 100 \cdot 5,6 \cdot \sin 56,3 = 466 \text{ VAR}$$

$$S = V I = 100 \cdot 5,6 = 560 \text{ VA}$$

Para dibujar el diagrama vectorial bastará con representar en el sistema cartesiano los vectores V e I en su forma polar (Figura 14.17).

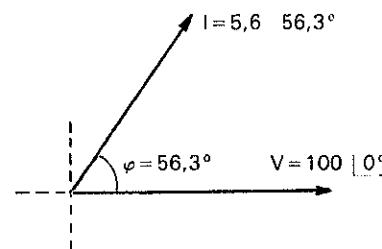


Figura 14.17

Ejemplo: 14.4

Resolvamos ahora el circuito de la Figura 14.7, planteando al principio de este apartado:

Averiguar: L_T , I_T , I_1 , I_2 , P_T , Q_T , S_T , $\cos \varphi_T$ y la lectura de un voltímetro conectado en paralelo con la reactancia X_C .

Solución: Calculamos primero la impedancia equivalente del circuito. A la impedancia resultante de cada una de las ramas las llamaremos:

$$Z_1 = R_1 + X_L = 10 + j30$$

$$Z_2 = R_2 + X_C = 20 - j15$$

Estas impedancias están, a su vez, conectadas en paralelo. Como son sólo dos cargas podemos aplicar la expresión:

$$Z_T = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(10 + j30) \cdot (20 - j15)}{10 + j30 + 20 - j15} =$$

$$= \frac{650 + j450}{30 + j15} = \frac{(30 - j15) \cdot (650 + j450)}{30^2 + 15^2} = 23,3 + j3,33$$

¿De qué carácter es la impedancia, inductiva o capacitiva?

Aplicando la ley de Ohm calculamos ahora las intensidades del circuito:

$$I_T = \frac{V}{Z_T} = \frac{200}{23,3 + j3,33} = \dots = 8,4 - j1,2 = 8,5 \angle -8,1^\circ$$

(La intensidad total es de 8,5 A y está retrasada un ángulo $\varphi = 8,1^\circ$ respecto a la tensión, como corresponde a los circuitos inductivos).

$$I_1 = \frac{V}{Z_1} = \frac{200}{10 + j30} = \dots = 2 - j6 = 6,3 \angle -71,6^\circ$$

$$I_2 = \frac{V}{Z_2} = \frac{200}{20 - j15} = \dots = 6,4 + j4,8 = 8 \angle 36,9^\circ$$

Comprueba si se cumple la primera ley de Kirchhoff:

$$I_T = I_1 + I_2 = \dots$$

La lectura del voltímetro se calcula aplicando la ley de Ohm entre los extremos de la carga donde está conectado:

$$V = X_C I_2 = 15 \angle -90^\circ \cdot 8 \angle 36,9^\circ = 120 \angle -53,1^\circ$$

(La lectura del voltímetro será de 120 V y su ángulo de desfase respecto a la tensión principal de $-53,1^\circ$).

Habrá podido comprobar que, para operar los números complejos, unas veces utilizamos la forma algebraica y otras la polar. Cualquiera de estas dos formas es válida para resolver los problemas que se nos planteen, teniendo en cuenta que:

- Para operaciones de suma sólo se puede utilizar la forma algebraica compleja.
- Para presentar los resultados en amperios, ohmios y voltios, con sus correspondientes ángulos de desfases, es más conveniente la forma polar.

Calculemos ahora las potencias del circuito:

$$P = V I \cos \varphi = 200 \cdot 8,5 \cdot \cos 8,1^\circ = 1.683 \text{ W}$$

$$Q = V I \sin \varphi = 200 \cdot 8,5 \cdot \sin 8,1^\circ = 240 \text{ VAR}$$

$$S = V I = 200 \cdot 8,5 = 1.700 \text{ VA}$$

$$\text{FP} = \cos \varphi = 0,99$$

Por último situamos cada una de las magnitudes en el diagrama vectorial, fijándonos para ello en la forma polar de las mismas (Figura 14.18).

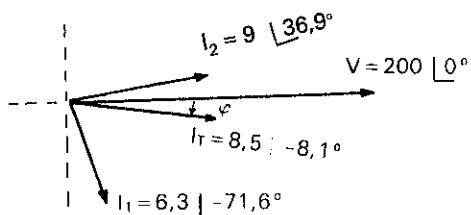


Figura 14.18

Ejemplo: 14.5

Averiguar la impedancia equivalente y las corrientes I_T , I_1 e I_2 que aparecerán en el circuito mixto de la Figura 14.19. Determinar, también, las potencias y el FP del conjunto.

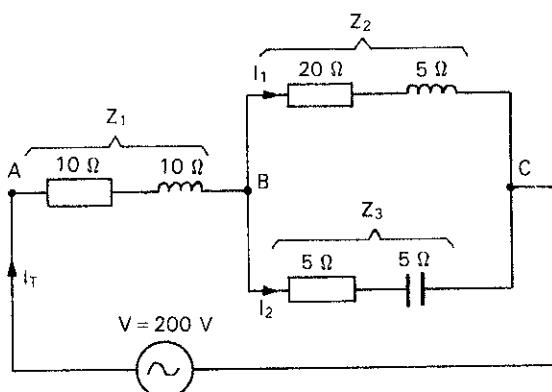


Figura 14.19

Solución:

Primero determinamos la impedancia equivalente de las ramas que están en paralelo entre los extremos (B-C) (Figura 14.20).

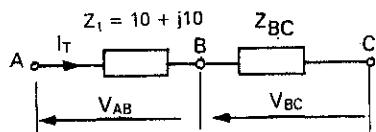


Figura 14.20

$$Z_{BC} = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{(20 + j5) \cdot (5 - j5)}{20 + j5 + 5 - j5} = \dots = 5 - j3$$

$$Z_T = Z_1 + Z_{BC} = 10 + j10 + 5 - j3 = 15 + j7$$

$$I_T = \frac{V}{Z_T} = \frac{200}{15 + j7} = \dots = 10,9 - j5,1 = 12 \angle -25^\circ$$

Para poder calcular las intensidades I_1 e I_2 , necesitaremos conocer primero la tensión V_{BC} , que está aplicada a cada una de las cargas Z_2 y Z_3 .

$$V_{BC} = Z_{BC} I_T = (5 - j3) \cdot (10,9 - j5,1) = 39,2 - j58,2$$

$$I_1 = \frac{V_{BC}}{Z_2} = \frac{39,2 - j58,2}{20 + j5} = \dots = 1,2 - j3,2 = 3,4 \angle -69,2^\circ$$

$$I_2 = \frac{V_{BC}}{Z_3} = \frac{39,2 - j58,2}{5 - j5} = \dots = 9,7 - j1,9 = 9,9 \angle -11,1^\circ$$

Dibuja tú mismo el diagrama vectorial con todas las magnitudes que se han calculado.

Para calcular las potencias tendremos en cuenta el ángulo φ de desfase entre V e I_T , que en nuestro caso es de -25° . Esto nos indica que la carga del circuito es inductiva.

$$P = V I \cos \varphi = \dots = 2.175 \text{ W}$$

$$Q = V I \sin \varphi = \dots = 1.014 \text{ VAR}$$

$$S = V I = \dots = 2.400 \text{ VA}$$

$$FP = \cos 25^\circ = 0,9$$

Ejemplo: 14.6

Averiguar la potencia compleja del Ejemplo 14.5.

Solución:

$$S_T = V I_T^* = 200 \cdot (10,9 + j5,1) = 2.180 + j1.020$$

Expresión de la potencia que nos indica que (Figura 14.21):

$$P_T = 2.180 \text{ W} \quad Q_T = 1.020 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{2.180^2 + 1.020^2} = 2.406 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{2.180}{2.406} = 0,9$$

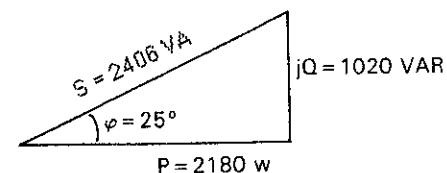


Figura 14.22

¿Cuál será la potencia compleja en la carga Z_2 de este mismo circuito?

Dado que esta carga es recorrida por la corriente I_1 y esta sometida a la tensión V_{BC} , su potencia compleja es:

$$S_2 = V_{BC} I_1^* = (39,2 - j58,2)(1,2 + j3,2) = 233,3 + j55,6$$

$$P_2 = 233,3 \text{ W} \quad Q_2 = 55,6 \text{ VAR}$$

$$S_2 = \sqrt{233,3^2 + 55,6^2} = 603 \text{ VA}, \quad \cos \varphi_2 = \frac{233,3}{603} = 0,39$$

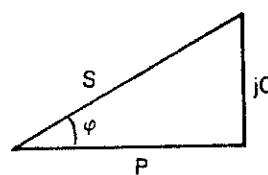


Figura 14.21. Triángulo de potencias en forma compleja.

El triángulo de potencias nos indica que la potencia aparente compleja se expresa de la siguiente forma:

$$S = P + jQ$$

– P es la parte real de S

– Q es la parte imaginaria de S

Para obtener la potencia se aplica la siguiente expresión:

$$\vec{S} = \vec{V} \cdot \vec{I}^*$$

Donde I^* es el conjugado de I.

14.4 Circuitos oscilantes

Un circuito oscilante se forma cuando se interconectan bobinas y condensadores, de tal forma que se intercambien entre ellos energía eléctrica.

Si cargamos un condensador, tal como se indica en el esquema de la Figura 14.23 y posteriormente lo conectamos en paralelo con una bobina que posea la misma reactancia inductiva que la capacitiva del condensador ($X_L = X_C$), al conectar un osciloscopio podremos observar que aparecen oscilaciones que se amortiguan al poco tiempo, tal como se muestra en la Figura 14.24.

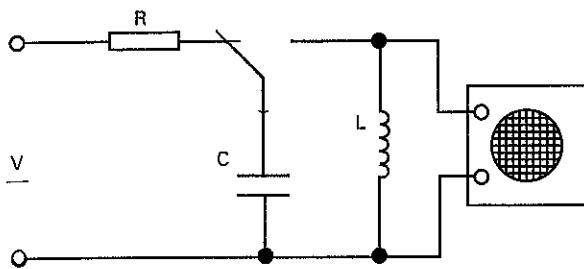


Figura 14.23. Comprobación experimental de un circuito oscilante.

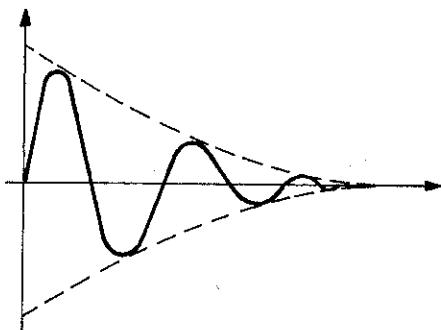


Figura 14.24. Oscilación amortiguada.

Este fenómeno se debe a que aparecen sucesivos ciclos de carga y descarga entre la bobina y el condensador. Estos ciclos repetidos de carga y descarga se van amortiguando por la presencia de la resistencia óhmica del circuito (conductores, bobina, etc), que hace que la energía se vaya transformando en calor en cada uno de los ciclos.

14.4.1 Resonancia

El intercambio constante de energía entre una bobina y un condensador en un circuito oscilante se produce a una determinada frecuencia, conocida por el nombre de frecuencia de resonancia.

Se alcanza la resonancia cuando el valor de la reactancia inductiva es igual al de la reactancia capacitativa:

$$X_L = X_C$$

O lo que es lo mismo:

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}, \text{ de donde:}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f_r = Frecuencia de resonancia (Hz)

L = Inductancia (H)

C = Capacidad (F)

Para evitar que las oscilaciones no desaparezcan es necesario alimentar al circuito con una tensión alterna que posea la misma frecuencia que el circuito resonante.

Existen dos posibilidades de conseguir un circuito resonante: en serie o paralelo.

14.4.2 Resonancia en serie

Para conseguir que un circuito como el de la Figura 14.25, se ponga en resonancia, se debe cumplir que la reactancia de la bobina sea igual a la del condensador.

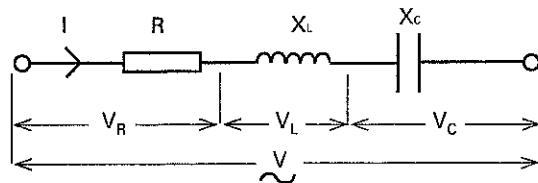


Figura 14.25. Circuito resonante en serie.

Cuando un circuito en serie entra en resonancia la corriente se hace muy elevada, ya que al anularse las reactancias el único elemento que limita la corriente es la resistencia del circuito. Además se cumple que las caídas de tensión en la bobina y el condensador son iguales.

Ejemplo: 14.7

El circuito serie de la Figura 14.25 está formado por una resistencia de $5\ \Omega$, una bobina de $0,5\ H$ y un condensador de $25\ \mu F$. Averiguar cuál será la frecuencia de la tensión que habrá que aplicar para que el circuito entre en resonancia. Si el valor de la tensión aplicada es de $50\ V$, calcular el valor de la corriente y de las caídas de tensión en la bobina y el condensador para la frecuencia de resonancia.

Solución: La frecuencia de resonancia la calculamos con la expresión ya conocida:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{0,5 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}} = 45\ Hz$$

Dado que las reactancias se anulan, el único valor que limita la corriente es la resistencia:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R} = \frac{50}{5} = 10\ A$$

Al ser iguales la reactancia inductiva y la capacitiva, las caídas de tensión también lo son:

$$V_C = V_L = X_L I = 2\pi f L I = 2 \cdot \pi \cdot 45 \cdot 0,5 \cdot 10 = 1.414\ V$$

El circuito oscilante en serie posee varias aplicaciones prácticas. Por ejemplo, se puede usar para eliminar una determinada frecuencia (la frecuencia de resonancia) en una señal que este compuesta por multitud de frecuencias. Para ello lo que se hace es poner un circuito oscilante en paralelo con la señal, de tal forma que cortocircuite aquella señal que posea la frecuencia de resonancia.

14.4.3 Resonancia en paralelo

Para conseguir que un circuito, como el de la Figura 14.26, oscile en paralelo, se ha de conseguir que las reactancias del condensador y de la bobina sean iguales.

En el caso de que la resistencia óhmica de la bobina sea prácticamente nula, la intensidad total absorbida por el conjunto es también prácticamente nula y el circuito se comporta como si estuviese abierto, es decir con una impedancia infinita.

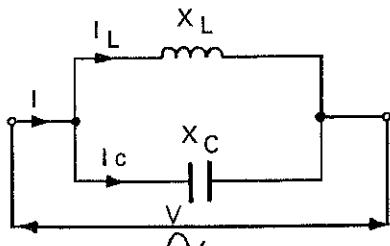


Figura 14.26. Circuito Resonante en paralelo.

Ejemplo: 14.8

Determinar la frecuencia de resonancia de un circuito paralelo como el de la Figura 14.26 si está compuesto por una bobina de 10 mH de resistencia despreciable y un condensador de 100 μF .

Solución: Al igual que en el circuito serie, la frecuencia de resonancia se alcanza para:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\cdot\pi\sqrt{10\cdot10^{-3}\cdot100\cdot10^{-6}}} = 159 \text{ Hz}$$

El circuito resonante en paralelo se puede utilizar, por ejemplo, para sintonizar una determinada emisora de radio. Lo que hace el circuito, en este caso, es separar de entre la mezcla de frecuencias que aparece entre los terminales de una antena de un receptor de radio, una determinada frecuencia (la de resonancia). Para ello se conecta en paralelo con la antena y tierra el circuito paralelo resonante, el cual presenta una impedancia muy baja para todas aquellas frecuencias que no sean la resonante, por lo que las cortocircuita y las elimina. Sin embargo, para la frecuencia de resonancia, la impedancia se hace muy elevada, por lo que la señal aparece íntegramente en antena.

Si se conectan en serie los circuitos oscilantes en paralelo con una determinada carga, al aplicar al circuito formado una señal con múltiples frecuencias, éste consigue bloquear la frecuencia propia de resonancia, ya que presenta una impedancia muy elevada para dicha frecuencia. Este tipo de circuitos se utiliza como filtros cuando se desea suprimir ciertas señales de una determinada frecuencia que pueden ser molestas, como por ejemplo en altavoces de audio, amplificadores etc.

Actividades

- Consigue los elementos necesarios para realizar el montaje de la Figura 14.23 y comprueba experimentalmente el efecto de oscilación amortiguada que aparece al aplicar un condensador cargado a una bobina.
- Se trata de que consigas poner en resonancia a un circuito serie. Para ello conecta en serie una resistencia, una bobina y un condensador a un generador de señales. Mide la tensión que aparece en la bobina y el condensador, así como la corriente y frecuencia aplicada. Comienza el ensayo aplicando una frecuencia muy baja, aumentando dicha frecuencia muy poco a poco hasta conseguir que las tensiones que aparecen en la bobina y el condensador sean iguales. Una vez conseguido, anota la frecuencia de resonancia a la que se ha conseguido. Observa cómo en todo el proceso la corriente por el circuito ha alcanzado su

valor máximo para la frecuencia de resonancia. En previsión de que las tensiones alcanzadas sean elevadas, conviene tomar las precauciones necesarias para evitar accidentes o daños en los aparatos de medida.

- Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- La instalación eléctrica de un taller electromecánico consta de los siguientes receptores, conectados a un línea eléctrica de C.A. de 220 V, 50 Hz: (1) 5 calefactores de 1500 W cada uno; (2) 3 motores monofásicos de inducción de 5 CV, $\cos \varphi = 0,75$; (3) 60 lámparas fluorescentes de 40 W, $\cos \varphi = 0,6$; (4) un horno con una resistencia equivalente a 15Ω ; (5) un electroimán con un circuito equivalente R-L igual a $R = 20 \Omega$, $L = 500 \text{ mH}$.

Averiguar: a) esquema eléctrico de la instalación, incluyendo interruptores automáticos para la protección de la línea general y de cada uno de los circuitos, así como una batería automática para la corrección del factor de potencia; b) potencia total instalada y FP; c) calibre de los interruptores automáticos de los diferentes circuitos; d) sección de los conductores de la línea general, si ésta consta de un cable bipolar de cobre, instalado al aire, de 125 m de longitud y con una caída de tensión máxima admisible del 3%; e) batería automática de condensadores para corregir el FP a 0,98; f) calibre del interruptor automático para el mando y protección de dicha batería.

- En la Figura 14.27 se muestra el esquema eléctrico, en representación unifilar, de una línea monofásica que alimenta a 220 V, 50 Hz a la instalación interior de un pequeño taller de reparaciones.

Seguidamente se indican las características de los receptores (1), (2), (3) y (4):

- (1) 7 lámparas incandescentes de 100 W; 220 V
- (2) 100 lámparas fluorescentes de 40 W, $\cos \varphi = 0,9$; 220 V

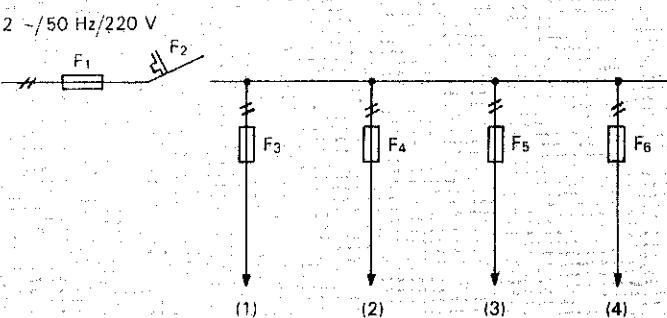


Figura 14.27

- (3) Horno eléctrico con una resistencia equivalente de 50Ω

- (4) Motor monofásico de 3025 W; $\cos \varphi = 0,7$; 220 V

Averiguar: a) P_T , S_T , $\cos \varphi_T$, I_T ; b) calibre de los fusibles F_1 , F_3 , F_4 , F_5 y F_6 ; c) sección de la línea general si ésta consta de un cable bipolar de 125 m de longitud instalado bajo tubo y la caída máxima que se admite es del 2%; d) características de la batería de condensadores que habrá que conectar al principio de línea general para corregir el FP a 0,99; e) ¿qué sección sería suficiente para la línea general una vez conectada la batería de condensadores?

- La impedancia equivalente de un circuito es $Z = 50 \angle 45^\circ$. Expresa el resultado en forma algebraica e indica los valores de la resistencia y de la reactancia.

- Se conecta a una red de 380 V, 50 Hz, una resistencia óhmica de 200Ω en paralelo con una bobina de 140Ω .

de resistencia y 1,96 H de coeficiente de autoinducción. Averiguar las intensidades del circuito. Dibujar el diagrama vectorial.

- 5) Se conecta a una red de C.A. de 120 V, 50 Hz, un circuito compuesto por tres receptores en paralelo de las siguientes características: un condensador de $66,3 \mu\text{F}$, una resistencia de 400Ω y una bobina de 159 mH . Averiguar la corriente total y por cada una de las cargas, las potencias totales y dibujar el diagrama vectorial.
- 6) Averiguar la impedancia equivalente del circuito de la Figura 14.28, así como los valores de I_T , I_1 , I_2 , I_3 , P_T , Q_T , S_T , FP. Dibujar el diagrama vectorial.

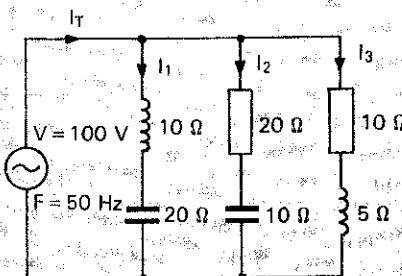


Figura 14.28

- 7) Del circuito mixto mostrado en la Figura 14.29, averiguar la lectura de A y de V, así como P_T , Q_T , S_T y dibujar el diagrama vectorial.

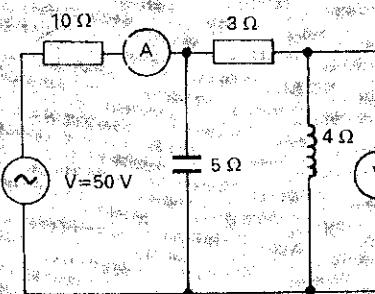


Figura 14.29

- 8) En el circuito mixto de la Figura 14.30, el amperímetro indica una lectura de 10 A. Determinar I_T , I_1 , V_T , P_T , Q_T , S_T , FP y dibujar el diagrama vectorial.

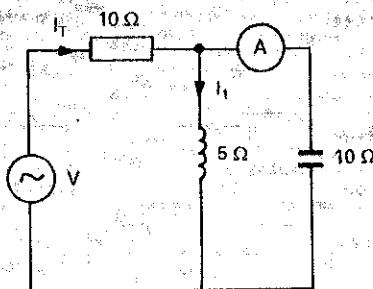


Figura 14.30

- 9) La bobina de un electroimán posee un coeficiente de autoinducción de 0,4 henrios y una resistencia óhmica de 100 ohmios. Calcular la intensidad, factor de potencia y potencias al aplicar una C.A. senoidal de $v = 311 \sin 314 t$. Dibujar los diagramas vectoriales.
- 10) Se conectan en paralelo las bobinas de dos contactores a una red monofásica de C.A. de 220 V, 50 Hz. Si las características de las mismas son: bobina nº 1 ($R = 80 \Omega$, $L = 0,8 \text{ H}$), bobina nº 2 ($R = 120 \Omega$, $L = 0,6 \text{ H}$), averiguar las corrientes por cada bobina, FP de cada una y total, potencia activa de cada una y total.
- 11) Se conecta en serie, con la resistencia de un calefactor de 160Ω , un condensador de $35 \mu\text{F}$ a una red de C.A. de 220 V, 50 Hz. Averiguar la tensión a la que quedará sometido el calefactor. ¿Qué frecuencia habrá que aplicar al conjunto para conseguir que el calefactor trabaje a 125 V sin modificar el valor de la tensión aplicada al conjunto?
- 12) Se conectan en serie las bobinas de dos electroválvulas a 220 V, 50 Hz, de las siguientes características: bobina nº 1 ($R = 20 \Omega$; $0,8 \text{ H}$), bobina nº 2 (28Ω ; $0,6 \text{ H}$). Calcular la corriente por las mismas, la tensión aplicada a cada bobina, el factor de potencia del conjunto, las potencias del conjunto y la capacidad del condensador que habrá que conectar en paralelo para conseguir corregir el FP del conjunto a 0,95.
- 13) La bobina de un contactor de 125 V posee una resistencia de 60Ω y un coeficiente de autoinducción de 0,2 H. ¿Cuál será el valor de la resistencia óhmica que habrá que conectar en serie para poder conectar dicha bobina a una red de 220 V, 50 Hz, sin que se vea afectado su funcionamiento?
- 14) A una bobina de 200Ω de resistencia y $0,8 \text{ H}$ de coeficiente de autoinducción, se le conecta en paralelo un condensador de $2 \mu\text{F}$. Calcular las intensidades del circuito al conectar el conjunto a 220 V, 50 Hz.
- 15) Calcular la sección de una línea monofásica de 100 m que alimenta a dos motores de las siguientes características: motor nº 1 (5 KW; 220 V; $\cos \varphi = 0,6$), motor nº 2 (7 KW; 220 V; $\cos \varphi = 0,65$). La caída de tensión máxima de tensión que se admite es del 5%. La línea consta de un cable bipolar aislado con PVC instalado bajo tubo. Posteriormente, a la instalación de la línea se conecta una batería de condensadores al final de la misma con la idea de elevar el factor de potencia de la instalación hasta 0,95. ¿Cuál sería ahora la sección recomendable para los conductores de línea?
- 16) Averiguar la frecuencia de resonancia de un circuito serie formado por un condensador de $20 \mu\text{F}$, una bobina de 80 mH y una resistencia de 2Ω . ¿Qué valor tendrán las caídas de tensión en la bobina y el condensador si se aplica al conjunto una tensión de 100 V?
- 17) Se desea conseguir que un circuito paralelo entre en resonancia a una tensión alterna de 50 Hz, para lo que se dispone de una bobina de 1 H. ¿Qué capacidad deberá poseer el condensador?

Sistemas Trifásicos

Introducción

A diferencia de los sistemas monofásicos de C.A., estudiados hasta ahora, que utilizan dos conductores eléctricos para su distribución y consumo, los sistemas trifásicos utilizan tres o cuatro conductores. En la práctica, no existen alternadores monofásicos para la producción de grandes cantidades de energía. Las centrales eléctricas se valen de alternadores trifásicos para la generación de la electricidad que posteriormente se consume en el sector industrial y doméstico, tanto en forma trifásica como monofásica. Como estudiaremos a continuación, las líneas monofásicas se obtienen a partir de un sistema trifásico.

Contenido

- Generación de un sistema trifásico.
- Tensiones simples y compuestas.
- Conexión en estrella y triángulo de cargas equilibradas.
- Corrección del factor de potencia.
- Cálculo de instalaciones trifásicas de varios receptores.
- Caída de tensión en líneas trifásicas de C.A.
- Cálculo de la sección de conductores en líneas trifásicas.

Objetivos

- Distinguir los sistemas trifásicos de los monofásicos, describiendo los procesos de generación de la energía eléctrica de los primeros.
- Enumerar las ventajas de los sistemas trifásicos de C.A. frente a otro tipo de sistemas de producción, transporte y consumo de la electricidad.
- Resolver problemas prácticos de instalaciones eléctricas con redes trifásicas de C.A.: cálculo de protecciones, sección de conductores, corrección del factor de potencia, etc.

15.1 Ventajas del uso de sistemas trifásicos

Lo más característico de los sistemas trifásicos es que las líneas utilizan tres o cuatro hilos (tres fases más el neutro), y con lo que se pueden obtener dos tensiones diferentes.

En la Figura 15.1 se muestra el aspecto de una línea de C.A. trifásica. Los conductores marcados con los números 1, 2 y 3 pertenecen a cada una de las tres fases del sistema. El conductor marcado con el número 0 pertenece al neutro. En esta línea se han conectado tanto receptores trifásicos como monofásicos.

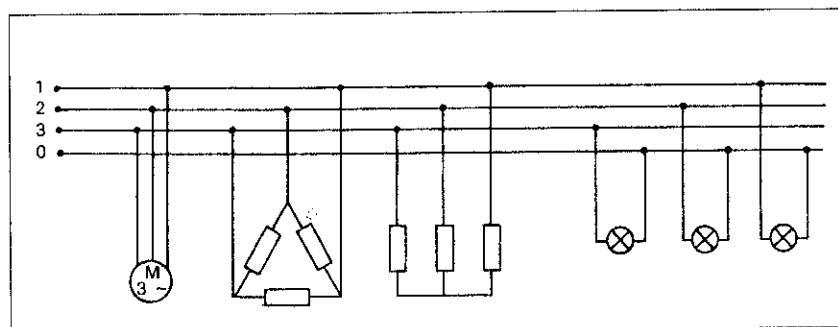


Figura 15.1. Receptores conectados a una línea trifásica.

Se puede comprobar experimentalmente que en un sistema trifásico existen dos tensiones diferentes. Así, por ejemplo, si tomamos un voltímetro y medimos la tensión que existe entre cualquiera de las fases y el neutro de un sistema de distribución de baja tensión (por ejemplo, en el cuarto de contadores de un edificio de viviendas) obtendremos un resultado de 230 V. Sin embargo, si medimos la tensión que aparece entre cualquiera de las fases, comprobaremos que existe una tensión de 400 V.

De aquí se deduce que en un sistema trifásico existen en una misma línea dos tensiones diferentes. También se puede comprobar que la tensión entre fases es $\sqrt{3}$ veces mayor que la que aparece entre las fases y el neutro:

$$\frac{400 \text{ V}}{230 \text{ V}} = \sqrt{3}$$

El hecho de que en una misma línea tengamos dos tensiones resulta muy ventajoso, ya que por ejemplo podemos utilizar la tensión más elevada en el sector industrial y, por seguridad, la tensión más baja en el sector doméstico.

A parte de esta ventaja que nos aportan los sistemas trifásicos existen otras muchas más, que expondremos a continuación:

Tanto los alternadores, transformadores y motores de C.A. trifásica poseen un mayor rendimiento y, por lo general, son mucho más sencillos y económicos que los monofásicos. Esto se aprecia fundamentalmente en los motores trifásicos de inducción, que es uno de los más utilizados en el sector industrial. Este motor posee unas características mucho mejores que el monofásico, como son: par de arranque muchísimo más fuerte, mejor rendimiento y mejor factor de potencia.

Los sistemas trifásicos consiguen transportar la energía eléctrica con un ahorro considerable en la sección de los conductores.

Todas estas ventajas hacen que en la actualidad toda la energía eléctrica se produzca, transporte, distribuya y consuma en forma de C.A. alterna trifásica.

15.2 Generación de un sistema de C.A. trifásica

Para conseguir una C.A. monofásica se hacía girar una espira en el seno de un campo magnético fijo.

En un sistema trifásico se hacen girar tres espiras en torno a un eje común en el seno de un campo magnético (Figura 15.2). Estas espiras se sitúan repartidas equitativamente sobre un núcleo cilíndrico de chapas de hierro, es decir, cada:

$$360^\circ / 3 = 120^\circ$$

La corriente puede pasar desde las espiras al circuito exterior por medio de un sistema de anillos colectores y escobillas frotantes.

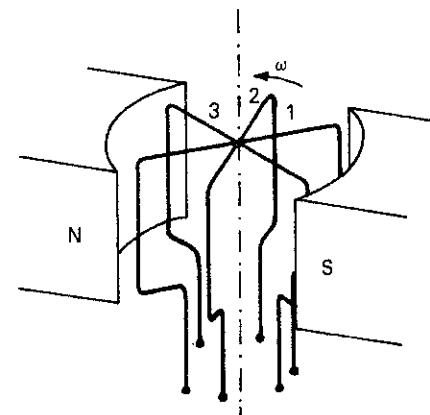


Figura 15.2. Altenador trifásico elemental.

Al moverse cada una de las espiras en el seno del campo magnético se inducirá en cada una de ellas una f.e.m. senoidal del mismo valor eficaz y frecuencia. Al estar situadas cada espira 120° en el rotor, cada una de las f.e.m. (e_1 , e_2 y e_3) inducidas quedan desfasadas temporalmente entre sí también 120° eléctricos.

El valor instantáneo de cada una de estas f.e.m. tendrá la siguiente forma:

$$\begin{aligned} e_1 &= E_{\max} \operatorname{sen} \omega t \\ e_2 &= E_{\max} \operatorname{sen} (\omega t - 120^\circ) \\ e_3 &= E_{\max} \operatorname{sen} (\omega t - 240^\circ) \end{aligned}$$

En la Figura 15.3 se muestran los diagramas vectoriales pertenecientes a estas fuerzas electromotrices.

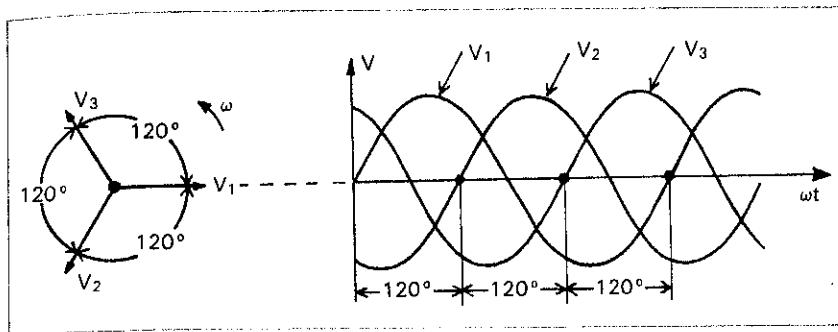


Figura 15.3. Diagrama vectorial de las fuerzas electromotrices generadas por un alternador trifásico.

Como se puede comprobar en los diagramas vectoriales, la suma de las tres f.e.m. es cero en cualquier momento. Esto constituye una de las características principales del sistema trifásico.

En los alternadores modernos se sitúan las tres bobinas en el estator, evitando así el complejo sistema de anillos colectores para la extracción de la gran energía eléctrica que se produce en las mismas (las tensiones son del orden de los 10 a 20 KV y las corrientes de hasta cientos de amperios) (Figura 15.4).

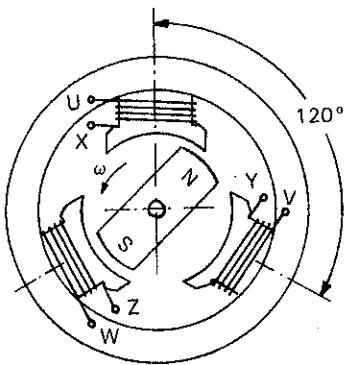


Figura 15.4. Alternador trifásico con campo magnético inductor móvil.

En el rotor se sitúa un potente electroimán que, al ser alimentado por una corriente continua genera el campo magnético. En su movimiento de rotación, el campo magnético corta los conductores de las tres bobinas consecutivamente, induciendo en las mismas las tres f.e.m desfasadas entre sí 120°.

De las tres bobinas del alternador se consiguen seis terminales. Existen dos formas básicas de conexión de estas bobinas: conexión en estrella y conexión en triángulo (Figura 15.5).

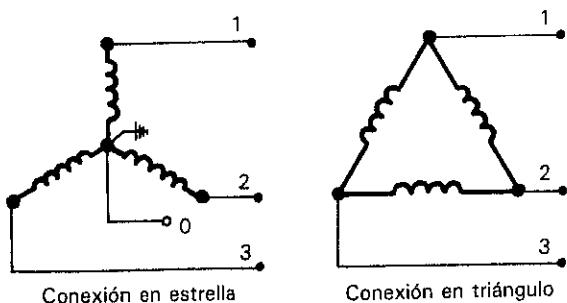


Figura 15.5. Conexiones de los bobinados de un alternador.

La forma más utilizada, y la que estudiaremos a continuación, es la conexión en estrella, ya que permite el uso del conductor neutro (0) y, con él, el uso de dos tensiones diferentes. El neutro se conecta a tierra junto con el chasis del alternador para garantizar la seguridad eléctrica de las instalaciones.

15.3 Conexión del alternador en estrella

En esta conexión se han unido los tres terminales libres de las bobinas del alternador a un punto común, formando el conductor neutro (0). Las otras partes activas de las bobinas (1), (2) y (3) forman los conductores de cada una de las fases del sistema trifásico. Para hacer un estudio completo de esta conexión, se ha conectado el alternador a un receptor que consta de tres cargas óhmico inductivas (Z_1 , Z_2 y Z_3) conectadas entre sí en estrella, tal como se muestra en la Figura 15.6.

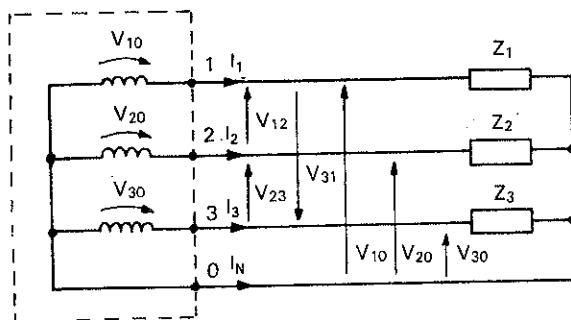


Figura 15.6. Tensiones y corrientes en un alternador en estrella.

Tensiones simples o de fase: Cada bobina del alternador trifásico se comporta como un generador monofásico, generando entre sus terminales una tensión denominada simple o de fase (V_s): V_{10} , V_{20} y V_{30} .

Intensidades de línea: Las tensiones simples quedan aplicadas a cada una de las cargas del receptor, apareciendo una corriente por cada conductor de línea (I_L): I_1 , I_2 y I_3 . La suma de estas tres corrientes dará como resultado la corriente de retorno del neutro I_N . En un principio podría parecer que el conductor del neutro debe conducir una gran corriente eléctrica. Como ya podremos comprobar en los diagramas vectoriales, en el caso de que las cargas sean todas iguales (cargas equilibradas) esta corriente es cero, lo que podría llevar a la anulación de este conductor en determinadas aplicaciones.

Tensiones compuestas: Son las tensiones que aparecen entre cada una de las fases (V_c): V_{12} , V_{23} y V_{31} . Estas tensiones reciben el nombre de tensiones compuestas porque aparecen gracias a la composición de las tensiones simples. Con ayuda de las leyes de Kirchhoff y del diagrama vectorial, demostraremos que todas estas tensiones poseen el mismo valor eficaz y que están desfasadas entre sí 120°, así como que se cumple que $V_c = \sqrt{3} V_s$.

Si aplicamos la segunda ley de Kirchhoff a cada una de las mallas que se forman entre las tensiones simples y compuestas, tendremos que (Figura 15.7):

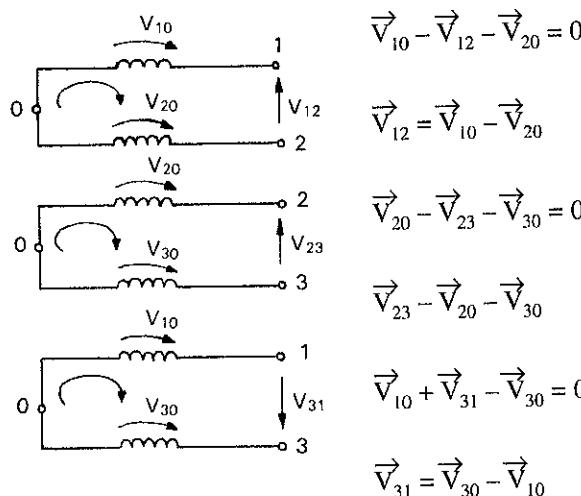


Figura 15.7. Obtención de las tensiones compuestas.

Ahora dibujamos el diagrama vectorial (Figura 15.8) con las tensiones simples desfasadas unas de otras 120° . Al ser las cargas de carácter inductivo, se han dibujado las corrientes eléctricas retrasadas de cada una de sus respectivas tensiones simples un ángulo φ . Como se ha supuesto que las cargas son iguales, las corrientes I_1 , I_2 y I_3 son también iguales en valor modular y desfasadas entre sí 120° . Se puede comprobar con facilidad el hecho de que la suma de estas intensidades es cero:

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = \vec{I}_N = 0$$

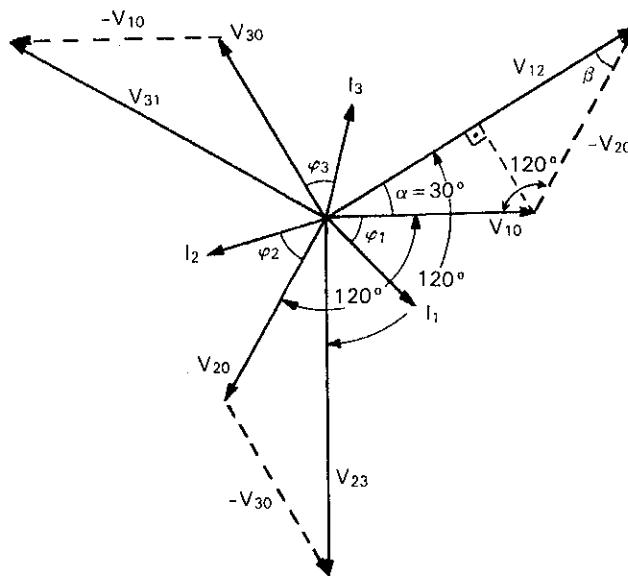


Figura 15.8. Diagrama vectorial de tensiones e intensidades.

Las tensiones compuestas se dibujan realizando las operaciones de suma vectorial de sus respectivas tensiones simples (ver las relaciones de tensiones obtenidas con anterioridad en Figura 15.7).

Se puede comprobar con facilidad que el ángulo que aparece entre las tensiones simples y las compuestas es de 30° (aparece un triángulo isósceles donde $\alpha = \beta$; en el triángulo se cumple que $180^\circ = \alpha + \beta + 120^\circ$, de donde se deduce que $\alpha = 30^\circ$). Aprovechando esta relación y por simple trigonometría determinaremos la relación que existe entre las tensiones simples y las compuestas (Figura 15.9).

$$\cos 30^\circ = \frac{V_{12}/2}{V_{10}} \Rightarrow V_{12} = 2 V_{10} \cos 30^\circ$$

$$V_{12} = 2 V_{10} \sqrt{3}/2 = V_{10} \sqrt{3}, \text{ en conclusión:}$$

$$V_c = \sqrt{3} \cdot V_s$$

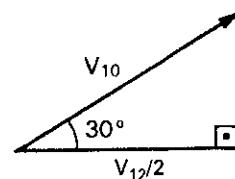


Figura 15.9. Relación entre tensiones simple y compuestas

Ejemplo: 15.1

Determinar la tensión compuesta que corresponde a un sistema trifásico que posee una tensión simple de 127 V.

$$\text{Solución: } V_c = \sqrt{3} V_s = \sqrt{3} 127 = 220 \text{ V}$$

$$\rightarrow \text{ y para } V_s = 230 \text{ V: } V_c = \dots$$

15.4 Conexión de los receptores

Una vez que disponemos de un sistema trifásico, podemos conectar al mismo cargas conectadas entre sí en triángulo, en estrella, o incluso cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro o entre fases (véase Figura 15.1). En los primeros casos se tratará, en la mayoría de las ocasiones, de cargas trifásicas equilibradas como, por ejemplo, motores trifásicos, hornos trifásicos, etc. Las cargas monofásicas vendrían constituidas por lámparas y todo tipo de receptores monofásicos. En este caso conviene siempre repartir por igual las cargas monofásicas entre cada una de las fases, en caso contrario el sistema sería desequilibrado, produciéndose diferentes corrientes por cada fase, que desestabilizan notablemente el sistema.

Seguidamente estudiaremos las cargas trifásicas conectadas en estrella y en triángulo, y demostraremos que la potencia de estas conexiones para cargas equilibradas es siempre igual a:

$$P = \sqrt{3} V_c \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

P = potencia activa de la carga trifásica

V_c = tensión compuesta

I_L = intensidad de línea

$\cos \varphi$ = factor de potencia de la carga

15.5 Carga equilibrada en estrella

En la Figura 15.10 se puede apreciar un receptor trifásico con tres cargas conectadas en estrella.

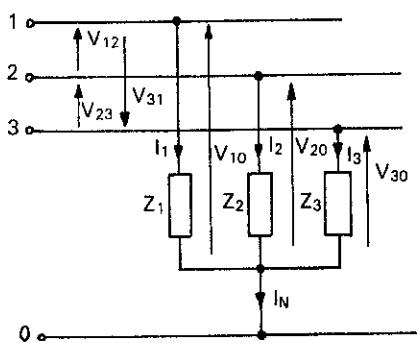


Figura 15.10. Carga equilibrada en estrella.

Como el sistema es equilibrado:

$$Z_1 \angle \varphi_1 = Z_2 \angle \varphi_2 = Z_3 \angle \varphi_3 = Z \angle \varphi$$

Aplicando la ley de Ohm a cada una de estas cargas tenemos que las corrientes por cada fase de las mismas, son:

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_{10}}{Z_1 \angle \varphi_1} \quad \vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_{20}}{Z_2 \angle \varphi_2} \quad \vec{I}_3 = \frac{\vec{V}_{30}}{Z_3 \angle \varphi_3}$$

Como las tensiones simples están desfasadas 120° , las corrientes también quedarán desfasadas entre sí 120° y un ángulo φ respecto a cada una de su respectiva tensión simple. Como las impedancias y las tensiones aplicadas a las mismas son del mismo valor modular, las corrientes también lo serán:

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = I_L$$

Como se podrá apreciar en el diagrama vectorial de la Figura 15.11 en esta situación se cumple que:

$$\rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \\ I_1 + I_2 + I_3 = I_N = 0$$

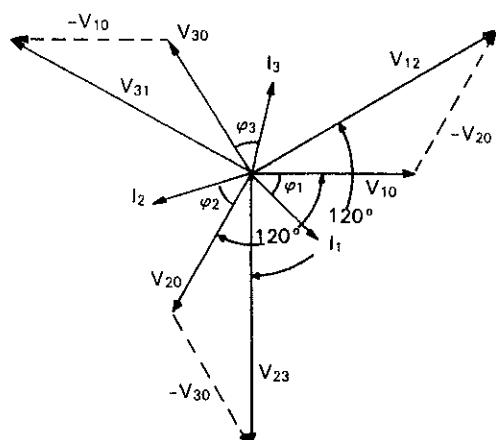


Figura 15.11. Diagrama de tensiones y corrientes en una carga en estrella.

En este caso se puede eliminar el neutro. Al hacerlo se forma un neutro artificial en el punto común de las cargas conectadas en estrella, que permite que se mantenga la tensión simple entre las fases y el neutro sin necesidad del conductor neutro. Por supuesto, esto sólo ocurre cuando las cargas están equilibradas.

Potencia del sistema trifásico: Para calcular la potencia que desarrolla la carga bastará con sumar la potencia que aparece en cada una de las tres cargas monofásicas, es decir:

$$P = V_{10} I_1 \cos \varphi_1 + V_{20} I_2 \cos \varphi_2 + V_{30} I_3 \cos \varphi_3$$

En un sistema equilibrado, tanto las tensiones simples, como las corrientes de fase, como los factores de potencia son iguales (para cargas en estrella la corriente de fase y de línea es la misma).

$$P = 3 V_s I_L \cos \varphi, \text{ como}$$

$$V_s = \frac{V_c}{\sqrt{3}} \Rightarrow P = 3 \frac{V_c}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

$$P = \sqrt{3} V_C \cdot I_L \cos \varphi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica

V_c = Tensión compuesta

I_L = Intensidad de línea

$\cos \varphi$ = Factor de potencia de la carga

Para el cálculo de la potencia reactiva y aparente, el procedimiento de demostración sería el mismo, cumpliéndose que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_C \cdot I_L \cdot \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_C \cdot I_L$$

Ejemplo: 15.2

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en estrella. Determinar la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red con una tensión entre fases de 400 V desarrolla una potencia de 10 KW con un FP de 0,8. Averiguar la potencia reactiva y aparente del mismo (veáse circuito equivalente en la Figura 15.12).

Solución: Como los motores son cargas equilibradas no será necesario conectar el neutro al punto común de la estrella para que aparezca la tensión simple entre el neutro y cualquiera de las fases.

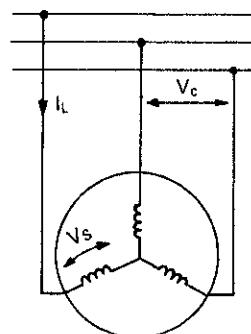


Figura 15.12

Para determinar la corriente aplicamos la fórmula general de potencia activa para sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{10.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8} = 18 \text{ A}$$

$$\varphi = \arccos 0,8 = 36,9^\circ$$

$$Q = \sqrt{3} V_c I_L \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 18 \cdot \sin 36,9^\circ = 7.488 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_c I_L = \dots = 12.471 \text{ VA}$$

¿Qué tensión y qué corriente aparece en cada una de las bobinas del motor?

Como las bobinas están conectadas en estrella y son cargas equilibradas, aparece en cada una de ellas la tensión simple, es decir:

$$V_s = V_c / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 230 \text{ V}$$

La corriente que aparece en cada bobina (corriente de fase) es la misma que aparece en la línea: 18 A.

Ejemplo: 15.3

Se conectan en estrella tres bobinas iguales a una red trifásica de 220 V, 50 Hz. Cada una de las mismas posee 10 Ω de resistencia óhmica y 30 Ω de reactancia inductiva (Figura 15.13). Calcular: I_L , $\cos \varphi$, P , Q y S .

Solución:

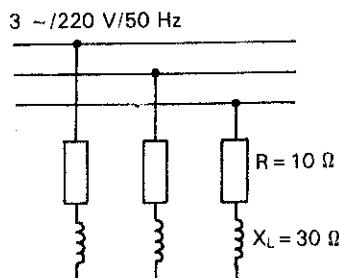


Figura 15.13

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{10^2 + 30^2} = 31,6 \Omega$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} = \arctg \frac{30}{10} = 71,6^\circ$$

Cada una de estas impedancias está sometida a la tensión simple, luego la corriente que se establecerá por cada una de ellas y por la línea será:

$$I_L = \frac{V_s}{Z} = \frac{127}{31,6} = 4 \text{ A} \quad (V_s = V_c \sqrt{3} = 220 \sqrt{3} = 127 \text{ V})$$

Aplicando las fórmulas generales de potencias, obtenemos:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi = \dots = 481 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} V_c I_L \sin \varphi = \dots = 1.446 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_c I_L = \dots = 1.524 \text{ VA}$$

$$\cos \varphi = \cos 71,6^\circ = 0,32$$

Ejemplo: 15.4

Se desea conectar a una red trifásica, con neutro y con una tensión entre fases de 400 V, 30 lámparas fluorescentes de 40 W, 230 V, $\cos \varphi = 0,6$. Mostrar la conexión de las mismas para conseguir que la carga esté equilibrada y averiguar la corriente por la línea que las alimenta, así como la potencia del conjunto y por fase.

Solución: Como las lámparas funcionan a 230 V, es decir a la tensión simple ($V_s = 400 / \sqrt{3} = 230 \text{ V}$), se han conectado 3 grupos de 10 lámparas entre cada fase y neutro con el fin de repartir equitativamente las cargas (Figura 15.14).

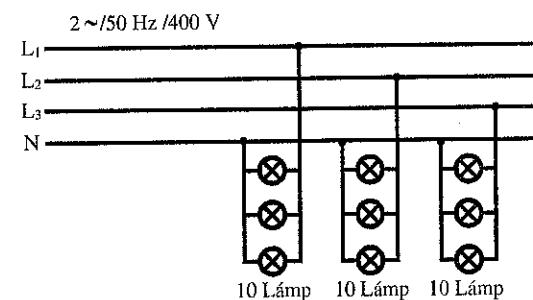


Figura 15.14

La potencia conectada a cada fase será entonces:

$$P' = 10 \cdot 40 \text{ W} = 400 \text{ W}$$

La potencia total conectada a la red trifásica es de:

$$P = 30 \cdot 40 \text{ W} = 1.200 \text{ W}$$

Para calcular la intensidad de línea nos valemos de la fórmula general de potencia trifásica:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{1.200}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,6} = 2,9 \text{ A}$$

Esta corriente también la podríamos haber averiguado tomando la potencia de una de las fases:

$$P' = V_s I_f \cos \varphi \Rightarrow I_f = \frac{P'}{V_s \cos \varphi} = \frac{400}{230 \cdot 0,6} = 2,9 \text{ A}$$

¿Se podría eliminar la conexión del neutro en las lámparas?

Evidentemente, mientras el sistema permanezca equilibrado, la tensión que aparecerá entre el punto común de las lámparas y la fase será la simple. Ahora bien, en el momento que alguna lámpara se funda, el sistema se desequilibra, con la consecuencia de que la tensión simple no se mantendrá en su valor nominal. La única forma de evitar este hecho es tener siempre conectado el neutro en estos casos.

15.6 Carga equilibrada en triángulo

Al conectar las cargas en triángulo (Figura 15.15), éstas quedan sometidas a cada una de las respectivas tensiones compuestas. Por cada una de las cargas aparece una corriente: I_{12} , I_{23} e I_{31} , que llamaremos **corriente de fase (I_f)**.

Como el sistema es equilibrado:

$$Z_{12}\angle\varphi_{12} = Z_{23}\angle\varphi_{23} = Z_{31}\angle\varphi_{31} = Z\angle\varphi$$

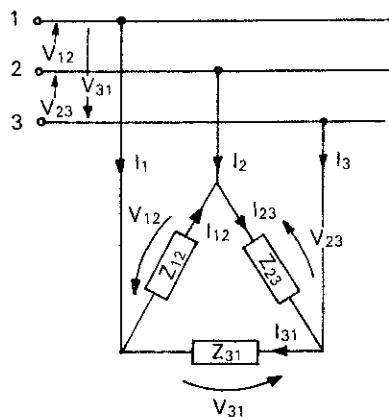


Figura 15.15. Carga equilibrada en triángulo.

$$\vec{I}_{12} = \frac{\vec{V}_{12}}{Z_{12}\angle\varphi_{12}} \quad \vec{I}_{23} = \frac{\vec{V}_{23}}{Z_{23}\angle\varphi_{23}} \quad \vec{I}_{31} = \frac{\vec{V}_{31}}{Z_{31}\angle\varphi_{31}}$$

Como las tensiones compuestas están desfasadas entre sí 120° , las corrientes también quedarán desfasadas entre sí 120° y un ángulo φ respecto a cada una de su respectiva tensión compuesta. Como las impedancias y las tensiones aplicadas a las mismas son del mismo valor modular, las corrientes también lo serán:

$$|I_{12}| = |I_{23}| = |I_{31}| = I_f$$

En la línea que alimenta a las cargas aparecen otras tres corrientes: I_1 , I_2 e I_3 , que llamaremos corrientes compuestas o de línea (I_L). Para determinar la relación de estas corrientes con las de fase vamos a aplicar la primera ley de Kirchhoff a cada uno de los nudos que se forman en las conexiones de las cargas en triángulo:

$$\text{Nudo 1} \Rightarrow \vec{I}_1 = \vec{I}_{12} - \vec{I}_{31}$$

$$\text{Nudo 2} \Rightarrow \vec{I}_2 = \vec{I}_{23} - \vec{I}_{12}$$

$$\text{Nudo 3} \Rightarrow \vec{I}_3 = \vec{I}_{31} - \vec{I}_{23}$$

Ahora dibujamos el diagrama vectorial con las tensiones compuestas desfasadas entre sí 120° (Figura 15.16). Al suponer las cargas de carácter inductivo, se han dibujado las corrientes de fase retrasadas de cada una de sus respectivas tensiones compuestas un ángulo φ .

Las corrientes de línea se dibujan realizando las operaciones de suma vectorial de sus respectivas intensidades de fase (ver relaciones obtenidas anteriormente).

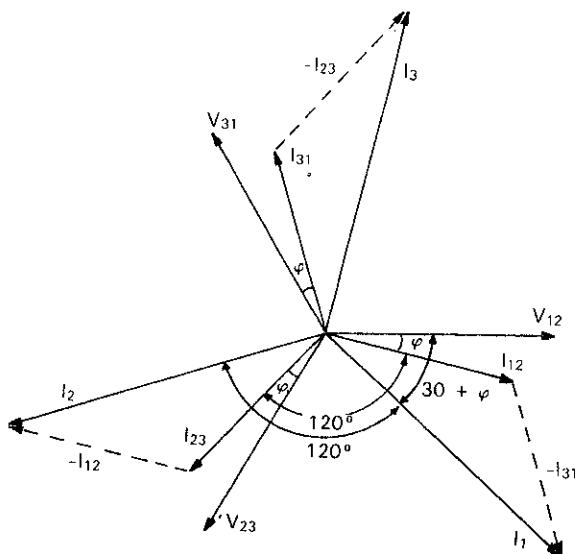


Figura 15.16. Diagrama de tensiones y corrientes en una carga en triángulo.

Se puede comprobar con facilidad que el ángulo que aparece entre las corrientes de fase y las de línea es de 30° (aparece un triángulo isósceles donde $\alpha = \beta$; en el triángulo se cumple que $180^\circ = \alpha + \beta + 120^\circ$, de donde $\alpha = 30^\circ$). Aprovechando esta relación, y por simple trigonometría, determinaremos la relación que existe entre las corrientes de fase y las de línea (Figura 15.17).

$$\cos 30^\circ = \frac{I_1/2}{I_{12}} \Rightarrow I_1 = 2 I_{12} \cos 30^\circ$$

$$I_1 = 2 I_{12} \sqrt{3}/2 = I_{12} \sqrt{3}, \text{ en conclusión:}$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f$$

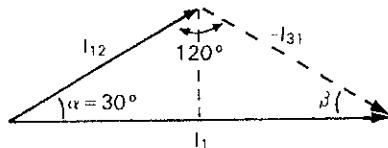


Figura 15.17. Relación entre las corrientes de fase y de línea.

Las corrientes de línea poseen todos un valor igual en módulo, están desfasadas entre sí un ángulo de 120° y son $\sqrt{3}$ veces mayores que las corrientes de fase.

Potencia del sistema trifásico: Para calcular la potencia que desarrolla la carga conectada en triángulo bastará con sumar la potencia que aparece en cada una de las tres cargas monofásicas, es decir:

$$P = V_{12} I_{12} \cos \varphi_{12} + V_{23} I_{23} \cos \varphi_{23} + V_{31} I_{31} \cos \varphi_{31}$$

En un sistema equilibrado, tanto las tensiones compuestas, como las corrientes de fase y de línea y los factores de potencia son iguales.

$$P = 3 V_c I_f \cos \varphi \text{ como } I_f = I_L \sqrt{3} \Rightarrow P = 3 V_c \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cos \varphi \Rightarrow$$

$$P = \sqrt{3} V_c \cdot I_L \cdot \cos \varphi$$

P = Potencia activa de la carga trifásica

V_c = Tensión compuesta

I_L = Intensidad de línea

$\cos \varphi$ = Factor de potencia de la carga

Para el cálculo de la potencia reactiva el procedimiento de demostración sería el mismo, cumpliéndose que:

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_c \cdot I_L \cdot \operatorname{sen} \varphi$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_c \cdot I_L$$

En conclusión, las fórmulas para el cálculo de la potencia en un sistema trifásico equilibrado son las mismas para cargas conectadas en estrella que en triángulo.

Ejemplo 15.5

Un motor trifásico posee sus bobinas conectadas en triángulo. Determinar la corriente eléctrica que absorberá de la línea si al conectarlo a una red, con una tensión entre fases de 400 V, desarrolla una potencia de 15 KW con un FP de 0,7. Averiguar la potencia reactiva y aparente del mismo.

Solución:

Para determinar la corriente de línea aplicamos la fórmula general de potencia activa para sistemas trifásicos:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{15.000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,7} = 31 \text{ A}$$

$$\varphi = \arccos 0,7 = 45,6^\circ$$

$$Q = \sqrt{3} V_c I_L \operatorname{sen} \varphi = \dots = 15.345 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_c I_L = \dots = 21.477 \text{ VA}$$

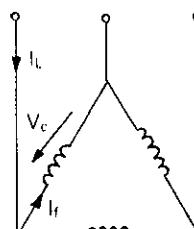


Figura 15.18

¿Qué tensión y qué corriente aparece en cada una de las bobinas del motor? (Figura 15.18).

Como las bobinas están conectadas en triángulo, aparece en cada una de ellas la tensión compuesta, es decir: 400 V.

La corriente que aparece en cada bobina (corriente de fase), es:

$$I_f = I_L \sqrt{3} = 31 \sqrt{3} = 17,9 \text{ A}$$

Ejemplo: 15.6

Se conectan en triángulo las tres bobinas del Ejemplo 15.3 a una red trifásica de 400 V, 50 Hz (Figura 15.19). Calcular: I_f , I_L , $\cos \varphi$, P , Q y S .

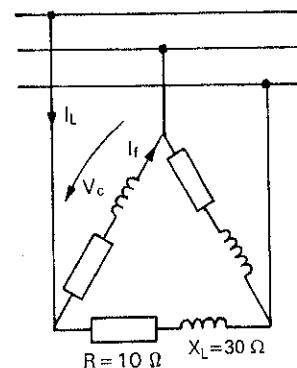


Figura 15.19.

Solución: Al calcular la impedancia correspondiente a cada una de las cargas obtuvimos el resultado: $Z = 31,6 \angle 71,6^\circ$.

Cada una de estas impedancias está sometida a la tensión compuesta, luego la corriente de fase que se establecerá por cada una de ellas será:

$$I_f = \frac{V_c}{Z} = \frac{400}{31,6} = 12,7 \text{ A} \quad I_L = I_f \sqrt{3} = 12,7 \cdot \sqrt{3} = 22 \text{ A}$$

Aplicando las fórmulas generales de potencias, obtenemos:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi = \dots = 4.811 \text{ W}$$

$$Q = \sqrt{3} V_c I_L \operatorname{sen} \varphi = \dots = 14.463 \text{ VAR}$$

$$S = \sqrt{3} V_c I_L = \dots = 15.242 \text{ VA}$$

$$\text{FP} = \cos \varphi = \cos 71,6^\circ = 0,32$$

Ejemplo: 15.7

Se desea conectar 60 lámparas incandescentes de 100 W, 220 V, a una red trifásica con una tensión entre fases de 220 V. Mostrar la conexión de las mismas para conseguir que la carga esté equilibrada, y averiguar la corriente por la línea que las alimenta, así como la potencia del conjunto y por fase.

Solución: Como las lámparas funcionan a 220 V, es decir a la tensión compuesta, se han conectado 3 grupos de 10 lámparas entre cada dos fases con el fin de repartir equitativamente las cargas (Figura 15.20).

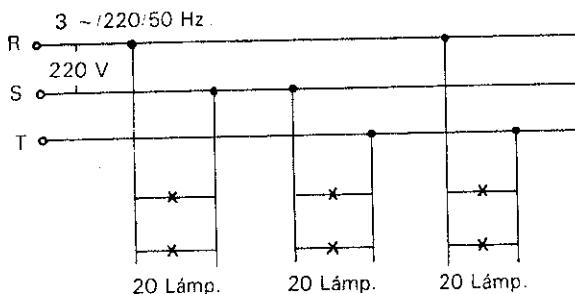


Figura 15.20

La potencia conectada a cada fase será entonces:

$$P' = 20 \cdot 100 \text{ W} = 2.000 \text{ W}$$

La potencia total conectada a la red trifásica es de:

$$P = 60 \cdot 100 \text{ W} = 6.000 \text{ W}$$

Para calcular la intensidad de línea nos valemos de la fórmula general de potencia trifásica:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{6.000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1} = 15,7 \text{ A}$$

(Las lámparas incandescentes son resistivas $\Rightarrow \cos \varphi = 1$).

Esta corriente también la podríamos haber averiguado tomando la potencia de una de las fases:

$$P' = V_c I_f \cos \varphi \Rightarrow$$

$$I_f = \frac{P'}{V_c \cos \varphi} = \frac{2.000}{220 \cdot 1} = 9,1 \text{ A}$$

$$I_L = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \cdot 9,1 = 15,7 \text{ A}$$

15.7 Corrección del factor de potencia

Por las mismas razones que se mejora el factor de potencia en las redes de C.A monofásicas, también se lleva a cabo en las trifásicas. La corrección se lleva a cabo mediante baterías de condensadores, conectados en estrella o en triángulo, que se acoplan en derivación a la red eléctrica a compensar. La forma más habitual de compensar la energía reactiva es mediante baterías automáticas trifásicas de condensadores (Figura 15.21).

El procedimiento a seguir para el cálculo de la batería de condensadores trifásica es prácticamente igual que el llevado a cabo para las monofásicas. Dependiendo de si conectamos las baterías en estrella o en triángulo cambiarán algunas de sus características.

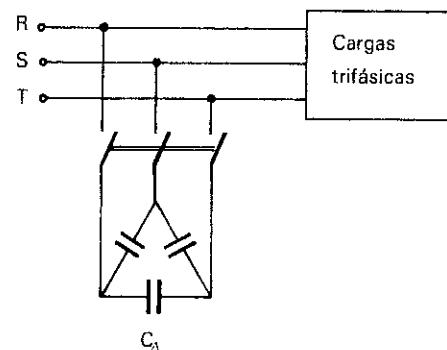


Figura 15.21. Batería de condensadores en triángulo para la corrección del factor de potencia.

Ejemplo: 15.8

El alumbrado de una sala de dibujo se compone de 60 lámparas fluorescentes de 40 W/230 V en BF (bajo factor de potencia) con un FP de 0,6. Las lámparas se han conectado de forma equilibrada a una red trifásica de 400 V entre fases (Figura 15.22). Dimensionar la batería de condensadores en estrella que será necesario conectar a la línea general que alimenta a esta instalación para corregir el FP a 0,97.

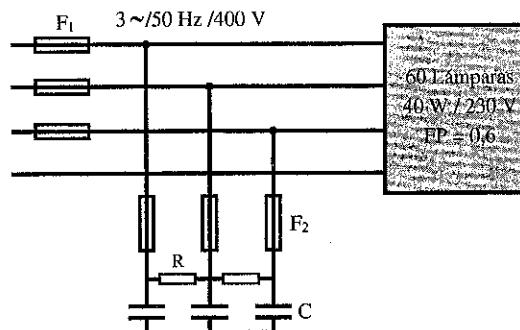


Figura 15.22

Averiguar el calibre de los fusibles generales. ¿Cuál será el calibre de los fusibles para la protección de la batería de condensadores? ¿En cuánto se ha conseguido reducir la intensidad en la instalación al corregir el FP?

Solución: La potencia total instalada es $60 \cdot 40 \text{ W} = 2.400 \text{ W}$.

$$\varphi = \arccos 0,6 = 53,13^\circ$$

$$\varphi = \arccos 0,97 = 14,07^\circ$$

$$Q_C = P (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi') = 2.400 (\operatorname{tg} 53,13^\circ - \operatorname{tg} 14,07^\circ) = 2.598 \text{ VAR}$$

La potencia de cada una de las fases de la batería de condensadores será la tercera parte de la total:

$$Q_C' = 2.598/3 = 866 \text{ VAR}$$

La corriente de fase de cada condensador la calculamos partiendo de esta potencia y de que el condensador está sometido a la tensión de fase por estar conectado en estrella:

$$Q_C' = V_s I_{fc} \Rightarrow I_{fc} = \frac{Q_C'}{V_s} = \frac{866}{230} = 3,77 \text{ A}$$

Ahora ya podemos calcular la reactancia y la capacidad del condensador:

$$X_C = \frac{V_s}{I_{fc}} = \frac{230}{3,77} = 61 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 61} = 52 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

La batería trifásica deberá poseer una potencia reactiva de 2.598 VAR a 400 V y está compuesta por 3 condensadores de $52 \mu\text{F}$ a 230 V conectados en estrella.

***Nota:** Las resistencias de descarga, que se han conectado entre las fases de la batería de condensadores, son para que los condensadores se descarguen por ellas cuando se desconecta la misma de la red.

Calibre de los fusibles F2 de la batería de condensadores:

$$3,77 \cdot 1,6 \text{ veces} = 6 \text{ A} \Rightarrow \text{F2 (10 A)}$$

Calibre de los fusibles generales de línea F1:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \varphi \Rightarrow$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{2.400}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,6} = 5,8 \text{ A}$$

F1 (10 A)

La intensidad por la línea cuando se conecta la batería automática será de:

$$P = \sqrt{3} V_c I_L' \cos \varphi' \Rightarrow I_L' =$$

$$\frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi'} = \frac{2.400}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,97} = 3,6 \text{ A}$$

Se ha conseguido una reducción de corriente del:

$$\frac{(5,8-3,6)}{5,8} \cdot 100 = 38 \%$$

Ejemplo: 15.9

Determinar las características de la batería de condensadores en triángulo que sería necesario conectar para corregir el FP del ejemplo 15.8.

Solución: La potencia reactiva de la batería será exactamente igual, incluso la corriente de la línea que alimenta a la misma. Lo que sí que será diferente es la tensión a la que trabaja cada condensador (en este caso los condensadores quedan sometidos a la tensión compuesta) y, por consiguiente, se verá afectada la capacidad de cada uno de ellos.

$$I_{fc} = \frac{Q_C'}{V_c} = \frac{866}{400} = 2,17 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_c}{I_{fc}} = \frac{400}{2,17} = 184,3 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 184,3} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Batería trifásica de condensadores de 2.598 VAR/400 V compuesta por condensadores de $17 \mu\text{F}$ a 400 V.

Con la batería en triángulo se consiguen condensadores de menor capacidad pero de mayor tensión nominal que con una batería en estrella.

15.8 Instalaciones trifásicas de varios receptores

Al igual que para las instalaciones monofásicas, en este caso se trata de calcular la potencia total instalada, el factor de potencia y la intensidad total de una instalación trifásica de la que se conectan varias cargas de potencia activa y FP conocidas. El procedimiento a seguir es exactamente el mismo que el utilizado para cargas monofásicas: se obtiene la potencia activa y reactiva de todas las cargas y se procede a obtener la potencia aparente total, así como el FP del conjunto y la intensidad.

Ejemplo: 15.10

La instalación eléctrica de un pequeño taller consta de los siguientes receptores, conectados a una línea trifásica de 400 V, 50 Hz: (1) motor trifásico de 10 KW, $\cos \varphi = 0,75$; (2) horno trifásico consistente en tres resistencias de 50Ω conectadas en triángulo; (3) 30 lámparas de vapor de mercurio de 500 W, 230 V, $\cos \varphi = 0,6$ conectadas equitativamente entre cada fase y neutro; (4) 3 motores monofásicos de 2 KW, 400 V, $\cos \varphi = 0,7$ conectados entre fases (Figura 15.23).

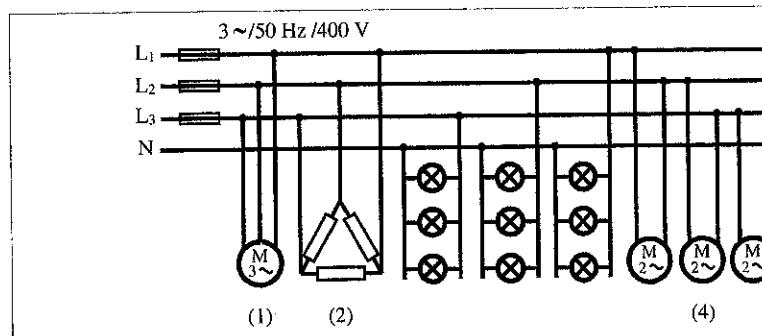


Figura 15.23

Averiguar: a) potencia total de la instalación y FP; b) calibre de los fusibles generales de la línea; c) sección de los conductores, teniendo en cuenta que la línea consta de tres conductores unipolares de PVC más el neutro instalados bajo tubo; d) características de la batería de condensadores conectada en triángulo para corregir el FP hasta 0,95; e) calibre de los fusibles de la batería de condensadores; f) corriente eléctrica por la línea con la batería de condensadores conectada.

Solución:

(1) Determinamos primero la potencia reactiva del motor, que según el triángulo de potencias:

$$Q_1 = P_1 \operatorname{tg} \varphi_1 = 10.000 \cdot \operatorname{tg} 41,4^\circ = 8.819 \text{ VAR}$$

$$\varphi_1 = \arccos 0,75 = 41,4^\circ$$

(2) Calculamos ahora la potencia activa del horno trifásico:

$$I_f = \frac{V_c}{R} = \frac{400}{50} = 8 \text{ A},$$

la potencia es tres veces la de una R

$$P_2 = 3 V_c I_f \cos \varphi = 3 \cdot 400 \cdot 8 \cdot 1 = 9.600 \text{ W}$$

$Q_2 = 0 \text{ VAR}$ (las cargas resistivas no producen potencia reactiva)

(3) Para las 30 lámparas de vapor de mercurio:

$$P_3 = 30 \cdot 500 \text{ W} = 15.000 \text{ W}$$

$$Q_3 = P_3 \operatorname{tg} \varphi_3 = 15.000 \cdot \operatorname{tg} 53^\circ = 19.905 \text{ VAR}$$

$$\varphi_3 = \arccos 0,6 = 53^\circ$$

(4) Para los tres motores monofásicos:

$$P_4 = 3 \cdot 2.000 \text{ W} = 6.000 \text{ W}$$

$$Q_4 = P_4 \operatorname{tg} \varphi_4 = 6.000 \cdot \operatorname{tg} 45,6^\circ = 6.121 \text{ VAR}$$

$$\varphi_4 = \arccos 0,7 = 45,6^\circ$$

Ahora sumamos las potencias:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 10.000 + 9.600 + 15.000 + 6.000 = 40.600 \text{ W}$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 8.819 + 0 + 19.905 + 6.121 = 34.845 \text{ VAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{40.600^2 + 34.845^2} = 53.503 \text{ VA}$$

$$S_T = \sqrt{3} V_c I_L \Rightarrow I_L = \frac{S_T}{\sqrt{3} V_c} = \frac{53.503}{\sqrt{3} \cdot 400} = 77 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{40.600}{53.503} = 0,76$$

a) Potencia instalada: 40,6 KW; FP = 0,76

b) Calibre de los fusibles: 100 A

d) Calculamos ahora la batería de condensadores:

$$Q_C = P_T (\operatorname{tg} \varphi_T - \operatorname{tg} \varphi_T') = 40.600 \cdot (\operatorname{tg} 40,54^\circ - \operatorname{tg} 18,19^\circ) = 21.384 \text{ VAR.}$$

$$\varphi_T = \arccos 0,76 = 40,54^\circ$$

$$\varphi_T' = \arccos 0,95 = 18,19^\circ$$

La potencia de cada una de las fases de la batería de condensadores es la tercera parte de la total:

$$Q_C' = 21.384/3 = 7.128 \text{ VAR}$$

$$I_{fC} = \frac{Q_C'}{V_c} = \frac{7.128}{400} = 18 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_c}{I_{fC}} = \frac{400}{18} = 22 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 22} = 145 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

Características de la batería trifásica de condensadores en Δ:

21,4 KVAR a 400 V; condensadores de $145 \mu\text{F}$, 400 V.

(Consultando en un catálogo de baterías automáticas podríamos elegir una con tres escalones de: 5 KVAR; 7,5 KVAR; 10 KVAR)

e) Para calcular el calibre de los fusibles de los condensadores tenemos en cuenta la corriente de línea por la batería y que es recomendable sobredimensionar su calibre en 1,6 veces para evitar la fusión intempestiva de los mismos.

$$I_{LC} = \sqrt{3} I_{fC} = \sqrt{3} \cdot 18 = 31 \text{ A}$$

$$1,6 \cdot 31 = 50 \text{ A} \Rightarrow (63 \text{ A})$$

f) Intensidad con la batería de condensadores conectada:

$$P_T = \sqrt{3} V_c I_T' \cos \varphi_T' \Rightarrow I_T' = \dots = \dots = 62 \text{ A}$$

c) Sección de los conductores de la línea general: 25 mm² (para este cálculo sólo se ha tenido en cuenta la $I_{\max. \text{ adm.}}$ por los conductores una vez mejorado el FP).

15.9 Caída de tensión en las líneas trifásicas de C.A.

Al igual que ocurría en las líneas monofásicas, en las líneas trifásicas aparece una caída de tensión en cada uno de los conductores de línea igual a: ($\Delta V_s = R_L I_L \cos \varphi$). Esta tensión se restará a la tensión simple. La caída de tensión que

aparecerá entré fases será $\sqrt{3}$ mayor que la simple ($\Delta V_c = \sqrt{3} \Delta V_s$), resultando:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot R_L \cdot I_L \cos\phi$$

ΔV = Caída de tensión compuesta (V)

R_L = Resistencia de la línea (Ω)

I_L = Intensidad eficaz por la línea

$\cos\phi$ = FP de la carga

Como en otras ocasiones, la sección del conductor la deducimos a partir de la expresión de la resistencia de un conductor:

$$R_L = \rho \frac{L}{S},$$

que, al sustituirla en la expresión anterior, dará el valor de la sección:

$$S = \frac{\sqrt{3} \cdot \rho \cdot L \cdot I_L \cdot \cos\phi}{\Delta V}$$

S = Sección del conductor (mm^2)

ρ = Resistividad del conductor ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)

L = Longitud de la línea (m)

I_L = Intensidad eficaz por la línea (A)

$\cos\phi$ = FP de la carga

ΔV = caída de tensión compuesta (V)

Como la corriente permitida para tres conductores unipolares bajo tubo de 35 mm^2 es de 77 A , se cumple también esta condición.

Ejemplo: 15.12

La acometida de una factoría une el transformador de distribución con el cuadro general de distribución mediante una línea trifásica de 125 m (línea tripolar + neutro) instalada al aire de polietileno reticulado. La tensión entre fases en el primario del mismo es de 10.000 V y en secundario de 380 V a 50 Hz. En la Figura 15.24 aparece el esquema unifilar correspondiente a dicho cuadro.

Las previsiones de las cargas que se van a dar en los diferentes circuitos son las siguientes: (tomas) 10 KW, 380 V; (calefacción) 9 calefactores monofásicos de 2 KW, 380 V; (taller A) 20 KW, 380 V, $\cos\phi = 0,8$; (taller B) 30 KW, 380 V, $\cos\phi = 0,85$; (soldadura) 8 KW, 380 V, $\cos\phi = 0,9$; (depuradora) motor trifásico de 5 KW, 660 /380 V, $\cos\phi = 0,9$; (servicios auxiliares) 3 KW, $\cos\phi = 0,85$, 380 V; (alumbrado) (1) 30 lámparas de vapor de mercurio de 400 W, 220 V, $\cos\phi = 0,72$; (2) 60 lámparas fluorescentes de 40 W, 220 V, $\cos\phi = 0,9$; (3) 15 lámparas incandescentes de 60 W. Con estos datos: a) calcular la potencia a tener en cuenta para la elección del transformador de distribución si se tiene en cuenta un factor de simultaneidad de las cargas del 0,65; b) determinar la corriente prevista por el primario y por el secundario de dicho transformador; c) averiguar la sección de los conductores de la línea general si se prevé una caída de tensión máxima admisible del 5%.

Solución: a) Calculamos primero todas las potencias:

Ejemplo: 15.11

La línea general que alimenta al pequeño taller del ejemplo 15.10 posee una longitud de 150 m. ¿Cuál será la sección más recomendable si se pide que la caída de tensión en la línea no supere el 2% de la de alimentación?

Solución: Primero calculamos la caída de tensión en voltios:

$$\Delta V = \frac{400}{100} \cdot 2\% = 8 \text{ V}$$

Ahora calculamos la sección teniendo en cuenta la corriente con el factor de potencia mejorado ($I_L = 62 \text{ A}$, $\cos\phi = 0,95$).

$$S = \frac{\sqrt{3} \rho L I_L \cos\phi}{\Delta V} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,017 \cdot 150 \cdot 62 \cdot 0,95}{8} = 32,5 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 35 mm^2 .

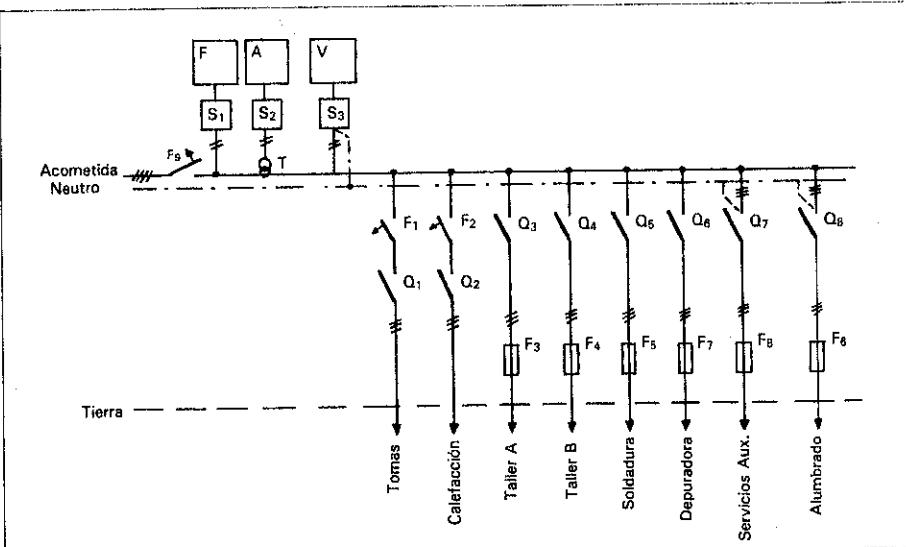


Figura 15.24

(Tomas) $P = 10 \text{ KW}$, $Q = 0 \text{ VAR}$

(Calefacción) $P = 9 \cdot 2 = 18 \text{ KW}$, $Q = 0 \text{ VAR}$

(Taller A) $P = 20 \text{ KW}$, $Q = P \operatorname{tg}\phi = 20 \cdot 0,75 = 15 \text{ KVAR}$

(Taller B) $P = 30 \text{ KW}$, $Q = \dots = 18,6 \text{ KVAR}$

(Soldadura) $P = 8 \text{ KW}$, $Q = \dots = 3,87 \text{ KVAR}$

Depuradora) $P = 5 \text{ KW}$, $Q = \dots = 2,42 \text{ KVAR}$

(Servicios auxiliares) $P = 3 \text{ KW}$, $Q = \dots = 1,86 \text{ KVAR}$

(Alumbrado) (1) $P = 30 \cdot 0,4 = 12 \text{ KW}$, $Q = \dots = 11,57 \text{ KVAR}$

(2) $P = 60 \cdot 0,04 = 2,4 \text{ KW}$, $Q = \dots = 1,15 \text{ KVAR}$

(3) $P = 15 \cdot 0,06 = 0,9 \text{ KW}$, $Q = \dots = 0 \text{ KVAR}$

$$P_T = \sum P = 109,3 \text{ KW}$$

$$Q_T = \sum Q = 54,47 \text{ KVAR}$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} = \sqrt{109,3^2 + 54,47^2} = 122,12 \text{ KVA}$$

$$\cos \varphi_T = \frac{P_T}{S_T} = \frac{109,3}{122,12} = 0,9$$

Para calcular la potencia nominal del transformador tenemos que tener en cuenta el factor de simultaneidad de las cargas. ¿Qué nos indica este factor?

En cualquier instalación eléctrica siempre hay una diferencia entre la suma de la potencia instalada y la potencia que se prevé se va a utilizar de una forma simultánea. Hay que pensar que no siempre se van a poner en funcionamiento todos los receptores de la instalación a la vez; por eso conviene realizar un estudio previo de la instalación para averiguar el porcentaje de cargas que se van a utilizar simultáneamente. De esta forma, se dimensionan las instalaciones en función de la potencia máxima que realmente se va utilizar, consiguiendo con ello un ahorro considerable en el aparellaje eléctrico a utilizar.

En nuestro caso nos indican un factor de simultaneidad de 0,65, que nos indica que se prevé una utilización simultánea de las cargas del 65 % de toda la potencia instalada.

$$S_{\text{transformador}} = 122,2 \cdot 0,65 = 79 \text{ KVA}$$

b) Ahora calculamos la corriente por el primario y por el secundario:

$$I_{L \text{ secun. del transf.}} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{c \text{ secun.}}} = \frac{79.000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 120 \text{ A}$$

Para calcular la corriente por el primario del transformador aplicamos la misma expresión, pero teniendo en cuenta que la potencia aparente se mantiene igual y que la tensión en el primario es de 10 KV.

$$I_{L \text{ prim.. del transf.}} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{c \text{ prim.}}} = \frac{79.000}{\sqrt{3} \cdot 10.000} = 4,56 \text{ A}$$

c) Calculamos ahora la sección de la línea

$$\Delta V = \frac{380}{100} \cdot 5 \% = 19 \text{ V}$$

$$S = \frac{\sqrt{3} \rho L I_L \cos \varphi}{\Delta V} =$$

$$\frac{\sqrt{3} \cdot 0,017 \cdot 125 \cdot 120 \cdot 0,9}{19} = 20,9 \text{ mm}^2$$

La sección comercial que le corresponde es de 25 mm².

Consultando en la Tabla 4.2, la intensidad máxima admisible para un cable de 25 mm² 3x XLPE (cables multiconductores al aire libre) es de 116 A. La solución será seleccionar una sección superior = 35 mm² que admite una intensidad de 144 A.

Actividades

1. Mediante un sencillo montaje vamos a comprobar experimentalmente las relaciones existentes entre las corrientes de línea y de fase, así como la validez de las expresiones generales de potencia trifásica.

Consigue tres lámparas incandescentes de 60 W a 230 V y conéctalas en triángulo a una red trifásica de 230 V entre fases. Conecta un amperímetro en una de las líneas (A_L) y otro en una de las lámparas (A_f) con el objeto de medir la intensidad de línea y de fase respectivamente. Conecta también un voltímetro entre fases para comprobar el valor de la tensión compuesta (Figura 15.25).

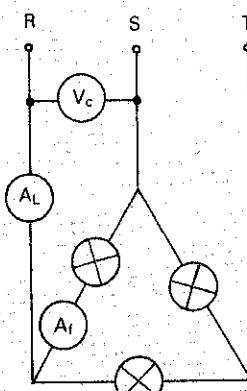


Figura 15.25

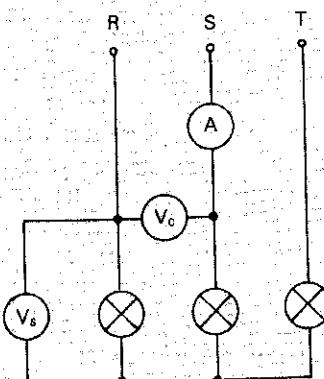


Figura 15.26

Con los datos obtenidos comprueba si:

$$A_L/A_f = \dots = \sqrt{3}$$

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \phi = \dots = 3 \cdot 60 \text{ W} = 3 V_s I_f \cos \phi$$

(para las lámparas incandescentes se toma un $\cos \phi = 1$.)

Ahora consigue tres lámparas incandescentes de 60 W a 127 V y conéctalas en estrella a una red trifásica de 220 V entre fases. Conecta un voltímetro entre las fases (V_c) y otro entre los bornes de una de las lámparas (V_s) con el objeto de medir la tensión compuesta y simple, respectivamente. Conecta también un amperímetro (A) en una de las líneas para comprobar el valor de la corriente de línea y de fase (Figura 15.26).

Con los datos obtenidos, comprueba si:

$$V_c / V_s = \dots = \sqrt{3}$$

$$P = \sqrt{3} V_c I_L \cos \phi = \dots = 3 \cdot 60 \text{ W} = 3 V_s I_f \cos \phi$$

Desconecta una de las lámparas. ¿Qué ocurre? ¿y si desconectamos dos?

¿Ocurriría lo mismo si conectásemos el neutro al punto común de la estrella?

2. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) ¿Qué ventajas presenta el alternador conectado en estrella frente al conectado en triángulo?
 - Presenta un mejor rendimiento
 - Disponibilidad del conductor neutro y posibilidad de puesta a tierra del mismo
 - Reduce considerablemente la distorsión en las tensiones de fase
- 2) En una carga trifásica conectada en triángulo:
 - La tensión de fase es igual que la de línea
 - La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea
 - La corriente de línea es igual que la de fase
- 3) En un cargo conectada en estrella:
 - La tensión de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea
 - La corriente de fase es raíz de tres veces inferior a la de línea
 - La corriente de fase es igual que la de línea
- 4) ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de fase de una alternador?
 - 30°
 - 90°
 - 120°
- 5) ¿Qué desfase aparece entre las tensiones de línea y de fase que proporciona un alternador conectado en estrella?
 - 30°
 - 90°
 - 120°
- 6) En un sistema trifásico con carga equilibrada se mide una intensidad en la línea de 30 A con un factor de potencia de 0,75. Si la tensión entre fases es 230 V, averiguar las potencias de la carga.
- 7) En un sistema trifásico con carga equilibrada a tres hilos se mide una potencia en la línea de 36 KW, una intensidad de 97,4 A y una tensión de 225 V. Averiguar el factor de potencia de la carga.
- 8) Una instalación industrial de 50 KW, con un factor de potencia de 0,65, se alimenta a través de un transformador trifásico con una tensión en el primario entre fases de 24 KV y de 400 V en el secundario. Averiguar:
 - la potencia nominal del transformador en KVA, así como la corriente por el primario y el secundario;
 - nuevas características del transformador si se corrige el FP de la instalación a 0,98 mediante una batería automática de condensadores conectada en el lado de baja tensión.
- 9) Un aparato de calefacción trifásico consta de tres resistencias de $10\ \Omega$ conectadas en estrella. Determinar la potencia que desarrollarán cuando se les aplique 230 V entre fases, así como la corriente de fase y de línea.
- 10) ¿Y si conectamos en triángulo las mismas resistencias que en el ejercicio anterior?
- 11) Un motor trifásico de 3.990 W, $\cos\varphi = 0,65$ se conecta a una red de 380 V, 50 Hz. Se trata de averiguar la corriente de línea y de cada fase del motor cuando está conectado en triángulo, así como su potencia reactiva y aparente. Si a cada una de las fases del motor se la puede considerar como una inductancia en serie con una resistencia óhmica, determinar los valores de las mismas?
- 12) Se conectan en triángulo tres bobinas iguales de $16\ \Omega$ de resistencia óhmica y $0,2\ H$ de coeficiente de autoinducción cada una. Si se conectan a un sistema trifásico de 240 V entre fases y 50 Hz, determinar: a) corriente por cada fase y por la línea; b) la potencia activa y el FP de la carga trifásica.
- 13) Un motor trifásico conectado a 400 V consume 56 A. Su potencia es de 29,4 KW. Determinar el factor de potencia, potencia reactiva y aparente.
- 14) Una red trifásica alimenta tres motores monofásicos de inducción de 5 CV, $\cos\varphi = 0,78$, 220 V cada uno, conectados entre cada fase y el neutro. Determinar la corriente por la línea y por el neutro, así como la potencia reactiva que deberá poseer la batería de condensadores para corregir el FP a 0,9.
- 15) Una empresa demanda una potencia de 700 KVA a 10 KV en corriente alterna trifásica. Las lecturas del consumo en dos meses son para el contador de activa de 205.000 KWh y para el de reactiva de 150.000 KVARh. Calcular: a) el FP medio en dicho período de facturación; b) intensidad por la línea; c) característica de batería de condensadores conectados en estrella para mejorar el FP hasta 0,93; d) porcentaje de reducción de la corriente de línea al conectar la batería de condensadores.
- 16) Una línea trifásica con neutro alimenta la instalación eléctrica de una nave de industria pesada comercial. Las cargas, que se conectan de una forma equilibrada son las siguientes: (1) motor trifásico de 50 KW, 240 V, $\cos\varphi = 0,8$; (2) motor trifásico de 40 KW, 240 V, $\cos\varphi = 0,85$; (3) 375 lámparas incandescentes de 40 W, 240 V; (4) 250 lámparas fluorescentes de 40 W, $\cos\varphi = 0,9$. Determinar las potencias, el FP y la intensidad de línea de el conjunto de la instalación.
- 17) En la Figura 15.27 se muestra el esquema general de distribución de una instalación industrial.

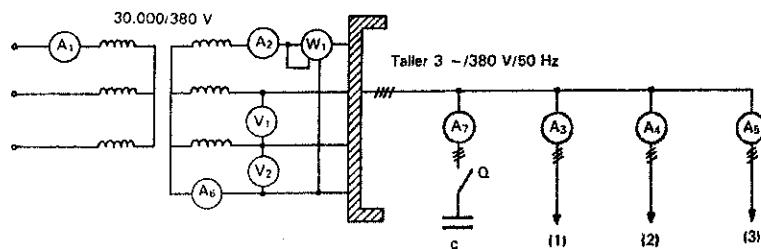


Figura 15.27

Seguidamente se indican las cargas que alimentan cada uno de los circuitos: (1) motor trifásico de 8.660 W, 380 V/220 V, $\cos \phi = 0,75$; (2) 30 lámparas de vapor de mercurio de 250 W, 380 V, $\cos \phi = 0,6$ cada una; (3) 90 lámparas incandescentes de 60 W, 220 V cada una. Con estos datos averiguar: a) lectura de los aparatos de medida con el interruptor Q de la batería de condensadores abierto; b) características de la batería de condensadores conectados en triángulo para mejorar el FP a 0,95; c) lectura de los aparatos de medida con el interruptor cerrado (condensadores conectados).

- 18) La línea general de alimentación en las instalaciones eléctricas de edificios destinados a viviendas, es la línea que une la Caja General de Protección con la centralización de contadores que alimenta. Según el REBT la caída de tensión máxima que se admite para estas líneas es del

0,5% para contadores totalmente concentrados. Según estos datos, calcular la sección de los conductores de la línea general de alimentación de un edificio de viviendas en el que se prevé una demanda de potencia de 100 KW con un $\cos \phi = 0,9$. La línea es trifásica a 400 V entre fases y con una longitud de 15 m; consta de 3 cables unipolares de cobre más el neutro de XLPE instalados bajo tubo.

- 19) Para la acometida de una pequeña factoría se ha instalado una línea trifásica de 200 m de longitud y con una sección de 35 mm². La tensión entre fases es de 500 V y la potencia instalada es de 50 KW con un $\cos \phi = 0,7$. Determinar el valor porcentual de la caída de tensión que produce esta línea, así como la perdida de potencia. ¿Cuánto se reducirá la pérdida de potencia en la línea si se corrige el FP a 0,95?

Medidas Eléctricas

16

Introducción

Algunos de los aparatos de medida más comunes, como voltímetros, amperímetros, vatímetros ya son conocidos por todos nosotros, puesto que han sido tratados en temas anteriores. En este tema estudiaremos las técnicas más comunes para realizar las medidas eléctricas así como el funcionamiento básico de los aparatos de medida.

La medición de las diferentes magnitudes eléctricas de una instalación o aparato eléctrico nos ayudan a comprobar su buen funcionamiento, detectar y reparar averías, estudiar con detenimiento ciertos procesos que nos ayudan a diseñar instalaciones y dispositivos eléctricos, así como a evaluar su comportamiento ante eventuales cambios.

Contenido

- *Errores de medición y precisión de un aparato de medida.*
- *Sistemas de medida.*
- *Medida de intensidad y ampliación del alcance de un amperímetro.*
- *Medida de tensión y ampliación del alcance de un voltímetro.*
- *Transformadores de medida.*
- *El polímetro.*
- *Medida de potencia activa monofásica y trifásica.*
- *Medida de potencia reactiva.*
- *Medida de energía.*
- *Medida de frecuencia y factor de potencia.*
- *Medida de resistencias.*
- *El osciloscopio.*
- *Sistemas avanzados de medida.*

Objetivos

- *Describir las características más relevantes (tipos de errores, precisión, posición de trabajo, etc), la tipología, clases y procedimientos de uso de los instrumentos de medida utilizados en los circuitos electrotécnicos básicos.*
- *Realizar con precisión y seguridad las medidas de las magnitudes eléctricas fundamentales (tensión, intensidad, resistencia, potencia, frecuencia, etc.), utilizando, en cada caso, el instrumento (polímetro, vatímetro, osciloscopio, etc.) y los elementos auxiliares apropiados.*

16.1 Errores en la medida

Siempre que se vaya a tomar una medida eléctrica nunca obtendremos el valor exacto de la misma. Esto es así porque siempre se cometen errores, como por ejemplo, que el aparato de medida no esté correctamente calibrado, por que no se haya utilizado el método correcto, por falta de habilidad del operador que toma la medida, etc.

Dado que se cometen errores en las medidas eléctricas, convendrá tener en cuenta una serie de aspectos a la hora de evaluar los resultados.

16.1.1 Errores absolutos y relativos

El error absoluto que se comete en una medida es la diferencia entre el valor leído (V_L) por el aparato de medida y el valor real (V_R) de la misma.

$$E_{ab} = V_L - V_R$$

Para obtener el valor más aproximado al real utilizaremos un aparato de medida patrón de laboratorio.

Ejemplo: 16.1

Para comprobar el error que comete un voltímetro se toma una medida de 100 V y luego se comprueba con un voltímetro de gran precisión la misma medida, dando como resultado 98 V. Determinar el error absoluto cometido por el voltímetro.

$$\text{Solución: } E_{ab} = V_L - V_R = 100 - 98 = 2V$$

Dado que el conocimiento del error absoluto no nos da una idea clara del error cometido, utilizaremos para ello el error relativo, que nos indica la relación porcentual entre el error absoluto y el valor real:

$$Er \% = \frac{E_{ab}}{V_R} \cdot 100$$

Ejemplo: 16.2

Averiguar el error relativo cometido en la medida del ejemplo 16.1.

Solución:

$$E_r \% = \frac{E_{ab}}{V_R} = \frac{2}{98} \cdot 100 = 2\%$$

16.2 Precisión de un aparato de medida

Cuanto más preciso es un aparato de medida más nos acercaremos a la medida real. Para definir lo preciso que es un

aparato de medida se utiliza el concepto de **clase**, que es el error absoluto máximo que puede cometer un aparato de medida referido al valor máximo de la escala ($V_{máx}$) de medida.

$$\text{Clase} = \frac{E_{ab\ máx}}{V_{máx}} \cdot 100$$

La clase suele aparecer inscrita en el aparato de medida o en la información técnica que proporciona el fabricante del mismo. En la práctica sólo se fabrican aparatos de medida de las siguientes clases de precisión: 0,1, 0,2, 0,5, 1, 1,5, 2,5, 5. Dependiendo del tipo de uso a que vayamos a destinar el aparato de medida, así seleccionaremos la clase más adecuada. Así, por ejemplo si necesitamos una gran precisión de medida para realizar ensayos de laboratorio utilizaremos aparatos de clase 0,1, 0,2 o 0,5.

Ejemplo: 16.3

Para verificar la precisión de un amperímetro se le somete a una contrastación con un amperímetro patrón. De todos los valores obtenidos se observa que el mayor de los errores absolutos cometidos es de 0,5 A. ¿Cuál será la clase de este amperímetro si el valor máximo de su escala es de 50 A?

Solución:

$$\text{Clase} = \frac{E_{ab\ máx}}{V_{máx}} \cdot 100 = \frac{0,5}{50} \cdot 100 = 1$$

Ejemplo: 16.4

Calcular el error máximo que puede cometer un voltímetro de clase 1 si el valor máximo que alcanza su escala es de 300 V.

Solución:

$$E_{ab\ máx} = \frac{\text{clase} \cdot V_{máx}}{100} = \frac{1 \cdot 300}{100} = 3V$$

16.3 Normas generales para la toma de medidas eléctricas

Antes de realizar la medida de una magnitud eléctrica habrá que tener en cuenta una serie de aspectos previos que nos garanticen el mejor resultado. Seguidamente exponemos algunas de estas consideraciones:

- Como no todos los aparatos de medida funcionan igual en C.A. que en C.C. habrá que seleccionar el tipo de corriente adecuado en cada caso.
- El campo de medida de una aparato de medida nos indica los valores entre los cuales mide el aparato con exactitud. Antes de realizar una medida habrá que prever con aproximación el orden de magnitud de la medida y con ello seleccionar el aparato más adecuado. Por ejemplo, supongamos que deseamos medir la tensión de una pila.

Para ello, seleccionaremos un voltímetro de C.C. con un campo de medida de 0-5 V. Si utilizásemos un voltímetro con un campo de medida de 0-300 V, probablemente no hubiéramos apreciado la medida en la escala.

- Utilizaremos el aparato de medida de la clase adecuada según el orden de precisión que requiera la medida. Hay que tener en cuenta que cuanto más preciso sea el aparato más elevada resultará su adquisición. Así, por ejemplo, no merecerá en ningún caso utilizar un aparato de clase 0,1 para medir la tensión en una línea de suministro eléctrico.
- Hay que procurar evitar las prisas y anotar los valores obtenidos de la medida de forma ordenada en el formulario previamente preparado.
- Conviene controlar periódicamente los instrumentos de medida, comprobando si mantienen su nivel de precisión.

16.4 Instrumentos de medida analógicos y digitales

Los instrumentos de medida analógicos son aquéllos que presentan la medida mediante una aguja móvil que se desplaza por una escala graduada (Figura 16.1 a). En los instrumentos de medida digitales el resultado de la medida se puede leer como una cifra numérica (dígitos) en una pantalla (Figura 16.2 b).

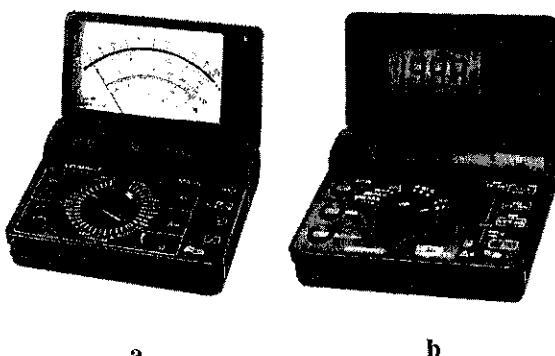


Figura 16.1. Instrumento de medida: a) analógico, b) digital.

Los instrumentos de medida analógicos son los que más se han venido utilizando hasta ahora, aunque el abaratamiento de los circuitos integrados está haciendo que éstos queden cada vez más relegados por los digitales.

El principio general de funcionamiento de los aparatos analógicos es el siguiente (Figura 16.2): Por lo general, la corriente a medir se hace circular por una bobina que puede girar sobre un eje. Esta bobina se introduce en el seno de un campo magnético, que puede ser generado por un imán. La corriente a medir genera en la bobina móvil otro campo magnético que, al interactuar con el campo fijo del imán, produce una fuerza que tiende a desplazar a la bobina móvil en un determinado sentido. Solidaria a la bobina móvil se fija la aguja medidora sobre una escala graduada. Además se incluye un muelle, generalmente de forma circular, que se opone al movimiento de la aguja. La fuerza antagonista que desarrolla el muelle es proporcional a su estiramiento. Por otro lado, la fuerza que hace girar la aguja es proporcional a la corriente a

medir. Cuando los pares de fuerzas de la bobina y del muelle antagonista se igualan se obtiene la medida leyendo el desplazamiento de la aguja sobre la escala graduada.

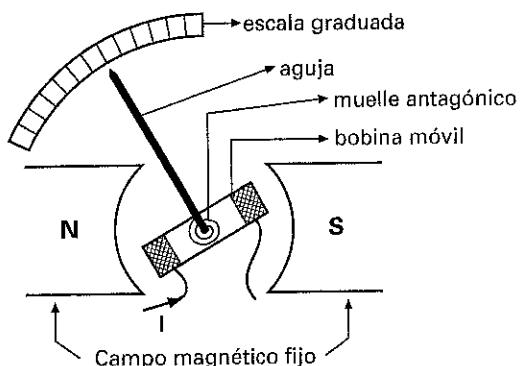


Figura 16.2. Instrumento de medida de bobina móvil.

En los instrumentos digitales no existe ningún elemento mecánico. La medida se realiza gracias a complejos circuitos electrónicos en forma de circuitos integrados. El resultado de la medida se presenta en una pantalla o display en forma de cifra numérica o dígitos.

Los instrumentos de medida digitales presentan varias ventajas que les hace ideales para la mayoría de las aplicaciones. Por lo general, son más precisos que los analógicos. La lectura de la medida es mucho más cómoda, ya que leemos directamente la cifra en la pantalla sin tener que interpretar una escala graduada. Esto los hace ideales en su uso como aparatos portátiles, donde es muy importante tomar una lectura rápida y precisa de la medida. Son muy robustos, aguantan fuertes impactos y vibraciones sin alteración de su funcionamiento. Esto último se debe a que en su estructura no existen elementos móviles.

Los instrumentos de medida analógicos tienden a ser sustituidos cada vez más por los digitales, sobre todo en los aparatos de medida portátiles. Sin embargo, en los aparatos de medida que se insertan en los cuadros (aparatos de medida de cuadro) de control, mando y distribución de las instalaciones eléctricas, se siguen empleando los instrumentos analógicos. Hay que pensar que los aparatos de cuadro suelen estar dispuestos para que un operario con una visualización rápida revise el estado de todas las magnitudes eléctricas. Siempre es más visual, fotográfico y rápido de interpretar la situación en una determinada posición de una aguja sobre una escala de una aparato de medida analógico que la interpretación de una cifra numérica en uno digital.

16.5 Posición de trabajo de los aparatos de medida

Los instrumentos de medida analógicos de cuadro no se pueden colocar en cualquier posición, ya que esto afecta al desplazamiento de la aguja. Para evitar errores en las medidas los fabricantes indican la posición a la que deben colocarse sus aparatos de medida (Figura 16.3 a). Para ello se utilizan los símbolos de la Figura 16.3 b.

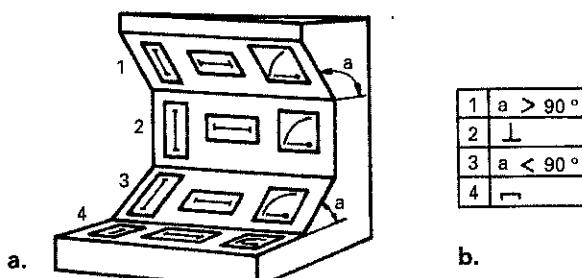


Figura 16.3. Posición de trabajo de los aparatos de medida.

16.6 Escalas de un instrumento de medida analógico

Las escalas pueden ser uniformes (las divisiones siempre tienen la misma anchura y representan el mismo valor sobre la escala) o no uniformes. Lo más importante en el momento de interpretar una medida en una escala graduada es conocer la constante del instrumento, es decir qué medida representa cada división de la escala. Para obtener la constante del instrumento se divide el valor máximo del fondo de escala entre el número total de divisiones de la escala.

Ejemplo: 16.5

Determinar la constante de la escala del voltímetro de la Figura 16.4. ¿Cuál será el resultado de la medida si la aguja se sitúa sobre la sexta división partiendo del cero?

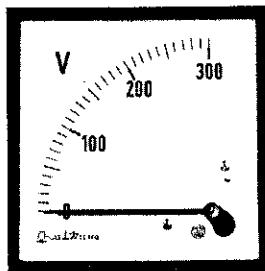


Figura 16.4

Solución: El campo de indicación del voltímetro es de 0 V a 300 V y la escala posee 30 divisiones. La constante del instrumento es, por tanto:

$$K = \frac{300}{30} = 10 \text{ V / división}$$

La medida resultante cuando la aguja recorre 6 divisiones es: $6 \cdot 10 = 60 \text{ V}$

16.7 Sistemas de medida

Existen una amplia variedad de instrumentos o sistemas de medida que mediante un determinado mecanismo consiguen

tomar la medida de la magnitud eléctrica deseada. Vamos a estudiar los más básicos y sus características fundamentales, así como su aplicación para la construcción de aparatos de medida.

El tipo de sistema de medida utilizado por un aparato de medida se representa por un símbolo, que suele venir inscrito de forma visible en la pantalla del mismo. Antes de entrar en más detalles, en la Tabla 16.1 se expone un resumen con los sistemas de medida y su símbolo correspondiente y en la Tabla 16.2 los símbolos que más comúnmente se utilizan para describir las características de los aparatos de medida.

Sistema de medida	Símbolo	Sistema de medida	Símbolo
Bobina móvil	Ⓐ	Bobina móvil con rectificador	→
Bobina móvil con convertidor incorporado	Ⓑ	Hierro móvil	Ⓜ
Electrodinámico	⊕	Ferrodinámico	Ⓜ
Inducción	●	Conciencímetro de inducción	Ⓜ
Bimetálico	Ⓑ	Láminas vibrantes	⚡

Tabla 16.1. Símbolos de los instrumentos de medida.

Denominación	Símbolo	Denominación	Símbolo
Apantallado electrostático	○	Corriente trifásica, medida sólo con un sistema de medida	~~~
Sistema de medida astático	ast	Corriente trifásica, medida con dos sistemas de medida	~~~
Corriente continua	—	Posición cero de la aguja	○
Corriente alterna	~	Marca de tensión de ensayo de 500 V-. Cifra dentro de la estrella indica la tensión de ensayo en KV-.	★
Corriente continua y alterna	~~	Atención, téngase presente las instrucciones de manejo!	⚠

Tabla 16.2. Símbolos utilizados para describir las características de los aparatos de medida.

16.7.1 Bobina móvil

Este sistema de medida, también conocido por el nombre de cuadro móvil, es idéntico al utilizado como ejemplo para explicar el principio general de funcionamiento de los instrumentos de medida analógicos (véase Figura 16.2).

El sistema está formado por un imán permanente fijo. Dentro del campo magnético formado por él mismo se coloca la bobina móvil a la que se fija la aguja indicadora. Con el fin de asegurar que ningún campo magnético exterior altere el funcionamiento del aparato de medida, se coloca una carcasa magnética a todo el conjunto.

En el eje de giro de la bobina móvil se colocan dos muelles en espiral que además de producir la fuerza antagónica sirven de camino de entrada y salida a la corriente de la bobina. De esta manera, la corriente que se mide fluye por la bobina, que al estar bajo la acción de un campo magnético, desarrolla una fuerza proporcional a dicha corriente, que tiende a desplazar a la aguja hasta que se alcanza el punto de equilibrio entre dicha fuerza y la antagónica desarrollada por los muelles.

Es importante tener en cuenta que si se invierte el sentido de la corriente eléctrica también se invertirá el sentido de la fuerza motriz que desplaza la aguja. Es por eso que este sistema de medida sólo se puede utilizar para C.C. y para una polaridad determinada que deberá venir indicada claramente en las bornas de conexión del aparato.

Por último, indicar que, dado que la corriente se introduce a la bobina por los muelles, no es posible realizar medidas directas de grandes corrientes, ya que éstos se puede sobrecalentar y dilatar, produciendo errores en la medida. Los valores máximos que se miden son del orden de 0,1 A. Como ya estudiaremos más adelante, se puede ampliar el alcance de medida de estos aparatos mediante sistemas que derivan parte de la corriente por shunts.

El empleo de este sistema es muy amplio y se utiliza para la fabricación de voltímetros, milivoltímetros, amperímetros, miliamperímetros, microamperímetros, óhmétros, etc.

16.7.2 Bobina móvil con rectificador

El puente rectificador es un dispositivo construido a base de diodos que convierte la C.A. en C.C. Para poder utilizar el sistema de medida de bobina móvil en C.A. se conecta un puente rectificador (Figura 16.5) entre la magnitud a medir y el instrumento de medida. Para la calibración de este aparato se utiliza corriente alterna sinusoidal y su escala nos indica valores eficaces, por lo que si midiésemos una corriente alterna no sinusoidal se producirían errores considerables.

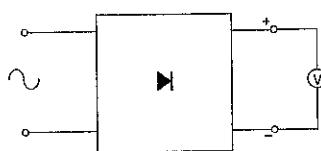


Figura 16.5. Voltímetro de bobina móvil con rectificador.

16.7.3 Bobina móvil con convertidor incorporado

Este sistema consta de una aparato de bobina móvil al que se le incorpora un convertidor de tipo electrónico. Así, por ejemplo, si se incorpora un convertidor de frecuencia a C.C. de función lineal es posible medir frecuencias (frecuencímetro de aguja), y si se le incorpora un convertidor de ángulo de fase a C.C. de función lineal es posible medir el factor de potencia de una instalación (fasímetros electrónicos).

Los sistemas de medida de bobina móvil, al que se les incorpora otros elementos, como son: rectificador, convertidores,

ampliaciones del alcance de diferentes medidas, etc., son ideales para la construcción de polímetros (aparato de medida múltiple que sirve para medir diferentes magnitudes eléctricas con diferentes campos de medida tanto en C.C. como en C.A.).

16.7.4 Hierro móvil

Consta de una bobina fija por la que se hace pasar la corriente que se va a medir (Figura 16.6). En el interior de la misma se fija un lámina de hierro dulce. Enfrentada a esta lámina se sitúa otra lámina de hierro de dulce y se une a un eje giratorio y a la aguja indicadora. Además, como en el sistema de medida de bobina móvil, se incluye un muelle antagonista.

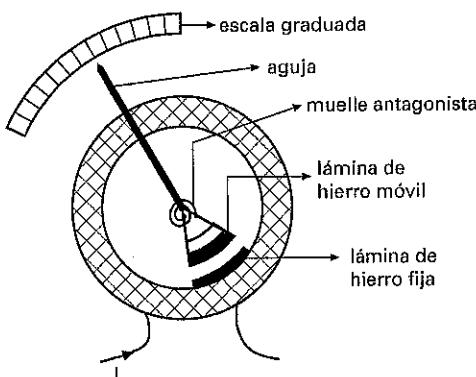


Figura 16.6. Instrumento de hierro móvil.

Al circular la corriente que se mide por la bobina se produce un campo magnético que magnetiza las dos láminas de hierro con la misma polaridad, por lo que aparece entre ellas una fuerza de repulsión que tiende a desplazar la aguja. La fuerza producida es proporcional a la corriente a medir y la posición de la aguja viene determinada por el equilibrio entre esta fuerza y la antagónica desarrollada por el muelle en su estiramiento.

La ventaja fundamental de este instrumento de medida es que sirve para medir tanto corriente continua como alterna. Hay que tener en cuenta que cuando la C.A. invierte el sentido de la corriente por la bobina, se invierte también el campo magnético que atraviesa las láminas de hierro; pero la polaridad relativa de las dos láminas siempre será igual, por lo que el efecto de repulsión se mantiene para cualquier tipo de corriente.

Debido a que la corriente entra directamente a la bobina fija, es posible hacer circular por ella grandes corrientes, pudiéndose hacer medidas directas con este sistema de medida de hasta más de 300 A. Si embargo su uso se ve restringido para frecuencias no superiores a los 100 Hz, ya que para altas frecuencias los efectos de histéresis pueden falsear la medida. En los casos en que sea necesario medidas de C.A. de frecuencias de hasta 10 KHz, se aconseja el uso de aparatos de bobina móvil con rectificador.

Dada la robustez y sencillez de estos sistemas de medida su empleo se dirige fundamentalmente a la construcción de amperímetros y voltímetro de C.A.

16.7.5 Electrodinámico

Consta de dos bobinas, una móvil, solidaria con el eje y la aguja indicadora, y otra fija, que envuelve a la primera (Figura 16.7). Al igual que en el sistema de bobina móvil, el sistema antagonista está formado por dos muelles en espiral que sirven también para conectar eléctricamente la bobina móvil.

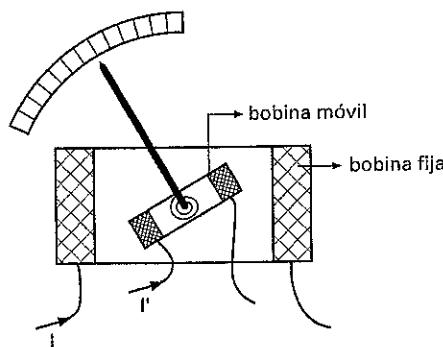


Figura 16.7. Instrumento electrodinámico.

El funcionamiento de este instrumento es similar al de bobina móvil, pero aquí el campo magnético fijo lo produce la bobina fija al ser atravesada por una de las corrientes a medir.

La mayor aplicación de este sistema de medida es como vatímetro. La bobina fija se utiliza como amperimétrica, conectándose en serie. La bobina móvil se utiliza como voltímetro y se conecta en paralelo. Utilizado para corriente continua, la fuerza motriz que desplaza a la aguja es resultado del producto de la tensión por la intensidad, calibrándose la escala en vatios. Utilizado para corriente alterna, la fuerza motriz depende del producto de la tensión por la intensidad por el cos φ, calibrándose también la escala en vatios.

La razón de que este sistema se pueda utilizar tanto para corriente continua como alterna está en el hecho de que, en el caso de C.A., la corriente cambia de sentido al mismo tiempo en las dos bobinas, por lo que la polaridad relativa del campo magnético desarrollado por ambas no cambia y, por tanto, la fuerza motriz siempre actúa en el mismo sentido. Conectando las dos bobinas en serie o en paralelo también se pueden utilizar como voltímetros y amperímetros.

16.7.6 Ferrodinámico

Este sistema de medida es muy similar al electrodinámico. La única diferencia estriba en que se le incorpora a cada una de las bobinas un núcleo de chapa magnética con el fin de eliminar los errores que pudieran producirse debido a campos magnéticos externos al aparato de medida.

16.7.7 Inducción

Este sistema de medida se utiliza fundamentalmente para realizar la medida de la energía en sistemas de C.A. (Figura 16.8). consta de dos bobinas con núcleo de chapa magnética.

Una hace las veces de amperimétrica y la otra de voltímetro. Dichas bobinas se disponen de tal manera que el campo magnético variable generado por ambas atraviese un disco giratorio de aluminio al que se incorpora un mecanismo registrador. Los campos variables de ambas bobinas generan en el disco de aluminio corrientes parásitas que, al interactuar con los campos magnéticos, producen una fuerza de impulsión que hace girar el disco. Esta fuerza de impulsión es proporcional a la potencia activa a medir. El sistema que desarrolla la fuerza antagonista de frenado lo produce un imán permanente colocado entre las dos superficies del disco. El número de vueltas que se producen resulta ser proporcional a la energía eléctrica. Gracias al mecanismo registrador, calibrado en KWh, podemos obtener una lectura de la energía eléctrica consumida.

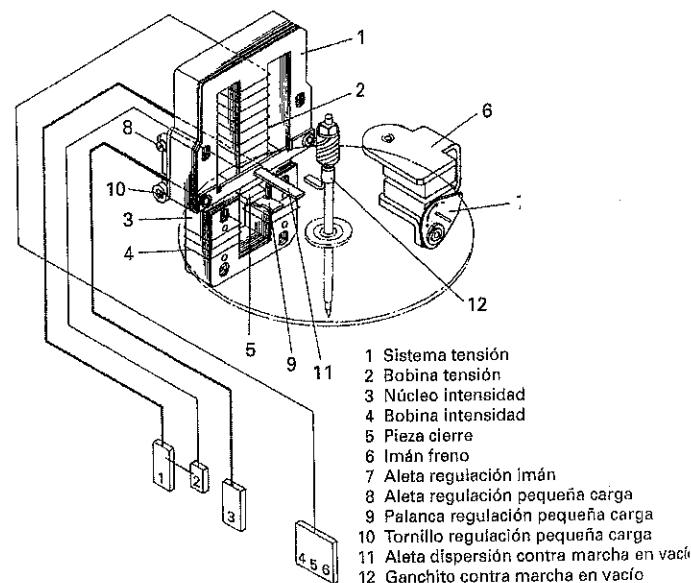


Figura 16.8. Instrumento de inducción.

16.7.8 Bimetálico

Este sistema está basado en la dilatación que se produce en una espiral bimetalica cuando es recorrida por una corriente eléctrica. Para compensar el efecto de la temperatura ambiente sobre el instrumento medidor se coloca otra espiral dispuesta en sentido contrario a la motriz. Este instrumento mide el valor medio de la corriente en C.C. y el eficaz en C.A. hasta 1.000 Hz. Son ideales para dar una lectura de los valores medios en aquellas instalaciones en los que existan grandes fluctuaciones, ya que el tiempo de respuesta (hasta que el bimetal alcanza su temperatura final) es alto, del orden de 10 minutos.

16.7.9 Láminas vibrantes

Estos aparatos se utilizan como frecuencímetros para C.A. Disponen de una bobina que se alimenta con la tensión a medir. El campo magnético alterno que genera la misma atraviesa una serie de láminas de diferentes características que se ponen a vibrar de acuerdo con la frecuencia. La medida se

obtiene cuando la frecuencia a medir hace vibrar una determinada lámina calibrada según una determinada frecuencia de resonancia.

16.8 Medida de intensidad

La medida de intensidad se realiza mediante el amperímetro. Se conecta en serie con el circuito cuya corriente se quiere medir, tal como se indica en la Figura 16.9. Es aconsejable que la resistencia interna del instrumento de medida (R_A) sea lo más baja posible. De esta forma, se evitan caídas considerables de tensión (V_A) en el amperímetro y consumos de potencia elevados.

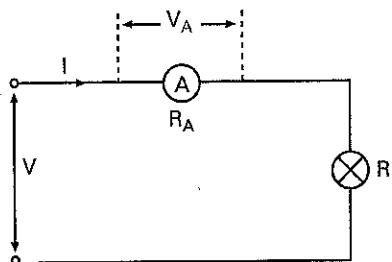


Figura 16.9. Medida de intensidad con amperímetro.

Para medidas de C.A. es indiferente la polaridad de conexión. Sin embargo, para C.C. hay que conectar el amperímetro según se indique en la polaridad del mismo, de otra manera la aguja tenderá a indicar en sentido contrario. Para aparatos de medida digitales no es tan importante esta consideración, puesto que son capaces de indicar lecturas negativas en su display.

Cuando la corriente a medir es muy elevada resulta difícil encontrar el aparato de medida adecuado para realizar una medida directa. En estos casos se recurre a sistemas de apoyo que consiguen ampliar el alcance de medida sin cambiar de amperímetro. Para corriente continua se emplean los shunts y para corriente alterna los transformadores de intensidad.

16.8.1 Ampliación del alcance de un amperímetro mediante shunt

Supongamos que disponemos de un amperímetro con un alcance de 50 A como máximo y que necesitamos incorporar un amperímetro de cuadro para la medida de la intensidad de corriente en un sistema de generación de energía solar fotovoltaica. La potencia instalada es de 6 KW y la tensión de alimentación es de 24 V en C.C. En este ejemplo, la corriente a medir sería del orden de:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{6.000}{24} = 250 \text{ A}$$

Para poder medir esta corriente con el amperímetro de 50 A emplearemos una resistencia shunt, como la mostrada en la Figura 16.10.

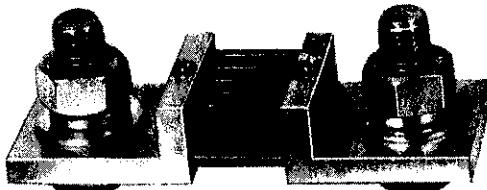


Figura 16.10. Resistencia shunt.

Este dispositivo consiste en conectar una resistencia en paralelo con el amperímetro que consiga desviar parte de la corriente que se quiere medir (véase Figura 16.11). En nuestro ejemplo, la resistencia shunt deberá desviar 200 A (I_S) para que por el amperímetro sólo circulen 50 A (I_A) cuando se quiera medir una corriente de 250 A (I).

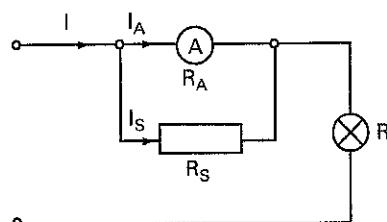


Figura 16.11. Esquema de conexión de un shunt.

Para poder calcular la resistencia que deberá poseer el shunt necesitamos conocer previamente la resistencia interna del amperímetro R_A . Como la resistencia R_S del shunt queda en paralelo con la del amperímetro, su caída de tensión es la misma, por lo que se cumple que:

$$R_A I_A = R_S I_S, \text{ de donde } R_S = \frac{R_A I_A}{I_S}$$

Ejemplo: 16.6

Teniendo en cuenta que el amperímetro de 50 A mencionado en la exposición anterior posee una resistencia interna de $0,1 \Omega$, calcular el valor de la resistencia del shunt para ampliar el alcance del aparato de medida hasta los 250 A.

Solución: La resistencia del shunt, es:

$$R_S = \frac{R_A I_A}{I_S} = \frac{0,1 \cdot 50}{200} = 0,025 \Omega$$

En este caso hemos conseguido aumentar el alcance del amperímetro en:

$$m = \frac{I}{I_A} = \frac{250}{50} = 5 \text{ veces}$$

Este dato habrá que tenerlo en cuenta a la hora de interpretar la lectura de la medida, ya que la constante de la escala del instrumento habrá que multiplicarla por 5.

Ejemplo: 16.7

Un amperímetro permite medir una corriente como máximo de 2 mA. Posee una escala fraccionada en 40 divisiones y una resistencia interna de 1 Ω. Se desea ampliar el alcance del aparato para poder realizar medidas hasta 2 A. Calcular la resistencia del shunt, así como la constante de la escala del aparato con y sin shunt. ¿Cuál será el resultado de la medida del amperímetro con shunt si lee en la escala 10 divisiones?

Solución:

El shunt debe desviar una corriente de:

$$I_S = I - I_A = 2 - 0,002 = 1,998 \text{ A}$$

La resistencia del shunt, es:

$$R_S = \frac{R_A I_A}{I_S} = \frac{1 \cdot 0,002}{1,998} = 0,001 \Omega$$

En este caso hemos conseguido aumentar el alcance del amperímetro en:

$$m = \frac{I}{I_A} = \frac{2}{0,002} = 1.000 \text{ veces.}$$

La constante de la escala sin shunt, es:

$$K = \frac{2 \text{ mA}}{40 \text{ div}} = 0,05 \text{ mA / div} = 50 \mu\text{A / div}$$

La constante del aparato con shunt, es:

$$K_S = \frac{2 \text{ A}}{40 \text{ div}} = 0,05 \text{ A / div} = 50 \text{ mA / div}$$

La medida para 10 divisiones, es: $10 \text{ div} \cdot 0,05 \text{ A / div} = 0,5 \text{ A}$

16.8.2 Ampliación del alcance de amperímetros mediante transformadores de intensidad

Cuando se desea ampliar el alcance de amperímetros en C.A. es más sencillo recurrir al empleo de transformadores de intensidad. Una de las características fundamentales de estos dispositivos es que solamente funcionan en C.A. De esta manera, se restringe el empleo del shunt para ampliar el alcance de amperímetros en C.C. y en amperímetros de pequeñas corrientes en C.A.

En la Figura 16.12 se ha conectado un transformador de intensidad en la línea con el objeto de medir la corriente elevada que fluye por la misma. El transformador de intensidad consta de dos circuitos: el primario se conecta en serie con la

línea donde se quiere medir la corriente y el secundario que se conecta entre los extremos del amperímetro. Vamos a estudiar ahora la aplicación práctica del transformador, dejando el estudio más detallado del mismo para el Capítulo 17 de esta obra de Electrotecnia.

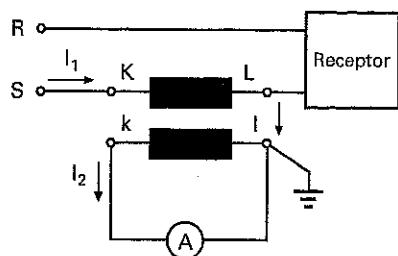


Figura 16.12. Esquema de conexión de un transformador de intensidad.

En la Figura 16.13 se muestran los símbolos más utilizados para el transformador de intensidad

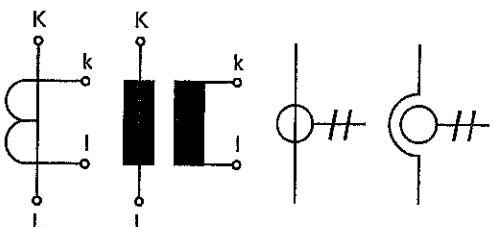


Figura 16.13. Símbolos eléctricos del transformador de intensidad.

El transformador de intensidad consigue que por el circuito secundario, donde se conecta el amperímetro, circule una corriente más reducida y siempre proporcional a la que fluye por el primario, conectado con el circuito a medir. De esta forma, se consigue reducir considerablemente la corriente por el amperímetro.

Por supuesto, será necesario conocer la proporción en la reducción de la corriente para poder posteriormente interpretar la medida en el amperímetro. Para ello, los fabricantes de transformadores nos proporcionan una característica conocida, como relación de transformación, que nos indica la relación entre la corriente por el primario I_1 y el secundario I_2 :

$$m = \frac{I_1}{I_2}$$

En la placa de característica de los transformadores de intensidad aparecen los valores de la intensidad nominal del primario y del secundario. Así, por ejemplo, la característica 100/5 A nos indica que cuando por el primario fluya una intensidad de 100 A, por el secundario conectado al amperímetro fluirán sólo 5 A. La intensidad por el secundario de los transformadores de intensidad suele ser 5 A para la mayoría de las aplicaciones. Por otro lado, se fabrican transformadores de las siguientes intensidades primarias: 5 A, 10 A, 15 A, 20 A, 25 A, 30 A, 40 A, 50 A, 60 A, 75 A, 100 A, 125 A, 150 A, 200 A, 250 A, 300 A, 400 A, 500 A, 600 A, 750 A, 800 A, 1.000 A, 1.200 A, 1.500 A, 2.000 A, 2.500 A, 3.000 A, 4.000 A, 5.000 A.

Ejemplo: 16.8

Se desea incorporar un equipo de medida de intensidad a una cuadro de distribución de unos pequeños almacenes. La potencia nominal de la instalación es de 100 KW con un factor de potencia de 0,85. El suministro de energía es trifásico a 380 V. Teniendo en cuenta que el amperímetro a utilizar posee un fondo de escala de 5 A, seleccionar el transformador de intensidad más adecuado, así como su relación de transformación. Suponiendo que el amperímetro posee una escala fraccionada en 20 divisiones ¿cuál será el resultado de la medida si se lee en la escala 15 divisiones?

Solución: Calculamos primero la intensidad nominal a medir por el primario del transformador de intensidad:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} V_L \cos \varphi} = \frac{100.000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,85} = 179 \text{ A}$$

Seleccionaremos para la medida un transformador de intensidad de relación: 200/5 A.

Su relación de transformación, es:

$$m = \frac{I_1}{I_2} = \frac{200}{5} = 40$$

La constante de la escala sin transformador, es:

$$K = \frac{5 \text{ A}}{20 \text{ div}} = 0,25 \text{ A / div}$$

La constante del aparato con transformador, es:

$$K_s = \frac{200 \text{ A}}{20 \text{ div}} = 10 \text{ A / div}$$

La medida para 15 divisiones, es:

$$15 \text{ div} \cdot 10 \text{ A / div} = 150 \text{ A}$$

En la práctica se calibran las escalas de los amperímetros para que puedan dar una lectura directa en asociación con un determinado transformador de intensidad.

Las ventajas que presentan los transformadores de intensidad son las siguientes:

- Permiten medir grandes corrientes con aparatos de medida de bajo alcance. Además, se pueden realizar medidas de corriente en líneas de alta tensión con aparatos de baja tensión, mucho más sencillos y económicos.
- Es posible situar los aparatos de medida separados de las líneas de gran corriente o tensión. De esta forma se hace posible obtener la medida alejado de zonas de alto riesgo para los operarios. Además se simplifica mucho las conexiones con los aparatos de medida.

Un aspecto importante en el manejo e instalación de transformadores de corriente es que nunca se debe desconectar el amperímetro del secundario sin previamente haber cortocircuitado los bornes del mismo. De otra manera, pueden aparecer tensiones elevadas en el secundario que pueden ser un peligro para las personas y para el propio transformador. Por otro lado, se debe conectar a tierra uno de los terminales del secundario. De esta forma, se evita la aparición de tensiones elevadas ante un fallo de aislamiento entre el circuito primario y el secundario.

Por último, indicar que es importante conocer la potencia nominal que puede proporcionar el transformador a los aparatos de medida. Ésta se mide en VA, fabricándose transformadores de las siguientes potencias nominales: 5 VA, 10 VA, 15 VA, 30 VA, 50 VA, 75 VA, 100 VA.

Así, por ejemplo, supongamos que deseamos alimentar con un transformador un amperímetro con un consumo de 3 VA y que además intercalamos en serie la bobina ampermétrica de un vatímetro con un consumo de otros 3 VA. La potencia que deberá suministrar como mínimo el transformador será de $3 + 3 = 6 \text{ VA}$, por lo que seleccionaremos un transformador de 10 VA de potencia nominal.

En cuanto a la construcción de transformadores de medida, existen dos tipo fundamentales: de barra pasante (Figura 16.14) y con primario devanado (Figura 16.15).

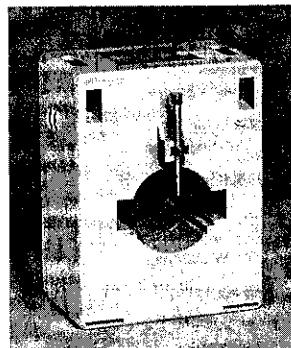


Figura 16.14. Transformador de intensidad de barra pasante.

Los transformadores de barra pasante disponen de un hueco por donde se hace pasar el conductor, por lo que no disponen de conexiones para el circuito primario. En este caso el primario lo constituye el propio conductor por el que circula la corriente a medir. Este tipo de transformador es muy utilizado ya que evita el tener que cortar el circuito a medir y evita las conexiones que de otra manera serían necesarias.

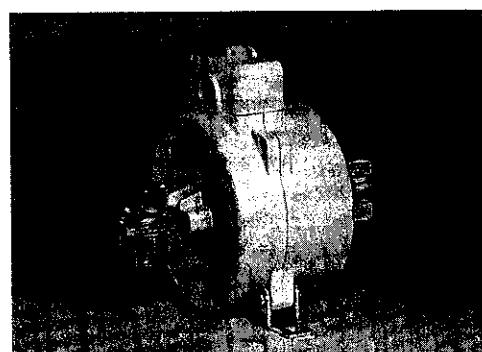


Figura 16.15. Transformador de intensidad con primario devanado.

En cuanto al amperímetro como aparato de medida portátil, el de más extendida aplicación es la pinza amperimétrica (véase Figura 16.16). Con este aparato de medida se evita tener que cortar y realizar conexiones para la toma de la medida. Esto se consigue gracias a que el aparato de medida lleva incorporado un transformador de intensidad del tipo pasante. Para hacer pasar el conductor por el hueco del transformador se abre manualmente el núcleo magnético de la pinza y se vuelve a cerrar. Este aparato de medida resulta muy cómodo para realizar comprobaciones rápidas de la intensidad de los circuitos, ya que no es necesario interrumpir el circuito para ello. Hoy en día se fabrican pinzas amperimétricas tanto para C.A. como para C.C.



Figura 16.16. Pinza Amperimétrica.

16.9 Medidas de tensión

La medida de tensión se realiza mediante el voltímetro. Se conecta entre los extremos cuya tensión se quiere medir, tal como se indica en la Figura 16.17. Es importante que la resistencia del instrumento de medida (R_V) sea alta, para así evitar consumos de corriente (I_V) y potencias elevadas.

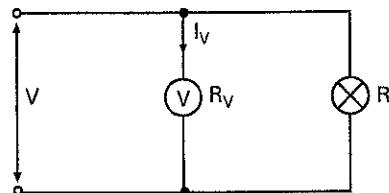


Figura 16.17. Medida de tensión con voltímetro.

Para ampliar el alcance de un voltímetro se recurre a la conexión en serie de resistencias adicionales o al empleo de transformadores de tensión. Dado que los transformadores sólo funcionan para corrientes alternas, se utilizarán sólo transformadores para realizar medidas de tensiones elevadas en C.A.

16.9.1 Ampliación del alcance de un voltímetro mediante resistencias adicionales en serie

En la Figura 16.18 se ha conectado una resistencia adicional R_S en serie con el voltímetro, con el fin de conseguir una

caída de tensión V_S que haga que la tensión V_V que aparece en bornes del voltímetro de resistencia R_V quede reducida proporcionalmente respecto a la tensión V a medir.

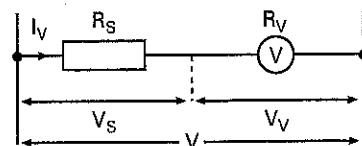


Figura 16.18. Esquema de conexión de voltímetro con resistencias adicionales.

Ejemplo: 16.9

Se dispone de un voltímetro con un campo de indicación de 10 V, una resistencia interna de $2\text{ k}\Omega$ y su escala está fraccionada en 40 divisiones. Calcular el valor de la resistencia adicional a conectar en serie con el voltímetro para ampliar su alcance hasta los 200 V, así como la constante del instrumento con y sin resistencia adicional. ¿Cuál será el resultado de la medida, con y sin la resistencia adicional, si se leen en la escala 30 divisiones?

Solución: Primero calculamos la corriente que circula por el voltímetro, que es la que también fluye por la resistencia adicional. Aplicando la ley de Ohm entre los extremos del voltímetro, tenemos que:

$$I_V = \frac{V_V}{R_V} = \frac{10}{2.000} = 0,005 \text{ A}$$

La tensión que debe caer en la resistencia adicional, es:

$$V_S = V - V_V = 200 - 10 = 190 \text{ V}$$

Si ahora aplicamos la ley de Ohm entre los terminales de la resistencia adicional, obtendremos el valor ohmico de la misma:

$$R_S = \frac{V_S}{I_V} = \frac{190}{0,005} = 38.000 \Omega = 38 \text{ k}\Omega$$

La constante de la escala sin resistencia adicional, es:

$$K = \frac{10 \text{ V}}{40 \text{ div}} = 0,25 \text{ V / div}$$

La constante del aparato con resistencia adicional, es:

$$= \frac{200 \text{ V}}{40 \text{ div}} = 5 \text{ V / div}$$

La medida para 30 divisiones sin resistencia adicional, es:

$$30 \text{ div} \cdot 0,25 \text{ V / div} = 7,5 \text{ V}$$

La medida para 30 divisiones con resistencia adicional, es:

$$30 \text{ div} \cdot 5 \text{ V / div} = 150 \text{ V}$$

16.9.2 Ampliación del alcance de un voltímetro mediante transformadores de tensión

En la Figura 16.19 se ha conectado un transformador de tensión en la línea con el objeto de medir la tensión elevada que existe en la línea. El transformador de tensión consta de dos circuitos: el primario se conecta entre los extremos de la línea donde se quiere medir la tensión, y el secundario, que se conecta entre los extremos del voltímetro.

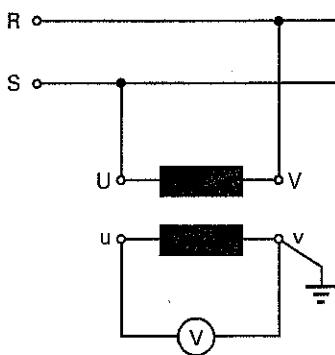


Figura 16.19. Esquema de conexión de transformador de tensión.

En la Figura 16.19 se muestran los símbolos más utilizados del transformador de tensión.

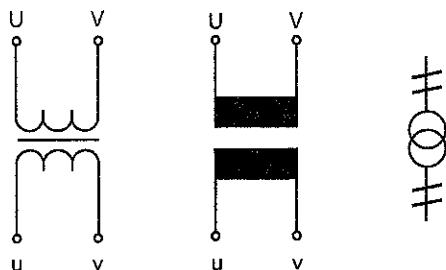


Figura 16.20. Símbolos eléctricos del transformador de tensión.

El transformador de tensión consigue que por el circuito secundario, donde se conecta el voltímetro, aparezca una tensión más reducida y siempre proporcional a la que queda sometido el primario, conectado con el circuito a medir. De esta forma, se consigue reducir considerablemente la tensión por el voltímetro.

Como en otras ocasiones, será necesario conocer la proporción en la reducción de la tensión para poder posteriormente interpretar la medida en el voltímetro. Los fabricantes de transformadores nos proporcionan la relación de transformación, que nos indica la relación entre la tensión por el primario V_1 y el secundario V_2 :

$$m = \frac{V_1}{V_2}$$

Al igual que para los transformadores de intensidad, en la placa de características de los transformadores de tensión aparecen los valores de la tensión nominal del primario y del secundario. Así, por ejemplo, la característica 5.500/110 V

nos indica que cuando por el primario se aplica una tensión de 5.500 V, por el secundario conectado al voltímetro aparecerán sólo 110 V. La tensión por el secundario de los transformadores de tensión suele ser 110 V para la mayoría de las aplicaciones. Por otro lado, se fabrican transformadores de las siguientes tensiones primarias: 110 V, 220 V, 380 V, 440 V, 2.200 V, 3.300 V, 5.500 V, 6.600 V, 11.000 V, 13,2 KV, 16,5 KV, 22 KV, 27,5 KV, 33 KV, 44 KV, 55 KV, 66 KV, 132 KV, 220 KV, 396 KV.

Ejemplo: 16.10

Se desea incorporar un voltímetro a un cuadro de distribución de energía eléctrica. La tensión de alimentación es de 2.000 V. Teniendo en cuenta que el voltímetro que se va a utilizar posee un fondo de escala de 110 V, seleccionar el transformador de tensión más adecuado, así como su relación de transformación. Suponiendo que el voltímetro posee una escala fraccionada en 55 divisiones, ¿cuál será el resultado de la medida si se lee en la escala 48 divisiones?

Solución: Seleccionaremos para la medida un transformador de tensión de relación: 2.200/ 110 V.

Su relación de transformación es,

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2.200}{110} = 20$$

La constante de la escala sin transformador, es:

$$K = \frac{110 \text{ V}}{55 \text{ div}} = 2 \text{ V / div}$$

La constante del aparato con transformador, es:

$$K_S = \frac{2.200 \text{ V}}{55 \text{ div}} = 40 \text{ V / div}$$

La medida para 48 divisiones, es:

$$48 \text{ div} \cdot 40 \text{ V / div} = 1.920 \text{ V}$$

Al igual que se hacía con los amperímetros, en la práctica se calibran las escalas de los voltímetros para que puedan dar una lectura directa en asociación con un determinado transformador de tensión.

Por motivos de seguridad es necesario conectar a tierra uno de los terminales del secundario, así se evita la aparición de tensiones elevadas en el mismo, en el caso de que existiese un fallo de aislamiento entre el primario y el secundario.

Por último, indicar que al igual que en los transformadores de intensidad es importante conocer la potencia nominal que puede proporcionar el transformador de tensión a los aparatos de medida, fabricándose transformadores de las siguientes potencias nominales: 10 VA, 15 VA, 25 VA, 30 VA, 50 VA, 75 VA, 100 VA, 150 VA, 200 VA, 300 VA, 400 VA.

16.10 El polímetro

El polímetro o multímetro es un aparato de medida portátil que se utiliza para medir diferentes magnitudes eléctricas, como, por ejemplo, tensión y corrientes en C.C. y C.A., resistencia, capacidad, prueba de continuidad, prueba de diodos y transistores. La misma palabra indica su función: polímetro, muchas medidas (Figura 16.21).

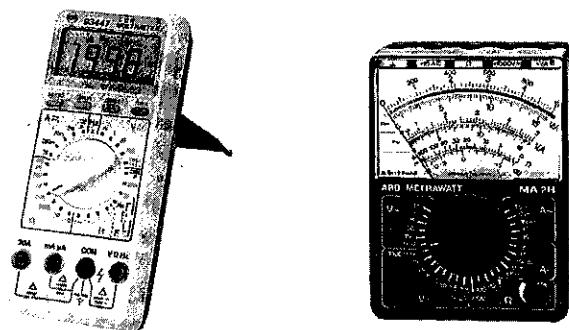


Figura 16.21. Polímetros analógicos y digitales.

Existen en el mercado una gran diversidad de modelos de polímetros. Las diferencias suelen estar en la forma de leer la medida del aparato (indicadores de aguja o analógicos e indicadores digitales) y en la forma de seleccionar la magnitud a medir, que por lo general suele consistir en un conmutador giratorio.

A continuación, y como ejemplo ilustrativo, damos una relación de los campos de medición de un determinado modelo de polímetro comercial:

- Tensiones para C.A. y C.C. (200 mV-2-20-200-1000 V).
- Intensidades para C.A. y C.C. (200 μ A- 2- 20-200 mA-2 A).
- Resistencias (200 Ω -2-20-200 K Ω -2-20 M Ω).
- Capacidades (2000 pF-20-200 nF-2-20 μ F).
- Inductancias (20-200 mH-2-20 H).
- Continuidad y prueba de diodos.

A primera vista da la impresión de que debe existir mucha diferencia entre manejar un modelo de polímetro u otro. Pero no es así, ya que en el momento que se adquiere una cierta práctica en el manejo de uno de los modelos, prácticamente ya se saben manejar todos.

Los polímetros digitales presentan una lectura a base de cifras numéricas que facilita bastante la interpretación de la medida. En los polímetros analógicos o de aguja hay que elegir la escala adecuada y tener cuidado en no equivocarse con la constante de escala a aplicar.

16.11 Medidas de potencia

Para realizar la medida de potencia el método más utilizado es mediante el vatímetro electrodinámico o ferrodinámico, tanto para C.C. como para C.A. Recordemos que el vatímetro consta de dos circuitos medidores: el circuito amperimétrico

se conecta en serie con el circuito y posee una resistencia muy baja, mientras que el voltímetro se conecta en paralelo y posee una resistencia muy elevada (Figura 16.22). Para C.C., el aparato indica directamente el producto de la tensión por la intensidad, dando como resultado de la medida la potencia media. Para C.A., el aparato indica directamente el producto de la tensión por la intensidad y por el cos ϕ , dando como resultado de la medida la potencia activa.

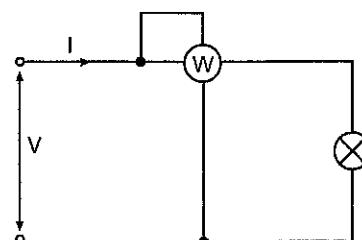


Figura 16.22. Medida de potencia con vatímetro.

Dado que el par de giro de la aguja indicadora del sistema de medida electrodinámico depende de los sentidos relativos de las corrientes por las bobinas fijas y móvil, pudiera ocurrir que al conectar el vatímetro, la aguja tendiese a moverse hacia el cero de la escala. Para solventar este incidente bastará con invertir la conexión de una de las bobinas.

Es habitual que los fabricantes de vatímetros construyan aparatos de medida con varios alcances de medida, proporcionando diferentes conexiones y alcances para la tensión aplicada a la voltímetrica y amperimétrica. Para determinar la constante de la escala, en estos casos, habrá que multiplicar el alcance de la tensión por el alcance de la intensidad y dividirlo entre el número total de divisiones de la escala.

Ejemplo: 16.11

Un vatímetro ferrodinámico posee dos alcances de tensión: 100 V y 200 V, y dos alcances de intensidad: 1 A y 5 A. Averiguar las constantes de la escala para cada una de las combinaciones posibles si la escala está fraccionada en 50 divisiones.

La constante de la escala para 100 V, 1 A, es:

$$K = \frac{100 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}}{50 \text{ div}} = 2 \text{ W / div}$$

La constante de la escala para 100 V, 5 A, es:

$$K = \frac{100 \text{ V} \cdot 5 \text{ A}}{50 \text{ div}} = 10 \text{ W / div}$$

La constante de la escala para 200 V, 1 A, es:

$$K = \frac{200 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}}{50 \text{ div}} = 4 \text{ W / div}$$

La constante de la escala para 200 V, 5 A, es:

$$K = \frac{200 \text{ V} \cdot 5 \text{ A}}{50 \text{ div}} = 20 \text{ W / div}$$

Al igual que se hacía con los voltímetros y amperímetros para ampliar el alcance de un vatímetro en C.A. se utilizan transformadores de medida. Se suelen acoplar transformadores de tensión acoplados en paralelo a la bobina voltimétrica cuando la tensión en la red es superior a 500 V y transformadores de intensidad, acoplados en serie con la bobina ampermétrica, cuando la intensidad en la línea es superior a 15 A. En la Figura 16.23 se muestra el esquema de conexiones de un vatímetro sin transformadores de medida y en la Figura 16.24 las conexiones con transformadores de intensidad y transformadores de tensión.

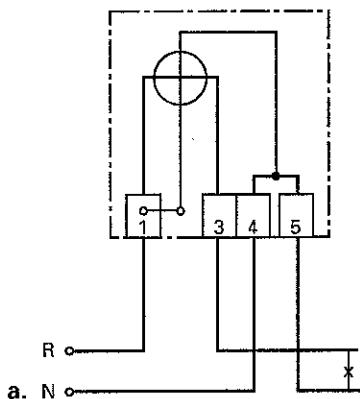


Figura 16.23. Esquema de conexiones de vatímetro monofásico en medición directa.

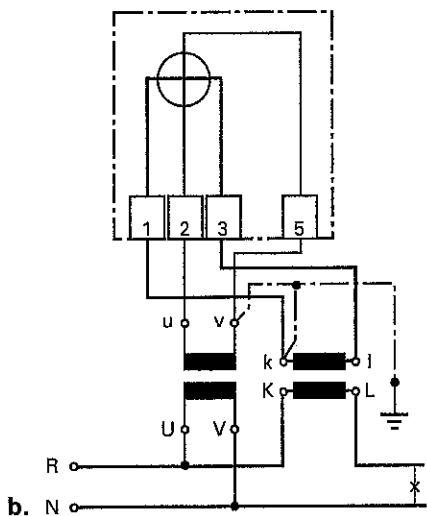


Figura 16.24. Esquema de conexiones de vatímetro monofásico con transformadores de tensión y corriente.

16.12 Medida de la potencia reactiva con vármetro

El vármetro es un aparato de medida que se construye partiendo de un vatímetro y al que se le añaden una serie de induc-

tancias o condensadores en serie con la bobina voltimétrica con el fin de desfasar 90° la tensión respecto a la corriente (Figura 16.25). De esta forma se consigue que el aparato de medida nos dé una lectura directa del producto de la tensión por la intensidad y por el sen φ, es decir de la potencia reactiva.

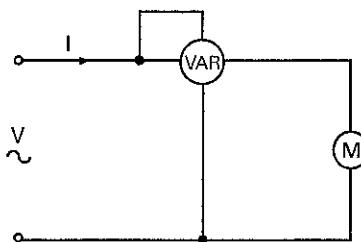


Figura 16.25. Medida de potencia reactiva con vármetro.

16.13 Medida de potencia activa en C.A. trifásica

La medida de potencia en los sistemas trifásicos se puede realizar con vatímetros monofásicos, conectados de tal forma que consigan medir la potencia activa de la carga.

El número de vatímetros que se emplee para realizar la medida, así como la forma en la que se conectan dependerá del tipo de línea que se utilice (a tres hilos sin neutro o a cuatro hilos con neutro) y de si la carga es equilibrada o desequilibrada. Por supuesto, un sistema de medida que sirva para medir la potencia de una carga desequilibrada también será válido para una equilibrada.

16.13.1 Medida de potencia activa para sistemas con neutro: cargas desequilibradas

Ésta es la forma más común de medida de la potencia en líneas de distribución de energía. En estos casos, se suministra el neutro, por ejemplo, en edificios de viviendas en los que es prácticamente imposible encontrar un equilibrio entre las fases.

Se utilizan tres vatímetros (Figura 16.26). La ampermétrica de cada uno se conecta en serie con cada conductor de línea, de tal forma que cada una mida la intensidad de línea respectiva. Las voltimétricas se conectan entre cada fase y neutro, midiendo cada una de las tensiones de fase.

Cada uno de los vatímetros indica la potencia en cada una de las fases. La potencia activa del sistema será la suma de la potencia que aparece en cada una de las fases, dato que coincide con la suma de las lecturas de los tres vatímetros.

$$P = W_1 + W_2 + W_3$$

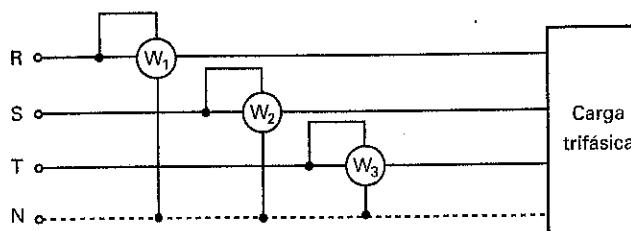


Figura 16.26. Esquema de conexiones de medida de potencia para sistemas trifásicos con neutro con cargas desequilibradas.

16.13.2 Medida de potencia activa para sistemas con neutro: cargas equilibradas

Para cargas equilibradas basta con conectar un solo vatímetro, con la amperimétrica en una de las líneas y con la voltmétrica entre la misma fase y el neutro (Figura 16.27). Como las cargas son todas iguales, la potencia de la carga trifásica se obtiene multiplicando por tres la lectura del vatímetro.

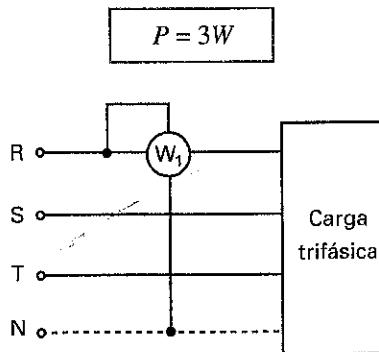


Figura 16.27. Esquema de conexiones para la medida de potencia para sistemas trifásicos con neutro con cargas equilibradas.

16.13.3 Medida de potencia activa para sistemas sin neutro: cargas equilibradas

Como no disponemos en la línea de neutro se conectan dos cargas adicionales R_1 y R_2 del mismo valor que la bobina voltmétrica con el fin de crear un neutro artificial (Figura 16.28).

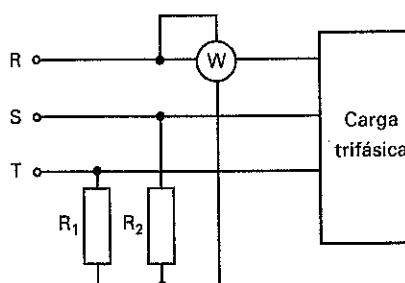


Figura 16.28. Esquema de conexiones para la medida de potencia activa en sistemas trifásicos sin neutro con cargas equilibradas.

De esta forma se consigue que el vatímetro nos indique la lectura de: $V_f I_L \cos \phi$, es decir, la potencia activa de una fase. La potencia del sistema será entonces de tres veces la indicada por el vatímetro.

$$P = 3W$$

Por lo general, los fabricantes de aparatos de medida montan en el mismo aparato las cargas adicionales; además, la escala aparece multiplicada por tres. Ahora, la lectura es directa y el vatímetro monofásico se ha transformado en un trifásico. En la Figura 16.29 se muestran las conexiones del mismo mediante otro tipo de representación.

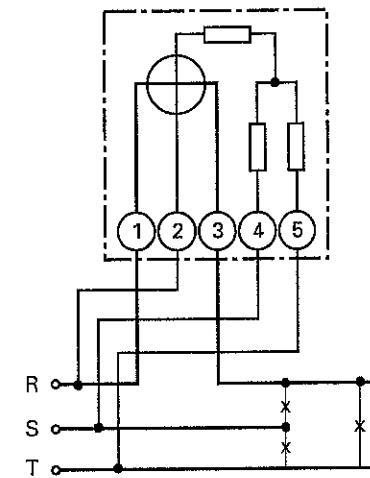


Figura 16.29. Vatímetro trifásico para cargas equilibradas sin neutro.

16.13.4 Medida de potencia activa para sistemas sin neutro: cargas desequilibradas

Conectando tres vatímetros, tal como se indica en la Figura 16.30, se consigue medir la potencia de cada una de las cargas. La potencia del sistema se obtiene sumando la lectura de cada uno de los vatímetros.

$$P = W_1 + W_2 + W_3$$

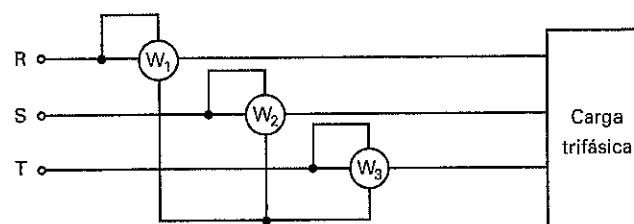


Figura 16.30. Sistema de tres vatímetros para cargas desequilibradas sin neutro.

Existe otra forma de medir la potencia para cargas desequilibradas sin neutro: método de los dos vatímetros o de Arón (Figura 16.31). La potencia activa se obtiene de la suma de los dos vatímetros.

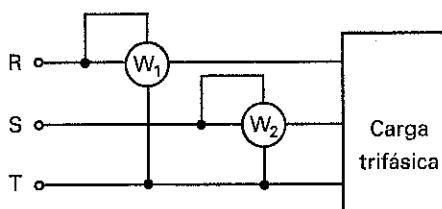


Figura 16.31. Sistema de dos vatímetros o Arón para cargas desequilibradas sin neutro.

En el momento de tomar una medida, podría ocurrir que uno de los vatímetros tendiese a indicar por debajo del cero, hecho que ocurre para factores de potencia muy bajos. En estos casos basta con invertir la conexión de una de las bobinas del vatímetro afectado. La medida obtenida por este vatímetro se considerará negativa, por lo que para obtener la potencia activa se restará este resultado del obtenido por el otro vatímetro.

En la práctica se fabrican vatímetros trifásicos con dos o tres sistemas de medida, de tal forma que la fuerza motriz de cada uno de ellos actúe sobre el eje que mueve la aguja indicadora. De esta manera se consigue que la lectura de la medida sea sobre una sola escala, lo que facilita mucho la interpretación de la medida. En la Figura 16.32 se muestra las conexiones de un vatímetro para la medida de potencia en sistemas trifásicos desequilibrados sin neutro mediante el sistema de dos vatímetros y un único órgano medidor.

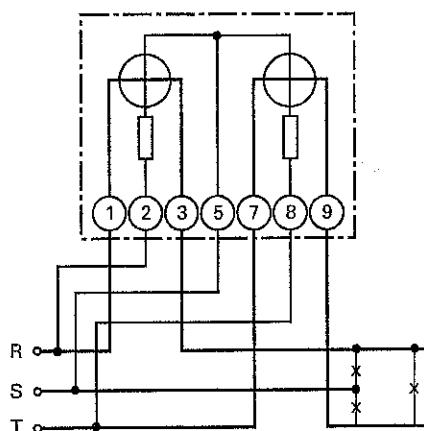


Figura 16.32. Vatímetro trifásico con dos sistemas de medida.

16.14 Medida de energía en sistemas trifásicos

La medida de la energía eléctrica se lleva a cabo mediante contadores de energía. Éstos miden el producto de la potencia por el tiempo ($E = P \cdot t$). Para ello se valen de un sistema, como el de un vatímetro, que mediante un circuito voltmétrico y otro amperimétrico mide la potencia, y al que se le incorpora un sistema de relojería que registra el producto de $P \cdot t$. El resultado casi siempre se expresa en KWh.

Los contadores más utilizados en la actualidad son los de inducción. También existen los contadores de energía electrónicos de impulsos, que por su gran precisión y versatilidad están desplazando a los de inducción. Además, es posible que

un contador electrónico sea capaz de comunicarse telefónicamente mediante un módem con la central de gestión de la compañía eléctrica y enviar los datos obtenidos de la lectura de energía; de esta forma se evita tener que enviar a un empleado a realizar dicha lectura, además se consigue un control a tiempo real de la distribución de la energía en toda la red.

Los contadores trifásicos se conectan de la misma forma que los vatímetros. De tal forma, que si, por ejemplo, se realiza la medida en las tres fases, el equipo es capaz de sumar el resultado y presentarlo en un solo indicador de medida.

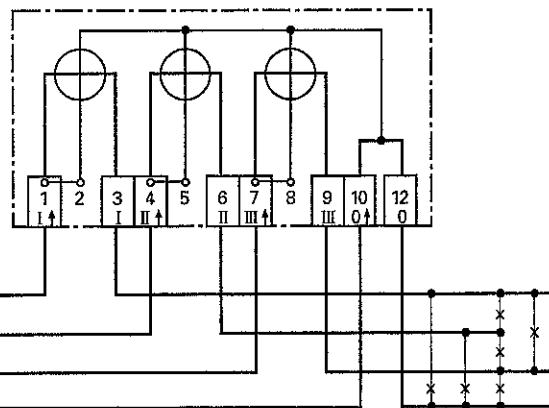


Figura 16.33. Esquema de conexiones de contador de energía trifásico para sistemas desequilibrados con neutro.

En la Figura 16.33 se muestra, a modo de ejemplo, el esquema de conexión de un contador trifásico en conexión directa para sistemas desequilibrados con neutro y en la Figura 16.34, el esquema de un contador trifásico en conexión a transformadores de intensidad y tensión para sistemas desequilibrados sin neutro.

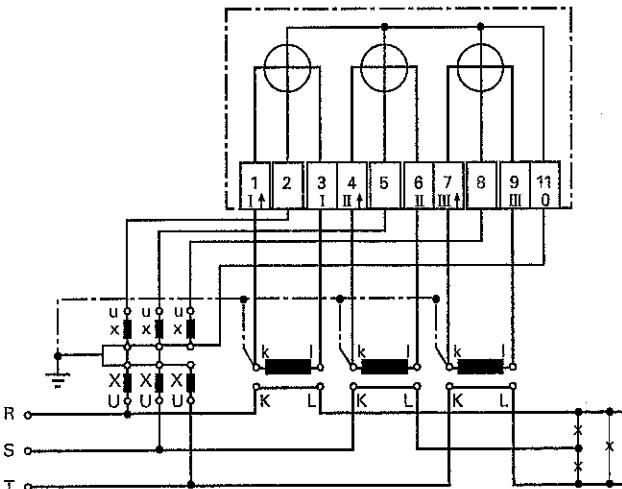


Figura 16.34. Esquema de conexiones de contador trifásico con transformadores de medida.

En tarificación eléctrica existe el concepto de la doble tarifa. Ésta consiste en establecer un precio para el consumo de energía eléctrica nocturna más reducido que para la diurna. La razón por la que las compañías eléctricas incentivan el consumo de energía nocturna está fundamentada en el hecho de que por la noche existe una baja demanda de energía y, sin embargo, ciertas centrales eléctricas, como las nucleares, no pueden llegar a desconectarse, por lo que existe un desequili-

brio entre la oferta y la demanda de energía. Además, así se consigue disminuir los fuertes consumos originados a ciertas horas del día.

En la Figura 16.35 se muestra el esquema de un contador monofásico de doble tarifa. Éste dispone de dos sistemas de registro de la energía consumida: uno para la tarifa nocturna y otro para la diurna. Para poder realizar el proceso de commutación de un registro al otro, el contador dispone de un reloj horario que realiza automáticamente el proceso de conmutación, según los tiempos preseleccionados.

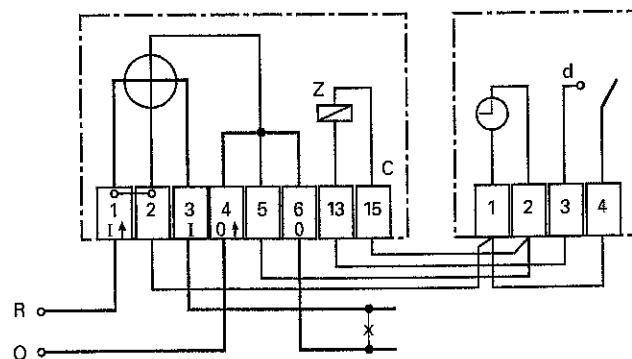


Figura 16.35. Esquema de conexiones de contador de energía monofásico de doble tarifa.

16.15 Medida de la frecuencia

La frecuencia se mide mediante el frecuencímetro. El frecuencímetro se conecta entre los extremos de las fases de la red cuya frecuencia se quiere medir (Figura 16.36).

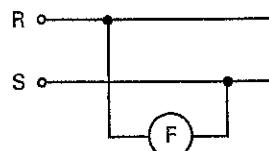


Figura 16.36. Esquema de conexiones de frecuencímetro.

Existen fundamentalmente dos tipos: de láminas vibrantes (Figura 16.37) y de bobina móvil con convertidor interior de frecuencia a C.C. de función lineal (Figura 16.38). Además también se fabrican de indicación digital con convertidor.

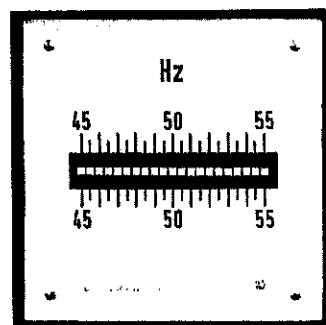


Figura 16.37. Frecuencímetro de láminas vibrantes.

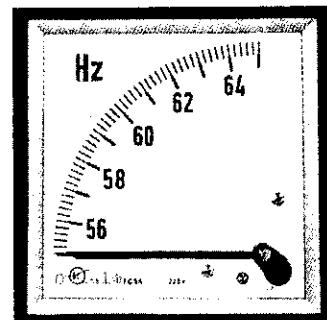


Figura 16.38. Frecuencímetro de aguja.

Para la medida de frecuencias en tensiones elevadas el frecuencímetro se interconecta mediante transformadores de tensión.

16.16 Medida del factor de potencia

Para medir el factor de potencia de una instalación se utiliza el fasímetro. En la Figura 16.39 se muestra el aspecto que presenta la pantalla de un fasímetro basado en sistema de medida móvil con convertidor de ángulo de fase a C.C. de función lineal.

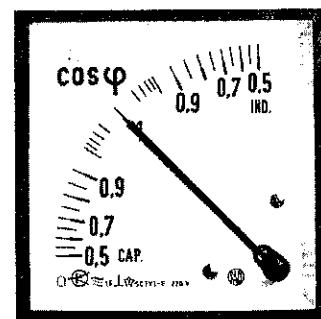


Figura 16.39. Fasímetro.

Este aparato de medida se conecta de forma similar a la de un vatímetro, ya que posee circuitos amperimétricos y voltmétricos. En la Figura 16.40 se muestra, como ejemplo, la conexión de un fasímetro trifásico.

En la actualidad también se fabrican fasímetros de indicación digital con convertidor.

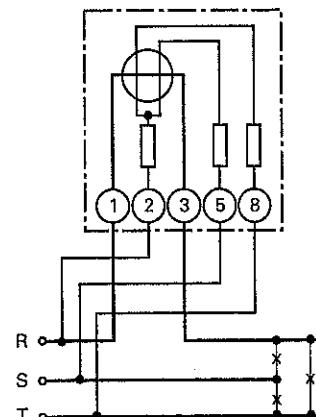


Figura 16.40. Esquema de conexiones de fasímetro trifásico.

16.17 Medida de resistencias eléctricas

La medida de la resistencia eléctrica se puede realizar simplemente midiendo la tensión y corriente que producen una resistencia al aplicar una fuente de alimentación de C.C. Aplicando la ley de Ohm se obtiene el valor de la resistencia. Evidentemente éste no es el sistema más utilizado. Dependiendo del orden de magnitud a medir y nivel de precisión requerido se utilizan diferentes sistemas de medida.

16.17.1 Medida de resistencias con óhmetro amperimétrico

Este sistema es el que utilizan los polímetros analógicos. Al conectar la resistencia R_x que se va a medir se cierra un circuito, donde existe una pila, un amperímetro donde se toma la medida y una resistencia R para el ajuste a cero del indicador Figura 16.41. La intensidad que mide el amperímetro es inversamente proporcional a la resistencia que se mide, por lo que al calibrar la escala del aparato de medida en ohmios habrá que poner el cero en el fondo de la escala. Dado que el resultado de la medida depende del estado de carga de la pila, antes de medir con este aparato conviene ajustar a cero la escala, para lo cual se cortocircuitan las puntas de prueba del instrumento y se modifica la resistencia variable mediante un cursor.

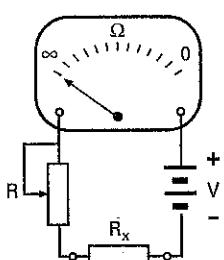


Figura 16.41. Óhmetro amperimétrico.

16.17.2 Medida de resistencias mediante puentes de medida

Cuando se desea obtener una precisión mayor en la medida de resistencias en un amplio campo de medidas se pueden utilizar puentes de medida, como el puente de Wheatstone o el puente de Thomson. En la Figura 16.42 se muestra el aspecto de un puente de medida comercial y en la Figura 16.43 el circuito básico de que consta un puente de Wheatstone. Un puente de Thomson comercial puede tener, por ejemplo, un campo de medida entre $500 \mu\Omega$ y 6Ω , mientras que un puente de Wheatstone su campo de medida estaría entre $500 \text{ m}\Omega$ y $500 \text{ k}\Omega$.

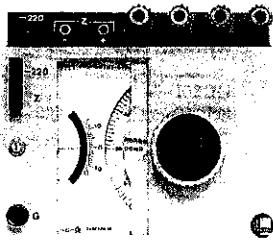


Figura 16.42. Óhmetro con puente de medida.

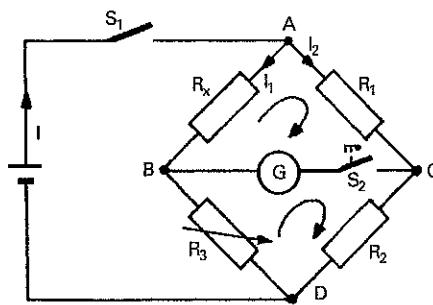


Figura 16.43. Esquema de puente de Wheatstone.

El puente de Wheatstone de la Figura 16.43 sirve para medir el valor ohmico de una resistencia desconocida R_x . Las resistencias R_1 y R_2 son fijas y de un valor conocido. La resistencia R_3 es variable y se mueve en una escala graduada, de tal forma que podemos saber su valor en todo momento. Se trata de modificar R_3 hasta conseguir equilibrar el puente. Este equilibrio se consigue cuando el galvanómetro indica que la corriente es cero.

Cuando el puente está equilibrado, aplicando la 2^a ley de Kirchhoff a las dos mallas formadas, se cumple que:

$$(1) R_x I_1 = R_1 I_2$$

$$(2) R_3 I_1 = R_2 I_2$$

Al dividir la ecuación (1) con la (2) conseguimos que las intensidades I_1 e I_2 se cancelen:

$$\frac{R_x I_1}{R_3 I_1} = \frac{R_1 I_2}{R_2 I_2}, \quad \frac{R_x}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$$

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3$$

Con esta última ecuación se puede averiguar el valor de la resistencia a medir R_x después de equilibrar el puente.

La ventaja que supone el empleo de los puentes para la medida de resistencias eléctricas reside en el hecho de que el resultado de la medida no depende, en ningún caso, del valor de la tensión que proporciona la batería de C.C. al circuito.

Ejemplo: 16.12

Al medir con el puente de Wheatstone el valor ohmico de una resistencia desconocida R_x , los valores fijos de R_1 y R_2 son de 10 y 1.000Ω , respectivamente, habiéndose conseguido el equilibrio del puente para un valor de $R_3 = 5.879 \Omega$.

Solución: Aplicando estos valores a la ecuación:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3 = \frac{10}{1.000} \cdot 5.879 = 58,79 \Omega$$

En un puente de Wheatstone comercial no suele ser necesario aplicar la ecuación para determinar la resistencia desconocida, ya que al variar R_3 aparece el resultado de la medida directamente en una escala. El cociente R_1/R_2 también se suele poder modificar. De esta forma se consigue ampliar el campo de medida. Los resultados de esta última modificación suelen indicarse en el aparato de medida con un coeficiente de multiplicación de la medida ($\times 0,1$; $\times 1$; $\times 10$; $\times 100$, etc.).

Hoy en día existen óhímetros de indicación digital, como el de la Figura 16.44, que poseen un campo medida muy amplio, como por ejemplo, entre $20\text{ m}\Omega$ y $20\text{ M}\Omega$, consiguiendo una gran precisión en la medida.



Figura 16.44. Puente de Wheatstone de indicación digital.

16.17.3 Medida de resistencias de aislamiento

Dado que no existen aislantes perfectos, la mayor parte de las instalaciones eléctricas quedan conectadas a tierra a través de los materiales aislantes que rodean a los conductores, por lo que siempre aparecen pequeñas corrientes de fuga desde los conductores de fase a tierra. El buen estado de los aislamientos de una instalación es muy importante, ya que un aislante en mal estado puede provocar cortocircuitos e incendios. Por esta razón, las normas sobre instalaciones eléctricas exigen pruebas de inspección para comprobar el estado de los aislamientos, es decir para comprobar si la resistencia de aislamiento es lo suficientemente elevada.

Dado que las resistencias de aislamiento suelen estar por encima de los $0,5\text{ M}\Omega$, es necesario el empleo de aparatos de medida especialmente diseñados para esta función, conocidos por el nombre de **megóhmétros** o **medidores de aislamiento**. Existe una amplia gama de diferentes aparatos de medida que cubren estas necesidades, unos con indicación analógica y otros con indicación digital, siendo estos últimos los que más se emplean en la actualidad. En la Figura 16.45 se muestra el aspecto de un medidor de aislamiento con indicación digital.



Figura 16.45. Medidor de aislamiento digital.

Para realizar las medidas de aislamiento de una instalación se procede de la siguiente forma:

- Se desconecta el interruptor general de alimentación de corriente de la instalación y se unen entre sí los conductores de alimentación. Seguidamente, se conecta el terminal positivo del medidor de aislamiento al conductor de tierra y el negativo a uno de los conductores de la instalación, tal como se muestra en la Figura 16.46. De esta forma mediremos la resistencia de aislamiento entre el total de la instalación y tierra.

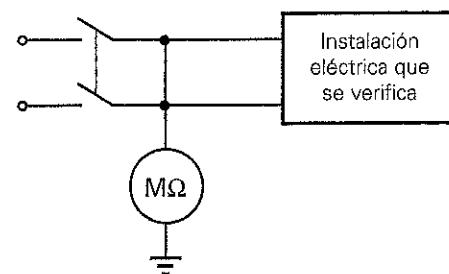


Figura 16.46. Esquema de conexiones para la medida de la resistencia de aislamiento entre la instalación y tierra.

- En el caso de que la resistencia de aislamiento total entre la instalación y tierra fuese inferior a la requerida por las normas vigentes, habrá que encontrar qué parte de la instalación es la que causa esta disminución del aislamiento, por lo que habrá que desconectar todos los receptores e ir comprobando la resistencia de aislamiento de cada uno de los conductores de la instalación respecto a tierra.

- Otra de las pruebas de aislamiento a realizar consiste en la medida de aislamiento entre los conductores activos. Para ello, se dejan conectados todos los receptores a la línea, pero con su respectivo interruptor en posición abierta, y se conecta el medidor de aislamiento entre los dos conductores activos de la instalación, tal como se muestra en la Figura 16.47.

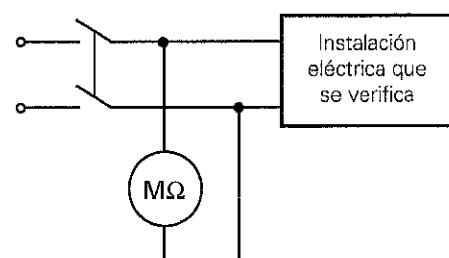


Figura 16.47. Esquema de conexiones para la medida de la resistencia de aislamiento entre los conductores activos de una instalación.

16.17.4 Medida de resistencia de una toma de tierra

En las instalaciones eléctricas siempre existe el riesgo de que alguno de los conductores activos (con tensión respecto a tierra) se ponga por accidente en contacto con alguna envoltura metálica (chasis de los receptores, como por ejemplo,

carcasas de motores, cubiertas metálicas de electrodomésticos, etc.). En estos casos aparece en la masa metálica una tensión respecto a tierra que, al ser tocada por una persona, puede provocar la electrocución de la misma (contacto indirecto). Para evitar estos accidentes se unen eléctricamente todas las masas metálicas de los receptores a tierra, eliminándose así la tensión que pudiera aparecer en las mismas (Figura 16.48).

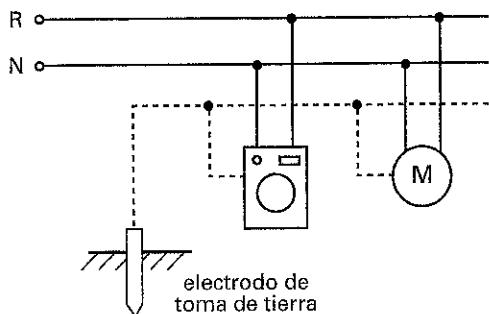


Figura 16.48. Puesta a tierra de las masas metálicas de los receptores.

Las tomas de tierra se realizan mediante electrodos metálicos enterrados (picas, barras, tubos, placas, cables, pletinas y en general cualquier objeto metálico) que produzcan un buen contacto con el terreno. Es imprescindible que la resistencia de la toma de tierra sea lo más baja posible, ya que de ello depende que la tensión que pudiera aparecer en las masas metálicas sea también baja.

El valor de la resistencia a tierra depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno, de los electrodos utilizados y de la calidad del contacto entre el electrodo y el terreno. Seguidamente se exponen los valores máximos que se recomiendan para la resistencia de tierra según el uso que se vaya a dar a las instalaciones eléctricas:

- ➊ Edificios de viviendas: $80\ \Omega$.
- ➋ Edificios con pararrayos: $15\ \Omega$.
- ➌ Instalaciones de máxima seguridad: 2 a $5\ \Omega$.
- ➍ Instalación de ordenadores: 1 a $2\ \Omega$.

Una vez realizada la toma de tierra hay que medir su resistencia para comprobar si su valor óhmico se encuentra según lo requerido. También es necesario realizar revisiones periódicas de los valores de la resistencia de tierra, ya que éstos podrían modificarse por diferentes factores, como pueden ser, corrosión de los electrodos, deterioro de conexiones, cambios en la composición de los terrenos (la resistividad de los terrenos aumenta al disminuir la humedad), etc.

Para la medida de la resistencia de tierra se utiliza *el telurómetro*. En el mercado existen diferentes tipos de telurómetros, pero básicamente todos emplean métodos de medida que consisten en clavar una serie de picas auxiliares a una determinada distancia de la toma de tierra.

En la Figura 16.49 se expone, a modo de ejemplo, un esquema de cómo se realiza la medida de resistencia de tierra con un telurómetro. Éste dispone de un terminal que se conecta al electrodo R_X de la toma de tierra. Además se proporciona un par de picas auxiliares Y y Z, de unos 30 cm de longitud, que se clavan a una cierta distancia del electrodo X de la toma de tierra.

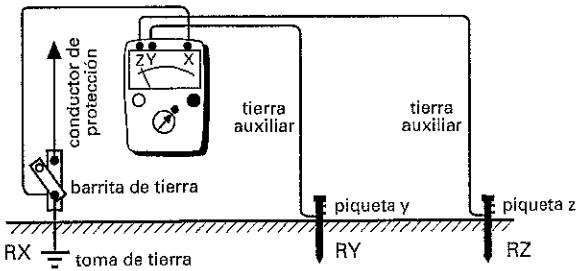


Figura 16.49. Esquema de conexiones para la medida de la resistencia de una toma de tierra.

En la Figura 16.50 se muestra el aspecto de un telurómetro comercial de indicación analógica. Antes de realizar la medida de tierra con un determinado medidor de tierra conviene leer detenidamente sus instrucciones de manejo y operar en consecuencia.

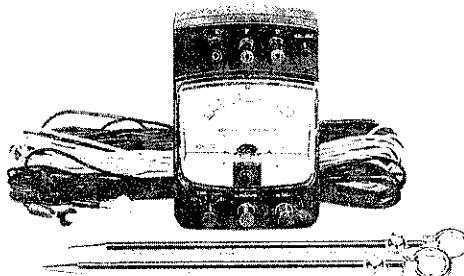


Figura 16.50. Telurómetro.

16.18 El osciloscopio

El osciloscopio es un aparato de medida que es indispensable para el análisis y comprobación de los valores que se dan en una tensión variable. Su aplicación en el campo de la electrónica se hace indispensable. Un osciloscopio lo que hace es mostrar en su pantalla la forma que posee una determinada tensión o corriente eléctrica. Es decir, representa en un eje de coordenadas las variaciones de estas magnitudes en función del tiempo.

Así, por ejemplo, la imagen que aparecería en la pantalla del mismo al aplicarle una tensión alterna senoidal sería la mostrada en la Figura 16.51.

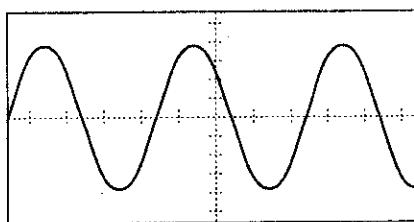


Figura 16.51. Imagen ofrecida por un osciloscopio de una tensión alterna.

El osciloscopio se vale de un tubo de rayos catódicos sobre el cual incide un haz electrónico, para reproducir la imagen visual.

A parte de este tubo de rayos catódicos, existe una serie de circuitos dentro del osciloscopio que hacen posible que el haz

electrónico reproduzca exactamente la imagen deseada. Éstos son los siguientes:

- Fuente de alimentación
- Amplificador vertical
- Amplificador de sincronismo
- Base de tiempos
- Amplificador horizontal
- **Base de tiempos y amplificador horizontal:** El circuito de base de tiempos de un osciloscopio es el que hace posible que la tensión que nosotros queremos representar aparezca en función del tiempo transcurrido. Mediante el circuito del amplificador horizontal podemos seleccionar las diferentes escalas de tiempos con las que nos interese trabajar en cada momento sobre el eje X. Para hacernos una idea del campo de medida de este circuito, se expone, a continuación, los grados de desviación de un osciloscopio comercial: desde 1 a 500 ms/división, desde 1 a 500 μ s/div y desde 100 a 500 ns/div.
- **Amplificador vertical:** Este circuito se encarga de que aparezcan representados los valores de tensión en el eje Y de la pantalla del osciloscopio. Mediante este circuito también podemos seleccionar diferentes escalas de tensión, como por ejemplo, 1 a 10 V/div, y de 2 a 500 mV/div.
- **Sincronización:** El circuito de sincronización realiza la tarea de mantener estable la imagen en la pantalla del tubo de rayos catódicos. Todos los osciloscopios poseen un circuito interno de sincronización automática de la imagen. No obstante, debido a que no siempre se consigue una imagen estable, se suele disponer de un mando de sincronización externa.

Ejemplo: 16.13

Al realizar una medida con un osciloscopio aparece en la pantalla la imagen que se muestra en la Figura 16.52. Si los grados de desviación seleccionados fuesen: atenuador vertical (4 V/div), base de tiempos (1 ms/div), averiguar el valor máximo y eficaz de la tensión, así como el período y la frecuencia.

$$V_{\text{máx}} = 3 \text{ div} \cdot 4 \text{ V/div} = 12 \text{ V}$$

$$T = 8 \text{ div} \cdot 1 \text{ ms/div} = 0,008 \text{ s}$$

$$V_{\text{eficaz}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \dots = 8,5 \text{ V}$$

$$f = 1/T = \dots = 125 \text{ Hz}$$

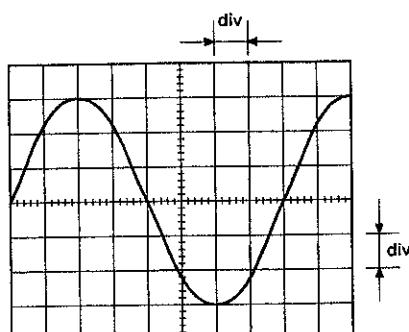


Figura 16.52

16.19 Sistemas avanzados de medida

El avance experimentado en los últimos años en la fabricación de microprocesadores y microcomputadores ha producido un fuerte avance en el desarrollo de nuevos instrumentos de medida, mucho más versátiles y de tamaño más reducido. Gracias a estos avances se ha aumentado el número de parámetros que se pueden medir con un solo instrumento a partir de las señales básicas de entrada (V e I). Además, se le ha dotado de una gran capacidad de comunicación con otros elementos de la instalación.

También es posible la conexión de los aparatos de medida con ordenadores personales a través de un bus de comunicaciones. De esta forma, se consigue procesar una gran cantidad de datos en un tiempo reducido. Con estas combinaciones se pueden efectuar muchas medidas a la vez, para, por ejemplo, realizar un control instantáneo de la energía consumida, establecer alarmas en caso de que alguna magnitud alcance valores inadecuados, evitar sobrecargas en las líneas, realizar estudios estadísticos, etc.

A continuación se exponen algunos de estos sistemas avanzados de medida.

16.19.1 Analizador de red trifásico

Este dispositivo posee 3 entradas de corriente y 3 entradas de tensión independientes (Figura 16.52), a partir de las cuales se pueden obtener las siguientes medidas: tensión de línea y de fase en cada una de las fases, intensidad de línea en cada una de las fases, potencia activa y reactiva, potencia aparente, factor de potencia, frecuencia, energía activa, energía reactiva inductiva y energía reactiva capacitativa. Con él es posible realizar desde el registro y valoración de magnitudes de medición en energía eléctrica hasta el análisis del consumo de energía eléctrica.

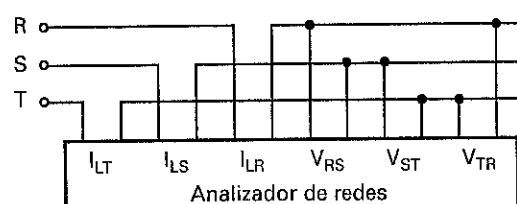


Figura 16.53. Esquema de conexiones de un analizador de red.

En la Figura 16.54 se muestra el aspecto de un analizador de redes comercial.

La presentación de la medida en la pantalla o display del aparato puede ser de diferentes formas: de forma alfanumérica como valores numéricos, a modo de tabla, valoración máxima/mínima, en forma de gráfico representando una curva o diagrama de líneas. También es posible, el almacenamiento de los valores medidos en una memoria, para ser consultados posteriormente a la medida. Algunos modelos permiten imprimir los resultados en papel o conectarse a un ordenador personal dotado con un software capaz de procesar los datos obtenidos según nuestras necesidades.

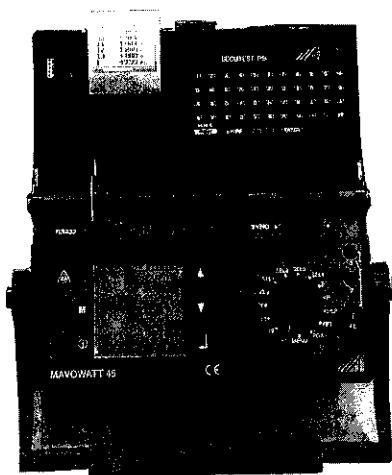


Figura 16.54. Analizador de red trifásico.

16.19.2 Comprobador de instalaciones eléctricas de baja tensión

Estos aparatos de medida resultan de gran utilidad para los instaladores electricistas, ya que se integran en un solo apar-

to de medida portátil una gran cantidad de funciones, como por ejemplo, la medición de tensiones, corrientes y frecuencias, verificación de resistencias de aislamiento, resistencias de tierra, comprobación de la continuidad de conductores, del estado de interruptores diferenciales, indica el orden de sucesión de fase, etc. En la Figura 16.55 se muestra el aspecto de un comprobador comercial de instalaciones eléctricas de baja tensión con indicación digital, posibilidad de imprimir los datos, memoria y conexión a ordenador personal.



Figura 16.55. Comprobador de instalaciones eléctricas de baja tensión.

Actividades

1. Consigue diferentes modelos de aparatos de medida; observa todas las indicaciones que aparecen en pantalla o en sus instrucciones de manejo y con ellas indica: magnitud a medir, campo de medición, posición de funcionamiento, sistema de medición empleado, tipo de corriente, clase del instrumento, así como la constante de la escala.
2. Consigue un amperímetro y varios shunts comerciales y observa sus características. Primero mide la corriente por un circuito de forma directa con el amperímetro, determinando la constante de escala. Posteriormente conecta en paralelo con el amperímetro cada uno de los shunts comerciales de forma independiente, anota los resultados obtenidos y determina en cuánto se amplía el alcance del amperímetro en cada caso, así como las nuevas constantes de escala.
3. Consigue un amperímetro de C.A. y varios transformadores de intensidad comerciales y observa sus características. Primero mide la corriente por un circuito de C.A. de forma directa con el amperímetro, determinando la constante de escala. Posteriormente conecta con el amperímetro cada uno de los transformadores de intensidad comerciales de forma independiente, anota los resultados obtenidos y determina en cuánto se amplía el alcance del amperímetro en cada caso, así como las nuevas constantes de escala.
4. Consigue un voltímetro de C.A. y varios transformadores de tensión comerciales, y observa sus características. Primero mide la tensión por un circuito de C.A. de forma directa con el voltímetro, determinando la constante de escala. Posteriormente conecta con el voltímetro cada una de los transformadores de tensión comerciales de forma independiente, anota los resultados obtenidos y determina en cuánto se amplía el alcance del voltímetro en cada caso, así como las nuevas constantes de escala.
5. Consigue un polímetro comercial, analiza sus características y sus diferentes campos de medida, comprobando su funcionamiento en la verificación de un circuito eléctrico.
6. Consigue un vatímetro para la medida de C.A. monofásica, determina la constante de la escala y realiza la medida de potencia de un receptor. Seguidamente conecta un transformador de tensión en la bobina voltmétrica y un transformador de intensidad en la voltmétrica, calcula la nueva constante de la escala y compruébalo mediante la realización de una nueva medida.
7. Consigue un vármetro y un vatímetro y realiza la medida de la potencia reactiva y activa de una carga monofásica (por ejemplo, un motor monofásico). Seguidamente calcula la potencia aparente y el factor de potencia.
8. Conecta un vatímetro, un voltímetro y un amperímetro a un motor monofásico. Con los datos obtenidos determina su factor de potencia.
9. Consigue un vatímetro trifásico para medida de potencias sin neutro. Mide la potencia de un motor trifásico. Seguidamente consigue tres vatímetros monofásicos y mediante una de las conexiones estudiadas mide la potencia del motor. Ahora repite la medida con el sistema de dos vatímetros y compara todos los resultados obtenidos.
10. Consigue un contador de energía trifásico de inducción, analiza sus características y mide la energía consumida por un motor trifásico en un período de tiempo determinado.
11. Consigue diferentes tipos de frecuencímetros, analiza y compara sus características. Seguidamente realiza la medida de la frecuencia de la red eléctrica.
12. Consigue diferentes tipos de fasímetros, analiza y compara sus características. A continuación realiza la medida del factor de potencia de un motor trifásico.
13. Consigue un polímetro y seleccionando la posición de medida de resistencias, mide la resistencia eléctrica de diferentes dispositivos eléctricos. No olvidar que para la medida de resistencias eléctricas, éstas tienen que estar separadas de la alimentación eléctrica.
14. Consigue un puente de medida, analiza sus características y realiza con él la medida de varias resistencias de diferentes valores ohmicos.
15. Consigue un medidor de resistencias de aislamiento, analiza sus características y verifica la resistencia de aislamiento de una sencilla instalación eléctrica.
16. Consigue un telurómetro, analiza sus características, estudia el procedimiento de medida proporcionadas por el fabricante y verifica la resistencia de una toma de tierra.
17. Consigue un osciloscopio, analiza sus características y con la ayuda de un generador de funciones, comprueba los valores de las magnitudes asociadas a señales senoidales de diferentes frecuencias. Para hacerlo correctamente sigue atentamente las siguientes recomendaciones:
 - a) Poner en marcha el osciloscopio siguiendo las instrucciones que aparecen en el manual de funcionamiento.
 - b) Situar el mando del amplificador vertical en su valor máximo. De esta forma, evitaremos que la tensión que deseamos medir sea superior a la que está preparada el osciloscopio.
 - c) Situar el conmutador de entrada en C.A.
 - d) Aplicar la tensión alterna a medir a la entrada vertical.
 - e) Girar el mando del atenuador vertical hasta que sea fácilmente visible la señal senoidal en la pantalla.

- f) Girar el selector de la base de tiempos hasta que se pueda ver claramente un ciclo completo de la señal alterna en la pantalla.
- g) Estabilizar la imagen mediante el control de sincronismo.
- h) Toman las lecturas de la pantalla y determinar el valor máximo y el período. Con estos datos se puede calcular el valor eficaz y la frecuencia.

18. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este

capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) El sistema de medida de bobina móvil:
 - a) Sirve para medir directamente grandes corrientes
 - b) En combinación con un rectificador sirve para medir C.C. y C.A.
 - c) Sirve para medir la potencia
- 2) El sistema de medida de hierro móvil:
 - a) Sirve para medir directamente grandes corrientes
 - b) Sirve para medir C.C. y C.A.
 - c) Sirve para medir tensiones y corrientes hasta frecuencias elevadas
- 3) El sistema de medida electrodinámico:
 - a) Se utiliza fundamentalmente para la medida de la potencia
 - b) Sirve para medir en C.C. y C.A.
 - c) Sirve para medir corrientes y tensiones
- 4) El sistema de medida de inducción:
 - a) Se utiliza fundamentalmente para la medida de energía en C.A.
 - b) Sirve para medir en C.C.
 - c) Sirve para medir el ángulo de desfase
- 5) El sistema de medida bimetálico:
 - a) Mide el valor medio de la corriente en C.C. y el eficaz en C.A.
 - b) Sirve para medir sólo en C.C.
 - c) Se utiliza para medir la potencia
- 6) El sistema de láminas vibrantes:
 - a) Se utiliza para medir la energía eléctrica
 - b) Sirven para medir en C.C. y C.A.
 - c) Se utilizan para la medida de frecuencias
- 7) El shunt:
 - a) Es una resistencia para ampliar el alcance de un voltímetro
- 8) Es una resistencia para ampliar el alcance de un amperímetro
- 9) Se conecta en serie con el amperímetro
- 10) El transformador de intensidad:
 - a) No debe dejarse nunca abierto el circuito secundario de medida
 - b) Se utiliza para ampliar el alcance de amperímetros en C.A.
 - c) Se utiliza para ampliar el alcance de amperímetros en C.C.
- 11) Para comprobar el error que comete un amperímetro se toma una medida de 350 mA y luego se comprueba con un amperímetro de gran precisión la misma medida, dando como resultado 335 mA. Determinar el error absoluto y relativo cometido por el amperímetro.
- 12) Para verificar la precisión de un voltímetro se le somete a una contrastación con un voltímetro patrón, anotándose los siguientes resultados:
Voltímetro a verificar: 0 V 50 V 100V 200 V
Voltímetro patrón: 0 V 49 V 98V 197 V
¿Cuál será la clase de este voltímetro si el valor máximo de su escala es de 200 V?
- 13) Calcular el error máximo que puede cometer un vatímetro de clase 2,5 si su campo de medida es 0 – 500 W.
- 14) Se desea ampliar el alcance de un amperímetro de C.C. con sistema de medida de cuadro móvil. La corriente máxima que admite es de 100 mA y su resistencia interna es de 0,19 Ω. Calcular el valor de la resistencia del shunt para ampliar el alcance del aparato de medida hasta los 2 A.
- 15) Un amperímetro comercial de C.C. permite medir una corriente como máximo de 10 A. Posee una escala fraccionada en 80 divisiones y una resistencia interna de 1,9 Ω. Se desea ampliar el alcance del aparato para poder realizar medidas de hasta 200 A. Calcular la resistencia del shunt y la constante de la escala del aparato con y sin shunt. ¿Cuál será el resultado de la

- medida del amperímetro con shunt y sin shunt si se lee en la escala 65 divisiones?
- 14) La potencia nominal de una estación depuradora es de 70 KW con un factor de potencia de 0,8. El suministro de energía es trifásico a 220 V. Para realizar la medida de la intensidad de línea se dispone de un amperímetro con un fondo de escala de 5 A; seleccionar el transformador de intensidad más adecuado, así como su relación de transformación. Suponiendo que el amperímetro posee una escala fraccionada en 40 divisiones, ¿cuál será el resultado de la medida si se leen en la escala 35 divisiones?
- 15) Se desea ampliar el alcance de un voltímetro, con un campo de indicación de 20 V, hasta los 1.000 V. Éste posee una resistencia interna de $5\text{ K}\Omega$ y su escala está fraccionada en 100 divisiones. Calcular el valor de la resistencia adicional a conectar en serie con el voltímetro para ampliar su alcance, así como la constante del instrumento con y sin resistencia adicional. ¿Cuál será el resultado de la medida, con y sin la resistencia adicional, si se leen en la escala 22 divisiones?
- 16) Para realizar la medida de tensión de una línea de distribución de 10 KV / 50 Hz se dispone de un voltímetro de 0-110 V. Seleccionar el transformador de tensión más adecuado para ello, así como su relación de transformación. Suponiendo que el voltímetro posee una escala fraccionada en 50 divisiones, ¿cuál será el resultado de la medida si se leen en la escala 45 divisiones?
- 17) El vatímetro ferrodinámico:
- En C.A. indica la potencia activa
 - En C.C. indica la potencia en V.A.R
 - Posee una bobina voltimétrica de gran resistencia y una amperimétrica de baja resistencia
- 18) El frecuencímetro se conecta:
- En serie con la línea
 - En paralelo con la línea
 - La bobina amperimétrica en serie y la voltimétrica en paralelo
- 19) El fasímetro se conecta:
- En serie con la línea
 - En paralelo con la línea
 - La bobina amperimétrica en serie y la voltimétrica en paralelo
- 20) Para la medida de resistencias eléctricas resulta más preciso
- El óhmetro amperimétrico
 - Los puentes de medida
 - El vérmetro
- 21) La resistencia de aislamiento de una instalación eléctrica:
- Si es baja nos indica que algún aislante de la instalación está en mal estado
 - Se mide con el megohmetro
 - Debe ser tan elevada como se indique en la normativa vigente
- 22) La resistencia de una toma de tierra
- Si es muy alta puede causar accidentes por contactos indirectos
 - Se mide con el telurómetro
 - Debe ser lo más pequeña posible
- 23) Un vatímetro electrodinámico posee dos alcances de tensión: 50 V y 150 V, y un alcance de intensidad: 5 A. Averiguar las constantes de la escala para cada una de las combinaciones posibles, si la escala está fraccionada en 25 divisiones. ¿Cuál será el resultado de la medida si leen 15 divisiones para el campo de medida de 150 V - 5 A?

Lámparas Eléctricas

Introducción

Hoy en día es impensable vivir sin la comodidad que proporciona la luz eléctrica. Para cubrir estas necesidades se fabrican un gran variedad de lámparas eléctricas. Cada una de ellas posee cualidades específicas que las hacen ideales para ciertas aplicaciones.

Las lámparas incandescentes se pueden conectar directamente a la red; sin embargo, las lámparas de descarga en un gas, como por ejemplo, fluorescentes, vapor de mercurio y vapor de sodio, necesitan de equipos especiales para su funcionamiento.

Contenido

- Magnitudes luminosas de las lámparas.
- Lámparas incandescentes.
- Lámparas halógenas.
- Lámparas fluorescentes.
- Lámparas fluorescentes compactas.
- Lámparas de vapor de mercurio de color corregido.
- Lámparas de vapor de mercurio con halogenuros metálicos.
- Lámparas de vapor de sodio de alta presión.
- Lámparas de vapor de sodio a baja presión.

Objetivos

- Comparar las diferentes lámparas eléctricas a través de sus características luminosas y eléctricas.
- Seleccionar la lámpara más adecuada para cada aplicación.
- Describir los equipos de arranque de las lámparas de descarga.

17.1 Magnitudes luminosas de las lámparas eléctricas

La luz es una forma de energía que se transmite por medio de ondas electromagnéticas a una velocidad de unos 300.000 km/s. Para definir las magnitudes luminosas tendremos que disponer de una fuente luminosa que proporcione luz, así como de los objetos que se van a iluminar.

17.1.1 Flujo luminoso

Es la cantidad de luz emitida por una fuente de luz, dentro del espectro visible, en un segundo y en todas las direcciones. Se representa por la letra griega Φ y su unidad de medida es el **lumen** (lm).

Así, por ejemplo, una lámpara incandescente de 60 W produce un flujo luminoso de unos 600 lm, mientras que una fluorescente de 65 W (blanco industrial) proporciona un flujo de 5.000 lm, y una lámpara de vapor de sodio a alta presión de 1.000 W nos da un flujo luminoso de hasta 130.000 lm.

17.1.2 Eficacia luminosa

La eficacia luminosa de una lámpara es el cociente entre el flujo luminoso emitido en lúmenes y la potencia consumida en vatios. El rendimiento o eficacia de una lámpara es importante, ya que indica los lúmenes que emite ésta por cada vatio consumido de la red eléctrica. Este dato será muy importante a la hora de seleccionar la lámpara más adecuada para una determinada aplicación, ya que cuanto mayor sea su eficacia luminosa, menor será el consumo de energía eléctrica del sistema de alumbrado. Su unidad es el lm/W.

Así, por ejemplo, una lámpara incandescente viene a tener una eficacia de entre 8 y 20 lm/W, mientras que una fluorescente puede alcanzar una eficacia entre 40 a 93 lm/W. En el otro extremo tenemos a las lámparas de sodio a baja presión, que alcanzan una eficacia luminosa de hasta 183 lm/W.

17.1.3 Índice de reproducción cromático (IRC)

Indica el grado de calidad que poseen las fuentes luminosas para reproducir los colores lo más exactamente posible. El valor 100 indica la reproducción de color de mayor calidad. Las normas DIN clasifican a las fuentes luminosas en grupos, según sea su índice de reproducción cromático, tal como se indica en la Tabla 17.1

Así, por ejemplo, mientras una lámpara incandescente tiene un IRC de 100, una fluorescente, dependiendo del tipo, puede tener un IRC de 50 a 97, y una de vapor de mercurio, entre 48 y 50.

ÍNDICE DE REPRODUCCIÓN CROMÁTICO (IRC)	NIVEL DE REPRODUCCIÓN CROMÁTICO
IRC de 85 a 100	Excelente
IRC de 70 a 84	Bueno
IRC de 40 a 69	Aceptable
IRC menor de 40	Limitado

Tabla 17.1. Clasificación del índice de reproducción cromático (IRC) de un lámpara.

17.1.4 Temperatura de color (K)

En el lenguaje común, se acostumbra a hablar de luces frías o de luces cálidas. En las frías predominan las radiaciones visibles de color azul, verde, etc. Este aspecto de tonalidad de las lámparas se denomina temperatura de color. Una luz cálida puede ser muy confortable en un ambiente de distensión y relax, a pesar de que este tipo de tonalidades disminuye el índice de reproducción cromático. Por otro lado, una luz fría puede ser muy eficaz para ambientes donde se quiere conseguir una gran actividad. La temperatura de color se mide en grados Kelvin (°K). En la Tabla 17.2 se muestra, como ejemplo, la temperatura de color aproximada de algunas fuentes de luz conocidas.

FUENTE DE LUZ	TEMPERATURA DE COLOR EN °K
Lámpara incandescente	2.800
Tubo fluorescente (blanco cálido)	3.000
Tubo fluorescente (blanco día)	4.000
Tubo fluorescente (luz de día)	6.000
Luz solar directa con el cielo despejado	6.000

Tabla 17.2. Temperatura de color de fuentes luminosas.

17.2 Tipos de lámparas eléctricas

Las lámparas eléctricas poseen la misión de transformar la energía eléctrica en luminosa. Se pueden construir basándose en dos principios claramente diferenciados:

- Lámparas de incandescencia
- Lámparas de descarga en un gas

Las lámparas incandescentes basan su funcionamiento en la emisión de luz cuando un filamento resistivo se calienta a elevadas temperaturas. Dentro de estas lámparas también se encuentran las halógenas.

Por otro lado, las lámparas de descarga en un gas funcionan gracias al efecto de la luminiscencia, que se caracterizan por producir luz cuando un gas es recorrido por una corriente eléctrica. Como ejemplo de las lámparas de descarga tenemos

a las fluorescentes, lámparas compactas de bajo consumo, lámparas de vapor de mercurio, lámparas de luz mezcla, lámparas de vapor de sodio a alta presión y lámparas de vapor de sodio a baja presión.

17.2.1 Lámparas incandescentes

El funcionamiento de una lámpara incandescente es muy sencillo. Al atravesar la corriente un filamento resistivo, éste alcanza una gran temperatura (unos 2.000 °C) poniéndose al rojo blanco, o sea incandescente, lo que provoca una emisión de radiaciones luminosas (Figura 17.1).

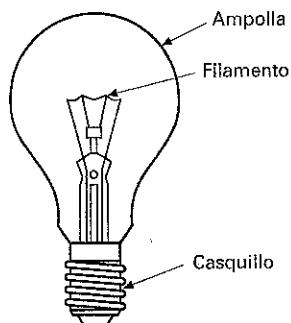


Figura 17.1. Lámpara incandescente.

Las lámparas incandescentes son muy utilizadas por su bajo coste y por la facilidad de su montaje. Sin embargo, poseen un rendimiento luminoso bastante bajo frente a otro tipo de lámparas, como por ejemplo las fluorescentes. Además, la duración de las mismas no suele superar la 1.000 horas de funcionamiento.

Estudiemos, a continuación, las partes de que se compone una lámpara incandescente, así como algunas de sus características más importantes.

Filamento: El filamento es un conductor resistivo, de tungsteno o wolframio, cuya temperatura de fusión es de unos 3.400 °C. La vida o duración del filamento viene condicionada por un fenómeno de evaporación del mismo. Hay que pensar que dicho filamento está sometido a muy altas temperaturas, lo cual provoca una emisión de partículas, por parte de éste, que van adelgazándolo y produciendo al cabo del tiempo su rotura (entonces solemos decir que la lámpara se ha fundido). Como ya se ha comentado, la duración media de este tipo de lámparas viene a ser de unas 1.000 horas de funcionamiento. Para evitar este fenómeno de evaporación se disponen los filamentos en forma de hélice, al tiempo que se rellena la ampolla con un gas inerte (mezcla de argón y nitrógeno) a una determinada presión.

Ampolla: La misión principal de la ampolla es aislar al filamento del medio ambiente. Si un filamento se pusiera en estado incandescente en contacto con la atmósfera, el oxígeno contenido en ésta produciría la combustión inmediata del mismo. Otra misión importante de la ampolla es la de permitir la evacuación del calor emitido por el filamento al ambiente.

La principal ventaja que presentan estas lámparas es que son muy baratas y fáciles de instalar. Sin embargo su baja eficiencia luminosa (en torno a los 15 lm/W) y su corta vida hace que su aplicación quede limitada al alumbrado doméstico y decorativo y a la señalización.

La temperatura de color que alcanzan estas lámparas está en torno a los 3.000 °K, siendo su índice de reproducción cromático (IRC) entre 85 y 100. Por lo que se puede decir que reproducen muy bien los colores y aportan un ambiente cálido en la zona que iluminan.

A modo de ejemplo en la Tabla 17.3 se muestran algunas de las características de una lámpara incandescente estándard.

POTENCIA (W)	FLUJO LUMINOSO (LM)	CASQUILLO
25	120	E27
40	430	E27
60	730	E27
100	1380	E27
200	3000	E27
500	8400	E40

Tabla 17.3.

17.2.2 Lámparas incandescentes con halógenos

Este tipo de lámparas es muy similar a las incandescentes, pero se construyen de tal forma que se consigue elevar considerablemente su vida y su eficacia lumínosa.

En este tipo de lámparas incandescentes se introduce en la ampolla un elemento halógeno, como el yodo, en combinación con los clásicos gases nobles que suelen contener las lámparas incandescentes. Cuando se pone en funcionamiento la lámpara, los átomos de tungsteno, de que se compone el filamento, se volatilizan y reaccionan químicamente con los átomos del halógeno, formando yoduro de tungsteno. Este compuesto gaseoso tiende a reaccionar nuevamente con los átomos del filamento, depositando los átomos volatilizados de tungsteno en dicho filamento y dejando libre el yodo para repetir el proceso. De esta forma se evita que se enegrezca la ampolla y que el filamento se vaya regenerando, por lo que la vida de una lámpara halógena se alarga desde las 2.000 horas hasta las 3.000 horas.

Para que el proceso de recombinación se produzca es necesario que se den temperaturas superiores a los 2.000 °C y que la ampolla sea de pequeñas dimensiones. Por esta razón se construyen las ampollas de un material que soporte altas temperaturas como el cristal de cuarzo, ya que la temperatura que se puede llegar a dar en la superficie de la misma es del orden de 300 °C a 600 °C.

Seguro que alguna vez habrás oído comentar que no se debe tocar con los dedos una lámpara halógena. Efectivamente, debe evitarse tocar con los dedos estas lámparas, ya que la grasa que queda en la superficie de la ampolla en combinación con las altas temperaturas puede desvitrificar el cuarzo, lo que implica que la ampolla pueda llegar a romperse.

Con este tipo de lámparas se consigue una temperatura de color de unos 3.000 °K (luz cálida) y una eficacia lumínosa de unos 20 lm/W, siendo su índice de reproducción cromático de 100 (reproduce perfectamente los colores).

En la actualidad se fabrica una amplia gama de lámparas halógenas. Así, por ejemplo, son muy populares el uso de estas lámparas para usos decorativos en el comercio y en el hogar. Generalmente se las hace funcionar a baja tensión a través de un transformador. Algunas llevan incorporado un reflector al que se le añade una doble envoltura (encima de la ampolla de cuarzo se coloca otra de vidrio), facilitando así las labores de manipulación. En otros casos se le dota a la lámpara de un reflector parabólico selectivo, de tal forma que sólo reflejan parte del espectro luminoso, como el rojo, verde, azul o amarillo, siendo de gran aplicación en escaparates, escenarios, etc.

En la Figura 17.2 se muestran diferentes tipos constructivos de lámparas halógenas.

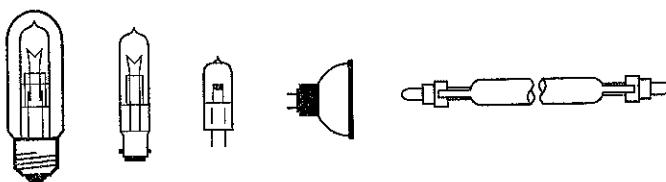


Figura 17.2. Lámparas halógenas.

Las aplicaciones más comunes de las lámparas halógenas las encontramos en el alumbrado del automóvil, proyectores de cine y diapositivas, fotografía, teatro, televisión, decoración de interiores y escaparates, galerías de arte, museos, etc. En la gama de alta potencia (hasta unos 2.000 W) en combinación con aparatos de proyección son ideales para el alumbrado exterior de edificios y monumentos, pequeñas instalaciones deportivas, etc.

17.2.3 Lámparas fluorescentes

La utilización de lámparas fluorescentes para la iluminación de todo tipo de locales es muy común, dado el buen rendimiento luminoso que éstas poseen (unas cuatro veces mejor que una incandescente) y su larga duración (8.000 horas). El único inconveniente que quizás puedan presentar las lámparas fluorescentes frente a las incandescentes es que éstas necesitan un equipo suplementario para su funcionamiento.

El funcionamiento de una lámpara fluorescente difiere totalmente de las incandescentes; en las primeras, la corriente debe atravesar un gas o un vapor metálico que está encerrado en un tubo, donde se desprende luz a baja temperatura (luz fría). Las lámparas fluorescentes, como todas aquellas que se basan en el mismo principio (lámparas de vapor de mercurio, de vapor de sodio, etc.), se conocen como *lámparas de descarga* y se basan en el fenómeno de la *luminiscencia*. Veamos en qué consiste este fenómeno.

Se introduce un gas noble en un tubo cerrado (Figura 17.3). Si sometemos a los electrodos del tubo a una tensión lo suficientemente alta, algún electrón será arrancado del electrodo negativo y se sentirá atraído hacia el positivo. A medida que estos electrones chocan con los átomos del gas y arrancan

electrones superficiales de aquellos átomos se sigue este proceso indefinidamente, ya que cada vez se desencadenan más choques.

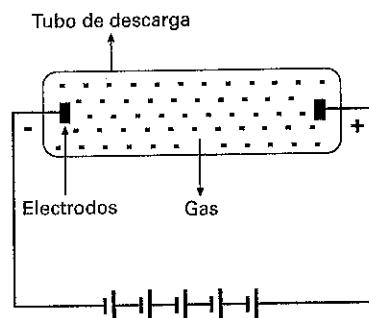


Figura 17.3. Funcionamiento de una lámpara de descarga.

Cuanto más electrones libres existan, mayor será la corriente que circule por el tubo y menor la resistencia que ofrecerá el tubo al paso de la corriente eléctrica, por lo que será necesario limitarla desde el exterior por medio de un dispositivo adecuado (la reactancia).

El átomo que queda sin un electrón después de un choque se llama ión. Ahora bien, no todos los choques entre un electrón y un átomo producen la ionización de éste último, sino que, con gran frecuencia, la energía del choque del electrón libre no es suficiente para arrancar un electrón del átomo, dejándolo sujeto a éste, pero en una órbita superior (véase Figura 17.4). Cuando sucede esto último, los electrones tienden a volver a su órbita inicial, restituyendo, en forma de radiaciones electromagnéticas la energía recibida en el choque (átomo excitado). Estas radiaciones son visibles en algunos gases.

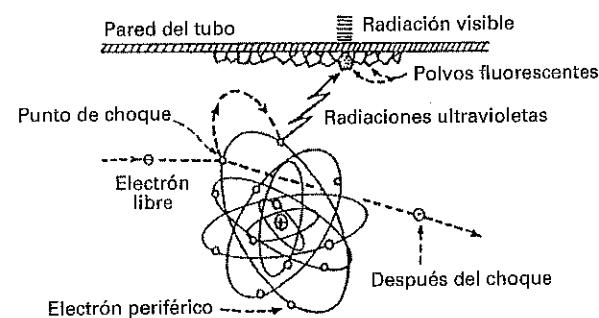


Figura 17.4. Efecto de luminiscencia en una lámpara fluorescente.

En las lámparas fluorescentes se utiliza gas argón a baja presión y una pequeña cantidad de mercurio líquido que se evapora al entrar en funcionamiento el tubo. Como la radiación que emiten estas lámparas no es visible, se deposita en las paredes internas del tubo de descarga una capa de polvos fluorescentes que transforman dichas radiaciones en visibles.

En la Figura 17.5 se muestra el aspecto de un tubo fluorescente al que se le ha añadido en cada uno de sus extremos un

filamento incandescente para facilitar el proceso de arranque del mismo.

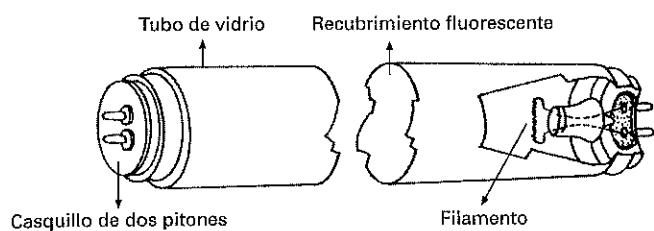


Figura 17.5. Tubo fluorescente.

Una de las características de los tubos fluorescentes es que no funcionan de forma espontánea cuando son conectados directamente a la red, por lo que es necesario equiparlas con un circuito de arranque. Éste deberá cumplir las siguientes funciones:

a) Nada más cerrar el interruptor de alimentación, el equipo debe proporcionar una tensión entre los electrodos mucho más elevada que la de la red, para que así pueda ionizarse, en un primer momento, la atmósfera de argón (hay que tener en cuenta que la separación que existe entre los electrodos de un tubo fluorescente viene a ser del orden de 1,5 m y que, por tanto la resistencia de éste es muy elevada al principio).

b) Una vez que el tubo se ha encendido y el mercurio se ha vaporizado, la atmósfera del vapor metálico se hace muy conductora, lo que provoca una avalancha de electrones que hay que limitar a un valor adecuado antes de que destruya el tubo.

En la Figura 17.6 se muestra el circuito de arranque de un tubo fluorescente.

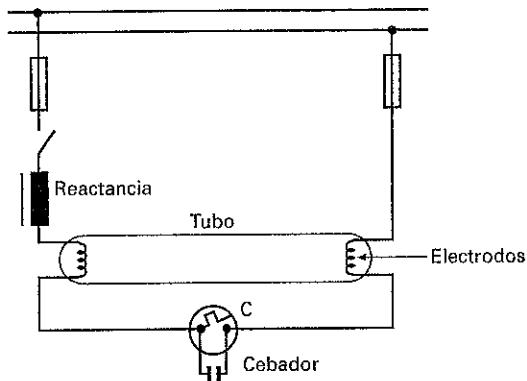


Figura 17.6. Circuito de arranque de una lámpara fluorescente.

Para conseguir una tensión elevada en el arranque se incorpora una bobina de alto coeficiente de autoinducción o reactancia, que se conecta en serie con el tubo de descarga. Cuando cerramos el interruptor, el cebador cierra sus contactos, permitiendo que los filamentos de los extremos calienten los electrodos de emisión (esto facilita la emisión electrónica). En muy poco tiempo, el cebador abre bruscamente sus contactos, provocando una fuerte f.e.m. de autoinducción en la bobina. Esta tensión queda aplicada a los extremos del tubo y es suficiente para que se encienda el mismo. Una vez arrancado el tubo, el cebador mantiene sus contactos abiertos.

Al estar la reactancia conectada en serie con el tubo de descarga, ésta produce una caída de tensión en el circuito que hace que la tensión y la corriente entre los extremos del tubo quede limitada a valores adecuados para éste.

¿Cómo funciona el cebador en el circuito? El cebador se compone de dos láminas, una de ellas bimetálica, situadas en el interior de una pequeña ampolla de vidrio llena de gas helio a baja presión (Figura 17.7).

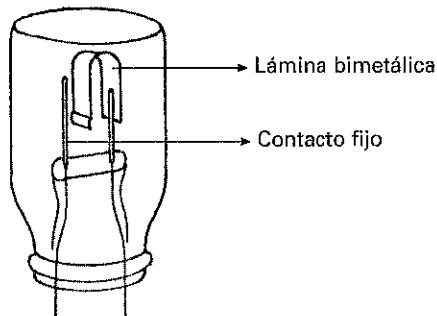


Figura 17.7. Cebador.

Al cerrar el interruptor de alimentación, la tensión queda aplicada totalmente entre las dos láminas del cebador. Como dichas láminas están muy próximas, se establece entre ellas, y a través del gas de relleno, un pequeño arco, el cual produce un aumento de la temperatura en el interior de la ampolla (el cebador lanza un destello luminoso). Esto hace que la lámina bimetálica se deforme hasta ponerse en contacto con la fija, cerrando con ello el circuito de caldeo. Como la corriente ya no circula a través del gas, sino que lo hace a través de los contactos del cebador, la lámina bimetálica se enfria y abre bruscamente el circuito, induciéndose una sobretensión en la reactancia, lo que determina el establecimiento de corriente por el interior del tubo de descarga y la consiguiente emisión de radiaciones luminosas. Una vez que el tubo se ha encendido, la reactancia produce una caída de tensión, por estar en serie con el circuito, lo que hace que la tensión existente entre las dos láminas del cebador sea insuficiente para hacerlo funcionar de nuevo.

Una de las grandes ventajas de las lámparas fluorescentes es su gran eficacia lumínosa, del orden de 80 lm/W. En la Tabla 17.4 se indican algunas de las características más importantes de una gama comercial de lámparas fluorescentes.

Como se deduce de la Tabla 17.4, existen tubos fluorescentes en tres tonalidades básicas según sea su temperatura de color: blanco cálido, blanco frío o industrial, luz dfa. De esta forma siempre existe una lámpara que se acomode a las necesidades específicas de cada aplicación.

Como se puede comprobar en la Tabla 17.4, según se aumenta la temperatura de color de los tubos fluorescentes se aumenta también su eficacia para reproducir los colores, aunque, eso sí, a costa de reducir la eficacia lumínosa.

Otro aspecto a destacar de este tipo de lámparas es que el flujo luminoso depende de la temperatura exterior, logrando la máxima efectividad a los 40 °C. Para temperaturas por debajo de los 0 °C el flujo luminoso puede descender hasta el 10%, por lo que no se recomienda la instalación de tubos flu-

Potencia W	Longitud mm.	Temperatura color aprox.	I.R.C	Flujo luminoso lm	Eficacia luminosa lm/W	Tono
40	1.200	3.000 °K	55	3.200	80	Blanco cálido
40	1.200	4.000 °K	66	3.200	80	Blanca fría
40	1.200	6.000 °K	75	2.600	65	Luz día

Tabla 17.4. Características de lámparas fluorescentes.

rescentes para iluminación de exteriores donde se prevea la aparición de heladas nocturnas.

La utilización de reactancias para el encendido de las lámparas fluorescentes produce un factor de potencia bajo (entorno a 0,6), que se corrige mediante un condensador de compensación, normalmente incorporado en el equipo de arranque.

Los tubos fluorescentes aumentan su eficacia luminosa hasta los 104 lm/W si se les aumenta la frecuencia de alimentación hasta los 28 KHz. En la actualidad, en sustitución de la reactancia y del cebador, se fabrican balastos electrónicos, como el que se muestra en el esquema de la Figura 17.8 que consiguen arrancar el tubo fluorescente de una forma instantánea y sin parpadeos gracias a las altas frecuencias que proporcionan. Además, es posible reducir el flujo luminoso de la lámpara con un simple potenciómetro.

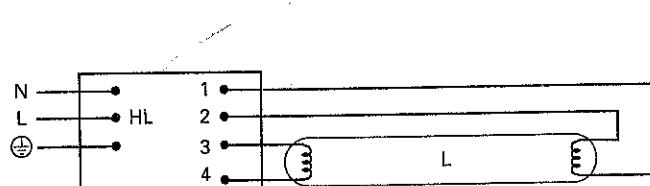


Figura 17.8. Circuito de arranque de una lámpara fluorescente con balasto electrónico.

Dada la buena eficacia luminosa de los tubos fluorescentes, su larga vida y sus variadas posibilidades de temperatura de color, éstos se han convertido en una de las fuentes luminosas de más extendida aplicación para el alumbrado de interiores en los que las alturas de los techos no sean excesivas.

17.2.4 Lámparas fluorescentes compactas o de bajo consumo

Este tipo de lámparas se está popularizando mucho en sustitución de las lámparas incandescentes. Básicamente son lámparas fluorescentes con potencias entre 5 y 60 W que, por lo general, llevan incorporado el equipo de arranque y disponen de un casquillo E.27 para ser conectadas a los portalámparas clásicos de las incandescentes (Figuras 17.9 a y 17.9 b).

Algunas de estas lámparas incorporan equipo de arranque mediante balasto electrónico.

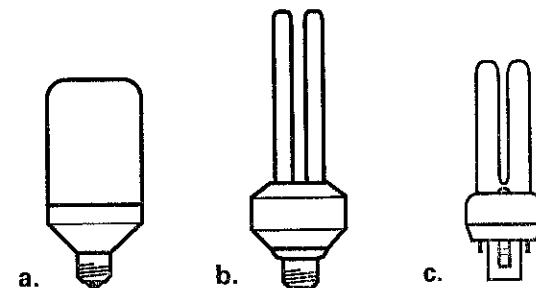


Figura 17.9 Lámparas fluorescentes compactas: a) y b), con casquillo E27; c) con conector de dos patillas.

Existen algunos modelos que sólo incorporan el cebador en su base, siendo necesario una reactancia exterior para su funcionamiento. Este tipo de lámparas suelen poseer un conector de dos patillas, tal como se muestra en la Figura 17.9 c. Por último, también se fabrican lámparas compactas sin equipo de arranque, las cuales disponen para su conexión de cuatro patillas.

En la Figura 17.10 se expone una comparativa para sustituir un lámpara incandescente por una lámpara fluorescente compacta que produzca el mismo flujo luminoso.

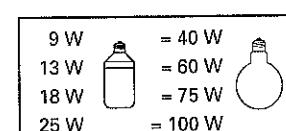


Figura 17.10. Comparativa entre lámparas incandescentes y lámparas fluorescentes compactas.

Este tipo de lámparas posee una vida media de unas 6.000 horas; su temperatura de color está en torno a los 2.700 °K, que se corresponde con el blanco cálido (muy similar a las incandescentes); su índice de reproducción cromática es alto, en torno a 85. Estas buenas características unidas a la facilidad de montaje hace que estén sustituyendo paulatinamente a las lámparas incandescentes. El único inconveniente que presentan es su más alto precio.

17.2.5 Lámparas de vapor de mercurio de color corregido

En estas lámparas, la descarga se realiza a través de una atmósfera de vapor de mercurio. Para mejorar el índice de

reproducción cromático de estas lámparas se recubre el interior de la ampolla con polvos fluorescentes de vandato de itrio (véase Figura 17.11). Las características más importantes de estas lámparas son:

- Necesitan de un equipo de arranque
- El rendimiento es de 40 a 60 lm/W
- Vida útil entre 8.000 y 16.000 horas
- Tiempo de encendido entre 4 y 5 minutos
- IRC de 40 a 60
- Potencias entre 50 y 2.000 W
- Temperatura de color: 3.500/4.500 °K
- Tiempo de reencendido entre 3 y 6 minutos

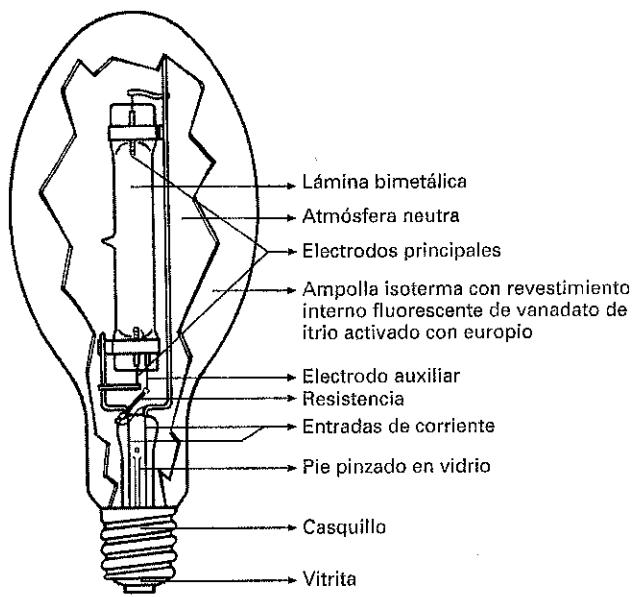


Figura 17.11. Lámpara de vapor de mercurio de color corregido.

Como se desprende de sus características, las lámparas de vapor de mercurio de color corregido consiguen una buena eficacia luminosa, una larga duración, una temperatura de color intermedia y un índice de reproducción cromático aceptable. Ésto, unido a que se fabrican unidades de gran potencia, las hace adecuadas para iluminar grandes áreas como garajes, zonas de almacenaje, estaciones de servicio, aeropuertos, zonas deportivas, calles comerciales y carreteras, etc.

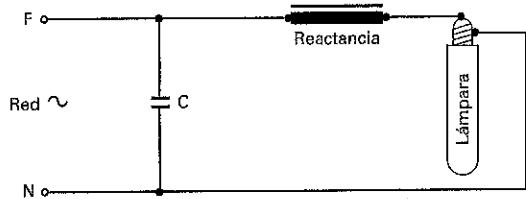


Figura 17.12. Esquema de conexiones para el encendido de una lámpara de vapor de mercurio de color corregido.

El encendido de estas lámparas se hace directamente con la tensión de red y con la ayuda del electrodo auxiliar, pero una vez encendida la lámpara es necesario limitar la tensión sobre la misma, para lo que se suele utilizar un reactancia conecta-

da en serie, tal como se muestra en la Figura 17.12. Para compensar el bajo factor de potencia ocasionado por esta reactancia se conecta un condensador en paralelo.

17.2.6 Lámparas de vapor de mercurio con halogenuros metálicos

Estas lámparas son básicamente iguales que las anteriores; al introducir halogenuros metálicos en el interior del tubo se consigue una mayor eficacia luminosa (65 lm/W a 90 lm/W) y una fiel reproducción de los colores (IRC = 60 a 85), una buena temperatura de color (4.000 a 6.000 °K) y una vida útil larga (6.000 a 10.000 horas).

En la Figura 17.13 se muestra el aspecto y constitución de una lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos, y donde se observan los dos tipos de ampollas exteriores con que se suelen fabricar, bien cilíndrica u ovoide satinada.

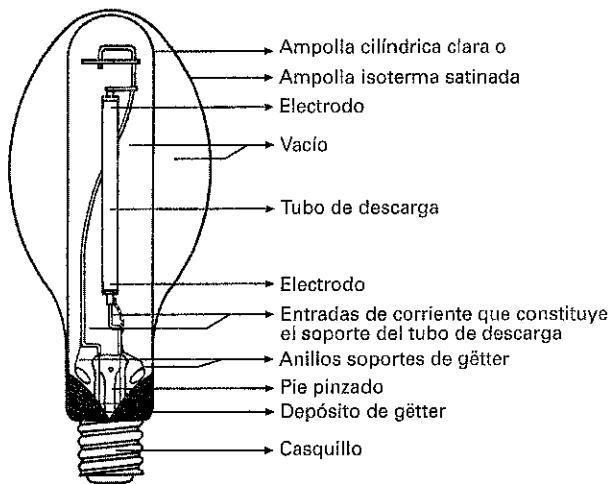


Figura 17.13. Lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos.

Se fabrican en potencias que van de los 250 a 5.000 W y de diferentes apariencias de color. Además se adaptan muy bien a sistemas de proyección. Se utilizan para iluminar grandes áreas donde la calidad de reproducción de los colores sea importante: exposiciones, retransmisión deportiva para TV, hipódromos, parques, monumentos, etc.

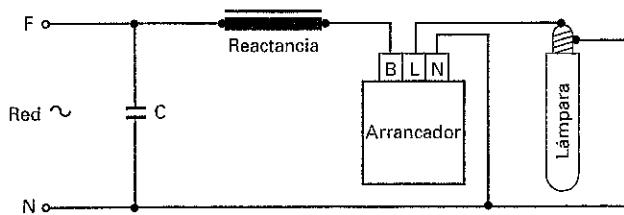


Figura 17.14. Esquema de conexiones para el encendido de una lámpara de vapor de mercurio con halogenuros metálicos.

Antes de montar estas lámparas es importante observar las indicaciones que dan los fabricantes en cuanto a las posibles posiciones de funcionamiento, ya que éstas quedan limitadas por la acción que ejerce la gravedad sobre los componentes halogenados.

El encendido de estas lámparas es lento (entre 3 y 10 minutos) al igual que el reencendido. Para el funcionamiento de este tipo de lámparas es necesario la aplicación de tensiones de encendido muy elevadas (1,5 a 5 KV), para lo que se utilizan arrancadores especiales en combinación con reactancias de alto carácter inductivo, tal como se muestra en la Figura 17.14.

17.2.7 Lámparas de vapor de sodio a alta presión

La descarga se realiza a través de vapor de sodio de alta presión (véase el aspecto de la lámpara en Figura 17.15) con lo que se consigue aumentar bastante el rendimiento lumínoso (60 a 130 lm/W).

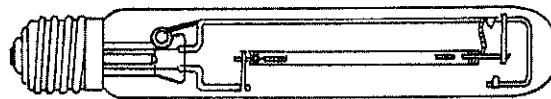


Figura 17.15. Lámpara de vapor de sodio a alta presión.

En un principio el índice de reproducción cromático que se conseguía con estas lámparas era muy bajo, del orden de 25, por lo que su uso quedaba limitado a zonas donde la reproducción de los colores no fuese importante, como autopistas, avenidas, muelles marítimos, etc. Los nuevos desarrollos consiguen elevar el IRC entre 65 y 80, lo que unido a su larga vida útil (12.000 horas), las hacen ideales para la iluminación de alumbrado público, zonas peatonales, monumentos, paseos, etc.

El proceso de encendido de estas lámparas es muy similar al que precisan las lámparas de vapor de mercurio con halogenuros metálicos (véase esquema de conexiones de la Figura 17.14). No obstante, hay que pensar que los esquemas de conexión pueden variar de una lámpara a otra (según modelo comercial, potencia, etc), por lo que se recomienda ajustarse a las indicaciones que proporciona el fabricante en cada caso.

17.2.8 Lámparas de vapor de sodio a baja presión

Estas lámparas son básicamente igual que las anteriores; al introducir vapor de sodio a baja presión en el interior del tubo

se consigue una muy alta eficacia luminosa (100 lm/W a 200 lm/W). A cambio, se consigue muy baja temperatura de color (1.800 °K) y una muy mala reproducción de los colores (IRC es nulo). Se produce una emisión de luz amarilla monocromática que se corresponde con la máxima sensibilidad del ojo.

En la Figura 17.16 se muestra el aspecto tubular en forma de U de una lámpara de vapor de sodio a baja presión.

Se fabrican en potencias que van de los 18 a 130 W y se utilizan para iluminar grandes áreas donde la calidad de reproducción de los colores no sea importante frente a la eficacia luminosa: autopistas, pasos subterráneos, puertos, etc.

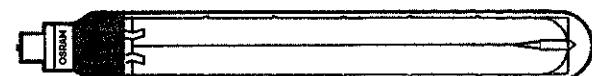


Figura 17.16. Lámpara de vapor de sodio a baja presión.

Para el encendido de estas lámparas se requiere una tensión relativamente elevada (400 - 600 V), para lo que se puede utilizar un autotransformador o un arrancador electrónico como el de la Figura 17.14.

En la Figura 17.17, se muestra el esquema del circuito de conexión para el encendido de estas lámparas mediante autotransformador. Éste proporciona un impulso de tensión inicial suficiente para el inicio de la descarga, para posteriormente limitar la corriente a valores aceptables para el funcionamiento de la lámpara.

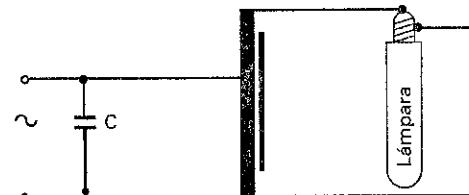


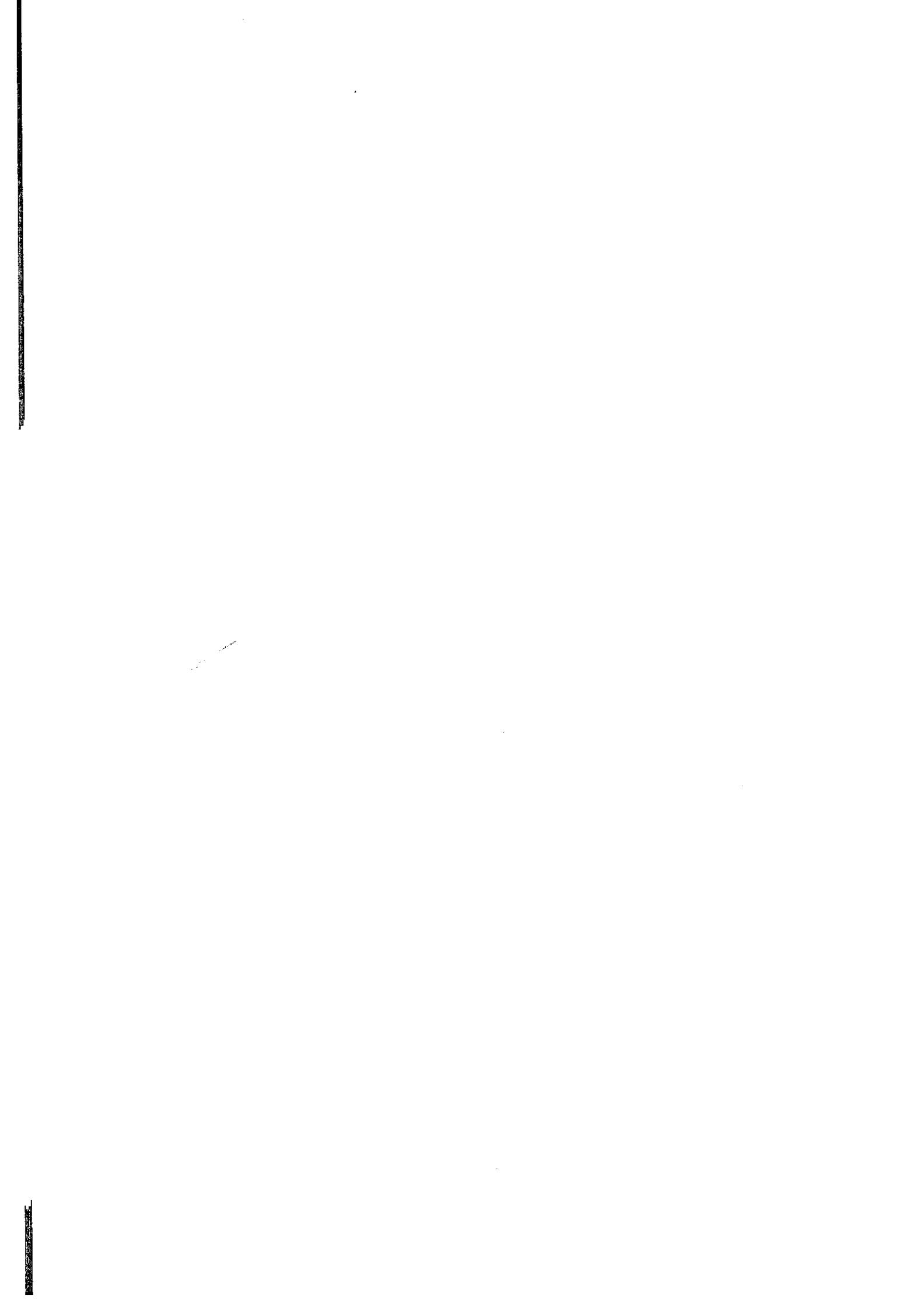
Figura 17.17. Esquema de conexiones para el encendido de una lámpara de vapor de sodio a baja presión mediante autotransformador.

Actividades

1. Consigue diferentes lámparas comerciales, así como las informaciones técnicas que proporcionan los fabricantes de las mismas y estudia sus características. Seguidamente realiza el montaje para el encendido de tubos fluorescentes, lámparas de vapor de mercurio y de vapor de sodio siguiendo las indicaciones que facilitan los fabricantes de las mismas. Utiliza el polímetro para medir las diferentes magnitudes eléctricas que se dan en las distintas partes de los circuitos de encendido de las lámparas de descarga.
 2. Analiza y compara las características de las diferentes lámparas estudiadas, para seguidamente confeccionar un cuadro resumen donde aparezcan por un lado los tipos de lámparas y por otro su características más relevantes, como son, gama de potencias,
 3. Consulta en Internet (<http://www.l2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.
- Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) ¿Qué lámpara produce más flujo luminoso, una incandescente de 60 W o una fluorescente de 40 W?
 - Incandescente de 60 W
 - Fluorescente de 40 W
- 2) El flujo luminoso se mide en:
 - Lux
 - Lumen
 - Candela
- 3) Un índice de reproducción cromático de 100 indica que la luz proporcionada por la fuente luminosa:
 - Es de un tono anaranjado
 - Reproduce muy mal los colores
 - Reproduce perfectamente los colores
- 4) Una temperatura de color elevada indica que la luz proporcionada por la fuente luminosa:
 - Es de un tono muy cálido y anaranjado
 - Es de un tono frío y blanquecino
 - Reproduce muy mal los colores
- 5) Las lámparas de descarga en un gas:
 - Funcionan gracias a la alta temperatura que se da en el gas
 - Funcionan gracias al efecto de la luminiscencia
 - Poseen un índice de reproducción cromático superior a las incandescentes
- 6) Las lámparas incandescentes poseen:
 - Un bajo IRC
 - Una alta eficacia luminosa
 - Una vida corta
- 7) Las lámparas incandescentes halógenas:
 - Poseen una vida más larga que las incandescentes
 - Funcionan gracias al fenómeno de la luminiscencia
 - Proporciona un IRC muy bajo
- 8) Las lámparas fluorescentes:
 - Mejoran su eficacia luminosa al aumentar la frecuencia
 - Poseen un IRC mas elevado que las incandescentes
 - Se fabrican de potencias elevadas
- 9) Las lámparas de vapor de mercurio de color corregido:
 - Su tiempo de encendido es largo
 - No necesitan de equipo de arranque
 - Su IRC es muy alto
- 10) Las lámparas de vapor de mercurio con halogenuros metálicos:
 - Su vida útil es baja
 - Desarrollan una eficacia luminosa baja
 - Necesitan de un equipo especial para su encendido
- 11) Las lámparas de vapor de sodio a baja presión poseen:
 - Una eficacia luminosa elevada
 - Un IRC elevado
 - Una temperatura de color elevada
- 12) Una lámpara fluorescente de 40 W (blanco industrial) produce un flujo luminoso de 2.500 lm, mientras que una incandescente de la misma potencia produce 500 lm. Determinar la eficacia luminosa de ambas lámparas.



El Transformador

Introducción

El transformador se puede considerar como una máquina eléctrica estática (sin movimiento) que es capaz de cambiar los valores de tensión y corriente sin alterar la frecuencia ni la potencia de una forma significativa.

Una de las principales razones por las que se emplea la corriente alterna y no la corriente continua en la producción, transporte, distribución y consumo de la electricidad es que este tipo de corriente es muy fácil de elevar y reducir su tensión mediante el transformador. Gracias a los transformadores se puede aumentar la tensión antes de transportar la energía a grandes distancias por la líneas de alta tensión, con el fin de reducir la intensidad y con ella las pérdidas que se dan en los conductores por efecto Joule. Con ellos también se puede reducir la tensión, con el fin de poder distribuirla y consumirla en las industrias y viviendas, a valores que sean seguros para las personas que manipulan los sistemas eléctricos.

Aparte de estas aplicaciones, los transformadores también se utilizan para separar eléctricamente dos circuitos, alimentar con pequeñas tensiones circuitos de mando de sistemas automáticos, alimentar todo tipo de aparatos electrónicos (televisores, equipos de sonido, receptores de radio, ordenadores, etc.), adaptar aparatos eléctricos a la tensión de red cuando ésta es superior o inferior a la nominal de los mismos, acondicionar grandes tensiones y corrientes para poder ser medidas sin dificultad.

Contenido

- Funcionamiento en vacío y carga del transformador.
- Ensayo en vacío y cortocircuito del transformador.
- Pérdidas en el cobre y en el hierro.
- Tensión de cortocircuito.
- Intensidad de cortocircuito accidental.
- Caída de tensión.
- Rendimiento.
- Autotransformadores.
- Transformadores trifásicos.
- Conexión en paralelo de transformadores.
- Refrigeración de los transformadores.
- Ensayos de los transformadores.

Objetivos

- Describir el funcionamiento del transformador.
- Seleccionar las características de un transformador para una determinada aplicación práctica.
- Analizar el funcionamiento de un transformador en vacío, en carga y en cortocircuito.
- Determinar el rendimiento de un transformador.
- Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con transformadores, identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

18.1 Funcionamiento del transformador

Un transformador posee dos bobinados: uno primario y otro secundario que se arrollan sobre un núcleo magnético común, formado por chapas magnéticas apiladas (Figura 18.1). Por el bobinado primario se conecta la tensión de entrada y por el bobinado secundario obtenemos la tensión de salida. El mismo transformador puede funcionar como elevador o reductor. Así, por ejemplo, con un transformador de 220/125 V, si conectamos el bobinado de 220 V a una red de la misma tensión, obtendremos en el otro bobinado una tensión de salida de 125 V (transformador reductor); a la inversa, si conectamos el bobinado de 125 V a una red de la misma tensión, obtendremos en el otro bobinado una tensión de salida de 220 V (transformador elevador).

N_1 = N° de espiras del primario

N_2 = N° de espiras del secundario

V_1 = Tensión del primario

V_2 = Tensión del secundario

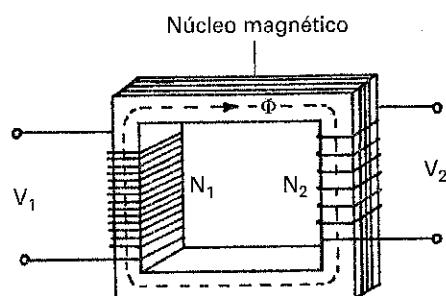


Figura 18.1. Transformador elemental.

¿Cómo consigue cambiar la tensión un transformador? Si observas la Figura 18.1, podrás comprobar que no existe conexión eléctrica entre el bobinado primario y el secundario. ¿Por dónde pasa entonces la energía eléctrica de un bobinado a otro? Estos fenómenos se pueden explicar gracias a la inducción electromagnética.

Al conectar el bobinado primario, de N_1 espiras, a una tensión alterna senoidal V_1 , aparece una pequeña corriente por dicho bobinado que produce en el núcleo magnético un flujo variable (Φ) también de carácter senoidal. Este flujo variable se cierra por todo el núcleo magnético y corta los conductores del bobinado secundario, por lo que se induce una fuerza electromotriz en el secundario que dependerá del número de espiras del mismo.

De esta forma, la transferencia de energía eléctrica se hace a través del campo magnético variable que aparece en el núcleo del transformador, no siendo necesario la conexión eléctrica entre ambos bobinados, por lo que se puede decir que un transformador aísla eléctricamente el circuito del primario del secundario (la bobina del primario convierte la energía eléctrica en energía en forma de campo magnético variable; la bobina del secundario se comporta como un generador y transforma dicho campo variable otra vez en energía eléctrica gracias a la inducción electromagnética).

En el caso de que el número de espiras del primario N_1 fuese igual al del secundario N_2 , la tensión V_2 , que se induce en el secundario, sería aproximadamente igual a la aplicada al primario V_1 . Hay que pensar que el flujo que se produce en el primario es proporcional a la tensión aplicada a la bobina y al número de espiras de la misma. Por otro lado, la tensión que se induce en el secundario es proporcional al flujo común y al número de espiras del secundario. Si el número de espiras es igual, la tensión que se induce en el secundario es igual que la administrada por el primario.

En el caso de que el número de espiras del secundario sea mayor que la del primario, la tensión del secundario también será mayor. Volviendo al mismo razonamiento, para un mismo flujo común, en cada una de las espiras del secundario se induce una cierta tensión, por lo que cuantas más espiras tenga este bobinado, más tensión aparecerá en el mismo. El mismo razonamiento se puede hacer para un transformador reductor. En general, se cumple con gran aproximación que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \text{ (relación de transformación)}$$

Por lo general, los transformadores monofásicos comerciales presentan la disposición que se aprecia en la Figura 18.2. El núcleo de hierro posee la forma de ventana y está constituido por numerosas chapas magnéticas de pequeño espesor, apiladas unas sobre otras y aisladas entre sí mediante un barniz. Esta disposición reduce considerablemente las pérdidas que aparecen en el hierro por efecto de las corrientes parásitas.

Para formar el paquete de chapas se utilizan tornillos o remaches, procurando que éstos queden aislados eléctricamente de las chapas. Además se tratan adecuadamente las superficies exteriores del núcleo para evitar la corrosión.

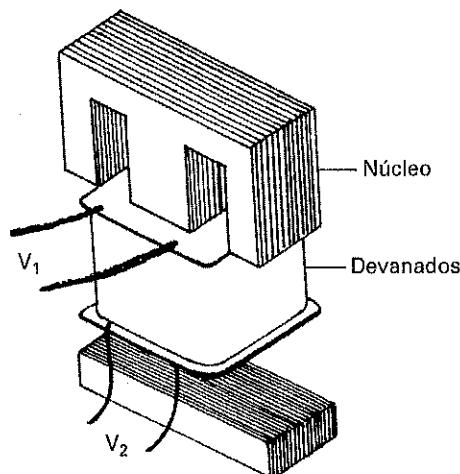


Figura 18.2. Constitución de un transformador monofásico.

Los dos bobinados aparecen arrollados sobre un carrete que abraza la columna central del núcleo. De esta forma, se consigue que el flujo creado por el primario abrace mejor al secundario, reduciéndose considerablemente los flujos de dispersión. El conductor que se utiliza para las bobinas suele ser de cobre aislado mediante un barniz. Las diferentes capas de los bobinados se aislan eléctricamente mediante papeles especiales, y la separación entre el bobinado primario y secundario se aísla mediante tejidos engrasados.

18.2 Funcionamiento de un transformador ideal

Con la idea de hacer más sencillo el estudio del transformador, comenzaremos considerando que éste es ideal, por lo que no tendremos en cuenta las pérdidas que se puedan dar tanto en los circuitos eléctricos (efecto Joule), como magnéticos (corrientes parásitas, histéresis, dispersión de flujos).

Experiencia 18.1. Conecta a una red de 220 V el primario de un transformador monofásico de 220 /125 V y mide la tensión en vacío en el primario y en el secundario. Con los datos obtenidos en el ensayo averigua la relación de transformación del mismo (Figura 18.3).



Figura 18.3

En estas condiciones conecta un amperímetro en el primario. ¿Cómo es la corriente en vacío por el primario?

Ahora repite la misma experiencia conectando el secundario a una red de 125 V.

Estando conectado el primario a la red eléctrica, conecta una lámpara incandescente al secundario y mide la corriente en el primario y en el secundario (Figura 18.4). ¿Qué relación hay entre ellas?



Figura 18.4

En conclusión, en vacío, la corriente por el primario de un transformador es muy pequeña. Al conectar una carga al secundario, aparece una corriente por el mismo que, a su vez, hace circular una corriente por el primario, cumpliéndose con una cierta aproximación que $V_1/V_2 = I_2/I_1 = m$.

18.2.1 Funcionamiento de un transformador ideal en vacío

Se conecta el primario a la red, mientras que el secundario no se conecta a carga alguna (Figura. 18.5). Por el primario aparece una corriente de vacío I_0 , de carácter senoidal, que al recorrer los conductores de la bobina produce, a su vez, un

flujo alterno senoidal común a ambos bobinados. Al cortar este flujo a la bobina primaria, se induce en la misma, por efecto de autoinducción, una fuerza electromotriz en el primario E_1 , cuyo valor instantáneo dependerá del número de espiras del primario y de lo rápido que varíe el flujo, es decir:

$$e_1 = N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

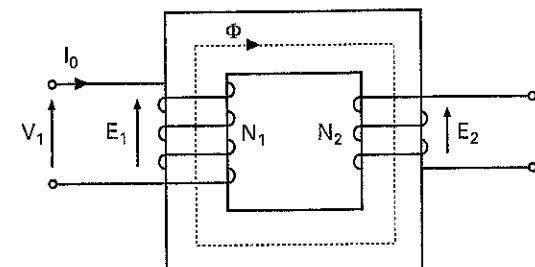


Figura 18.5. Transformador ideal en vacío.

Según la ley de Lenz, esta f.e.m. se opone en todo momento a la causa que la produce, es decir, a la tensión V_1 aplicada al primario. Como se supone que no hay ningún tipo de pérdidas, los valores instantáneos de V_1 y e_1 son iguales y de signos opuestos.

Partiendo de la expresión general de inducción electromagnética (ley de Faraday), para un corriente alterna senoidal, el valor eficaz de esta f.e.m. viene determinado por la expresión:

$$E_1 = 4,44 fN_1 \Phi_{máx}$$

E_1 = f.e.m. eficaz inducida en el primario (V)

f = frecuencia (Hz)

N_1 = número de espiras del primario

$\Phi_{máx}$ = flujo máximo (Wb)

El bobinado secundario es cortado también por el flujo común engendrado por el primario, por lo que se generará en él mismo una f.e.m., que tendrá por valor eficaz:

$$E_2 = 4,44 fN_2 \Phi_{máx}$$

E_2 = f.e.m. eficaz inducida en el secundario(V)

N_2 = número de espiras del secundario

Si dividimos las dos expresiones de las fuerzas electromotrices eficaces, como la frecuencia y el flujo son comunes, obtendremos el siguiente resultado:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \text{ (relación de transformación)}$$

En definitiva, hemos podido comprobar que la f.e.m. inducidas en ambos bobinados depende del número de espiras de

los mismos. Dado que no existen pérdidas, los valores eficaces de las tensiones en el primario y en el secundario son iguales a sus respectivas f.e.m., cumpliéndose con aproximación que:

$$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{E_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Ejemplo: 18.1

En la fabricación de un transformador monofásico se han utilizado 750 espiras en el primario y 1.500 en el secundario. El flujo máximo que aparece en el núcleo magnético es de 3 mWb. Determinar las tensiones en el primario y en el secundario para una frecuencia de 50 Hz, así como la relación de transformación

Solución:

$$E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_{\max} = 4,44 \cdot 50 \cdot 750 \cdot 0,003 = 499,5 \text{ V}$$

$$E_2 = 4,44 f N_2 \Phi_{\max} = 4,44 \cdot 50 \cdot 1.500 \cdot 0,003 = 999 \text{ V}$$

Lo cual nos indica que es un transformador elevador, siendo su relación de transformación:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{750}{1.500} = 0,5$$

Ejemplo: 18.2

Un transformador ideal con 500 espiras en el primario y 100 en el secundario se conecta a una red de C.A. de 1.900 V, 50 Hz. Averiguar la relación de transformación y la tensión en el secundario.

$$\text{Solución: } m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{500}{100} = 5$$

Como el número de espiras del secundario es menor que en el primario, el transformador reducirá la tensión (en este caso 5 veces).

$$m = \frac{V_1}{V_2} \Rightarrow V_2 = \frac{V_1}{m} = \frac{1.900}{5} = 380 \text{ V}$$

18.2.2 Funcionamiento del transformador ideal en carga

Al conectar el secundario del transformador a una carga $Z \angle \varphi$, la f.e.m. E_2 hace que aparezca una corriente por la carga I_2 , desfasada un ángulo φ de la misma (Figura 18.6).

En un principio podría parecer que la corriente I_2 al recorrer el bobinado secundario tendería a modificar el flujo común φ generado por el primario, pero vamos a comprobar cómo esto no ocurre así.

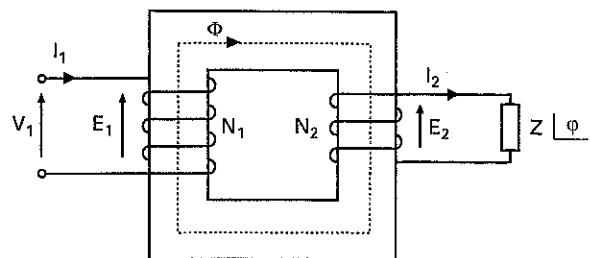


Figura 18.6. Transformador ideal en carga.

Cuando tratamos el funcionamiento en vacío se dijo que la f.e.m. del primario era de sentido opuesto e idealmente igual a la tensión aplicada, es decir:

$$V_1 = E_1 = 4,44 f N_1 \Phi_{\max} \Rightarrow \Phi_{\max} = \frac{V_1}{4,44 f N_1}$$

Tanto la frecuencia como el número de espiras permanece constante, por lo que el valor del flujo común depende exclusivamente de la tensión que se aplique al primario.

En el transformador en carga, la intensidad I_2 produce una fuerza magnetomotriz secundaria ($N_2 I_2$) que tiende a modificar el flujo común. Como acabamos de comprobar que dicho flujo permanece fijo con la tensión primaria, el primario se verá forzado a producir otra fuerza magnetomotriz de sentido contrario que equilibre la originada por el secundario. Para ello tendrá que circular una corriente extra por el primario, de tal forma que se cumpla la igualdad de dichas fuerzas magnetomotoras:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

$$\text{Despejando, se cumple que: } \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = m = \frac{E_1}{E_2}$$

En conclusión, vemos que la relación de transformación de intensidades por el primario y por el secundario son inversas a las de las tensiones. Por supuesto que para que esto se cumpla hay que suponer que la corriente de vacío I_0 es despreciable (en un transformador real esta corriente no es superior al 5% de la corriente a plena carga). De aquí también se puede extraer la siguiente relación:

$$E_1 I_1 = E_2 I_2$$

Expresión que nos indica que un transformador ideal, en el cual se supone que las pérdidas de potencia son nulas, la potencia transferida al secundario es igual que la tomada por el primario. De la misma forma, también podemos decir que las potencias activas, reactivas y aparentes absorbidas por el primario son iguales que las suministradas por el secundario:

$$V_1 I_1 \cos \varphi_1 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$V_1 I_1 \operatorname{sen} \varphi_1 = V_2 I_2 \operatorname{sen} \varphi_2$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

Ejemplo: 18.3

Un transformador reductor de 220/125 V proporciona energía a una motobomba de 2 KW, 125 V, $\cos \varphi = 0,6$. Suponiendo la corriente de vacío y las pérdidas despreciables, determinar la intensidad por el primario y por el secundario, así como la relación de transformación del mismo. ¿Cuál es la potencia aparente que suministra el transformador?

Solución: Calculamos primero la corriente por el secundario:

$$P = V_2 I_2 \cos \varphi \Rightarrow I_2 = \frac{P}{V_2 \cos \varphi} = \frac{2.000}{125 \cdot 0,6} = 26,7 \text{ A}$$

La relación de transformación, es:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{220}{125} = 1,76$$

La corriente por el secundario la calculamos teniendo en cuenta la relación de transformación:

$$m = \frac{I_2}{I_1} \Rightarrow I_1 = \frac{I_2}{m} = \frac{26,7}{1,76} = 15,2 \text{ A}$$

La potencia aparente que suministra el transformador, es:

$$S = V_2 I_2 = 125 \cdot 26,7 = 3.338 \text{ VA}$$

Ejemplo: 18.4

Una subestación de transformación es alimentada con una red trifásica a 45 KV y 50 Hz, reduciendo la tensión hasta 10 KV para su distribución. Para ello dispone de un transformador reductor de 45 KV/10 KV. Determinar las intensidades de línea por el primario y por el secundario del transformador si la demanda de potencia es de 10 MVA.

Solución: Para resolver este ejercicio nos valdremos de las expresiones de potencia aparente trifásica: $S = \sqrt{3} V_c I_L$

La intensidad por el primario, es:

$$I_{1L} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{1C}} = \frac{10.000.000}{\sqrt{3} \cdot 45.000} = 128 \text{ A}$$

La intensidad por el secundario, es:

$$I_{2L} = \frac{S}{\sqrt{3} V_{2C}} = \frac{10.000.000}{\sqrt{3} \cdot 10.000} = 577 \text{ A}$$

Ejemplo 18.5

Se precisa de un pequeño transformador monofásico de 500 VA de potencia, con una relación de transformación

de 220/12 V y una frecuencia de 50 Hz. La chapa magnética con la que se va a construir el núcleo posee una inducción máxima de 1,3 T. Considerando el transformador ideal, calcular el número de espiras por el primario y por el secundario. Calcular también la sección de los conductores por el primario y por el secundario si se admite una densidad de corriente de 4 A/mm².

Solución: Para calcular el número de espiras necesitamos conocer primero el flujo magnético máximo por el núcleo. Conocemos la inducción magnética máxima pero no la sección del núcleo. Ésta se puede calcular con aproximación mediante la siguiente expresión:

$$s_u = \sqrt{S} = \sqrt{500} = 22,4 \text{ cm}^2$$

El flujo máximo que se da en el núcleo para una inducción de 1,3 T es:

$$\Phi_{\max} = s_u B_{\max} = 22,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,3 = 0,0029 \text{ Wb}$$

Partiendo de la expresión de la fuerza electromotriz eficaz podemos calcular ya el número de espiras del primario y del secundario:

$$E_1 = V_1 = 4,44 \Phi_{\max} f N_1 \Rightarrow N_1 = \frac{V_1}{4,44 \Phi_{\max} f} = \frac{220}{4,44 \cdot 0,0029 \cdot 50} = 342 \text{ espiras}$$

$$N_2 = \frac{V_2}{4,44 \Phi_{\max} f} = \frac{12}{4,44 \cdot 0,0029 \cdot 50} = 19 \text{ espiras}$$

Para determinar las secciones de los conductores de ambos bobinados calcularemos primero las intensidades nominales por los mismos:

$$I_1 = \frac{S}{V_1} = \frac{500}{220} = 2,3$$

$$I_2 = \frac{S}{V_2} = \frac{500}{12} = 41,7 \text{ A}$$

La sección de los conductores la calculamos una vez que conocemos que la densidad que admiten los conductores que se van a emplear para los bobinados es de 4 A/mm²:

$$S_1 = \frac{2,3 \text{ A}}{4} = 0,6 \text{ mm}^2 \quad S_2 = \frac{41,7 \text{ A}}{4} = 10,4 \text{ mm}^2$$

18.3 Transformador real

Experiencia 18.2. Conecta un transformador de 220/125 V a una red de 220 V y mide la tensión de salida en vacío. A continuación, conecta una lámpara incandescente a la salida del transformador y mide la tensión en el secundario. Seguidamente, ir conectando más lámparas a la salida del transformador e ir comprobando la tensión de salida.

Se podrá comprobar que la tensión que proporciona el transformador a su salida disminuye al ir aumentando la carga. Esto es debido a que al conectar una carga en el secundario aparece una corriente por este bobinado y, a su vez, aumenta la corriente por el primario. Estas corrientes producen caídas de tensión en las resistencias y reactancias inductivas de ambos bobinados. También se puede comprobar que la temperatura del transformador aumenta con la carga, debido al aumento de las pérdidas.

Para hacer el estudio del transformador real hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Tanto el bobinado primario como el secundario poseen una cierta resistencia óhmica, R_1 y R_2 , que habrá que tener en cuenta, ya que provocarán una cierta caída de tensión y una pérdida de potencia por efecto Joule cuando circule corriente por ambos bobinados (Figura 18.7).

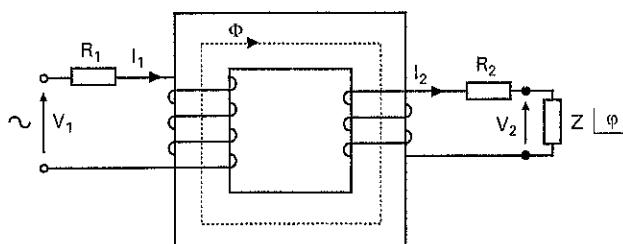


Figura 18.7. Resistencias óhmicas de los devanados en un transformador real.

- b) El núcleo del transformador está constituido por chapas magnéticas de alta permeabilidad, bajo campo coercitivo y baja resistencia óhmica, con el fin de reducir las pérdidas en los circuitos magnéticos, debidas sobre todo a la histéresis y las corrientes parásitas o de Foucault. A pesar de ello, todavía persisten estos fenómenos, aunque no en gran medida, que hacen que la potencia transferida al secundario del transformador nos sea exactamente la misma que la absorbida por el mismo de la red.

- c) El flujo no es del todo común, ya que éste tiende a dispersarse por el propio chasis del transformador e incluso por el aire, lo que hace que dicho flujo de dispersión sólo atraviese los propios bobinados que lo han producido (Φ_{d1} lo produce N_1 , y Φ_{d2} lo produce N_2) (Figura 18.8). Esto origina a su vez una f.e.m. de autoinducción en cada uno de los mismos, que se puede sustituir con bastante aproximación por bobinas ficticias en serie con el primario y el secundario de reactancias X_{d1} y X_{d2} .

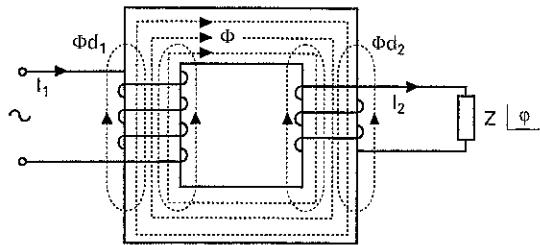


Figura 18.8. Flujo de dispersión en un transformador real.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el circuito equivalente quedaría tal como se indica en la Figura 18.9.

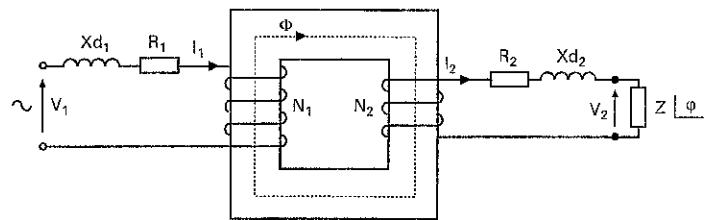


Figura 18.9. Circuito equivalente de un transformador real.

R_1 = resistencia del primario

R_2 = resistencia del secundario

X_{d1} = reactancia de dispersión del primario

X_{d2} = reactancia de dispersión del secundario

18.3.1 Transformador real en vacío

Al conectar el primario a una tensión de red V_1 aparece una corriente de vacío I_0 , que es la encargada de producir el flujo magnético común del transformador. El bobinado primario se comporta como si fuese una inductancia, y la pequeña corriente de vacío que aparece depende fundamentalmente de la tensión aplicada a dicho bobinado. En la Tabla 18.1, que se expone más adelante, se puede comprobar el valor de la corriente de vacío de diferentes transformadores.

¿Qué ocurre si conectamos el primario de un transformador de relación 220/125 V a una tensión de 380 V?

Dado que el transformador es reductor, con una relación de transformación igual a $m = 220/125 = 1,73$, en un principio cabría esperar una tensión por el secundario igual a $380/1,73 = 220$ V. En la práctica esto no se cumple. Además se aprecia un considerable aumento de la corriente de vacío y de la temperatura en el transformador, que puede llegar a destruirlo.

La razón de este comportamiento hay que buscarla en el hecho de que cuando aumentamos la tensión aplicada al primario, el flujo magnético tiende también a aumentar. Dado que el núcleo magnético se dimensiona normalmente para trabajar en niveles de inducción de saturación magnética para valores de la tensión nominal, para conseguir un aumento sustancial del flujo magnético y de la inducción se necesita aumentar considerablemente la corriente magnetizante de

vacio. Esta corriente elevada puede llegar a destruir el bobinado por sobrecalentamiento.

De esta forma, hay que indicar que no se deben conectar los bobinados de un transformador a tensiones más elevadas que las indicadas en sus características nominales.

18.3.2 Pérdidas en el hierro

El núcleo del transformador está sometido constantemente a un campo magnético alterno, lo que produce los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas. Estos fenómenos, producen unas pérdidas en el núcleo de hierro que se transforman en calor y que reducen el rendimiento del transformador.

¿Qué ocurre si conectamos un transformador de 50 Hz a una red de 100 Hz?

Dado que los fenómenos de histéresis y de corrientes parásitas dependen de la frecuencia, al aumentar ésta también aumentan las pérdidas en el hierro, produciéndose sobrecaleamientos en el núcleo que, al ser transmitidos a los bobinados, pueden llegar a destruirlos.

En la Tabla 18.1 se puede comprobar el valor de las pérdidas en el hierro (pérdidas en vacío) de diferentes transformadores. Para determinar las pérdidas en el hierro se realiza el ensayo en vacío del transformador.

18.3.3 Ensayo en vacío del transformador

Mediante una sencilla experiencia se puede determinar:

- La relación de transformación (m)
- La corriente de vacío (I_0)
- Las pérdidas en el hierro (P_{Fe})

Para llevar a cabo este ensayo se deja abierto el circuito del secundario y se conecta un voltímetro (V_1) en el primario y otro en el secundario (V_2). Además se intercala un amperímetro (A) y un vatímetro (W) en el circuito primario (Figura 18.10).

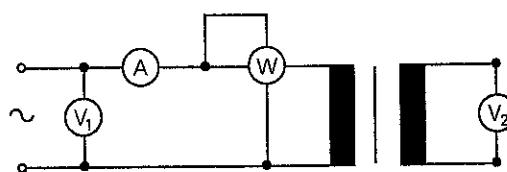


Figura 18.10. Ensayo en vacío de un transformador monofásico.

El amperímetro indica la corriente de vacío I_0 .

El voltímetro V_2 mide la fuerza electromotriz E_2 inducida en el secundario, y el V_1 la tensión de red V_1 aplicada al primario.

La relación de transformación exacta se calcula mediante la expresión:

$$m = \frac{E_1}{E_2}$$

Dado que la corriente de vacío es tan pequeña, se pueden despreciar las caídas de tensión en el primario en relación a los valores de V_1 y E_1 . Por lo que se puede afirmar con bastante aproximación que en vacío se cumple que:

$$V_1 \approx E_1$$

Por lo que la relación de transformación se obtiene del cociente de las lecturas de los dos voltímetros:

$$m = \frac{V_1}{V_2}$$

El vatímetro indica la potencia de vacío (P_0), que será igual a:

$$P_0 = V_1 I_0 \cos \varphi_0$$

Esta potencia será la suma de las pérdidas en vacío producidas en los conductores de cobre de la bobina primaria por efecto Joule ($P_{0cu} = R_1 I_0^2$) más las originadas en el hierro por efecto de las corrientes parásitas y por histéresis. Como la corriente I_0 es muy pequeña, se puede considerar que las pérdidas en los conductores de cobre en vacío son prácticamente despreciables a las del hierro. Por otro lado, las pérdidas en el hierro dependen, sobre todo, del flujo magnético, que como ya hemos visto permanece prácticamente constante en carga y en vacío, ya que su valor depende de la tensión de red V_1 . Por todo esto, se puede decir que las pérdidas en el cobre se miden con bastante aproximación con el vatímetro conectado en vacío.

$$P_0 \approx P_{Fe}$$

Ejemplo: 18.6

Se somete a un ensayo en vacío a un transformador monofásico de 5 KVA, 1000/380 V, 50 Hz, obteniendo los siguientes resultados: voltímetro en el primario (V_1) = 1.000 V; voltímetro en el secundario (V_2) = 380 V; amperímetro en el primario (A) = 0,5 A, y vatímetro en el primario (W) = 30 W. Determinar: la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío.

Solución: La relación de transformación, es:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1.000}{380} = 2,63$$

Las pérdidas en el hierro, son:

$$P_{Fe} = \text{lectura del vatímetro} = 30 \text{ W}$$

La corriente de vacío, es:

$$I_0 = \text{lectura del amperímetro} = 0,5 \text{ A}$$

18.3.4 Transformador real en carga

Para hacer el estudio del transformador real en carga (Figura 18.11), habrá que tener en cuenta las mismas consideraciones que para el ideal, es decir, el flujo magnético tiende a ser el mismo en carga y en vacío. Para que esto se cumpla, la fuerza magnetomotriz producida por las bobinas del transformador debe ser igual en carga que en vacío. La expresión de los amperivoltas puede quedar así:

$$\vec{N}_1 I_0 = \vec{N}_2 I_2 + \vec{N}_1 I_1$$

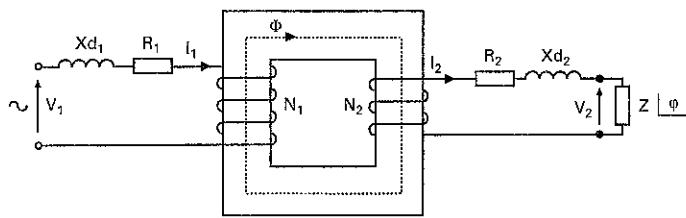


Figura 18.11. Transformador real en carga.

Esta ecuación se explica de la siguiente forma: al conectar una carga en el secundario, circula una corriente I_2 por el bobinado secundario que produce la fuerza magnetomotriz $N_2 I_2$. Esta tiende a modificar el flujo común creado por la f.m.m. de vacío $N_1 I_0$, pero como esto no es posible, en el primario aparece una corriente I_1 que produce otra f.m.m. $N_1 I_1$ para poder compensar los efectos de la producida por el secundario.

A plena carga, la corriente de vacío se puede considerar despreciable respecto a las corrientes del primario y el secundario, por lo que en valores algebraicos se cumple que:

$$I_1 = \frac{I_2}{m} \Rightarrow m = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Cuando el transformador trabaja con valores muy por debajo de su carga nominal, esta última apreciación es bastante inexacta.

Dado que tanto en el primario como en el secundario existe resistencia óhmica y reactancia inductiva, al circular por ellos la corriente primaria y secundaria, aparece una serie de caídas de tensión en ambos bobinados que hace que en carga la relación de tensiones primaria y secundaria no coincida con la relación de transformación.

18.4 Circuito equivalente en cortocircuito del transformador

Para poder valorar con aproximación y con una cierta sencillez los fenómenos que producen las resistencias y reactancias de los bobinados de un transformador se utiliza normalmente un circuito equivalente del transformador que produzca con bastante aproximación los mismos efectos que el real y que permita, a su vez, determinar las relaciones fundamentales (caída de tensión en el secundario, intensidad de cortocircuito, pérdidas en los conductores por efecto Joule).

Para encontrar este circuito se cortocircuita el secundario y se hace pasar por el primario la corriente nominal I_{In} a una tensión de red reducida (V_{cc} = tensión de cortocircuito aplicada al primario) (Figura 18.12). Si en estas condiciones tomamos al transformador como una carga, desde el primario se observará que existe una impedancia que consta de una resistencia de cortocircuito R_{cc} en serie con una reactancia de cortocircuito X_{cc} .

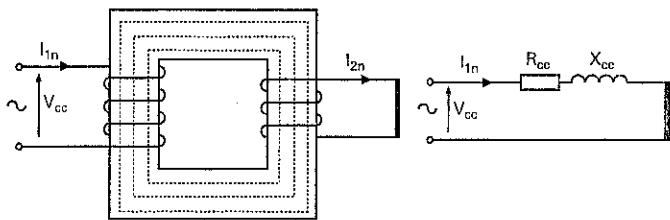


Figura 18.12. Circuito equivalente en cortocircuito del transformador.

De tal forma que se cumplen las siguientes relaciones (según el triángulo de impedancias de la Figura 18.13).

$$Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

$$V_{cc} = Z_{cc} I_{In}$$

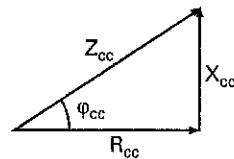


Figura 18.13

Este circuito equivalente indica que el transformador posee una resistencia R_{cc} vista desde el primario, que suma los efectos de las resistencias del primario y del secundario. La X_{cc} da el valor de la reactancia total en el primario y en el secundario.

Como ya estudiaremos más adelante, la tensión de cortocircuito V_{cc} que es necesario aplicar al transformador con el secundario en cortocircuito y para que circule la intensidad nominal primaria, será de mucha utilidad para conocer a fondo el transformador. En realidad el valor que más nos va a interesar va a ser el del valor porcentual de esta tensión referido a la tensión primaria. Este valor se expresa mediante la letra u_{cc} .

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_1} \cdot 100$$

u_{cc} = Valor porcentual de la tensión de cortocircuito referido a la tensión primaria

V_{cc} = Tensión de cortocircuito (V)

V_1 = Tensión nominal primaria

El valor de u_{cc} es muy importante, y por eso figura en la placa de características de los transformadores comerciales. Para hacernos una idea de cómo es este valor, a continuación se expresa una relación de los mismos para transformadores trifásicos: hasta 200 KVA ($u_{cc} = 4\%$); desde 250 a 3150 KVA ($u_{cc} = 6\%$); desde 4 a 5 MVA ($u_{cc} = 8\%$); más de 6,3 MVA ($u_{cc} = 10\%$).

18.5 Ensayo del transformador en cortocircuito

Mediante este ensayo es posible determinar las componentes de cortocircuito, es decir:

- Los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc}
- Tensión de cortocircuito porcentual y sus componentes
- Las pérdidas en el cobre

Para llevar a cabo este ensayo se cortocircuita el secundario mediante un amperímetro A_2 , tal como se muestra en el circuito de la Figura 18.14. El primario se alimenta a través de una fuente de tensión alterna regulable (por ejemplo con un autotransformador de regulación variable). En el primario se conecta un amperímetro A_1 , un voltímetro V y un vatímetro W .

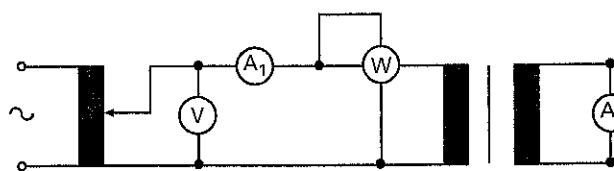


Figura 18.14. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en cortocircuito de un transformador monofásico.

Se comienza el ensayo aplicando cero voltios en el primario, se va subiendo poco a poco la tensión hasta conseguir que el amperímetro A_1 indique un valor de corriente igual a la intensidad nominal primaria correspondiente al transformador a ensayar.

Cuando el amperímetro A_1 indique la intensidad nominal primaria I_{1n} , el amperímetro A_2 indicará la intensidad nominal secundaria I_{2n} .

Al circular corriente por el primario y por el secundario, se producirán pérdidas de potencia en las resistencias del primario y del secundario, que se transforman en calor, y que para la intensidad nominal serán iguales a:

$$P_{cu} = R_1 I_{1n}^2 + R_2 I_{2n}^2$$

El vatímetro conectado en el ensayo indica con bastante aproximación el valor de esta potencia. Hay que tener en cuenta que tanto en el bobinado primario como en el secundario circula toda la intensidad nominal. Por otro lado, se pueden considerar las pérdidas en el hierro despreciables, ya que al someter al transformador a una tensión muy baja (la tensión de cortocircuito aplicada es del orden del 5% de la nominal primaria) el flujo con que trabaja el transformador es también muy reducido, por lo que dichas pérdidas son insignificantes con respecto a las del cobre.

$$P_{cu} = \text{lectura de vatímetro}$$

Para determinar la impedancia de cortocircuito aplicaremos la ley de Ohm:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{1n}}$$

Para determinar las componentes R_{cc} y X_{cc} nos valemos del triángulo de impedancias (Figura 18.13), que una vez conocido el ángulo φ_{cc} , podrán ser determinadas de la siguiente forma:

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc}$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \sin \varphi_{cc}$$

El ángulo φ_{cc} lo obtenemos de la potencia de cortocircuito. El vatímetro nos indica dicha potencia, que será igual a:

$$P_{cc} = V_{cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc} \Rightarrow \cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{1n}}$$

Al fluir la corriente nominal por la resistencia y reactancia de cortocircuito, aparece en cada una de ellas una caída de tensión, siendo en la primera igual a $R_{cc} I_{1n}$ y en la segunda igual a $X_{cc} I_{1n}$, de tal forma que la tensión de cortocircuito V_{cc} aplicada sea la suma vectorial de éstas, tal como se puede apreciar en el diagrama vectorial de la Figura 18.15.

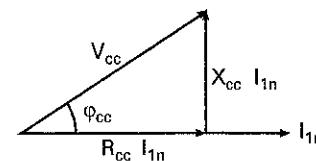


Figura 18.15

Si expresamos cada una de estas tensiones en valores porcentuales, tendremos que:

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_1} \cdot 100; \quad u_{Rcc} = \frac{R_{cc} I_{1n}}{V_1} \cdot 100; \quad u_{Xcc} = \frac{X_{cc} I_{1n}}{V_1} \cdot 100$$

$$u_{Rcc} = \text{Caída de tensión óhmica de cortocircuito porcentual}$$

$$u_{Xcc} = \text{Caída de tensión inductiva de cortocircuito porcentual}$$

Estas tensiones se pueden representar también en un diagrama vectorial (Figura 18.16), con sus correspondientes relaciones.

$$u_{Rcc} = u_{cc} \cos \varphi_{cc}$$

$$u_{Xcc} = u_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc}$$

Para hacernos una idea del orden de magnitud de algunas de las características de los transformadores, en la Tabla 18.1 se exponen las recomendaciones de UNESA 5 201 B para transformadores trifásicos.

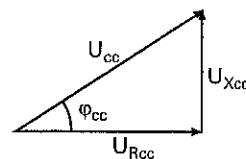


Figura 18.16. Triángulo de tensiones de cortocircuito porcentuales.

Capacidad KVA	Conexión	Pérdidas en vacío W	Pérdidas en c.c. W	Tensión de c.c. %	Corriente en vacío %	Corriente en vacío %
Serie 17,5 y 24 KV						
10	Yz11	105	360	3,6	7,0	21,0
25	Yz11	145	800	4	5,1	15,3
50	Yz11	210	1380	4	4,3	12,9
100	Yz11	345	2340	4	3,0	10,5
160	Dy11	490	3150	4	2,4	8,4
250	Dy11	675	4010	4	2,0	7,0
400	Dy11	990	5780	4	1,8	6,3
630	Dy11	1350	8750	4	1,7	6,0
800	Dy11	1660	12000	5	1,6	5,6
1000	Dy11	1950	13900	5	1,6	5,3
Serie 36 KV						
25	Yz11	160	800	4,5	5,6	16,8
50	Yz11	230	1380	4,5	4,7	14,1
100	Yz11	380	2340	4,5	3,3	11,6
160	Dy11	540	3330	4,5	2,7	9,5
250	Dy11	810	4230	4,5	2,4	8,4
400	Dy11	1170	6210	4,5	2,2	7,7
630	Dy11	1538	8800	4,5	2,0	7,0
800	Dy11	1870	10800	5,5	1,8	6,3
1000	Dy11	2139	14400	5,5	1,7	6,0

Tabla 18.1. Recomendaciones UNESA 5 201 B para transformadores trifásicos.

Ejemplo: 18.7

Al realizar un ensayo en cortocircuito a un transformador monofásico de 250 KVA, tensiones 24.000/398 V, es necesario aplicar al lado de alta tensión una tensión de 960 V para que por el primario circule la corriente nominal. Si la potencia absorbida en el ensayo es de 4.010 W, averiguar: a) las corrientes nominales del primario y del secundario; b) las pérdidas en el cobre para la potencia nominal; c) la tensión de cortocircuito y sus componentes; d) los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} ; e) las pérdidas en el cobre cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga.

Solución: a) Mediante la expresión general de potencia aparente determinamos las corrientes nominales de ambos devanados:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{V_{1n}} = \frac{250.000}{24.000} = 10,4 \text{ A}$$

$$I_{2n} = \frac{S_n}{V_{2n}} = \frac{250.000}{398} = 628 \text{ A}$$

b) Las pérdidas en el cobre a la potencia nominal coinciden con la potencia de cortocircuito medida en el ensayo:

$$P_{cu} = P_{cc} = 4.010 \text{ W}$$

También podemos determinar el factor de potencia de cortocircuito:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} I_{1n}} = \frac{4.010}{960 \cdot 10,4} = 0,4 \Rightarrow \varphi_0 = 66,3^\circ$$

c) La tensión porcentual de cortocircuito la determinamos a partir de V_{cc} :

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{1n}} \cdot 100 = \frac{960}{24.000} \cdot 100 = 4 \%$$

Las caídas de tensión u_{Rcc} y u_{Xcc} las determinamos a partir del triángulo de tensiones de cortocircuito:

$$u_{Rcc} = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 4 \cdot 0,4 = 1,6 \%$$

$$u_{Xcc} = u_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc} = 4 \cdot \operatorname{sen} 66,3^\circ = 3,7 \%$$

d) Determinaremos ahora la impedancia de cortocircuito y su componentes:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{ln}} = \frac{960}{10,4} = 92,3 \Omega$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} = 92,3 \cdot 0,4 = 36,9 \Omega$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc} = 92,3 \cdot \operatorname{sen} 66,3 = 84,5 \Omega$$

e) Se puede decir que las pérdidas en el cobre vienen determinadas por la expresión:

$$P_{cu} = R_{cc} I_{cc}^2$$

Si el transformador trabaja a la mitad de la potencia nominal, la intensidad por el primario, en ese caso, será la mitad que la de plena carga y, por tanto, las pérdidas en el cobre también se verán reducidas:

$$I_1 = \frac{I_{ln}}{2} = \frac{10,4}{2} = 5,2 \text{ A} \quad P_{cu} = 36,9 \cdot 5,2^2 = 998 \text{ W}$$

18.6 Corriente de cortocircuito accidental

Cuando el secundario de un transformador se pone en cortocircuito por una avería, al estar el primario conectado a toda la tensión primaria, la corriente tiende a elevarse rápidamente a valores peligrosos para los conductores del ambos devanados (Figura 18.17).



Figura 18.17

Esta corriente, según el circuito equivalente en cortocircuito, quedará limitada exclusivamente por el valor de la impedancia de cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{V_{ln}}{Z_{cc}}$$

El valor de Z_{cc} no suele ser conocido. Sin embargo, el de u_{cc} suele aparecer en las placas de características, por lo que

si determinamos la relación que existe entre ambos parámetros podremos determinar con rapidez la intensidad de cortocircuito de un transformador:

En el ensayo de cortocircuito:

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{ln}} \quad (1)$$

$$\text{Como } u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{ln}} \cdot 100 \Rightarrow V_{ln} = \frac{V_{cc}}{u_{cc}} \cdot 100 \quad (2)$$

Si sustituimos las expresiones (1) y (2) en la primera ecuación, tendremos que:

$$I_{cc} = \frac{100 V_{cc} / u_{cc}}{V_{cc} / I_{ln}}, \text{ y simplificando}$$

$$I_{cc} = \frac{I_{ln}}{u_{cc}} \cdot 100$$

Ejemplo: 18.8

Determinar la intensidad de cortocircuito accidental del primario y del secundario del transformador del ejemplo 18.7.

Solución: Como la $u_{cc} = 4\%$ y la $I_{ln} = 10,4 \text{ A}$, la intensidad de cortocircuito en el primario, es:

$$I_{cc1} = \frac{I_{ln}}{u_{cc}} \cdot 100 = \frac{10,4}{4} \cdot 100 = 260 \text{ A}$$

$$I_{cc2} = \frac{I_{ln}}{u_{cc}} \cdot 100 = \frac{628}{4} \cdot 100 = 15.700 \text{ A}$$

Se habrá podido observar que la corriente de cortocircuito es grande en transformadores con tensión de cortocircuito baja, y pequeña en transformadores con tensión de cortocircuito alta.

Una corriente de cortocircuito elevada puede provocar daños en los conductores si no se corta rápidamente, por lo que siempre es importante prestar atención a los dispositivos de protección elegidos para esta misión. Los daños a que nos referimos vienen causados por la elevación de temperatura en los bobinados por efecto Joule ($P_{cu} = R_{cc} I_{cc}^2$) y por los esfuerzos dinámicos que aparecen entre los conductores de una misma bobina, que pueden provocar deformaciones o roturas de las mismas cuando circulan grandes corrientes (los fuertes campos magnéticos creados por estos conductores desarrollan fuerzas de atracción y de repulsión que originan los esfuerzos dinámicos).

Una forma de reducir la corriente de cortocircuito accidental es aumentar la tensión de cortocircuito a costa de elevar la resistencia y la reactancia de cortocircuito. Esto trae consigo, como estudiaremos en el siguiente apartado, un aumento de la caída de tensión del transformador. Por esta razón, cuando se fabrican transformadores se busca un equilibrio entre estos valores.

18.7 Caída de tensión de un transformador

Dado que existen resistencias y reactancias intercaladas en serie con los bobinados del transformador, cuando circule una corriente de carga por los bobinados la tensión del secundario se verá reducida. La caída de tensión será entonces la diferencia algebraica entre la tensión del secundario en vacío (E_2) y la que aparece cuando el transformador trabaja en carga (V_2):

$$\Delta V = E_2 - V_2$$

Como veremos más adelante, es muy útil expresar esta caída en valores porcentuales referidos a la tensión de vacío, ya que así será posible relacionarla, con la ayuda del circuito equivalente con los parámetros de cortocircuito y con las tensiones de cortocircuito porcentuales. A este valor porcentual se le denomina **coeficiente de regulación** (ϵ).

$$\epsilon = \frac{E_2 - V_2}{E_2} \cdot 100$$

E_2 = Tensión del secundario en vacío

V_2 = Tensión del secundario en carga

ϵ = Coeficiente de regulación

Para determinar la relación antes mencionada nos valdremos del circuito equivalente con los parámetros de cortocircuito (Figura 18.18).

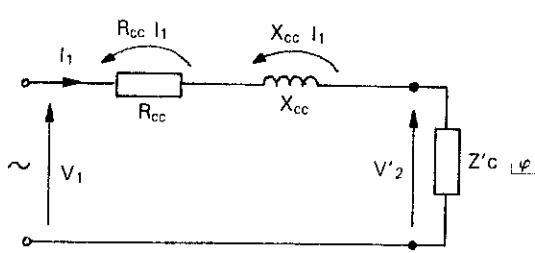


Figura 18.18. Circuito equivalente del transformador con parámetros de cortocircuito.

En este caso se supone que V_1 es la tensión que aparecería en la carga reducida al primario estando el transformador en vacío. La tensión V'_2 sería la tensión que aparece en bornes de la carga cuando se establece la corriente I_1 por el transformador. En este caso la caída de tensión será la diferencia entre estas dos tensiones:

$$\Delta V = V_1 - V'_2,$$

y que coincide con bastante aproximación con la caída de tensión expresada con anterioridad.

El coeficiente de regulación en este caso se expresará de la forma:

$$\epsilon = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \cdot 100$$

Para calcular el coeficiente de regulación nos valdremos del diagrama vectorial de la Figura 18.19, donde expresaremos la siguiente ecuación:

$$V_1 = V'_2 + R_{cc} I_1 + X_{cc} I_1$$

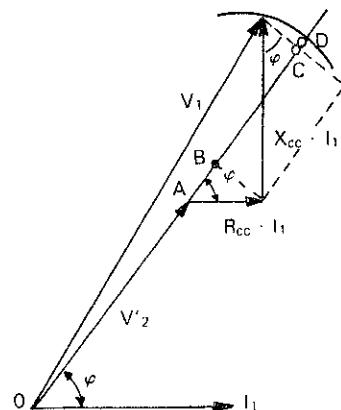


Figura 18.19. Diagrama vectorial para determinar la caída de tensión.

El coeficiente de regulación será:

$$\epsilon = \frac{V_1 - V'_2}{V_1} \cdot 100 = \frac{OD - OA}{V_1} \cdot 100 =$$

$$\frac{AD}{V_1} \cdot 100 \approx \frac{AC}{V_1} \cdot 100 = \frac{AB + BC}{V_1} \cdot 100$$

Sustituyendo estos términos por los relacionados con las caídas de tensión óhmica e inductiva en el diagrama vectorial:

$$\epsilon = \frac{R_{cc} I_1 \cos \varphi + X_{cc} I_1 \sin \varphi}{V_1} \cdot 100$$

Como $u_{R_{cc}} = \frac{R_{cc} I_1}{V_1} \cdot 100$ y $u_{X_{cc}} = \frac{X_{cc} I_1}{V_1} \cdot 100$,

tenemos que:

$$\epsilon = u_{R_{cc}} \cos \varphi + u_{X_{cc}} \sin \varphi$$

ϵ = coeficiente de regulación

u_{Rcc} = caída de tensión óhmica de cortocircuito

u_{Xcc} = caída de tensión inductiva de cortocircuito

$\cos \varphi$ = factor de potencia de la carga

Ejemplo: 18.9

Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un FP de 0,85. Las características del mismo son: 10 KVA; 1000/398 V; $u_{Rcc} = 3,2\%$; $u_{Xcc} = 2,4\%$. Averiguar también el valor efectivo de la tensión en la carga cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y a un FP de 0,85 inductivo de la misma.

Solución: Con los datos aportados de las caídas de tensión porcentuales y el factor de potencia de la carga calculamos el coeficiente de regulación del transformador.

$$\epsilon = u_{Rcc} \cos \varphi + u_{Xcc} \sin \varphi = 3,2 \cdot 0,85 + 2,4 \cdot 0,53 = 4\%$$

Este dato nos indica que el transformador produce una caída del 4% de la tensión de salida para la corriente nominal, es decir:

$$\Delta V = \frac{398 \text{ V}}{100} \cdot 4\% = 15,9 \text{ V}$$

La tensión en bornes del secundario para esta carga será, entonces:

$$V_2 = E_2 - \Delta V = 398 - 15,9 = 382 \text{ V}$$

Cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga, la intensidad por el primario será también la mitad. Se puede comprobar que la caída de tensión que se produce también será la mitad ($V'_{cc} = Z_{cc} I_{ln}/2$), por lo tanto las componentes u_{Rcc} , u_{Xcc} serán también la mitad. En definitiva el coeficiente de regulación también se ve reducido en la misma manera.

Por lo tanto, si llamamos (C) al índice de carga, expresado como la relación entre la corriente a cualquier carga y la carga a la potencia nominal: $C = I_l/I_{ln}$, tendremos que:

$$\epsilon_C = C\epsilon$$

En nuestro caso $C = 1/2$, por lo que $\epsilon = 0,5 \cdot 4 = 2\%$

La caída de tensión es ahora:

$$V = \frac{398 \text{ V}}{100} \cdot 2\% = 7,96 \text{ V}$$

La tensión en bornes del secundario para esta carga, es:

$$V_2 = E_2 - \Delta V = 398 - 7,96 = 390 \text{ V}$$

Ejemplo: 18.10

Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un FP de 0,85. Las características del mismo son 50 KVA y 1.000/230 V. En el ensayo de cortocircuito se han obtenido los siguientes resultados: ha consumido 90 W al aplicar una tensión de 10 V y circula una corriente por el primario de 12,5 A. Averiguar también: a) las pérdidas en el cobre a plena carga; b) el valor efectivo de la tensión en la carga cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y a un FP de 0,85 inductivo de la misma.

Solución: Lo primero que vamos a hacer es comprobar si el ensayo en cortocircuito se ha hecho para la corriente nominal:

$$I_{ln} = \frac{S_n}{V_{ln}} = \frac{50.000}{1.000} = 50 \text{ A}$$

Este resultado nos indica que el ensayo se ha hecho a corriente reducida. Esto se hace con el fin de que la fuente de tensión regulable y los aparatos sean más sencillos. Por otro lado, los valores de la impedancia y el factor de potencia de cortocircuito permanecen fijos para cualquier corriente de ensayo, por lo que:

$$Z_{cc} = \frac{V'_{cc}}{I'_{cc}} = \frac{10}{12,5} = 0,8 \Omega$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P'_{cc}}{V'_{cc} I'_{cc}} = \frac{90}{10 \cdot 12,5} = 0,72 \Rightarrow \varphi_{cc} = 43,94^\circ$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \cos \varphi_{cc} = 0,8 \cdot 0,72 = 0,58 \Omega$$

a) Las pérdidas del cobre a la potencia nominal serán entonces:

$$P_{cu} = R_{cc} I_{ln}^2 = 0,58 \cdot 50^2 = 1.450 \text{ W}$$

La tensión de cortocircuito para la intensidad nominal se calculará aplicando la ley de Ohm a la impedancia de cortocircuito:

$$V_{cc} = Z_{cc} I_{ln} = 0,8 \cdot 50 = 40 \text{ V}$$

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{ln}} 100 = \frac{40}{1.000} 100 = 4\%$$

$$u_{Rcc} = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 4 \cdot 0,72 = 2,88\%$$

$$u_{Xcc} = u_{cc} \sin \varphi_{cc} = 4 \cdot \sin 43,94^\circ = 2,77\%$$

Ahora ya podemos determinar el coeficiente de regulación:

$$\epsilon = u_{Rcc} \cos \varphi + u_{Xcc} \sin \varphi = 2,88 \cdot 0,85 + 2,77 \cdot 0,53 = 3,9\%$$

La tensión en bornes V_2 de la carga la obtenemos a partir de este coeficiente y de la tensión de vacío E_2 :

$$V_2 = E_2 - \frac{E_2 \epsilon}{100} = 230 - \frac{230 \cdot 3,8}{100} = 221 \text{ V}$$

b) Cuando el transformador trabaja a la mitad de la carga, la intensidad por el primario es también la mitad. Se puede comprobar que la caída de tensión que se produce también es la mitad ($V_{cc} = Z_{cc} I_{ln}/2$), por tanto las componentes u_{Rcc} , u_{Xcc} serán también la mitad. En definitiva el coeficiente de regulación también se ve reducido de la misma manera.

Por lo tanto, si llamamos (C) al índice de carga, expresado como la relación entre la corriente a cualquier carga y la carga a la potencia nominal: $C = I_1/I_{ln}$, tendremos que:

$$\epsilon_C = C \epsilon$$

En nuestro caso $C = 1/2$, por lo que $\epsilon = 0,5 \cdot 3,9 = 1,95\%$

La tensión en bornes de la carga será entonces:

$$V_2 = \dots = 225,5 \text{ V}$$

¿Qué ocurre cuando se conecta una carga capacitativa a un transformador?: Al invertirse el ángulo φ de la carga, para ciertos valores se puede comprobar que la caída se puede convertir en nula e incluso hacerse negativa. Es decir, con cargas capacitativas puede aparecer una tensión más alta en bornes de la carga que en vacío.

Ejemplo: 18.11

Determinar la tensión en bornes de la carga del transformador del Ejemplo 18.10, trabajando a plena carga y con un factor de potencia capacitivo de 0,1.

Solución: Para un $\cos \varphi = 0,1$ capacitivo le corresponde un ángulo igual a:

$\varphi = \arccos 0,1 = -84,3^\circ$ (es negativo por que la tensión queda retrasada respecto a la intensidad)

$$\operatorname{sen} \varphi = \operatorname{sen} (-84,3^\circ) = -0,99$$

$$\epsilon = u_{Rcc} \cos \varphi + u_{Xcc} \operatorname{sen} \varphi = 2,88 \cdot 0,1 + 2,77 \cdot (-0,99) = -2,45\%$$

$$V_2 = E_2 - \frac{E_2 \epsilon}{100} = 230 - \frac{230 \cdot (-2,44)}{100} = 235,6 \text{ V}$$

En este caso la tensión del secundario en carga es mayor que la de vacío.

Mediante el diagrama vectorial de la Figura 18.19 se puede hacer un estudio de cómo se comporta el transformador para una corriente de salida fija y un factor de potencia variable (cargas óhmicas, cargas inductivas y cargas capacitivas).

A este tipo de gráficos se les conoce por el nombre de diagrama de Kapp, en el que se puede determinar la caída de tensión para cualquier tipo de carga.

Por todo esto se puede concluir que la tensión que aparece en bornes de un transformador depende de la potencia que suministre por el secundario a la carga, así como del factor de potencia de la misma.

Para transformadores que posean una potencia nominal inferior a 16 KVA se indica en su placa de características el valor de la tensión de salida a plena carga, suponiendo un factor de potencia igual a la unidad.

En los transformadores con potencias superiores a 16 KVA se indica en la placa de características la tensión de cortocircuito en valores porcentuales. Además, se suele añadir un conmutador de tensiones, cuya misión es compensar las caídas de tensión producidas en el transformador o en la propia línea de distribución. Este conmutador posee varias posiciones y es capaz de seleccionar, de una forma automática, más o menos espiras de uno de los bobinados, consiguiendo así seleccionar la tensión de salida al valor deseado.

En la Figura 18.20 se muestran diferentes curvas características de un transformador para la tensión en bornes de la carga en función de la corriente de la misma. Se han trazado varias curvas para poder apreciar la diferencia en las mismas para diferentes tipos de carga.

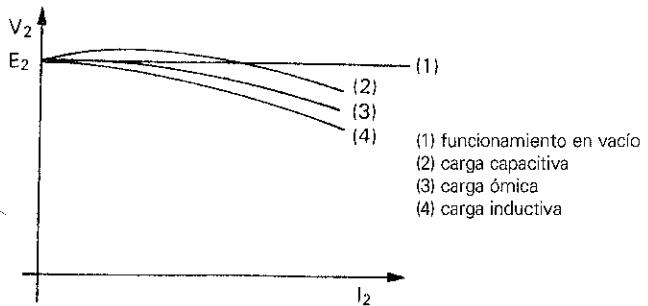


Figura 18.20. Curvas características de un transformador, $V_2 = f(I_2)$.

18.8 Rendimiento de un transformador

Un transformador ideal no produce ningún tipo de pérdidas y, por eso, la potencia que absorbe por el primario de la red la entrega íntegramente por el secundario a la carga. En un transformador real esto no ocurre exactamente así, ya que la potencia absorbida por el primario queda aumentada por efecto de las pérdidas en el hierro y en el cobre. Aun así, el transformador es una máquina eléctrica que posee un alto rendimiento (por encima del 90%).

Se puede decir que el rendimiento de un transformador es la relación entre la potencia suministrada a la carga por el secundario (P_2) y la potencia absorbida de la red por el primario (P_1), expresada en tantos por ciento. De esta forma, el rendimiento vendrá dado por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

La potencia que el transformador toma de la red de entrada es la suma de la potencia proporcionada a la carga más las pérdidas que se producen en los circuitos magnéticos y en los devanados de cobre: $P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}$

$$\boxed{\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \cdot 100}$$

18

η = rendimiento del transformador en %

P_2 = potencia activa cedida a la carga

P_{Fe} = pérdidas en el hierro

P_{Cu} = pérdidas en el cobre

El rendimiento del transformador dependerá del índice de carga al que trabaje. Se demuestra matemáticamente que se alcanza el rendimiento máximo para un índice de carga tal que las pérdidas en el cobre sean igual que las del hierro.

Ejemplo: 18.12

Un transformador monofásico posee las siguientes características: 10 KVA, 7.200/398 V, potencia de ensayo en vacío = 125 W, potencia de ensayo en cortocircuito = 360 W. Determinar: a) el rendimiento a plena carga y $\cos\varphi = 0,8$; b) el rendimiento cuando el transformador trabaje a la mitad de su potencia nominal y $\cos\varphi = 0,8$; c) la potencia a que debe trabajar el transformador para que lo haga con el rendimiento máximo.

Solución: a) Para calcular el rendimiento a plena carga habrá que determinar previamente la potencia activa con el factor de potencia indicado ($P_2 = S \cos\varphi$):

$$\eta = \frac{S \cos\varphi}{S \cos\varphi + P_{Fe} + P_{Cu}} \cdot 100 = \frac{10.000 \cdot 0,8}{10.000 \cdot 0,8 + 125 + 360} \cdot 100 = 94,28\%$$

b) Cuando el transformador trabaje a la mitad de la carga se reducirán también las pérdidas en el cobre, manteniéndose constantes las del hierro.

Las pérdidas en el cobre para cualquier carga I_1 son:

$P_{Cu} = R_{cc} I_1^2$, como el índice de carga es:

$$C = \frac{I_1}{I_{1n}} \Rightarrow$$

$I_1 = C I_{1n}$ sustituyendo en la primera ecuación:

$$P_{Cu} = R_{cc} I_{1n}^2 C^2$$

Como el término $R_{cc} I_{1n}^2$ coincide con las pérdidas del ensayo en cortocircuito a intensidad nominal:

$$P_{Cu} = R_{cc} C^2$$

$P_{Cu} (C = 1/2) = 360 \cdot (1/2)^2 = 90$ W, el rendimiento será entonces:

$$\eta_C = \frac{C S_n \cos\varphi}{C S_n \cos\varphi + P_{Fe} + C^2 P_{cc}} \cdot 100 \Rightarrow$$

$$\eta_{(C=1/2)} = \frac{1/2 \cdot 10.000 \cdot 0,8}{1/2 \cdot 10.000 \cdot 0,8 + 125 + 90} \cdot 100 = 94,9\%$$

c) El rendimiento máximo se consigue cuando se cumple: $P_{Fe} = P_{Cu}$

$$P_{Fe} = P_{cc} C^2 \Rightarrow C = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{cc}}} = \sqrt{\frac{125}{360}} = 0,59$$

Lo que nos indica que el transformador consigue su rendimiento máximo cuando trabaja a un 59% de su potencia nominal. Para un factor de potencia de la carga igual a la unidad, este rendimiento será:

$$\eta_{\max} = \frac{0,59 \cdot 10.000 \cdot 0,8}{0,59 \cdot 10.000 \cdot 0,8 + 125 + 125} \cdot 100 = 94,97\%$$

18.9 Características nominales de un transformador

La potencia nominal de un transformador monofásico es el producto de su tensión nominal primaria por la corriente nominal primaria. Es decir, su potencia aparente:

$$S_n = V_n I_n$$

Se entiende por tensiones y corrientes nominales a los valores para los cuales ha sido proyectado el transformador. Así, por ejemplo, un transformador que posea las siguientes características nominales:

- Tensión nominal del primario: 10.000 V
- Corriente nominal del primario: 50 A

le corresponderá una potencia nominal de:

$$S_n = V_n I_n = 10.000 \cdot 50 = 500.000 \text{ VA} = 500 \text{ KVA}$$

Los aislantes del bobinado primario de este transformador deberán soportar una tensión superior a 10.000 V, y los conductores del mismo deberán poseer una sección suficiente para soportar el paso de una corriente de 50 A.

En resumen, se puede decir que la potencia nominal de un transformador es un valor puramente convencional de referen-

cia y que esta fijado, básicamente, desde un punto de vista térmico. Hay que pensar que el transformador trabajando a plena carga se calienta por causa de las pérdidas en el cobre ocasionadas por el efecto Joule en los conductores del primario y del secundario, así como por las pérdidas que aparecen en el núcleo de hierro por histéresis y corrientes parásitas.

Un transformador trabajando a sus características nominales evacuará el calor que produce sin dificultad, manteniendo una temperatura de trabajo no peligrosa.

¿Cómo podemos aumentar la potencia nominal de un transformador?

Cuando nosotros exigimos a un transformador que trabaje a una potencia superior a la nominal, éste se calienta excesivamente. Si nosotros refrigeramos el transformador, por ejemplo con un ventilador o sumergiendo los bobinados en aceite mineral, habremos conseguido el objetivo propuesto.

18.10 Autotransformadores

Estos dispositivos se construyen con el mismo núcleo que los transformadores pero con un sólo devanado y una conexión intermedia (Figura 18.21). Al conjunto de las espiras se le somete a la tensión mayor (V_1), pudiendo ser considerado éste como el primario. Al estar la toma intermedia conectada a menos espiras, aparece en ella una tensión menor (V_2), que corresponde a la del secundario. La relación de transformación vendrá dada en este caso por:

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

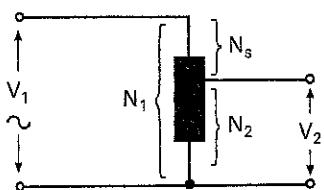


Figura 18.21. Autotransformador.

En los autotransformadores, el devanado primario está eléctricamente unido con el de salida; esto propicia que parte de la energía del primario se transfiera directamente hacia el secundario a través de los propios conductores de los devanados; el resto de la energía se transmite por inducción magnética como en un transformador normal.

Si I_1 es la intensidad del primario e I_2 la del secundario, la intensidad que circulará por el devanado común (N_s) en un transformador reductor será igual a la diferencia de las mismas ($I_c = I_1 - I_2$) (Figura 18.22). Esto hace que se pueda reducir la sección de los conductores, con el consiguiente ahorro de cobre. Además el núcleo podrá ser más pequeño, por lo que las pérdidas en el cobre y en el hierro serán más reducidas.

Una vez entendido esto, comprenderemos que las principales ventajas que presentan los autotransformadores son: abaratamiento, reducción de peso y volumen, y mejor rendimiento. Sin embargo, su uso se ve limitado por no aislar eléctricamente

el bobinado de alta tensión con el de baja, lo que puede provocar en caso de avería (por ejemplo, si se corta el devanado común) que la tensión del primario aparezca íntegramente en secundario, con el consiguiente peligro que ello conlleva. Por eso sólo podrá aplicarse en aquellos casos en que la tensión superior no exceda el 25% de la inferior.

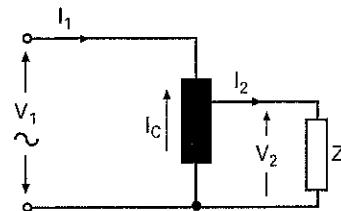


Figura 18.22. Autotransformador en carga.

18.11 Autotransformadores de regulación

Estos dispositivos son como los que hemos empleado para realizar los ensayos de cortocircuito de los transformadores.

Los autotransformadores son ideales para obtener una tensión variable mediante un sistema que sea capaz de ir poniendo en conexión las diferentes espiras del bobinado principal. Se construyen con contactos deslizantes o con contactos fijos seleccionados mediante un interruptor múltiple rotativo (Figura 18.23).

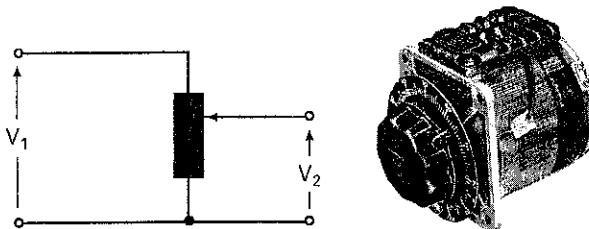


Figura 18.23. Autotransformador de regulación.

18.12 Transformadores Trifásicos

El transformador trifásico es el de más extensa aplicación en los sistemas de transporte y distribución de energía eléctrica. Dado que los niveles de energía que se manejan en estos casos es elevada, este tipo de transformadores se construyen para potencias nominales también elevadas.

Se puede decir que un transformador trifásico está constituido por tres transformadores monofásicos montados en un núcleo magnético común. Los principios teóricos que se han expuesto para los sistemas monofásicos son totalmente aplicables a los trifásicos, teniendo en cuenta que ahora se aplicarán a cada una de las fases de los mismos.

Para su construcción se emplea un núcleo de chapas magnéticas de grano orientado con tres columnas alineadas, tal como se muestra en la Figura 18.24. En cada una de estas columnas se arrollan los respectivos bobinados primarios y secundarios de cada una de las fases.

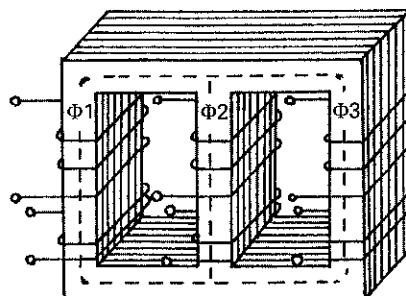


Figura 18.24. Circuitos magnéticos y eléctricos de un transformador trifásico.

Dado que el circuito magnético no es del todo simétrico, la corriente de vacío de la columna central es un poco más pequeña que la de las otras dos. Esto no afecta significativamente al funcionamiento del transformador.

Al igual que se hacía con los transformadores monofásicos, para evitar en lo posible los flujos de dispersión, se coloca en cada columna los bobinados de baja y alta tensión de cada una de las fases, bobinando primero, y sobre el núcleo el bobinado de baja tensión y encima de éste el de alta tensión. En la Figura 18.25 se muestra el aspecto de un transformador trifásico.

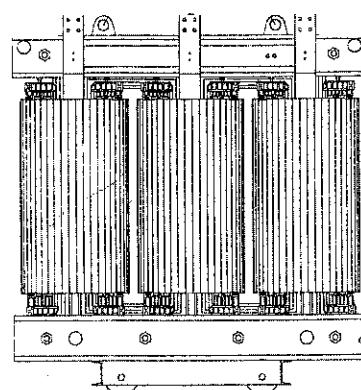


Figura 18.25. Transformador trifásico.

También es posible la elaboración de un transformador trifásico a partir de tres monofásicos, constituyendo lo que se conoce como **banco de tres transformadores monofásicos**.

Se constituye a partir de tres transformadores monofásicos de las mismas características eléctricas. Con las tres bobinas primarias conectadas en estrella o en triángulo, se forma el primario trifásico y con las tres secundarias monofásicas, conectadas también en estrella o triángulo, el secundario trifásico (Figura 18.26).

El banco de transformadores monofásicos presenta alguna ventaja frente a los trifásicos, pero su mayor precio y peor rendimiento hace que sean utilizados en aplicaciones muy especiales. Las ventajas que poseen frente a los trifásicos son las siguientes: a) para potencias muy elevadas es más fácil su transporte por carretera; b) en caso de avería siempre hay que disponer de un transformador trifásico de reserva; en un banco es suficiente disponer de un monofásico de reserva, lo que abarata su costo y facilita la reparación de la fase estropeada.

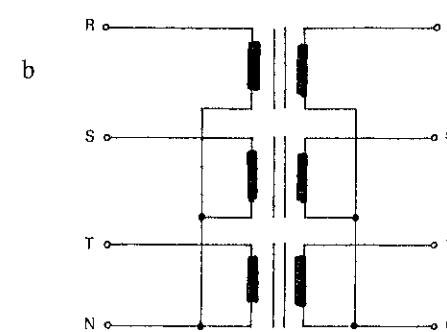
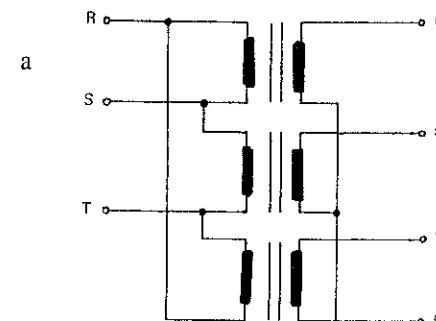


Figura 18.26. Banco de tres transformadores monofásicos: a) conexión triángulo-estrella; b) conexión estrella-estrella.

18.12.1 Conexiones de los transformadores trifásicos

Los bobinados de alta tensión de un transformador trifásico se pueden conectar en estrella (Y) o en triángulo (D). Por otro lado, los bobinados de baja tensión se pueden conectar también en estrella (y) o en triángulo (d).

En la Figura 18.27 se muestra la denominación habitual de los terminales de los diferentes devanados de un transformador trifásico. Las letras mayúsculas U, V, W representan los principios de los devanados de alta tensión y X, Y, Z los finales de los mismos. Para baja tensión se emplea la misma nomenclatura con letras minúsculas.

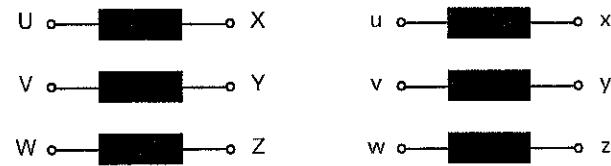


Figura 18.27. Denominación de terminales en un transformador trifásico.

En estrella se consigue que la tensión a la que queda sometida cada fase del transformador sea $\sqrt{3}$ veces menor que la tensión de línea, por lo que se consigue reducir el número de espiras en relación a la conexión en triángulo para una misma relación de transformación de tensiones compuestas. Por otro lado, la conexión en estrella hace circular una corriente por cada fase del transformador $\sqrt{3}$ veces mayor que en la conexión en triángulo, por lo que la sección de los conductores de

las espiras aumenta en relación a la conexión en triángulo. Conectando el secundario en estrella se consigue disponer de neutro, lo que permite obtener dos tensiones de distribución y la posibilidad de conectar el neutro a tierra para garantizar la seguridad de las instalaciones.

A continuación se muestran los esquemas típicos de conexión de los transformadores trifásicos. En la Figura 18.28 a se muestra una conexión estrella estrella (Yy), en la Figura 18.28 b una conexión conexión estrella triángulo (Yd), y en la figura 18.28 c triángulo estrella (Dy).

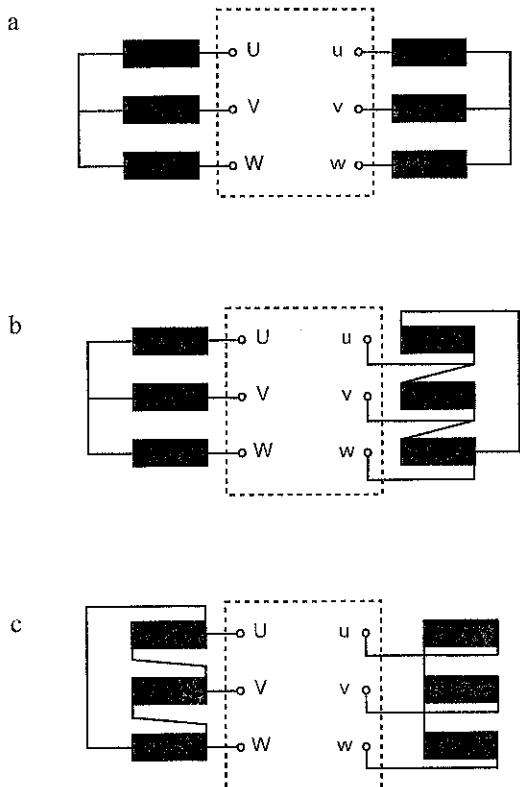


Figura 18.28. Conexiones del transformador trifásico: a) Yy; b) Dy; c) Yd.

Cuando se conecta el primario y el secundario en estrella (Yy), por ejemplo, un transformador de distribución a dos tensiones que posea alta tensión en el primario, y se conectan cargas en el secundario fuertemente desequilibradas, aparece un fuerte desequilibrio de corrientes en el primario que, a su vez, provoca una asimetría de los flujos que hace que la tensión de salida aumente en las fases no cargadas y disminuya en las cargadas. Este fenómeno se reduce considerablemente si conectamos el primario en triángulo (Dy), pero eliminamos la posibilidad de conectar el neutro en el lado de alta tensión.

Una forma de evitar este fenómeno manteniendo el neutro consiste en conectar el secundario en zig-zag (Yz), para lo cual se divide el bobinado de cada fase en dos partes iguales y se arrollan en sentido contrario y cada parte se conecta en serie con la columna consecutiva, tal como se muestra en la Figura 18.29. La conexión en zig-zag resulta un poco más costosa por requerir un número de espiras mayor en el secundario respecto a una conexión en estrella.

En la práctica se emplea la conexión Dy para grandes transformadores y la conexión Yz se utiliza para pequeños transformadores en la red de baja tensión.

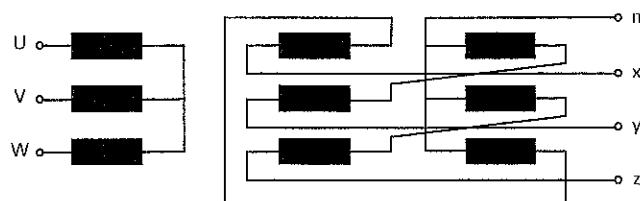


Figura 18.29. Transformador con el secundario en zig-zag (Yz).

18.12.2 Desfase entre el primario y el secundario de transformadores trifásicos

Cuando se conecta el primario y el secundario de la misma forma, por ejemplo, Yy o Dd, el ángulo de desfase entre el lado de alta tensión y el de baja puede ser 0° (en fase) o 180° (oposición de fase) según la posición de salida de los terminales. En el caso de que el primario y el secundario se conecten de diferente forma, por ejemplo, Dy, Yd, Yz, el desfase entre ambos bobinados podrá ser 150° o 180° .

Normalmente se expresan estos resultados en forma horaria, de tal forma que la tensión primaria represente los minutos (siempre en las 12) y la secundaria las horas. Dado que la esfera de un reloj está dividida en 12 horas, cada hora equivale a $360^\circ/12 = 30^\circ$. De esta forma, si un transformador presenta un desfase de 150° , el desfase representado en forma horaria será $150^\circ/30^\circ = 5$ horas (véase Figura 18.30). Así, por ejemplo, un transformador con el lado de alta tensión conectado en estrella y el de baja en triángulo para un desfase de 150° obtendríamos un grupo de conexión Yd5 y para un desfase de 330° un grupo de conexión Yd11.

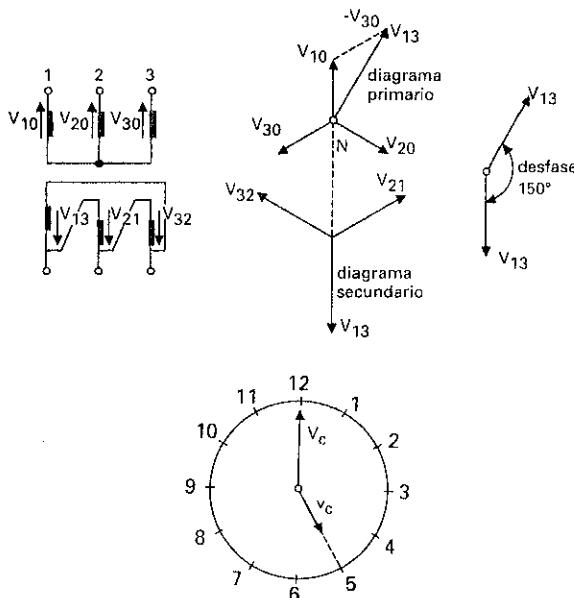


Figura 18.30. Representación horaria del desfase de un transformador en conexión Yd.

Seguidamente se indican los grupos de conexión más comunes:

Dd0, Yy0, Dz0, Dd6, Yy6, Dz6, Dy5, Yd5, Yz5, Dy11, Yd11, Yz11.

Los grupos de conexiones se indican en la placa de características de los transformadores.

18.12.3 Ensayo en vacío de un transformador trifásico

Este ensayo se lleva a cabo de la misma forma que para transformadores monofásicos. En la Figura 18.31 se muestra el esquema eléctrico del ensayo de un transformador conectado en estrella-estrella con los aparatos de medida utilizados. Para la medida de potencia se han empleado tres vatímetros con el fin de captar la diferencia que pudiera haber en cada fase. La suma de las lecturas de los tres vatímetros nos dará las pérdidas en el hierro del transformador.

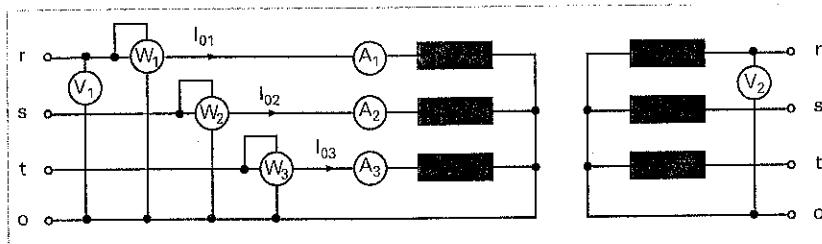


Figura 18.31. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en vacío de un transformador trifásico.

$$P_{Fe} = W_1 + W_2 + W_3$$

Para calcular la relación de transformación del transformador aplicaremos la relación:

$$m_s = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

(relación de transformación simple o por fase)

Si conectamos los voltímetros entre las fases del primario y del secundario obtendrímos la relación de transformación compuesta $m_c = V_{C1}/V_{C2}$. Cuando ambos devanados se conectan de la misma forma, la relación de transformación simple se hace igual a la compuesta. Pero cuando las conexiones son diferentes éstas no coinciden. Por otro lado, a efectos prácticos, el dato que más nos interesa conocer de un transformador es su relación de transformación compuesta.

Ejemplo: 18.13

Al someter a un ensayo en vacío a un transformador trifásico de 250 KVA, 12.000/398 V, conectado en estrella-estrella y según el esquema de la Figura 18.31, se han obtenido los siguientes resultados: $I_0 = 0,5$ A; $P_0 = 1.000$ W; V_{Is}

= 6.928 V; $V_{2s} = 230$ V. Determinar: a) las pérdidas en el hierro; b) la corriente de vacío; c) la relación de transformación simple.

Solución: a) Las pérdidas en el hierro coinciden con las obtenidas por los tres vatímetros en el ensayo: $P_{Fe} = 1.000$ W.

b) La corriente de vacío es la indicada por los amperímetros en el ensayo: $I_0 = 0,5$ A.

c) La relación de transformación simple la obtenemos con las lecturas de los voltímetros conectados entre la fase y neutro:

$$m = \frac{V_{1s}}{V_{2s}} = \frac{6.928}{230} = 30,12$$

18.12.4 Ensayo en cortocircuito de un transformador trifásico

Al igual que se hacía para los monofásicos, se cortocircuta el secundario y, mediante una fuente de C.A alterna regulable, se hace que circule por el primario la intensidad nominal. En el esquema de la Figura 18.32 el voltímetro nos indica la tensión de cortocircuito, siempre y cuando esté conectado a una de las fases del transformador (para conexión en estrella \Rightarrow entre fase y neutro; para conexión en triángulo \Rightarrow entre fases).

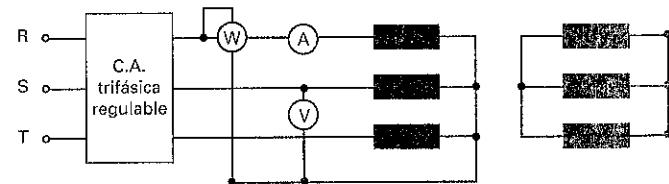


Figura 18.32. Esquema de conexiones para realizar el ensayo en cortocircuito de un transformador.

Como el sistema es equilibrado, podremos utilizar cualquiera de los métodos conocidos para medir la potencia trifásica en cortocircuito, que coincidirá con las pérdidas en el cobre. En el ensayo de la Figura 18.32 se ha utilizado el método de un vatímetro para medir dicha potencia ($P_{Cu} = 3$ W) en un transformador trifásico en conexión estrella-estrella.

Ejemplo: 18.14

Al someter a un ensayo en cortocircuito a un transformador trifásico de 250 KVA, 12.000/398 V, conectado en triángulo-estrella, se ha medido una tensión de cortocircuito entre fases de 600 V y una potencia total de 4.000 W cuando circulaba la intensidad nominal por el primario. Averiguar: a) las pérdidas en el cobre y el factor de potencia de cortocircuito; b) la tensión porcentual de cortocircuito y sus componentes; c) tensión compuesta en la carga cuando el

transformador trabaje a plena carga y con un factor de potencia inductivo de 0,85; d) rendimiento del transformador en estas condiciones si las pérdidas en el hierro son de 675 W; e) la intensidad de cortocircuito accidental por las fases del primario, así como por la línea del mismo. Calcular también la intensidad de cortocircuito del secundario.

Solución: a) Como el ensayo se ha hecho para la corriente nominal, las pérdidas en el cobre coincidirán con la potencia de cortocircuito medida en el ensayo:

$$P_{Cu} = P_{cc} = 4.000 \text{ W}$$

El factor de potencia lo determinamos a partir de las lecturas de los diferentes aparatos de medida. Primero calcularemos la intensidad de línea nominal primaria:

$$I_{IL} \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{1C}} = \frac{250.000}{\sqrt{3} \cdot 12.000} = 12 \text{ A}$$

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{cc} I_{IL}} = \frac{4.000}{\sqrt{3} \cdot 600 \cdot 12} = 0,32 \Rightarrow \varphi_{cc} = 71,34^\circ$$

b) La tensión de cortocircuito porcentual de cada una de las fases se determina a través de la tensión de cortocircuito medida en una de las fases; al estar en triángulo, la tensión entre fases medida coincide con dicha tensión.

$$u_{cc} = \frac{V_{cc}}{V_{1c}} 100 = \frac{600}{12.000} 100 = 5\%$$

$$u_{Rcc} = u_{cc} \cos \varphi_{cc} = 5 \cdot 0,32 = 1,6\%$$

$$u_{Xcc} = u_{cc} \operatorname{sen} \varphi_{cc} = 5 \cdot \operatorname{sen} 71,34^\circ = 4,73\%$$

c) Para determinar la tensión en la carga habrá que determinar previamente el coeficiente de regulación correspondiente:

$$\epsilon = u_{Rcc} \cos \varphi + u_{Xcc} \operatorname{sen} \varphi = 1,6 \cdot 0,85 + 4,73 \cdot 0,53 = 3,87\%$$

Por lo que la caída de tensión que se producirá será de:

$$\Delta V = \frac{E_2}{100} \epsilon = \frac{398}{100} \cdot 3,87\% = 15,4 \text{ V}$$

La tensión que se presenta en la carga, es:

$$V_2 = E_2 - \Delta V = 398 - 15,4 = 382,6 \text{ V}$$

d) El rendimiento lo calculamos mediante la expresión:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} 100 = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + P_{Fe} + P_{Cu}} 100$$

$$\eta = \frac{250.000 \cdot 0,85}{250.000 \cdot 0,85 + 675 + 4.000} \cdot 100 = 97,8\%$$

e) La intensidad de cortocircuito accidental por fase del primario lo determinamos con la expresión ya conocida:

$$I_{cc(f)} = \frac{100}{u_{cc}} I_{ln(f)}$$

Para lo cual determinamos primero la intensidad por la fase del primario del transformador conectado en triángulo:

$$I_{ln(f)} = I_{IL}/\sqrt{3} = 12/\sqrt{3} = 6,93 \text{ A}$$

$$I_{cc1(f)} = \frac{100}{5} \cdot 6,93 = 138,6 \text{ A}$$

En la línea aparecerá una intensidad de cortocircuito igual a:

$$I_{cc1(L)} = \sqrt{3} I_{cc(f)} = \sqrt{3} \cdot 138,6 = 240 \text{ A}$$

Para calcular la corriente de cortocircuito del secundario primero calculamos la intensidad nominal por el mismo. En el secundario aparecerá una corriente de cortocircuito igual a:

$$I_{2L} \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{2C}} = \frac{250.000}{\sqrt{3} \cdot 398} = 363 \text{ A}$$

$$I_{cc2(f)} = \frac{100}{5} \cdot 363 = 7.260 \text{ A}$$

18.13 Conexión en paralelo de transformadores

En ciertas ocasiones es necesario acoplar transformadores en paralelo para conseguir así aumentar la potencia de salida. Para hacerlo, se deberán cumplir las siguientes condiciones:

a) Los valores instantáneos de las tensiones de salida deben ser iguales, por lo que siempre habrá que conectar los transformadores con el mismo orden de fases en la salida. Además el desfase correspondiente al grupo de conexión de ambos transformadores debe ser el mismo.

Una forma de comprobar este último extremo consiste en verificar con un voltímetro si existe diferencia de potencial entre cada uno de los terminales de salida a conectar, tal como se muestra en la Figura 18.33.

b) El reparto de potencia de cada uno de los transformadores dependerá de la impedancia de cortocircuito que posea cada uno de ellos, de tal forma que suministrará más potencia el que tenga menor impedancia. Normalmente se conoce la tensión de cortocircuito u_{cc} , que es proporcional a dicha impe-

dancia, por lo hay que procurar conectar transformadores que posean la misma potencia nominal y la misma tensión de cortocircuito. En el caso de que las potencias nominales de los transformadores sean diferentes, éstas no deben diferenciarse en más del triple, y la tensión de cortocircuito del más pequeño debe de ser superior a la del más grande, de tal forma que el reparto de cargas entre ambos transformadores sea equitativo respecto a sus potencias nominales.

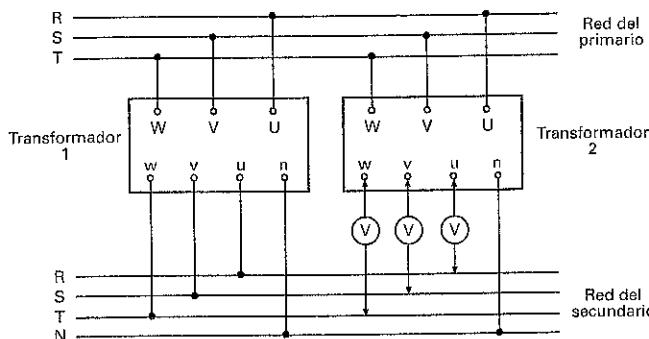


Figura 18.33. Verificación de terminales antes de conectar dos transformadores en paralelo.

18.14 Refrigeración de los transformadores

Si el calor que se produce en los transformadores por efecto de las pérdidas no se evaca convenientemente se puede producir la destrucción de los materiales aislantes de los devanados. Para evacuar este calor se emplean diferentes métodos de refrigeración en función de la potencia nominal del transformador y la ubicación del mismo, como por ejemplo:

Para transformadores de pequeña potencia (hasta 50 KVA) la refrigeración se realiza aprovechando el aire que envuelve a los mismos. Para ello se construye la cubierta con unas aberturas, con el fin de que el aire pueda circular de una forma natural por los mismos (ventilación por convección). En el caso de que esta ventilación no fuese suficiente, se añaden ventiladores que fuerzan la refrigeración del transformador.

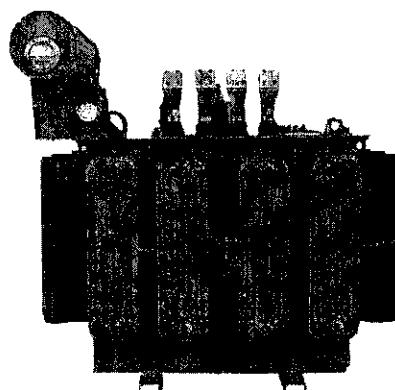


Figura 18.34. Transformador trifásico con refrigeración por aceite.

Para transformadores de distribución de media potencia (menos de 200 KVA) se sumergen en aceite mineral o silicona. El aceite transmite el calor del transformador al exterior por convección natural. Además, con el aceite se consigue mejorar el aislamiento de los devanados de alta tensión (Figura 18.34).

Para transformadores de distribución de gran potencia se añaden aletas de refrigeración en la cubierta exterior del mismo. Además se hace circular el aceite caliente desde el interior del transformador hacia dichas aletas con el fin de acelerar el proceso de refrigeración. Para transformadores de más potencia se pueden añadir ventiladores que fuerzan la evacuación de los radiadores externos.

En los transformadores con aceite, éste tiende a dilatarse con los aumentos de temperatura, por lo que para evitar sobrepresiones se coloca sobre la cuba de aceite un **depósito de expansión** de forma cilíndrica a medio llenar y en contacto con el exterior mediante un orificio. Para evitar la entrada de humedad del exterior al depósito, que podría alterar las cualidades del aceite, se coloca una especie de filtro que absorbe la humedad que pudiera entrar del exterior. Este dispositivo se conoce por el nombre de **desecador** y suele ir dotado de sales absorbentes de la humedad, como por ejemplo el silicagel. Cuando el desecador, con el tiempo, se satura de humedad cambia de color, lo que nos indica que hay que renovar las sustancias de absorción.

Con el fin de dotar al sistema de refrigeración por aceite de un sistema de protección adecuado ante una sobrepresión en el circuito, se instala en el mismo el **relé Buchholz**. Este dispositivo se intercala en el circuito de refrigeración entre la cuba y el depósito de expansión. En caso de sobrepresiones en el circuito de refrigeración, bien ocasionadas por un cortocircuito o por una falta de aislamiento, el relé Buchholz puede desconectar el transformador o provocar una señal de alarma, dependiendo de la gravedad del incidente. También actúa en caso de un descenso rápido del nivel de aceite provocado por una fuga del mismo.

Para conocer en todo momento la temperatura del refrigerante se colocan termómetros que nos indican en todo momento el grado de sobrecarga del transformador.

18.15 Características de un transformador

Es importante conocer los datos característicos que es necesario aportar para realizar la adquisición de un transformador comercial para una determinada aplicación. Seguidamente indicamos los más relevantes:

- › Potencia nominal asignada en KVA.
- › Tensión primaria y secundaria.
- › Regulación de tensión en la salida $\pm \%$.
- › Grupo de conexión.
- › Frecuencia.
- › Normas de aplicación.
- › Temperatura máxima ambiente (si es $> 40^\circ$).
- › Altitud de la instalación sobre el nivel del mar (si es > 1.000 m).

› Accesorios opcionales.

› Instalación en interior o bien a la intemperie.

Para determinar la potencia nominal se calcula el consumo máximo de potencia aparente previsible. Además se le añade una reserva de potencia por los posibles incrementos de potencia que se pudieran dar por ampliación de las instalaciones.

Para transformadores de distribución se opta por una tensión de cortocircuito porcentual UCC del 4%, con lo que se consigue reducir la caída de tensión del transformador a niveles reducidos. Por otro lado, para transformadores de gran potencia que operan en redes industriales se prefiere la utilización de una tensión de cortocircuito del 6%, evitando así intensidades de cortocircuito elevadas.

Para alturas superiores a los 1.000 m sobre el nivel del mar disminuyen las propiedades de los refrigerantes utilizados, así como la resistencia del aire. Es por eso que para la instalación de transformadores en zonas que se superen los 1.000 m sea necesario indicárselo al fabricante.

En el caso de instalaciones en las que la temperatura del recinto donde se va a emplazar el transformador sea superior a los 40° también es necesario indicarlo al fabricante, ya que esto puede afectar a la potencia nominal del transformador o al reforzamiento de los equipos de refrigeración.

18.16 Ensayos para transformadores monofásicos y trifásicos

Una vez acabada la construcción de los transformadores es necesario realizar una serie de ensayos con el fin de comprobar sus características. Para realizar estas pruebas será necesario seguir fielmente las normas reglamentarias que se indiquen en cada país, como por ejemplo, las normas UNE (Una Norma Española), CENELEC (Comité Electrotécnico para la Normalización Electrotécnica, CEI (Comité Electrotécnico Internacional), etc.

Los ensayos que se pueden realizar son muy variados, caben destacar:

- › Medida de la resistencia de los arrollamientos.
- › Medida de la relación de transformación y grupo de conexión.
- › Ensayo en vacío.
- › Ensayo en cortocircuito.
- › Obtención de la característica exterior.
- › Medida del rendimiento.
- › Ensayos de calentamiento.
- › Ensayos de aislamiento.

Para la medida de la resistencia de los arrollamientos primario y secundario la mejor opción consiste en utilizar puentes de medida que aseguren una gran precisión en su resultado.

Téngase en cuenta que la resistencia que se va a medir es bastante baja. En el caso de transformadores trifásicos habrá que tener en cuenta la conexión del arrollamiento, de tal forma, que si por ejemplo están conectados en estrella, al aplicar el ohmímetro entre dos terminales se tome la medida de la resistencia de dos bobinas conectadas en serie.

Para la medida de la relación de transformación se pueden utilizar dos voltímetros de similares características, conectados uno en el primario y otro, en el secundario y con el transformador funcionando en vacío, procediéndose como se indica en el ensayo en vacío.

En el caso de tener que acoplar dos transformadores en paralelo es necesario que ambos sean del mismo grupo de conexión. Una forma de comprobarlo es medir la tensión entre cada uno de los terminales a conectar en el secundario de ambos transformadores, tal como ya indicamos en el Apartado 18.13.

Para obtener la característica exterior del transformador (tensión en bornes de la carga para diferentes corrientes de carga y factores de potencia) se pueden utilizar dos procedimientos: método directo e indirecto. El método directo consiste en tomar lectura de tensión, corriente y factor de potencia cuando se le somete al transformador a diferentes régimenes de carga (óhmico, inductivo, capacitivo). Este método sólo se utiliza para pequeños transformadores y de tensiones no muy elevadas. Para transformadores de gran potencia se pueden utilizar métodos indirectos, como el de Kaap, que consiste en realizar un estudio gráfico del diagrama de caída de tensión de un transformador, haciéndolo extensivo para diferentes corrientes de carga y factor de potencia.

La medida del rendimiento se realiza de forma indirecta, tomando los resultados de las pérdidas en el hierro y el cobre obtenidas de los ensayos en vacío y cortocircuito.

Para cualquier tipo de transformador es importante conocer su temperatura normal de trabajo. Además, siempre habrá que procurar que la temperatura no supere los límites indicados en las normas. Las temperaturas que más interesa conocer son las de los devanados y las del refrigerante (aceite mineral, silicona, piráleno, etc.). Para la medida de la temperatura de las diferentes partes del transformador se pueden utilizar térmometros o termopares. La medida de la temperatura de los devanados también se puede determinar teniendo en cuenta el aumento de resistencia, experimentado por los mismos al conectar la carga en el transformador. Para ello se emplearan las expresiones ya estudiadas en el Capítulo 2 de esta obra.

El estado de los aislamientos en un transformador es muy importante para alargar su vida y reducir las averías. Para comprobar los aislamientos de un transformador se pueden realizar distintas pruebas mediante un megohmetro o megger, como son: medida de resistencia entre conductores y masa, medida de resistencia entre conductores, medida de rigidez dieléctrica del aceite.

Actividades

1. Consigue un transformador monofásico y un trifásico, analiza las características de ambos y realiza el ensayo en vacío de los mismos. Una vez tomadas las lecturas de los aparatos de medida, determina la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío.
2. Con los transformadores utilizados en la Actividad 18.1, realiza los ensayos en cortocircuito. Una vez tomadas las lecturas de los aparatos de medida, determina las pérdidas en el cobre para la potencia nominal, la tensión de cortocircuito y sus componentes y los parámetros R_{ce} , X_{ce} y Z_{ce} .
3. Consigue dos transformadores trifásicos de similares características, y teniendo en cuenta las consideraciones estudiadas, lleva a cabo su acoplamiento en paralelo.
4. Vamos a analizar cómo varía la tensión de salida de un transformador monofásico. Para ello conecta a su

salida un voltímetro y un amperímetro, para después ir conectando diferentes cargas de carácter variable (resistencias, inductancia, condensadores). Anota los resultados y comprueba la dependencia de la caída de tensión de un transformador con el factor de potencia y la corriente de la carga.

5. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.)

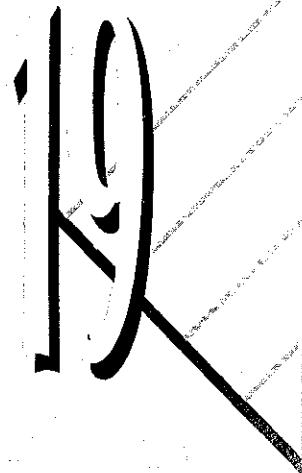
Autoevaluación

- 1) Los transformadores se utilizan para:
 - Cambiar la tensión y corriente en líneas de C.A.
 - Cambiar la tensión y corriente en líneas de C.C.
 - Cambiar la potencia en líneas de C.A.
- 2) ¿Cómo se consigue transferir la energía eléctrica del primario al secundario de un transformador?
 - Gracias a los fenómenos de histéresis y Foucault
 - A través del núcleo de hierro común, que hace de contacto eléctrico entre ambos devanados
 - A través del núcleo de hierro común y mediante un campo magnético variable
- 3) ¿Cómo es posible aumentar la potencia nominal de un transformador comercial?
 - Elevando la tensión del primario
 - Refrigerándolo
 - Elevando el factor de potencia de la carga
- 4) ¿De qué depende fundamentalmente la fuerza electromotriz inducida en el secundario de un transformador?
 - Del número de espiras del secundario
 - De la corriente por el secundario
 - De la potencia nominal del transformador
- 5) ¿Qué ocurre si se aplica a un transformador una tensión superior a la nominal?
 - Que la tensión por el secundario aumenta en la misma proporción sin apreciarse cambios considerables en el comportamiento del transformador
 - La corriente de vacío tiende a elevarse a valores peligrosos para el transformador
 - Aumenta la potencia nominal del transformador
- 6) ¿De qué dependen las pérdidas en el cobre de un transformador?
 - De la corriente suministrada por el transformador y de la resistencia de los devanados
 - De la calidad del cobre utilizado
 - De la relación de transformación
- 7) Las pérdidas en el hierro de un transformador:
 - Son producidas por los efectos combinados de la histéresis y corrientes parásitas
 - Se determinan con el ensayo en cortocircuito
 - No cambian apreciablemente porque el transformador trabaje en vacío o en carga
- 8) Averiguar la relación de transformación y la tensión en el secundario de un transformador ideal con 5.000 espiras en el primario y 500 en el secundario. ¿Qué tensión aparece en el secundario si se conecta el primario a una red de C.A. de 220 V, 50 Hz?
- 9) Un transformador monofásico posee 350 espiras en el primario y 1.750 en el secundario. El flujo máximo que aparece en el núcleo magnético es de 4 mWb. Determina

- nar las tensiones en el primario y en el secundario para una frecuencia de 60 Hz, así como la relación de transformación (considerar el transformador como ideal).
- 10) Un transformador monofásico reductor de 380/127 V proporciona energía a un equipo frigorífico de 1.500 W, 127 V, $\cos \phi = 0,6$. Suponiendo la corriente de vacío y las pérdidas despreciables, determinar la intensidad por el primario y por el secundario, así como la relación de transformación del mismo.
- 11) Al someter a un ensayo de vacío a un transformador monofásico de 5 KVA, 10.000/398 V, 50 Hz, se obtienen los siguientes resultados: $V_1 = 1.000$ V, $V_2 = 398$ V, $A = 0,15$ A y $W = 20$ W. Determinar la relación de transformación, las pérdidas en el hierro y la corriente de vacío .
- 12) Al realizar un ensayo en cortocircuito a un transformador monofásico de 100 KVA, tensiones 6.000/230 V, es necesario aplicar al lado de alta tensión una tensión de 250 V para que por el primario circule la corriente nominal. Si la potencia absorbida en el ensayo es de 1.571 W, averiguar: a) las corrientes nominales del primario y del secundario; b) las pérdidas en el cobre para la potencia nominal; c) la tensión de cortocircuito y sus componentes; d) los parámetros R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} ; e) las pérdidas en el cobre cuando el transformador trabaje a 3/4 partes de su potencia nominal.
- 13) Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida de un transformador monofásico a plena carga con un FP de 0,8. Las características del mismo son: 100 KVA; 2.000/230 V; $u_{Rcc} = 3,7\%$; $u_{Xcc} = 2,3\%$. Averiguar también el valor efectivo de la corriente de cortocircuito en ambos devanados y la tensión en la carga cuando el transformador suministre una potencia de 25 KVA con un factor de potencia de 0,8.
- 14) Las características de un transformador monofásico son las siguientes: 50 KVA, 398/220 V, potencia de ensayo en vacío = 100 W, potencia de ensayo en cortocircuito = 300 W. Determinar el rendimiento a plena carga y $\cos \phi = 0,87$.
- 15) Se desea determinar el valor efectivo de la tensión de salida y el rendimiento de un transformador monofásico a plena carga con un FP inductivo de 0,85. Las características del mismo son: 10 KVA, 398/230 V. En el ensayo de cortocircuito se han obtenido los siguientes resultados: ha consumido 360 W al aplicar una tensión de 16 V cuando circulaba una corriente por el primario de 25 A. En el ensayo en vacío se ha medido una potencia de 90 W. Averiguar también la corriente de cortocircuito en ambos devanados
- 16) ¿Qué ventajas presentan los bancos de transformadores monofásicos para sistemas trifásicos?
- a) Son más económicos
 - b) Fácil transporte por carretera de transformadores de gran potencia
 - c) Poseen un mayor rendimiento
- 17) Un transformador trifásico con un grupo de conexión Dz6 indica que:
- a) Devanado de alta tensión conectado en triángulo, el de baja en zig-zag y un desfase de 0°
 - b) Devanado de baja tensión conectado en triángulo, el de alta en zig-zag y un desfase de 180°
 - c) Devanado de alta tensión conectado en triángulo, el de baja en zig-zag y un desfase de 180°
- 18) ¿Qué consideraciones hay que tener en cuenta para poder acoplar dos transformadores en paralelo?
- a) El grupo de conexión ha de ser el mismo
 - b) Su potencia nominal debe ser exactamente igual
 - c) Para potencias nominales iguales en ambos transformadores sus caídas de tensión de cortocircuito pueden ser diferentes
- 19) Los datos obtenidos al someter a un transformador trifásico de 100 KVA, 12.000/398 V con un grupo de conexión Dy5, a un ensayo en vacío son: potencia trifásica absorbida = 400 W; corriente medida en la línea del lado de alta tensión = 0,2 A. Determinar: a) la relación de tensiones simples y compuesta; b) la corriente de vacío; c) las pérdidas en el hierro.
- 20) Los datos obtenidos al someter a un transformador trifásico de 250 KVA, 17,5 KV/398 V con un grupo de conexión Dy11, a un ensayo en cortocircuito son: potencia trifásica absorbida = 4.010 W; corriente medida en la línea del lado de alta tensión = 8,25 A; tensión medida entre fases del primario 700 V. En el ensayo en vacío se han medido 675 W. Determinar. a) las pérdidas en el cobre y el factor de potencia de cortocircuito; b) la tensión porcentual de cortocircuito y sus componentes; c) tensión compuesta en la carga cuando el transformador trabaje a plena carga y con un factor de potencia inductivo de 0,85; d) rendimiento del transformador en estas condiciones; e) la intensidad de cortocircuito accidental por las fases del primario.



Generadores Electromagnéticos de C.C. Las Dinamos



Introducción

En la actualidad, la generación de C.C. se realiza mediante pilas y acumuladores o se obtiene de la conversión de C.A. a C.C. mediante los puentes rectificadores. El uso de la dinamo para la producción de energía en forma de C.C. se estuvo utilizando hasta la llegada de los alternadores, que con el tiempo la han dejado totalmente desplazada. Hoy en día únicamente se utilizan las dinamos para aplicaciones específicas, como por ejemplo, para medir la velocidad de rotación de un eje (tacodinamos), ya que la tensión que presentan en los bornes de salida es proporcional a la velocidad de la misma.

Se puede decir que una dinamo es una máquina eléctrica rotativa que produce energía eléctrica en forma de corriente continua aprovechando el fenómeno de inducción electromagnética. Esta máquina consta fundamentalmente de un electroimán encargado de crear un campo magnético fijo conocido por el nombre de inductor, y un cilindro donde se enrrollan bobinas de cobre, que se hacen girar a una cierta velocidad cortando el flujo inductor, que se conoce como inducido.

Contenido

- Principio de funcionamiento de una dinamo.
- Constitución de una dinamo.
- Reacción del inducido.
- Polos de comutación y de devanado de compensación.
- Dinamos de excitación independiente.
- Dinamos autoexcitadas.
- Ensayos y curvas características de las dinamos.

Objetivos

- Describir el funcionamiento de la dinamo.
- Seleccionar las características de un dinamo para una determinada aplicación práctica.
- Analizar el funcionamiento de una dinamo en función de su tipo de excitación.
- Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con las dinamos, identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

19.1 Producción de corriente alterna en una espira que gira en el seno de un campo magnético

Cuando hacemos girar una espira rectangular una vuelta completa entre las masas polares de un electroimán inductor (véase Figura 19.1), los conductores *a* y *b* del inducido cortan en su movimiento el campo magnético fijo y en ellos se induce una f.e.m. inducida cuyo valor y sentido varía en cada instante con la posición.

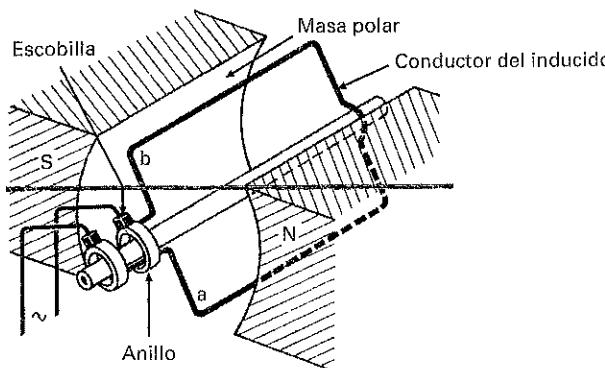


Figura 19.1. Alternador elemental.

Cada uno de los terminales de la espira se conecta a un anillo metálico conductor, donde dos escobillas de grafito recogen la corriente inducida y la suministran al circuito exterior.

Para determinar el sentido de la corriente inducida, en cada posición de los conductores, de la espira se aplica la regla de los tres dedos de la mano derecha, pudiéndose comprobar cómo se obtiene a la salida una tensión alterna senoidal.

19.2 Rectificación de la corriente mediante el colector de delgas

Dado que lo que deseamos es obtener corriente continua en la salida del generador, necesitamos incorporar un dispositivo que convierta la C.A. generada en C.C. Esto se consigue mediante el **colector de delgas**.

Si, tal como se muestra en la Figura 19.2, conectamos los dos extremos de la espira, no ya en los dos anillos colectores, sino en dos semianillos conductores aislados uno del otro, sobre los que ponemos en contacto dos escobillas que recojan la corriente, conseguiremos obtener a la salida C.C.

Cuando la espira gira, la corriente inducida cambia de sentido en una determinada posición. Si observamos atentamente en la Figura 19.3 las dos posiciones de la espira, ésta es solidaria a los dos semianillos 1 y 2 que giran con ella. Sin embargo, las escobillas A y B son fijas.

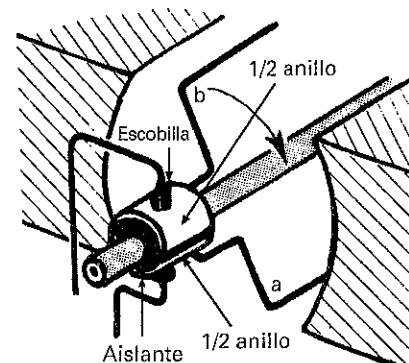


Figura 19.2. Colector de delgas de una dinamo.

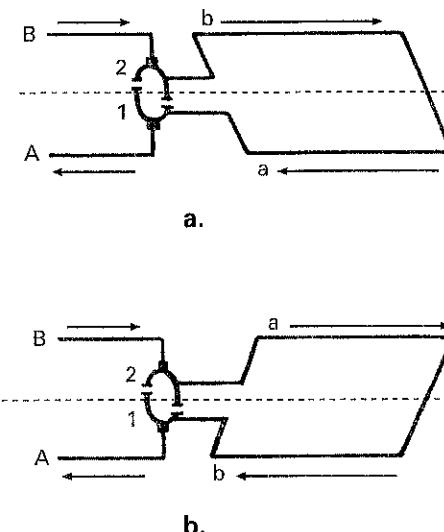


Figura 19.3. El sentido de la corriente permanece constante en la salida de la espira gracias al colector de delgas.

En la posición de la Figura 19.3 a, la corriente inducida en los conductores *a* y *b* posee el sentido que se indica con las flechas. El semianillo 1 está en contacto con la escobilla A, y el semianillo 2 con la escobilla B.

Al girar la espira hasta la posición de la Figura 19.3 b, la corriente inducida en los conductores *a* y *b* ha cambiado de sentido, tal como se indica con las flechas, pero como el semianillo 1 está ahora en contacto con la escobilla B y el semianillo 2 queda en contacto con la escobilla A, el sentido de la corriente no cambia en los conductores A y B que suministran energía a la carga.

En resumen, la corriente que fluye por la espira es alterna, pero el **colector** formado por los semianillos aislados consiguen rectificar la corriente y convertirla en continua.

Con una sola espira y dos anillos colectores conseguimos una corriente continua similar a la obtenida en un puente rectificador de onda completa, tal como se muestra en la Figura 19.4.

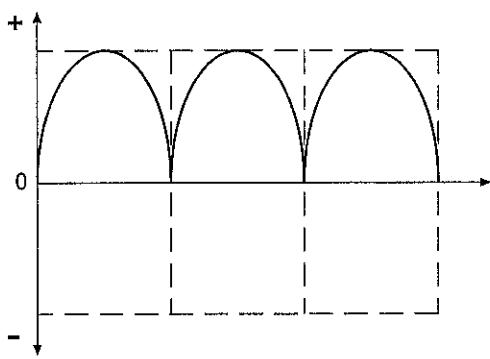


Figura 19.4. Aspecto de la corriente continua que se presenta a la salida del colector.

Esta corriente continua presenta muchas variaciones, o lo que es lo mismo, un rizado excesivo e indeseable. Si incluyésemos en el inducido una segunda espira situada a 90° de la primera y conectada a otros dos nuevos semianillos o **delgas**, obtendríamos una corriente en la salida de la dinamo como la representada en la Figura 19.5, que como se puede comprobar posee un rizado menor que en el caso de una sola espira (la corriente ya no llega a descender a cero). En este caso el colector constaría de cuatro **delgas**.

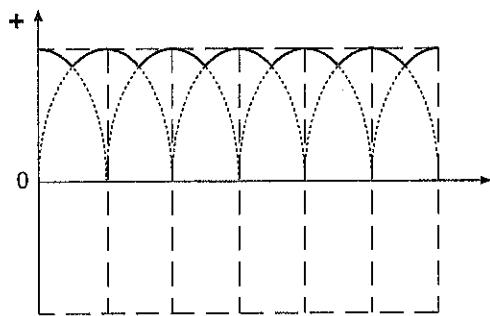


Figura 19.5. Corriente de salida de una dinamo con cuatro delgas.

Si incluimos en el inducido cuatro espiras con ocho delgas obtenemos una corriente de salida todavía mucho más lineal, como la representada en la Figura 19.6. En la práctica, cuando se desea obtener una tensión continua lo más rectilínea posible, se construyen dinamos con un número considerable de espiras y delgas.

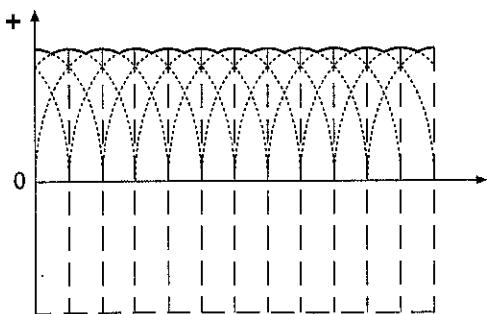


Figura 19.6. Corriente de salida de una dinamo con ocho delgas.

19.3 Constitución de una dinamo

Las partes fundamentales de una dinamo son el **inductor**, el **inducido**, y el **colector**.

Inductor. El inductor es fijo y se sitúa en el estator (parte estática o sin movimiento de la máquina). Está formado por un electroimán de dos polos magnéticos en las máquinas bipolares (Figura 19.7), o de varios pares de polos en las multipolares.

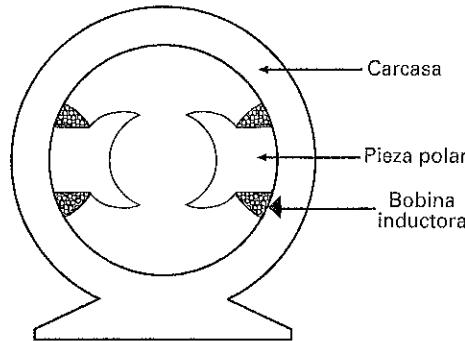


Figura 19.7. Inductor de una dinamo.

El bobinado y las piezas polares de hierro dulce del electroimán están rodeados por una carcasa o culata de fundición o de acero moldeado que sirve de soporte a la máquina y permite el cierre del circuito magnético (véase Figura 19.13).

El inducido. El inducido es móvil y se sitúa el rotor (parte que se mueve en sentido giratorio de la máquina). Está compuesto de un núcleo magnético en forma de cilindro y constituido por chapas magnéticas apiladas, con el fin de evitar las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, donde se bobinan las espiras con conductores de cobre esmaltados, tal como se muestra en la Figura 19.8. El núcleo de chapas dispone de una serie de ranuras donde se alojan los bobinados del inducido.

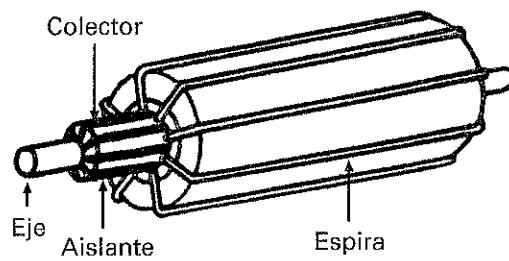


Figura 19.8. Inducido de una dinamo.

El núcleo queda fijado a un eje, cuyos extremos se deslizan apoyados en cojinetes fijos a la carcasa. De esta forma el inducido se sustenta entre las piezas polares del inductor, pudiendo ser impulsado en un movimiento de rotación rápido.

El colector. En el eje del inducido se fija el colector de delgas formado por láminas de cobre electrolítico con el fin de poderle conectar los diferentes circuitos del inducido. Las delgas se afilan del eje y entre sí por hojas de mica (Figura 19.9).

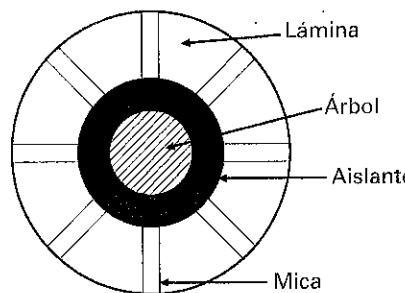


Figura 19.9. Colector de delgas.

La corriente se recoge en el colector con la ayuda de dos o varios contactos deslizantes de grafito o de carbón puro, llamados escobillas (Figura 19.10).

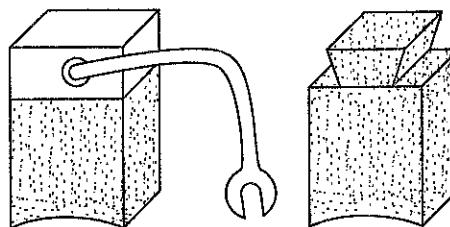


Figura 19.10. Escobillas.

Cada escobilla se monta en un portaeescobillas, que asegura la presión de la misma contra el colector mediante muelles (Figura 19.11). De las escobillas parten los conductores que se conectan a la placa de bornas de la dinamo, de donde se conectarán al circuito exterior. Dada la fricción a la que se somete a las escobillas, se produce un desgaste progresivo de las mismas que limita su vida útil, teniendo que reponerlas cada ciertos períodos de tiempo.

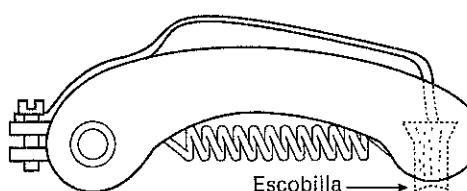


Figura 19.11. Portaeescobillas.

19.4 Circuito magnético de una dinamo

En la Figura 19.12 se ha representado el circuito recorrido por las líneas de fuerza del campo magnético inductor. Éstas se cierran a través de las piezas polares del electroimán, el inducido y la carcasa o culata de la dinamo.

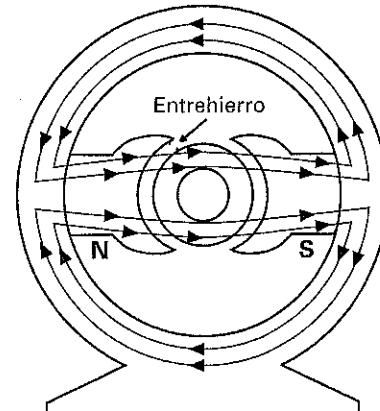


Figura 19.12. Circuito magnético de una dinamo.

Es importante hacer notar que las líneas de fuerza deben transcurrir por un pequeño espacio no ferromagnético existente entre las piezas polares y el **entrehierro**. Nos referimos al entrehierro formado por aire. Dado que las líneas de fuerza se establecen muy mal por el entrehierro, se intenta reducir al máximo su tamaño, procurando que esto no impida que el rotor pueda girar libremente y sin fricciones.

19.5 Fuerza electromotriz generada por una dinamo

El valor de la fuerza electromotriz se obtiene aplicando el principio de inducción electromagnética, por lo que dependerá del flujo magnético que corten los conductores, así como de lo rápido que lo hagan y del número de ellos. La expresión que relaciona la fuerza electromotriz de una dinamo con estas variables, es:

$$E = \Phi n N \frac{p}{a} \frac{1}{60}$$

E = fuerza electromotriz (V)

Φ = flujo por polo (Wb)

n = nº de conductores del inducido

N = velocidad de giro del inducido (r.p.m.)

a = pares de circuitos del inducido

p = pares de polos

Como los términos n , p y c son constantes para una máquina de C.C., tenemos que:

$$E = KN\Phi$$

La fuerza electromotriz es directamente proporcional al flujo inductor y al número de revoluciones de la dinamo.

19.6 Reacción del inducido

Cuando los conductores del inducido son recorridos por una corriente eléctrica, producen un campo magnético cuya dirección y sentido se obtiene aplicando la regla del sacacorchos. La dirección de este campo transversal de reacción adquiere la misma dirección que el eje de las escobillas, con lo que resulta ser perpendicular al campo principal producido por los polos inductores (Figura 19.13).

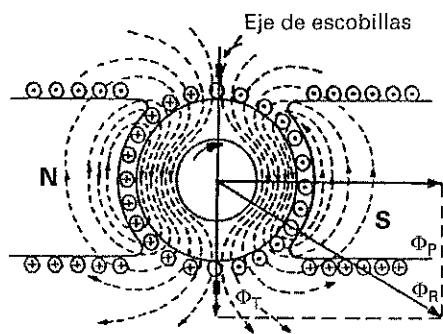


Figura 19.13. Flujo transversal generado por los conductores del inducido.

El campo transversal debido a la reacción del inducido se suma vectorialmente al principal, dando como fruto un campo magnético resultante que queda desviado de la posición original (Figura 19.14). Esta desviación del campo inductor produce una serie de problemas cuando las escobillas comutan de una delga a otra en el colector, dando como resultado chispas que perjudican notablemente el funcionamiento de la máquina.

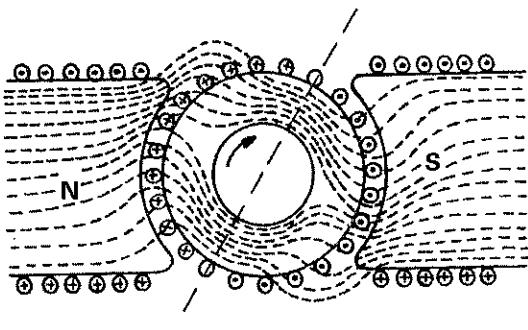


Figura 19.14. Desviación del campo magnético inductor provocada por la reacción del inducido.

Existen dos posibilidades para evitar los efectos perjudiciales de la reacción del inducido: desviar las escobillas o disponer de polos auxiliares de comutación:

La desviación de las escobillas debe hacerse en el mismo sentido de giro de la dinamo hasta que el eje de las mismas coincida con la perpendicular al campo resultante (Figura 19.15). El inconveniente que conlleva este sistema es que, al ser el valor del campo transversal de reacción del inducido dependiente de la corriente que absorba el inducido, la desviación de las escobillas será la adecuada para una corriente

determinada. Para una corriente mayor o menor, la desviación de las escobillas también tendría que ser diferente.

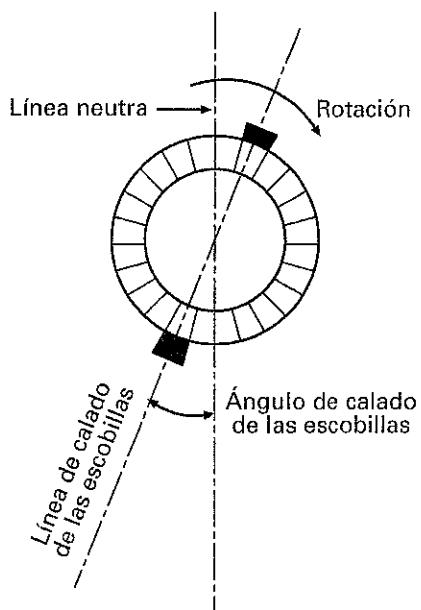


Figura 19.15. Desviación de las escobillas para reducir el efecto de la reacción del inducido.

Los polos de comutación se disponen en la culata del generador de tal forma que produzcan un campo magnético transversal del mismo valor y de sentido contrario al flujo transversal de reacción del inducido (Figura 19.16). Para que esto sea así, los polos de comutación se conectan en serie con el inducido para que la corriente que pasa por ellos sea igual que la del inducido.

De esta forma, cuando crece el campo transversal de reacción del inducido por un aumento de corriente, también lo hace el flujo de compensación producido por los polos de comutación. En este caso siempre se consigue eliminar con efectividad el campo magnético de reacción del inducido.

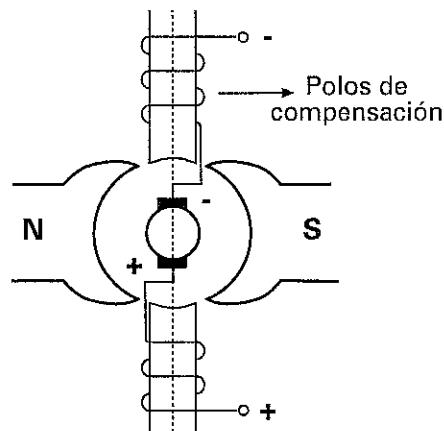


Figura 19.16. Polos de comutación para eliminar el campo transversal del inducido.

19.7 Devanado de compensación

En las máquinas de gran potencia, aparte de los polos de conmutación, se coloca en las ranuras de los polos principales un devanado compensador, cuya misión es eliminar las distorsiones del campo magnético principal originados por el flujo transversal. Este devanado se conecta en serie con el de conmutación y el inducido (Figura 19.17).

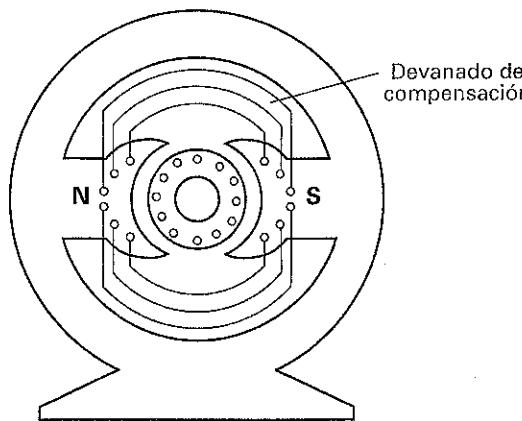


Figura 19.17. Devanado de compensación.

19.8 Excitación de los inductores

El campo magnético necesario para que una dinamo pueda funcionar se puede producir de dos formas claramente diferenciadas: mediante un imán permanente o mediante electroimanes alimentados por corriente continua.

Dado que los imanes permanentes producen un campo magnético no muy intenso y constante (sin posibilidad de regulación) su uso se hace interesante para pequeñas dinamos como, por ejemplo, dinamos taquimétricas, magnetos, etc.

Cuando se desea la obtención de un campo magnético de excitación elevado y con posibilidad de regulación se recurre a bobinas inductoras que rodean las piezas polares y que son alimentados por una corriente continua.

Dependiendo de cómo se obtenga la energía eléctrica necesaria para alimentar el circuito inductor de una dinamo y de cómo se conecten surgen diferentes tipos de excitación.

Dinamos de excitación independiente.

Dinamos autoexcitadas.

19.8.1 Dinamos de excitación independiente

La corriente de excitación con la que se alimenta a las bobinas inductoras se proporciona mediante una fuente de energía exterior de C.C., como por ejemplo una batería de acumuladores o una fuente de alimentación (Figura 19.18).

Los terminales A y B se corresponden con los del circuito del inducido y los terminales K e I con los del devanado del inductor.

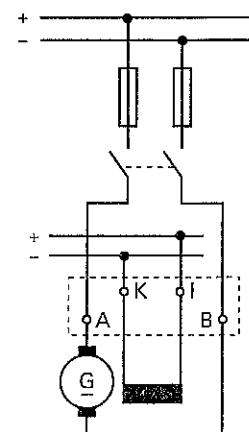


Figura 19.18. Esquema de conexiones de dinamo con excitación independiente.

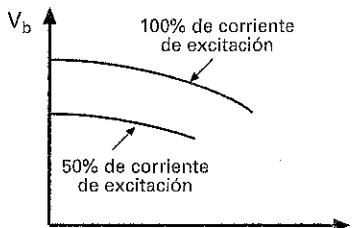


Figura 19.19. Características en carga de una dinamo con excitación independiente.

En la Figura 19.19 se muestra la característica en carga de una dinamo con excitación independiente para una velocidad determinada y constante. Aquí se puede comprobar que la tensión que proporciona la dinamo a la carga disminuye al aumentar la intensidad de carga. Esto se debe fundamentalmente a que la caída de tensión que se produce en la resistencia interna del inducido aumenta proporcionalmente a la intensidad. En la característica de la Figura 19.19 se han incluido dos curvas; se puede comprobar que al disminuir la corriente de excitación del inductor se consigue reducir también la tensión de salida de la dinamo.

La dinamo de excitación independiente posee el inconveniente de que necesita de una fuente de alimentación de C.C. para la alimentación del inductor; sin embargo la independencia entre la corriente de excitación y la tensión en bornes del inducido la hacen interesante para ciertas aplicaciones.

19.18.2 Dinamos autoexcitadas

En la práctica resulta más interesante conseguir que el propio generador produzca la energía necesaria para la alimentación del circuito inductor. Esto presenta un problema, que es cómo conseguimos que la dinamo comience a produ-

cir f.e.m. si inicialmente no existe campo magnético en el inductor. Este problema se solventa fácilmente gracias al pequeño **magnetismo remanente** que poseen los núcleos magnéticos de las piezas polares.

Efectivamente, cuando un material magnético es sometido a una imantación, aunque retiremos la causa imanadora, dicho material siempre queda algo magnetizado, dependiendo de la intensidad del magnetismo remanente del material utilizado. De esta forma, si conectamos el circuito del inducido con el del inductor, por ejemplo, en paralelo con el inductor, al girar el inducido a su velocidad nominal, los conductores del mismo cortan el débil campo magnético debido al magnetismo remanente, produciéndose una pequeña f.e.m., pero suficiente para alimentar con una pequeña corriente al circuito inductor. Esto, a su vez, produce un aumento del flujo magnético inductor, que hace que aumente la f.e.m. en el inducido, produciéndose un ciclo repetido de aumentos de la f.e.m. y de flujo inductor hasta que se alcanza la f.e.m. nominal.

Según como se conecte el devanado inductor respecto al inducido surgen tres tipos de dinamos autoexcitadas: *dinamo con excitación en derivación*, *dinamo con excitación en serie* y *dinamo excitación compound*.

19.8.3 Dinamo con excitación en derivación

Aquí se conecta el devanado inductor en paralelo con el inducido, tal como se muestra en la Figura 19.20. Para producir el flujo magnético necesario se montan bobinas inductoras con un gran número de espiras, ya que la corriente de excitación que se alcanza con este montaje es pequeña, siendo reducida la sección de los conductores.

En el esquema eléctrico de la Figura 19.20 se ha incluido un reostato de regulación de campo conectado en serie con el devanado inductor. Al modificar la resistencia de este reóstato conseguimos variar la corriente de excitación y con ella el flujo magnético inductor, consiguiendo así tener un control efectivo sobre la tensión de salida del generador.

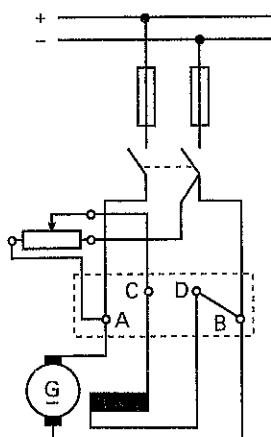


Figura 19.20. Esquema de conexiones de una dinamo con excitación en derivación.

En la Figura 19.21 se muestra la curva característica de una dinamo en derivación o shunt en carga. Aquí se puede observar que la tensión que proporciona el generador a la carga se reduce más drásticamente con los aumentos de la corriente de carga que en la dinamo con excitación independiente. Esto es debido a que al aumentar la caída de tensión en el inducido con la carga, se produce una disminución de la tensión en bornes, que provoca, a su vez, una reducción de la corriente de excitación. Esto hace que la f.e.m. inducida se vea reducida, pudiéndose llegar a perder la excitación total de la dinamo para corrientes de carga muy elevadas.

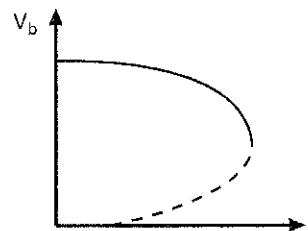


Figura 19.21. Curva característica en carga de una dinamo derivación.

19.8.4 Dinamo con excitación en serie

En este caso se conecta el devanado inductor en serie con el inducido, de tal forma que toda la corriente que el generador suministra a la carga fluye por igual por ambos devanados (Figura 19.22). Dado que la corriente que atraviesa al devanado inductor es elevada, es necesario construirlos con pocas espiras y una gran sección en los conductores.

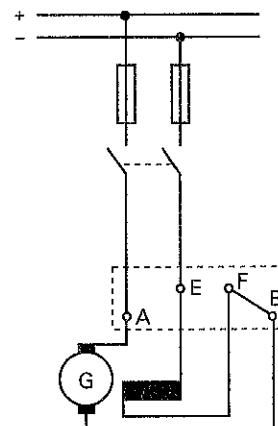


Figura 19.22. Esquema de conexiones de una dinamo con excitación en serie.

El inconveniente fundamental de este tipo de generador es que cuando trabaja en vacío (sin conectar ningún receptor exterior), al ser la corriente nula, no se excita. Además, cuando aumenta mucho la corriente de carga, también lo hace el flujo inductor por lo que la tensión en bornes de la dinamo también se eleva, tal como se muestra en la curva característica de carga de la Figura 19.23. Esto hace que este generador sea muy inestable en su funcionamiento y, por lo tanto, poco útil para la generación de energía eléctrica.

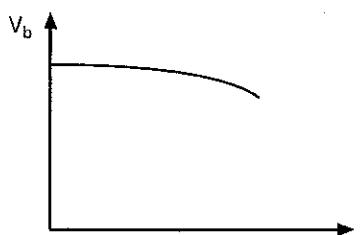


Figura 19.23. Curva característica en carga de una dinamo serie.

19.8.5 Dinamo con excitación compound

En la excitación mixta o compound se divide un circuito inductor en dos partes independientes, conectando una en serie con el inducido y otra en derivación, tal como se muestra en el esquema de la Figura 19.24.

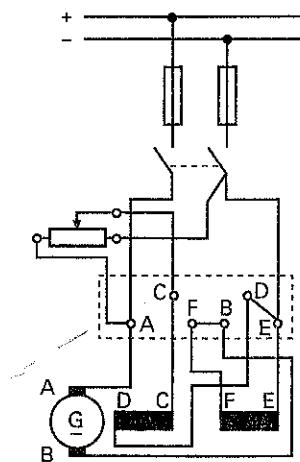


Figura 19.24. Esquema de conexiones de una dinamo con excitación compound.

Gracias a la combinación de los efectos serie y derivación en la excitación de la dinamo se consigue que la tensión que suministra el generador a la carga sea mucho más estable para cualquier régimen de carga, tal como se muestra en la curva característica en carga de la Figura 19.25.

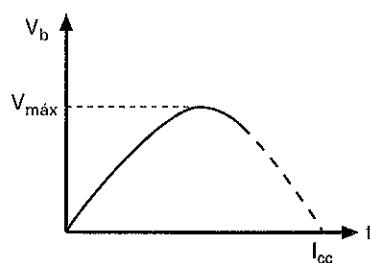


Figura 19.25. Curva característica en carga de una dinamo compound.

La gran estabilidad conseguida en la tensión por las dinamos con excitación compound hacen que ésta sea en la práctica la más utilizada para la generación de energía.

19.9. Ensayos en una dinamo

Al igual que se hace con los transformadores, las dinamos también pueden ser sometidas a una serie de ensayos con el fin de determinar sus características y analizar su comportamiento en diferentes situaciones de funcionamiento. De esta forma, se pueden realizar ensayos para determinar el rendimiento, para evaluar el calentamiento de la máquina para diferentes regímenes de funcionamiento, medir la resistencia de aislamiento, la rigidez dieléctrica, etc. Además, a través de los ensayos se pueden determinar las curvas características de la dinamo, como pueden ser:

- **Característica de vacío:** $V_b = f(I_{ex})$. Para una velocidad de rotación fija ($N = \text{cte}$) y estando la dinamo trabajando en vacío ($I_i = 0$), la curva representa el valor de la tensión en bornes (V_b) en función de la corriente de excitación (I_{ex}).
 - **Característica en carga:** $V_b = f(I_{ex})$. Para una velocidad de rotación fija ($N = \text{cte}$) y estando la dinamo trabajando en carga a una intensidad constante ($I_i = \text{cte}$), la curva representa el valor de la tensión en bornes (V_b) en función de la corriente de excitación (I_{ex}).
 - **Característica de regulación:** $I_{ex} = f(I)$. Para una velocidad de rotación y una tensión en bornes constantes ($N = \text{cte}$, $V_b = \text{cte}$), la curva representa la corriente de excitación (I_{ex}) en función de la corriente suministrada por el inducido (I_i).
 - **Característica de cortocircuito:** $I_{ex} = f(I_i)$. Para una velocidad constante ($N = \text{cte}$) y una tensión en bornes igual a cero ($V_b = 0$), la curva representa la corriente de excitación (I_{ex}) en función de la corriente suministrada por el inducido (I_i).
 - **Característica exterior:** $V_b = f(I)$. Para una corriente de excitación y velocidad constantes ($I_{ex} = \text{cte}$, $N = \text{cte}$), la curva representa la tensión en la carga (V_b) en función de la corriente suministrada por la dinamo (I_i).
 - **Característica interior:** $E = f(I)$. Para una corriente de excitación y velocidad constantes ($I_{ex} = \text{cte}$, $N = \text{cte}$), la curva representa la f.e.m. inducida por la dinamo (E) en función de la corriente suministrada por el inducido (I_i).
- Para llevar a cabo estos ensayos son necesarios los siguientes equipos:
- Motor de arrastre con posibilidad de regulación y control de velocidad. En la Figura 19.26 se ha utilizado un motor de corriente continua en derivación en el que, modificando su corriente de excitación (variando el reostato R_s) y tensión del inducido (variando la tensión en la fuente de alimentación F.A. regulable) se puede conseguir un amplio margen de velocidad.
 - Fuente de alimentación de C.C. regulable para alimentación del motor de arrastre.
 - Fuente de alimentación de C.C. regulable para alimentación de la excitación de la dinamo.
 - Aparatos de medida de alcance adecuado para medir tensión y corriente en los diferentes circuitos.
 - Un tacómetro para medir la velocidad de la dinamo (la mayor parte de los ensayos se hacen a velocidad constante, que deberá corresponderse con la nominal de la dinamo. Para conseguir mantener esta velocidad cons-

tante en el circuito de la Figura 19.26 habrá que ajustar la tensión de alimentación y la corriente de excitación del motor de arrastre).

- Reostatos para regular corriente del inducido o de la excitación (R , R_r).

En la Figura 19.26 se muestra, como ejemplo, el circuito para obtener las curvas en vacío y carga de una dinamo de

excitación independiente. Para realizar las curvas de una dinamo con la excitación en derivación o serie no sería necesario utilizar la fuente de alimentación para la alimentación de excitación, ya que la dinamo con estas conexiones se auto-excita.

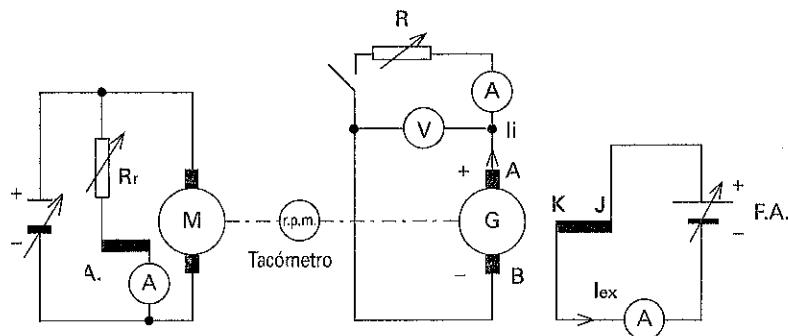


Figura 19.26. Esquema de conexiones para la obtención de las curvas características de una dinamo de excitación independiente.

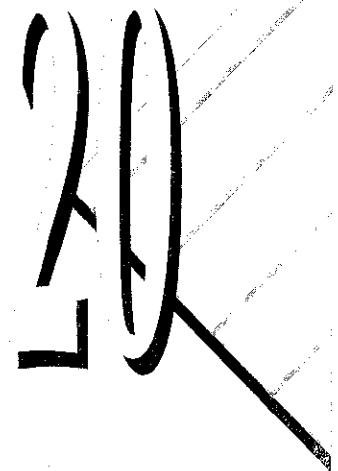
Actividades

1. Consigue una dinamo, analiza sus partes, prestando especial atención a la constitución del devanado inductor, al inducido y al conjunto formado por el colector de delgas y las escobillas.
 2. Partiendo del esquema de conexiones de la Figura 19.26, realizar el ensayo de una dinamo de excitación independiente para la obtención de las diferentes curvas características. Para llevar con éxito estos ensayos en el laboratorio de Electrotecnia, es importante observar previamente las características nominales de las máquinas a ensayar, como pueden ser: tipo de excitación, tensión nominal en bornes, velocidad nominal, potencia nominal, tensión en la excitación para dinamos con excitación independiente, etc.
Los datos obtenidos en cada punto del ensayo se anotarán, como en otras ocasiones, en un cuadro previamente preparado donde aparecerán las magnitudes que se van a medir.
 3. Siguiendo las mismas recomendaciones que en la Actividad 19.2, obtener las curvas características de una dinamo con excitación en serie y de otra con excitación en derivación.
 4. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.
- Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) ¿Qué tipo de corriente se produce en el inducido de una dinamo?
 - Corriente alterna
 - Corriente continua
 - C.C. y C. A.
- 2) ¿De qué depende la polaridad de la f.e.m. de una dinamo?
 - Depende únicamente de la situación de los polos del inductor
 - Del sentido de giro del inducido
 - De la situación de los polos de commutación
- 3) El valor de la f.e.m. producido por una dinamo:
 - Aumenta con la velocidad del inducido
 - Se puede modificar ajustando el campo magnético del inductor
- 4) La reacción del inducido de una dinamo:
 - Se elimina conectando polos de commutación de derivación con el inducido
 - Se puede evitar desviando las escobillas en sentido contrario al de giro del inducido
 - Provoca chispas en el colector de delgas
- 5) ¿Qué tipo de excitación produce una tensión de salida más constante para diferentes estados de carga de una dinamo?
 - Excitación derivación
 - Excitación compound
 - Excitación serie

Motores de Corriente Continua



Introducción

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas rotativas que transforman la energía eléctrica en mecánica.

Los motores de corriente continua presentan el inconveniente de que sólo pueden ser alimentados a través de equipos rectificadores que conviertan la corriente alterna suministrada por la red eléctrica en corriente continua. Por otro lado, su construcción es mucho más compleja que los de C.A. y al igual que las dinamos necesitan de colectores de delgas y escobillas para su funcionamiento, que aumentan considerablemente los trabajos de mantenimiento. En contrapartida, poseen un par de arranque elevado y su velocidad se puede regular con facilidad entre amplios límites, lo que los hace ideales para ciertas aplicaciones: tracción eléctrica (tranvías, trenes, coches eléctricos, etc.) y en todos aquellos casos en que sea muy importante el control y la regulación de las características funcionales del motor.

Contenido

- ✓ Principio de funcionamiento de una motor de C.C.
- ✓ Constitución de un motor de C.C.
- ✓ Reacción del inducido.
- ✓ Comportamiento en servicio.
- ✓ Arranque.
- ✓ Par motor, velocidad, fuerza contraelectromotriz e intensidad en el inducido.
- ✓ Inversión del sentido de giro.
- ✓ Motor de excitación independiente.
- ✓ Motores autoexcitados.
- ✓ Regulación y control de motores de C.C.
- ✓ Ensayos y curvas características de los motores.

Objetivos

- ✓ Describir el funcionamiento del motor de C.C.
- ✓ Seleccionar las características de un motor de C.C. para una determinada aplicación práctica.
- ✓ Analizar el funcionamiento de un motor en función de su tipo de excitación.
- ✓ Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con los motores, identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

20.1 Principio de funcionamiento

Como todos los motores eléctricos, su funcionamiento se basa en las fuerzas que aparecen en los conductores cuando son recorridos por corrientes eléctricas y, a su vez, están sometidos a la acción de un campo magnético.

En la Figura 20.1 se ha representado el aspecto de un motor de corriente continua elemental. Los polos magnéticos del imán, situados siempre en el estator, son los encargados de producir el campo magnético inductor. La espira, que se ha situado en el rotor, es recorrida por una corriente continua que se suministra a través de un anillo de cobre cortado por la mitad (colector de delgas). Las dos mitades se aislan eléctricamente y se sitúan sobre ellas unos contactos deslizantes de carbón (escobillas), de tal forma que la corriente aplicada por la fuente de alimentación pueda llegar a los conductores del rotor.

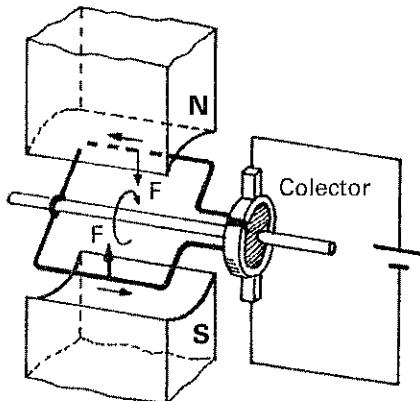


Figura 20.1. Motor de C.C. elemental.

Como las corrientes que circulan por ambos lados de la espira son contrarias, al aplicar la regla de la mano izquierda, podemos comprobar que aparecen fuerzas también contrarias en cada lado activo de la espira, lo que determina un par de giro. Para que el sentido de giro sea siempre el mismo, el par de fuerzas siempre deberá actuar en el mismo sentido. En el caso de que los conductores de la espira girasen hasta enfrentarse con el polo contrario, con el mismo sentido de corriente que en la anterior posición, la fuerza se invertiría de sentido y la espira no establecería nunca una revolución. Con el colector de delgas se resuelve este problema, haciendo que la corriente siempre circule en el mismo sentido respecto al campo magnético (observa cómo el colector consigue ir comutando los circuitos de ambos lados activos de la espira cada media vuelta).

Para conseguir que el motor gire en uno u en otro sentido hay que lograr invertir el sentido del par de fuerzas. Esto se consigue invirtiendo el sentido de la corriente del rotor y manteniendo fijo el campo magnético inductor.

20.2 Constitución

La constitución de motor de C.C. es exactamente igual que la de un generador de corriente C.C. (dinamo). Esta máquina es reversible y, por lo tanto, puede funcionar indistintamente como motor o como generador. Como hemos podido compro-

bar en el motor elemental, se necesitan de tres partes fundamentales para su funcionamiento: un circuito que produzca el campo magnético (circuito inductor), un circuito que al ser recorrido por la corriente eléctrica desarrolle pares de fuerza que pongan en movimiento el rotor (circuito inducido) y un colector de delgas con escobillas.

20.3 Reacción del inducido

Al igual que ocurría con el generador de C.C., al pasar la corriente por el inducido del motor se desarrolla un campo magnético transversal que desvía de su posición original al campo principal inductor, produciéndose el fenómeno conocido de chispas en el colector. Para reducir el efecto perjudicial de la reacción del inducido también se utilizan polos de commutación conectados en serie con el inducido. En el caso de querer invertir el sentido de giro del motor, se invierte tanto la polaridad de la corriente por el inducido como la de los polos de commutación.

En el caso de optar por la desviación de las escobillas, habrá que hacerlo en sentido contrario al giro del motor.

20.4 Comportamiento en servicio

Cuando la corriente recorre los conductores del inducido de un motor de corriente continua, se produce un par de giro en el rotor, lo que da lugar a que el motor, en un proceso de arranque, empiece acelerarse hasta alcanzar sus revoluciones nominales. La corriente que aparece en el inducido dependerá, sobre todo, de la fuerza contraelectromotriz que se desarrolle en el inducido del mismo. Seguidamente estudiaremos la relación que existe entre todas estas variables.

20.5 Fuerza contraelectromotriz

Cuando el motor gira, impulsado gracias al par de giro desarrollado por los conductores del inducido cuando son recorridos por una corriente, dichos conductores cortan en su movimiento a las líneas de campo magnético del inductor, lo que hace que se induzca en ellos una fuerza electromotriz (es como si el motor se comportase como un generador de C.C. cuando gira). El sentido de dicha fuerza electromotriz es tal que, según la ley de Lenz, tiende a oponerse a la causa que la produjo. Es decir, a la corriente del inducido y a la tensión aplicada al motor.

Esta f.e.m., llamada fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.), produce un efecto de la limitación de la corriente del inducido.

El valor de la fuerza contraelectromotriz se calcula exactamente igual que la f.e.m. de una dinamo:

$$E = K_1 N\Phi$$

La fuerza contraelectromotriz es proporcional al flujo inductor y al número de revoluciones del motor.

20.6 Corriente del inducido

Cuando el motor trabaja en vacío, el par motor originado por los conductores del inducido provoca un aumento de la velocidad del rotor debido a la poca resistencia que encuentra. Este aumento de velocidad produce, a su vez, una mayor f.c.e.m. que limita la corriente del rotor a valores de corriente de vacío. Cuando el motor arrastra una carga mecánica, la velocidad tiende a decrecer, con lo cual disminuye la f.c.e.m. y la corriente aumenta, elevándose con ella el par de fuerzas.

La corriente que el motor absorbe depende del trabajo mecánico que tenga que realizar.

Para determinar el valor de esta corriente aplicamos la ley de Ohm y la segunda ley de Kirchhoff:

$$I_i = \frac{V_b - E - 2 U_e}{r_i}$$

I_i = corriente del inducido (A)

V_b = tensión aplicada al inducido (V)

E = f.c.e.m. (V)

$2 U_e$ = caída de tensión de las escobillas (V)

r_i = resistencia del inducido (Ω)

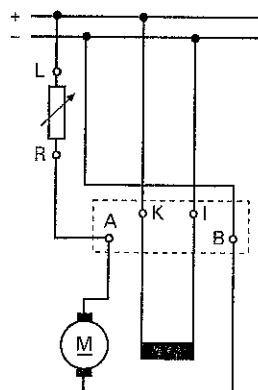


Figura 20.2. Esquema de conexiones del reostato de arranque de un motor de C.C.

El procedimiento de arranque se realiza de tal forma que según el motor aumenta su velocidad, se va disminuyendo el valor de las resistencias adicionales de arranque.

Ejemplo: 20.1

Un motor de C.C. posee una resistencia interna en el inducido de $0,15 \Omega$, siendo la caída de tensión de las escobillas de unos 2V. Determina la corriente absorbida por el motor en el arranque si se le conecta a una tensión de 100 V. ¿Cuál será la corriente de arranque de este motor si se conecta en serie con el inducido una resistencia adicional de 3Ω ?

Solución: La intensidad absorbida antes de que el motor comience a moverse, es:

$$I_{i(a)} = \frac{V_b - 2 U_e}{r_i} = \frac{100 - 2}{0,15} = 653 \text{ A}$$

Al conectar en serie con el inducido la resistencia adicional, se aumenta artificialmente la resistencia del inducido y la corriente queda limitada:

$$I_{i(a)} = \frac{100 - 2}{0,15 + 3} = 31 \text{ A}$$

Ejemplo: 20.2

Se dispone de un motor de C.C. con excitación independiente de las siguientes características: 8 KW; 220 V; resistencia del inducido = $0,23 \Omega$; caída de tensión de las escobillas = 2 V. Determinar la corriente de arranque directo del motor. ¿Qué valor deberá poseer la resistencia adicional a conectar en serie con el inducido si se desea limitar la corriente de arranque a 2,5 veces la intensidad nominal?

Solución: La intensidad en el arranque sin resistencias adicionales, es:

$$I_{i(a)} = \frac{V_b - 2 U_e}{r_i} = \frac{220 - 2}{0,23} = 948 \text{ A}$$

La corriente nominal del motor:

20.7 Corriente absorbida en el arranque

En el primer momento de arranque de un motor, el rotor está parado y, por tanto, la f.c.e.m. es nula. La corriente sólo queda limitada por la pequeña caída de tensión de las escobillas, que suele ser del orden de 2 V, y por la pequeña resistencia del inducido (menor a 1Ω).

$$I_{i(\text{arranque})} = \frac{V_b - 2 U_e}{r_i}$$

La corriente absorbida por el motor en el arranque es muy elevada.

Cuando se conecta el motor directamente a la red, éste absorbe una intensidad muy fuerte de la línea en el momento del arranque, lo que puede afectar no sólo a la duración de los aparatos de conexión, sino a la líneas que suministran energía eléctrica. Estas fuertes corrientes sobrecargan las líneas de distribución, pudiendo producir caídas de tensión y calentamiento en los conductores de las mismas. Por esta razón, las compañías de energía indican normas para reducir dichas corrientes de arranque a valores que sean aceptables.

El arranque directo está permitido para motores que posean una potencia inferior a 5,5 Kw.

En un motor de corriente continua es muy simple limitar la corriente hasta valores aceptables, intercalando resistencias adicionales en serie con el inducido, tal como se muestra en la Figura 20.2.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{8.000}{220} = 36 \text{ A}$$

La corriente de arranque deberá limitarse hasta:

$$36 \text{ A} \cdot 2,5 = 90 \text{ A}$$

El valor de la resistencia adicional r_a la obtenemos a partir de la expresión correspondiente a la intensidad de arranque:

$$I_{(a)} = \frac{V_b - 2 U_e}{r_i + r_a} \Rightarrow r_a = \frac{V_b - 2 U_e - I_{(a)} r_i}{I_{(a)}} = \frac{220 - 2 - 90 \cdot 0,23}{90} = 2,2 \Omega$$

20.8 Rendimiento de un motor eléctrico

En muchas ocasiones no se conoce la potencia eléctrica que el motor toma de la red eléctrica para su funcionamiento. Sin embargo, sí conocemos la potencia útil que el mismo puede entregar por su eje y el rendimiento con el que lo hace, por ejemplo, 5 CV con un rendimiento del 85% ($\eta = 85\%$); ¿cuál es la potencia eléctrica que el motor tiene que absorber de la red en este caso?

Llamaremos P a la potencia eléctrica activa que el motor toma de la red eléctrica y P_u a la potencia útil o mecánica que el motor va a desarrollar en su eje. De la diferencia de estas potencias obtendremos la potencia perdida en el motor P_p :

$$P_p = P - P_u$$

La potencia se pierde, por un lado, por efecto Joule al pasar la corriente por los conductores de los bobinados ($R I^2$), por otro, por rozamientos en los rodamientos y en la ventilación y, por otro, en los circuitos magnéticos: histéresis y corrientes parásitas.

El rendimiento de un motor indica la relación porcentual que existe entre la potencia útil del motor y la potencia total o eléctrica, es decir:

$$\eta = \frac{P_u}{P} \cdot 100$$

En nuestro ejemplo, la potencia eléctrica que el motor absorbe de la red, es:

$$P = \frac{P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{5 \cdot 736}{85} \cdot 100 = 4.239 \text{ W}$$

¿Cuál es la potencia perdida en este caso?

Ejemplo: 20.4

Un motor de C.C. posee una potencia útil de 10 CV, $\eta = 87\%$, 400 V. Determinar la potencia eléctrica tomada de la alimentación, así como la corriente que absorbe.

Solución:

$$P = \frac{10 \cdot 736}{87} \cdot 100 = 8.460 \text{ W}$$

$$P = V_b I \Rightarrow I = \frac{P}{V_b} = \frac{8.460}{400} = 21 \text{ A}$$

20.9 Par motor

En los conductores del rotor de un motor aparecen una serie de fuerzas de origen electromagnético que producen una par de fuerzas C . Este par interno se encarga de hacer girar el rotor con la carga mecánica a mover.

El par de rotación se obtiene del producto de la fuerza por el radio (Figura 20.3).

$$C = F \cdot r$$

C = par en newton · metro (Nm)

F = fuerza en newtons (N)

r = radio en metros (m)

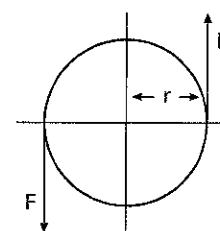


Figura 20.3. Par de fuerzas.

Ejemplo: 20.5

Determinar el par de rotación de un motor que posee un rotor con un diámetro de 0,20 metros y desarrolla una fuerza de 400 newtons.

$$\text{Solución: } C = F \cdot r = 400 \cdot 0,10 = 40 \text{ Nm}$$

El par de rotación útil producido por el motor también se puede expresar como la relación existente entre la potencia útil desarrollada en el rotor y la velocidad angular del mismo.

$$C = \frac{P_u}{\omega}$$

$C = \text{par en Nm}$

$P_u = \text{potencia útil del motor en W}$

$\omega = \text{velocidad angular en rad/s}$

Para calcular la velocidad angular del rotor partiendo de su velocidad de rotación en revoluciones por minuto (r.p.m.) se utiliza la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Ejemplo: 20.6

La potencia útil de un motor eléctrico es de 8 CV. Determinar el par útil de rotación de dicho motor a plena carga, así como la fuerza media que impulsa a girar al rotor si éste posee un diámetro de 28 cm y gira a una velocidad de 2.935 r.p.m.

Solución: La velocidad angular del rotor, es:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2.935}{60} = 307 \text{ rad/s}$$

Como cada caballo de vapor equivale aproximadamente a 736 W, el par útil es igual a:

$$C = \frac{P_u}{\omega} = \frac{8 \cdot 736}{307} = 19 \text{ Nm}$$

La fuerza media en el rotor del motor:

$$C = F \cdot r \Rightarrow F = \frac{C}{r} = \frac{19}{0,14} = 136 \text{ N}$$

El par motor que desarrollan los conductores del inducido al ser recorridos por la corriente dependerá, según la ley de Laplace, del valor de dicha corriente y del flujo desarrollado por el campo inductor. La expresión que relaciona el par con estas variables en un motor de C.C., es:

$$C = \frac{n p}{2\pi a} \Phi I_i$$

Como los términos n , p y a son constantes \Rightarrow

$$C = K_2 \Phi I_i$$

El par motor es proporcional a la corriente del inducido y al flujo del campo magnético inductor.

20.10 Velocidad de giro

La velocidad de giro de un motor de corriente continua la podemos determinar combinando las ecuaciones de la f.c.e.m. y la de la corriente eléctrica. No teniendo en cuenta la caída de tensión producida por las escobillas, la velocidad adquiere la siguiente expresión:

$$N = \frac{V_b - r_i I_i}{K_1 \Phi}$$

La velocidad de giro de un motor de C.C. aumenta con la tensión aplicada, al disminuir la corriente del inducido y al disminuir el flujo producido por el campo inductor.

A partir de esta expresión se puede comprender el comportamiento del motor para una determinada carga y desarrollar sistemas de regulación de velocidad.

La regulación de velocidad de un motor se puede hacer de dos formas diferentes: manteniendo constante el flujo y variando la tensión aplicada al inducido o manteniendo constante la tensión y variando el flujo de la excitación. Este último sistema es el más empleado por su sencillez, ya que es suficiente con intercalar un resistor variable (reostato de campo) en serie con el circuito que alimenta al devanado encargado de producir el campo magnético inductor, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.4. Si se disminuye el flujo mediante el reostato de campo, la velocidad aumenta y viceversa.

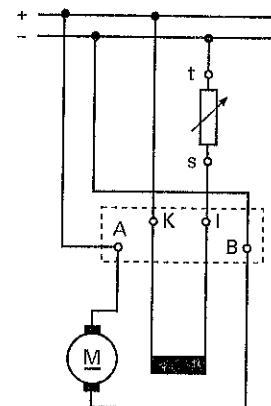


Figura 20.4. Esquema de conexiones de reostato de campo para la regulación de velocidad de un motor de C.C.

20.11 Conexión de los motores de corriente continua

Por lo general, el campo magnético inductor o excitación de los motores de C.C. se produce con devanados dispuestos en las piezas polares y que generan dicho campo cuando son recorridas por la corriente eléctrica. Dependiendo de como se conecte el devanado de excitación respecto al inducido, al igual que ocurre con los generadores, se consiguen diferentes tipos motores: motor de excitación independiente, motor de

excitación en derivación o shunt, motor de excitación en serie y motor de excitación compound.

20.11.1 Motor con excitación independiente

En los motores con excitación independiente, el devanado de excitación se conecta a una fuente de tensión diferente a la aplicada al inducido, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.5. En la placa de características es necesario indicar tanto la tensión del inducido como la de la excitación. Las características de funcionamiento son similares a la del motor con excitación en derivación, por lo que no insistiremos en su estudio.

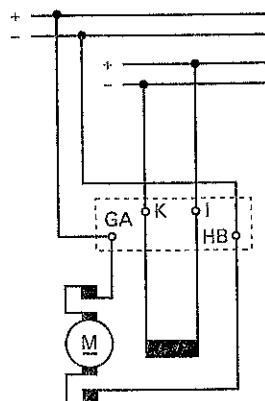


Figura 20.5. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación independiente.

La separación de la excitación aporta la ventaja de mayores posibilidades de regulación de velocidad que el motor derivación. Gracias al avance de las nuevas tecnologías, hoy en día se fabrican equipos electrónicos para el arranque y control de motores de corriente continua. Dada la posibilidad que poseen estos equipos de controlar separadamente diferentes variables, en combinación con motores de excitación independiente presentan innumerables ventajas.

20.11.2 Motor con excitación derivación o shunt

En el motor shunt el devanado de excitación se conecta en paralelo con el inducido. El devanado de los polos de commutación se conecta en serie con el inducido. En la Figura 20.6 se puede apreciar las conexiones de la placa de bornes de un motor de corriente continua con polos de commutación. Se ha incluido una reostato para limitar la corriente de arranque del inducido, y otro para poder regular el campo magnético inductor de la excitación.

Característica de velocidad. La característica de velocidad indica la relación que existe entre la velocidad del motor y la corriente del inducido. Recordemos que la expresión general de velocidad es:

$$N = \frac{V_b - r_i I_i}{K_1 \Phi}$$

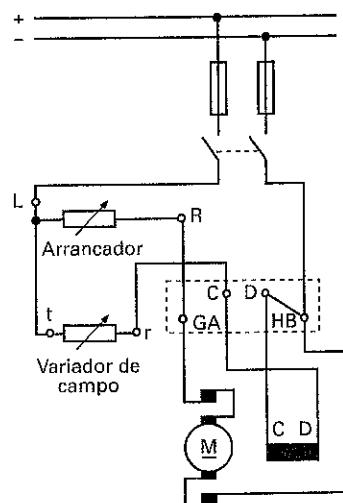


Figura 20.6. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación en derivación.

Si se mantiene constante el campo magnético, como la tensión aplicada por la red (V_b) también lo es, la velocidad sólo depende de la caída de tensión del inducido ($r_i I_i$).

Dado que el término $r_i I_i$ es muy pequeño, la velocidad tiende a disminuir un poco al aumentar la carga (curva c) (Figura 20.7). Por otro lado, cuando aumenta la intensidad del inducido, la reacción del inducido reduce el flujo del campo resultante, tendiendo a aumentar la velocidad con la carga (curva a). En conclusión, la velocidad de un motor con excitación en derivación permanece prácticamente constante para cualquier régimen de carga, tal como se puede apreciar en la curva característica $N = f(I_i)$ de la Figura 20.7 (curva b).

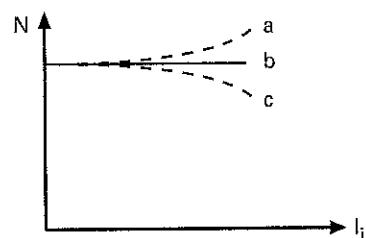


Figura 20.7. Característica mecánica de un motor derivación. $N = f(I_i)$.

En máquinas de gran potencia, cuando se trabaja a regímenes de carga elevados, la reacción del inducido provoca un debilitamiento considerable del campo principal, lo que hace que el motor tienda a elevar su velocidad y funcione inestablemente. Para evitar esto se incorpora el devanado de compensación que evita la distorsión y el debilitamiento del campo. Dado el alto precio que este sistema de compensación conlleva, sólo se utiliza para máquinas de gran potencia.

La regulación de velocidad de un motor derivación entre amplios límites se consigue, con facilidad, regulando la corriente de excitación mediante un reostato de campo conectado en serie con el devanado de excitación, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.6.

Característica del par motor. Relaciona el par motor en función de la intensidad de corriente del inducido, $C = f(I_i)$.

Teniendo en cuenta que la expresión del par es la siguiente:

$$C = K_2 \Phi I_i$$

Si el flujo permanece constante, el par es directamente proporcional a la corriente del inducido.

En la Figura 20.8 se puede apreciar la curva característica del par motor $C = f(I_i)$ de un motor con excitación en derivación.

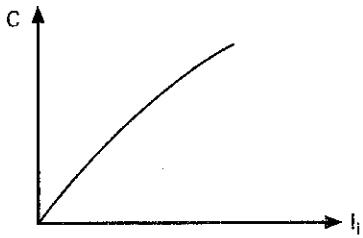


Figura 20.8. Característica del par motor de un motor derivación.

Característica mecánica. Esta característica relaciona el par motor en función de la velocidad $C = f(N)$. La curva característica correspondiente se puede obtener a partir de las otras dos. Se puede decir que esta característica es la más representativa del funcionamiento del motor, ya que con ella podemos determinar la velocidad de giro del motor para un determinado par resistente aplicado al motor.

Si consideramos que el flujo magnético permanece constante, el par motor permanece también constante con la velocidad. El resultado se ha representado en la curva que se muestra en la Figura 20.9.

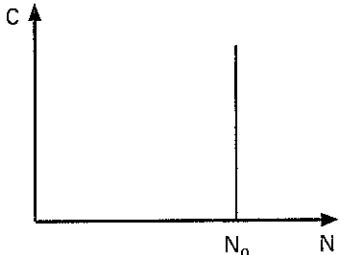


Figura 20.9. Característica mecánica de un motor derivación.

En resumen, en el motor con excitación derivación, la velocidad se mantiene relativamente constante para cualquier régimen de carga. Cuando se aumenta el par resistente aplicado al motor, la corriente del inducido aumenta para producir un par motor igual al mismo.

Dada la estabilidad que permite el motor derivación, posee un campo de aplicación bastante amplio, como por ejemplo, en máquinas, herramientas para metales, madera, plásticos, etc.

20.11.3 Motor con excitación en serie

En estos motores se conecta el devanado de excitación en serie con el inducido. En la Figura 20.10 se ha representado el esquema de conexiones de un motor serie con devanado de compensación, polos de conmutación y reóstato de arranque.

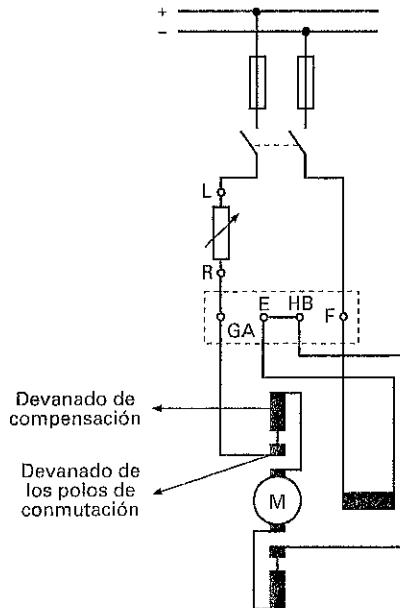


Figura 20.10. Esquema de conexiones de un motor de C.C. con excitación en serie.

Característica de velocidad. La particularidad más importante a observar es que la corriente de excitación es la misma que la del inducido:

$$I_i = I_{ex}$$

Como el flujo del campo magnético inductor es proporcional a la corriente de excitación, éste depende directamente de la intensidad de carga del inducido:

$$\Phi = K_3 I_i$$

En este caso la velocidad vendría dada por la expresión:

$$N = \frac{V_b - \sum r I_i}{\Phi}$$

El término $\sum r I_i$ indica las caídas de tensión producidas en la resistencia del inducido y en los devanados de excitación, polos de conmutación, etc. Por lo general, este término suele ser bastante pequeño, por lo que podemos decir, con bastante aproximación que:

$$N \approx \frac{K}{\Phi}$$

En la Figura 20.11 se puede apreciar la curva característica de velocidad, que posee la forma de una hipérbola. Según aumenta la intensidad del motor, el motor va perdiendo velocidad. Para corrientes muy pequeñas el motor tiende a alcanzar velocidades muy elevadas que pueden llegar a ser peligrosas, por lo que no conviene hacer funcionar estos motores en vacío.

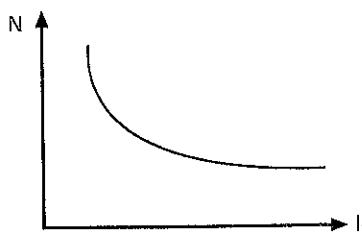


Figura 20.11. Característica de velocidad de un motor serie.

Característica del par motor. El par motor depende de la intensidad del inducido y del flujo magnético. En un motor serie tendremos entonces que:

$$C = K_2 \Phi I_i = K_2 K_3 I_i I_i = K_4 I_i^2$$

Esta ecuación representa una parábola. El par motor crece con el cuadrado de la intensidad, por lo que responde bien en trabajos de tracción.

El motor serie se caracteriza por tener un par muy elevado de arranque, ya que si la intensidad en el arranque es muy elevada, el par crecerá en forma cuadrática a esta intensidad. En la práctica, la saturación y la reacción del inducido tienden a oponerse a que el par aumente con la misma rapidez que el cuadrado de la corriente, por lo que la curva $C = f(I_i)$ no llega a ser exactamente una parábola, tal como se muestra en la Figura 20.12.

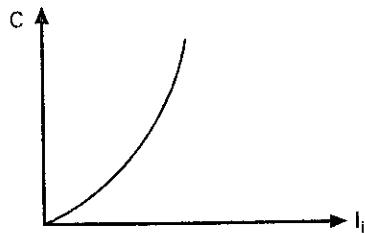


Figura 20.12. Característica de par motor de un motor serie.

Característica mecánica. En la Figura 20.13 se ha representado la curva $C = f(N)$. La velocidad del motor disminuye según se le exige un mayor par resistente. Cuando el par sobre pasa el punto (1), el motor no puede con la carga y tiende a pararse. Cuando el motor desarrolla un par por debajo del punto (2), el motor tiende a embalarse.

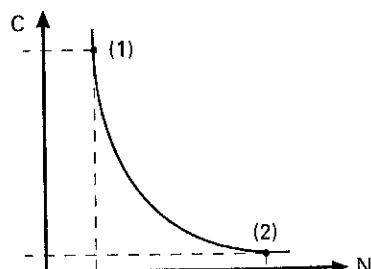


Figura 20.13. Característica mecánica de un motor serie.

Los motores serie se utilizan para los casos en que se exige un gran par de arranque, como, por ejemplo, en los tranvías, locomotoras, grúas, etc. Además tienen otra característica que les hace especialmente adecuados para la tracción. Supongamos que un vehículo eléctrico asciende por una rampa; con un motor serie, tendería a ir más despacio en la rampa, ya que al demandar más intensidad, se reduce la velocidad y se aumenta el par. Esta reducción de velocidad permite al motor desarrollar un gran par con un aumento moderado de potencia. Con un motor derivación, al ascender la rampa, se mantendría la velocidad, con lo que el motor tendría que absorber una intensidad excesiva.

Regulación de velocidad. Para regular la velocidad en los motores serie se conecta un reostato regulador de campo en derivación con el devanado de excitación. Con este dispositivo se consigue desviar parte de la corriente que atraviesa la excitación. De esta forma se consigue controlar el flujo magnético de la excitación y, con él, la velocidad (Figura 20.14).

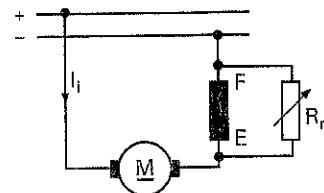


Figura 20.14. Esquema de conexiones del reostato de campo para regular la velocidad en un motor serie.

20.11.4 Motor de excitación compound

En estos motores se divide el devanado de excitación en dos partes. Una de ellas se conecta en serie con el inducido y la otra en derivación, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 20.15.

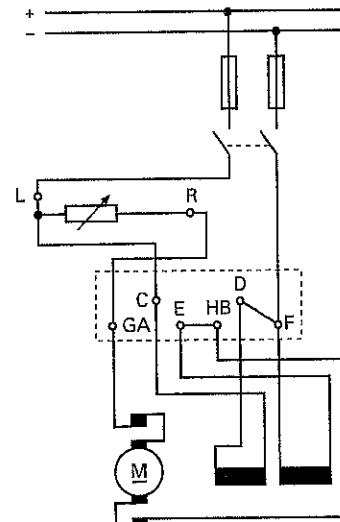


Figura 20.15. Esquema de conexiones de motor de C.C. con excitación compound.

Con el devanado en derivación se consigue evitar el peligro de embalamiento del motor por reducción de flujo, por lo que estos motores se comportan en vacío como los motores en derivación. En carga, el devanado en serie hace que el flujo aumente, por lo que la velocidad tiende a disminuir, aunque no en la misma medida que lo hace un motor serie.

En la Figura 20.16 se muestran las curvas características correspondientes a un motor compound.

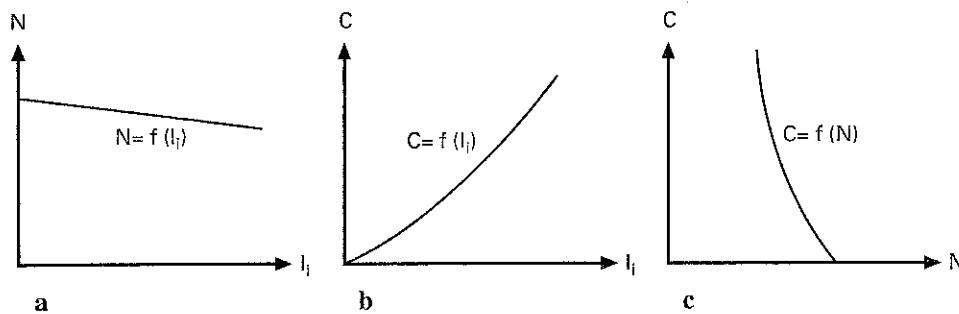


Figura 20.16. Curvas características de un motor compound: a) característica de velocidad, b) característica del par motor, c) característica mecánica.

Los motores compound se utilizan en aquellos casos en los que el par de arranque de los motores shunt no es capaz de mover la carga en los primeros momentos, como, por ejemplo, en dispositivos de elevación.

20.12 Inversión del sentido de giro

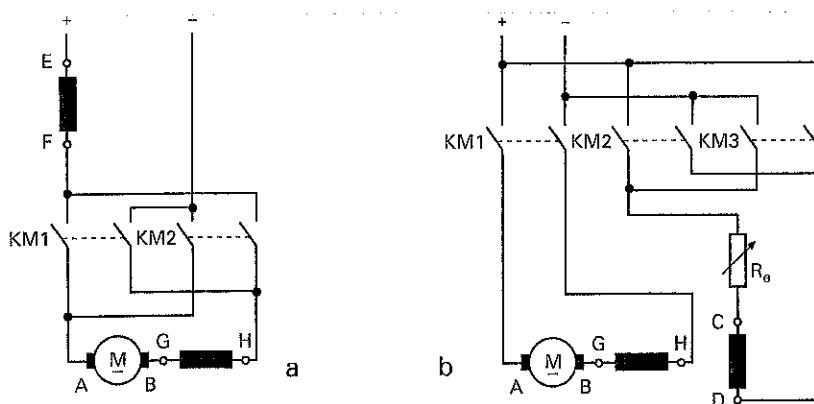
Existen muchas aplicaciones donde es necesario dotar a los motores con sistemas que sean capaces de hacerlos girar indistintamente en uno u otro sentido; como por ejemplo, en sistemas de elevación, tracción eléctrica, etc.

Existen dos formas de invertir el sentido de giro de un motor:

a) Cambiando la polaridad del inducido, manteniendo fija la polaridad del devanado de excitación.

b) Cambiando la polaridad del devanado de excitación, manteniendo fija la polaridad del inducido.

En la práctica se suele optar por la primera (permutar la polaridad del inducido), ya que el invertir la polaridad de la excitación ocasiona ciertos inconvenientes, debidos a la alta inductancia que posee este devanado y por el magnetismo remanente de las piezas polares.



En la Figura 20.17 a se muestra el esquema de fuerza correspondiente a la inversión de giro de un motor con excitación serie. Su funcionamiento es como sigue: cuando se acciona el contactor KM1, mientras que el KM2 permanece abierto, se alimenta al inducido de tal forma que el terminal A se une con el polo positivo de la alimentación y el terminal B con el negativo. En este caso el motor gira en un determinado sentido. Para invertir el sentido de giro se desconecta el contactor

KM1 y se conecta el KM2, consiguiendo ahora que el terminal A del inducido quede conectado al negativo de la alimentación y el B al positivo. Observa que la polaridad del devanado inductor, marcado con los terminales C-D, no cambia de polaridad en ningún caso.

En la Figura 20.17 b aparece el esquema de fuerza correspondiente a la inversión de giro de un motor con excitación derivación. Aquí se ha optado por invertir la polaridad del devanado de excitación, bien accionando el contactor KM2, o el KM3, mientras que la polaridad del inducido permanece fija y alimentada constantemente por el contactor KM1.

20.13 Regulación y control de los motores de C.C.

Hasta hace muy poco tiempo, el motor de corriente continua presentaba ciertas ventajas sobre los de corriente alterna. Nos referimos a la posibilidad de variar su velocidad de forma simple. Como ya estudiaremos más adelante, para variar la velocidad de un motor de C.A. es necesario modificar la frecuencia de la tensión de alimentación, procedimiento que hasta no hace mucho tiempo presentaba serias dificultades. Hoy en día, la evolución de la electrónica permite la fabricación de variadores de velocidad para motores de C.A. a precios cada vez más competitivos, lo que unido a la mayor robustez y rendimiento, menor mantenimiento y costo de estos motores, hace que los mismos estén desplazando en su uso a los motores de C.C.

En la actualidad, gracias al avance de la electrónica, ya no se suelen utilizar los reostatos como elementos de regulación para los motores de C.C. Los modernos reguladores son capaces de conocer en todo momento el punto de funcionamiento del motor, de tal forma que se consigue el control y regulación de todas las variables del mismo con la máxima efectividad.

En la Figura 20.18 se muestra, a modo de ejemplo y en representación esquemática, el sistema de regulación de un motor de C.C. de excitación independiente por dinamo tacometrífica.

Figura 20.17. Esquemas de conexiones para la inversión de giro de un motor de C.C. a) motor serie, b) motor derivación.

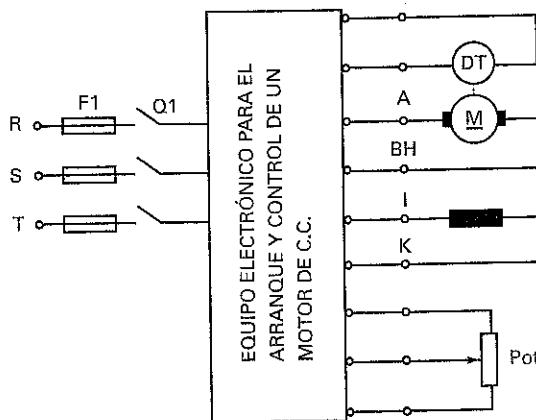


Figura 20.18. Esquema de conexiones de un equipo electrónico para el arranque y control de un motor de C.C. con excitación independiente.

El equipo se alimenta mediante corriente alterna trifásica que, a su vez, alimenta con C.C. regulada y de forma separada al devanado inductor e inducido del motor. Con el potenciómetro de referencia (Pot) se fija la velocidad de funcionamiento deseada. La tacodinamo (DT) es un pequeño generador de C.C. que genera una tensión proporcional a la velocidad con que es movida por el eje del motor. Ésta envía una tensión de retorno al equipo electrónico de control. El equipo analiza las señales de estos dos elementos y proporciona al devanado del inducido y al inductor la tensión y corriente continua necesaria para adaptarse a la velocidad de referencia prefijada.

En el arranque el equipo proporciona al motor en todo el momento del proceso y de una forma automática los valores de tensión y corrientes requeridos.

20.14 Ensayos de los motores de C.C.

De la misma forma que se hacía para las dinamos, a los motores de C.C. también se les somete a una serie de ensayos

con el fin de determinar sus características y de analizar su comportamiento en diferentes situaciones de funcionamiento. De esta forma, se pueden realizar ensayos para determinar el rendimiento, ensayos para evaluar el calentamiento de la máquina para diferentes regímenes de funcionamiento, medición de la resistencia de aislamiento, medición de la rigidez dieléctrica, etc. Además a través de los ensayos se pueden determinar las características electromecánicas de los motores, las cuales relacionan la velocidad de rotación (N), el par motor (C), y la corriente del inducido (I_i).

A parte de los elementos utilizados para ensayar las dinamos, ahora necesitaremos dispositivos que sean capaces de medir el par motor y que además sean capaces de someter el motor a diferentes regímenes de carga. Para ello es posible utilizar frenos de polvo magnético o dinamo-freno, que acoplados al eje del motor pueden someter a éste a diferentes pares de frenado, pudiendo conocer en todo momento el par resistente aplicado.

En la Figura 20.19 se expone a modo de ejemplo el esquema de conexiones para realizar el ensayo de un motor de C.C. con excitación en derivación.

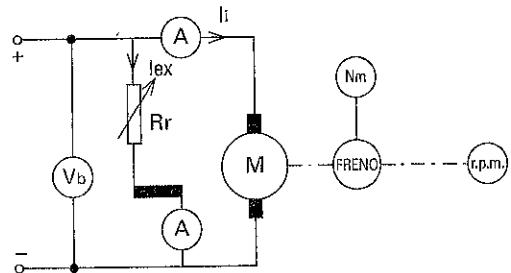


Figura 20.19. Esquema de conexiones para la obtención de las características electromecánicas de un motor de C.C. con excitación en derivación.

Actividades

- Observa detenidamente los motores de C.C. que existen en el laboratorio de Electrotecnia. Apunta sus diferencias y clasifícalos según su excitación, poniendo especial atención en las placas de características y en las placas de bornes de los mismos.
- Conecta un motor de C.C. (por ejemplo, un motor derivación) directamente a su tensión nominal, intercalando un amperímetro en el circuito del inducido. Comprueba cómo la corriente es muy elevada en el arranque y disminuye según se van alcanzando las revoluciones nominales. Repite la experiencia intercalando un reóstato en serie con el inducido y observa cómo se consigue suavizar la corriente de arranque.
- Conecta un motor serie para que gire en un determinado sentido. Invierte la polaridad del inducido y comprueba cómo se invierte el sentido de giro del motor.
- Partiendo del esquema de conexiones de la Figura 20.19, realiza el ensayo de un motor con excitación en derivación para la obtención de las diferentes curvas características. Para llevar con éxito estos ensayos en el laboratorio de Electrotecnia, es importante observar previamente las características nominales de las máquinas a ensayar, como pueden ser: tipo de

excitación, tensión nominal en bornes, velocidad nominal, potencia nominal, tensión en la excitación para motores con excitación independiente, etc.

Los datos obtenidos en cada punto del ensayo se anotarán, como en otras ocasiones, en un cuadro previamente preparado donde aparecerán las magnitudes a medir.

- Siguiendo las mismas recomendaciones que en la Actividad 20.4 obtener las curvas características de un motor con excitación en serie y de otra con excitación independiente.
- Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

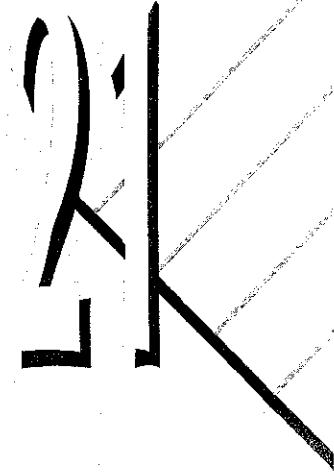
Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- La fuerza contraelectromotriz de un motor de C.C.:
 - Aumenta con la corriente de excitación
 - Disminuye al aumentar la corriente por la devanado inductor
 - Aumenta con la velocidad
 - La corriente que absorbe un motor:
 - Disminuye con el trabajo mecánico a realizar
 - Aumenta con el trabajo mecánico a realizar
 - Permanece constante para cualquier régimen de carga
 - La corriente absorbida en el arranque de un motor de C.C.:
 - Si no se limita su valor puede causar perturbaciones en los sistemas de alimentación
 - Depende exclusivamente de la resistencia del inducido
 - Se puede limitar mediante resistencias adicionales conectadas en serie con el devanado inductor
 - El par motor desarrollado por un motor de C.C.:
 - Disminuye con la corriente de la excitación
 - Se hace más elevado con la corriente del inducido
 - Permanece siempre constante
- ¿Cómo se puede modificar la velocidad de un motor de C.C.?
 - La velocidad permanece siempre constante
 - Modificando la corriente aplicada al devanado inductor
 - Modificando la tensión aplicada al inducido
 - ¿Cómo se conectan respecto al inducido los polos de conmutación y el devanado de compensación de un motor de C.C.?
 - De forma independiente
 - En serie
 - En paralelo
 - ¿Cuál de los motores de C.C. corre peligro de embalsarse en vacío?
 - Excitación serie
 - Excitación derivación
 - Excitación compound

- 8) ¿Cuál de los motores de C.C. mantiene su velocidad relativamente constante para cualquier régimen de carga?
- Excitación serie
 - Excitación derivación
 - Excitación compound
- 9) Un motor de C.C. de excitación en serie se conecta a una tensión de 440 V. Determinar la corriente absorbida por el motor en el arranque si la resistencia interna del inducido es de $0,35\ \Omega$, la resistencia del devanado inductor es de $0,1\ \Omega$ y la caída de tensión de las escobillas es de 2 V. Determinar la corriente en el arranque del motor si se incorpora una resistencia adicional en serie con el inducido de $5\ \Omega$.
- 10) Un motor de C.C. de excitación independiente de 10 KW se conecta a una tensión de 110 V. Determinar la corriente absorbida por el mismo en el arranque, si la resistencia interna del inducido y de los polos de
- comutación es de $0,3\ \Omega$ y la caída de tensión de las escobillas es de aproximadamente 2 V. ¿De qué valor tendrá que ser la resistencia del reóstato de arranque que habrá que conectar en serie con el inducido para que la intensidad en el arranque no supere 2 veces a la nominal?
- 11) Determinar la potencia eléctrica y la corriente de un motor de C.C. de las siguientes características: potencia útil = 5 CV, $\eta = 89\%$, 110 V.
- 12) ¿Cuál será la fuerza media que aparece en la periferia del rotor de un motor si este rotor posee un diámetro de 15 cm y desarrolla un par motor de 100 Nm?
- 13) Determinar el par nominal de rotación de un motor de 20 CV si en régimen nominal gira a una velocidad de 7.230 r.p.m.
- 14) Se desea conseguir que la fuerza media que aparezca en la periferia del rotor de un motor eléctrica sea de 1.000 N a una velocidad de 1.465 r.p.m. Averiguar la potencia útil del motor si el diámetro del rotor es de 25 cm.

El Alternador Trifásico



Introducción

La producción de energía eléctrica en grandes cantidades se realiza en las centrales eléctricas mediante el alternador trifásico. El alternador es una máquina eléctrica que transforma la energía mecánica, aportada a su eje por una turbina, en energía eléctrica en forma de corriente alterna.

Hoy en día, es el generador más utilizado para la producción de energía eléctrica, dejando prácticamente en desuso a las dinamos. Recordemos que el sistema más utilizado para el transporte y distribución de la energía eléctrica es la corriente alterna trifásica, dada la facilidad con la que se eleva y reduce su tensión mediante los transformadores. Además los alternadores son máquinas eléctricas que presentan mayores ventajas que las dinamos, como por ejemplo, la ausencia de colectores de delgas y escobillas para la extracción de la energía del generador.

Contenido

- *Principio de funcionamiento de una alternador trifásico.*
- *Constitución de un alternador trifásico.*
- *Frecuencia de un alternador.*
- *Acoplamiento de alternadores.*

Objetivos

- *Describir el funcionamiento del alternador trifásico.*
- *Analizar la constitución del alternador trifásico.*
- *Calcular la frecuencia de un alternador.*

21.1 Principio de funcionamiento del alternador

Al igual que las dinamos, los alternadores basan su funcionamiento en el principio general de la inducción electromagnética. Cuando estudiábamos la dinamo pudimos comprobar que cuando se ponen a girar conductores en el seno de un campo magnético lo que se produce es una f.e.m. inducida de carácter senoidal que se podía conectar a un circuito exterior mediante dos anillos colectores y un par de escobillas. En la práctica es mucho más interesante hacer girar las piezas polares que producen el campo magnético **inductor** y dejar fijo los conductores del **inducido**.

En la Figura 21.1 se muestra el aspecto de un alternador trifásico elemental de inductor móvil e inducido fijo. El inducido, situado en el estator, lo forman tres devanados independientes y separados entre sí 120° . El inductor, situado en el rotor, esta formado por un electroimán que es alimentado por una corriente continua de excitación.

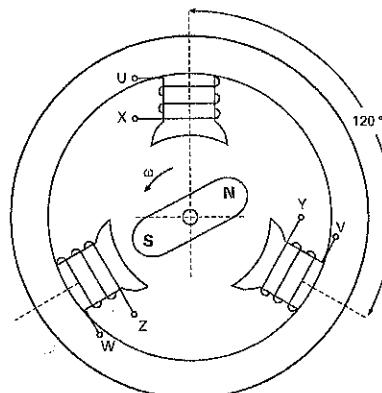


Figura 21.1. Alternador trifásico.

Al disponer los devanados del inducido en el estator se evita la utilización de los correspondientes tres anillos colectores y escobillas para la extracción de la C.A. trifásica generada. Además hay que pensar que las tensiones y corrientes con las que trabaja un alternador industrial son bastante elevadas (del orden de 10 a 20 KV y cientos de amperios) lo que complicaría aun más la utilización de colectores.

21.2 Constitución de un alternador de inducido fijo

Al igual que la dinamo, el alternador consta de un circuito inductor y un circuito inducido.

El circuito inductor está constituido por un cierto número de electroimanes, cuyo bobinado se realiza de tal forma que los polos presenten alternativamente una polaridad norte y sur, y cuyo número total es siempre par. La alimentación de los devanados del inductor se realiza con corriente continua a través de dos anillos colectores y un par de escobillas.

En la Figura 21.2 se muestra el aspecto de un alternador, donde se ha situado en el rotor un sistema inductor consisten-

te en cuatro piezas polares (2 pares de polos) a las que se les alimenta con C.C. desde una fuente de energía exterior y a través de un par de anillos colectores.

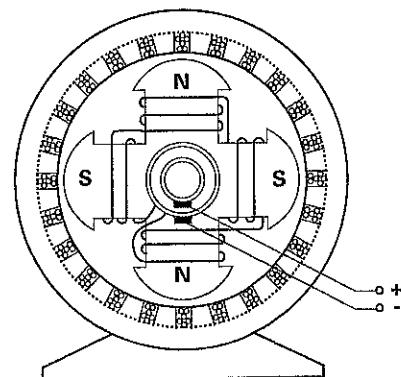


Figura 21.2. Constitución de un alternador de inducido fijo.

Dado que el alternador no genera C.C. es imposible llevar a cabo un sistema de autoexcitación como ocurría con las dinamos. Existen diferentes métodos para alimentar de C.C. el devanado inductor para la generación del campo magnético; indicaremos aquí los dos más importantes.

a) Mediante una dinamo **excitatríz** acoplada al eje del alternador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 21.3. En este esquema los terminales K-J se corresponden con el devanado inductor del alternador; la dinamo excitatríz posee una autoexcitación shunt y la tensión continua que proporciona la dinamo se conecta al devanado inductor a través de un reostato de regulación.

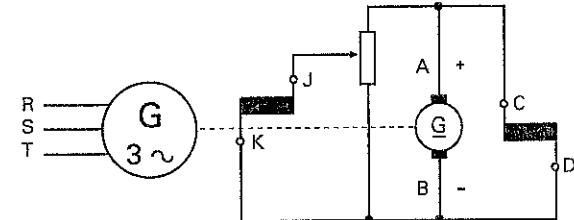


Figura 21.3. Excitación de un alternador mediante excitatríz.

b) Mediante alternador auxiliar acoplado al eje del alternador (véase Figura 21.4). En este caso se monta un pequeño alternador de inducido móvil en el mismo eje que el alternador principal. El devanado inductor (k-j) del alternador auxiliar se alimenta a través de un rectificador monofásico conectado a los bornes de salida del alternador principal. Hay que pensar que las piezas polares del alternador principal poseen un cierto magnetismo remanente, por lo que al ponerse en movimiento producen una pequeña f.e.m., pero suficiente para comenzar con el ciclo de cébado. El alternador auxiliar produce C.A. trifásica que, al ser convertida a C.C. mediante un puente rectificador trifásico, sirve de alimentación al devanado inductor del alternador principal.

La ventaja que presenta este tipo de excitación es que si acoplamos el puente rectificador trifásico al eje del alternador no se hace necesario el uso de colectores y escobillas para la alimentación del circuito inductor.

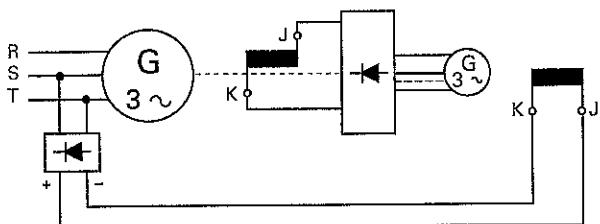


Figura 21.4. Alternador excitado mediante pequeño alternador de inducido móvil.

El circuito inducido está constituido por tres bobinas situadas 120° una de otra y alojadas en ranuras practicadas en un núcleo cilíndrico y hueco de chapas magnéticas (véase Figura 21.2). La conexión del devanado trifásico suele ser en estrella, conectando el neutro a tierra.

El devanado de cada fase del inducido del alternador se compone de varias bobinas, conectadas de tal forma que la fuerzas electromotrices generadas en cada uno de los conductores que las componen se sumen.

En la Figura 21.5 se muestra el aspecto del bobinado del inducido de un alternador con 24 ranuras en el estator.

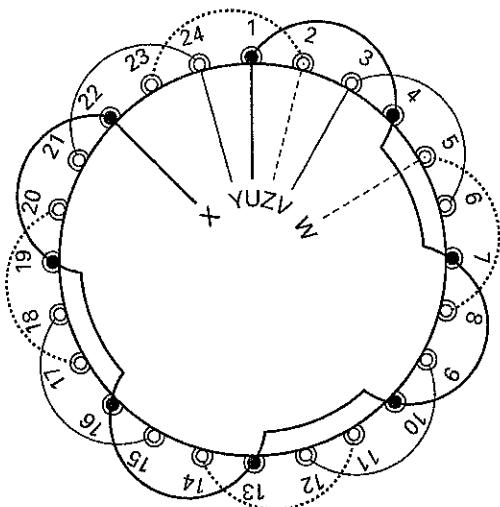


Figura 21.5. Bobinado del inducido de un alternador de 24 ranuras.

En la Figura 21.6 se ha dibujado el mismo bobinado en representación esquemática.

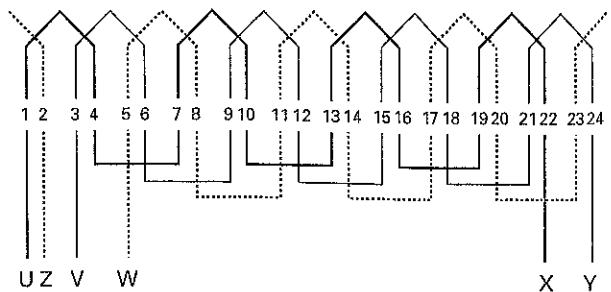


Figura 21.6. Esquema del bobinado del inducido de un alternador de 24 ranuras.

La frecuencia o número de ciclos por segundo que produce un alternador es directamente proporcional a la velocidad del alternador y al número de pares de polos del circuito inductor. Hay que pensar que cuando los conductores del inducido son cortados por un polo norte, del rotor en movimiento, se induce un semicírculo de tensión positiva, y que al ser cortados por un polo sur consecutivo se induce un semicírculo de tensión negativa. Esto indica que cada vez que un conductor pasa frente a un par de polos se produce un ciclo completo. Así, por ejemplo, un alternador que posee un par de polos y gira a una velocidad de 50 revoluciones por segundo, producirá una frecuencia de 50 ciclos por segundo. Ahora si dotamos a este alternador con dos pares de polos se producirá una frecuencia de 100 ciclos por segundo. A raíz de estas consideraciones se deduce que:

$$f = p \frac{n}{60}$$

f = frecuencia de la C.A. (Hz)

p = pares de polos del inductor

n = velocidad en revoluciones por minuto (rpm)

Ejemplo: 21.1

Determinar la frecuencia que produce un alternador que gira a una velocidad de 1.500 rpm si éste posee dos pares de polos.

$$\text{Solución: } f = p \frac{n}{60} = 2 \frac{1500}{60} = 50 \text{ Hz}$$

Ejemplo: 21.2

¿A qué velocidad deberá girar un alternador con cuatro pares de polos para producir una frecuencia de 50 Hz?

Solución: De la expresión general tenemos que la velocidad síncrona de un alternador, es:

21.3 Frecuencia del alternador

Para que un alternador produzca una C.A. de frecuencia fija, como corresponde al funcionamiento normal de un alternador, debe girar a una velocidad constante, conocida como **velocidad síncrona**.

$$n = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ rpm}$$

Ejemplo: 21.3

Para el accionamiento de un alternador se dispone de una turbina hidráulica de baja velocidad. Determinar el número de pares de polos que deberá disponer el alternador para conseguir una frecuencia de 50 Hz si la turbina gira a 375 rpm.

$$\text{Solución: } p = \frac{60 f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{375} = 8$$

21

21.4 Acoplamiento de alternadores

Cuando se desea aumentar la potencia suministrada por un sistema de generación de C.A. se acoplan en paralelo varios alternadores. También es corriente acoplar alternadores a la red eléctrica con el fin de aportar energía eléctrica al sistema general de producción.

Para realizar el acoplamiento con éxito es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

a) La tensiones de los alternadores a acoplar debe ser igual.

b) La frecuencia de los alternadores también debe ser la misma.

c) El orden de sucesión de fases de los alternadores debe ser igual.

d) En el momento de la conexión las tensiones de los alternadores deben estar en fase. Es decir las sinusoides que representan a las tensiones de cada uno de los alternadores deben superponerse exactamente.

Para conseguir que se cumplan estas condiciones se actúa sobre la velocidad y corriente de excitación de los alternadores mientras se sigue con aparatos de medida adecuados las diferentes variables del proceso. En la actualidad, los procesos de acoplamiento entre alternadores o entre alternadores y la red eléctrica se realizan mediante dispositivos automáticos e informatizados de sincronización.

Los alternadores deben funcionar a una velocidad rigurosamente constante para conseguir mantener la frecuencia a un valor fijo. Cuando se le exige una mayor potencia eléctrica al alternador, éste reacciona proporcionando una mayor resistencia al movimiento, por lo que la tendencia es perder velocidad. Si la velocidad llegara a descender se perdería el sincronismo con la red a la que está acoplado y habría que desconectar automáticamente el generador de la red. Para evitar esto, se dota al conjunto de alternador y grupo motriz, que le impulsa, de un sistema de regulación automática de velocidad.

Así, por ejemplo, imaginemos un alternador que es movido por una turbina de vapor. En el caso de que se le exija, por parte de la carga, una mayor potencia eléctrica al alternador, se le proporciona a la turbina un mayor caudal de vapor con el fin de mantener la velocidad estable.

Dado que el alternador también debe proporcionar una cierta cantidad de potencia reactiva a los receptores que lo requieran, se dota al mismo de un sistema que controla automáticamente la corriente de excitación del inductor, produciéndose una mayor potencia reactiva al aumentar dicha corriente de excitación.

Actividades

1. Consigue un alternador trifásico, analiza sus partes, prestando especial atención a la constitución del devanado inducido, al inductor y al conjunto formado por el par de anillos colectores y las escobillas que alimentan al circuito inductor con C.C.

2. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Autoevaluación

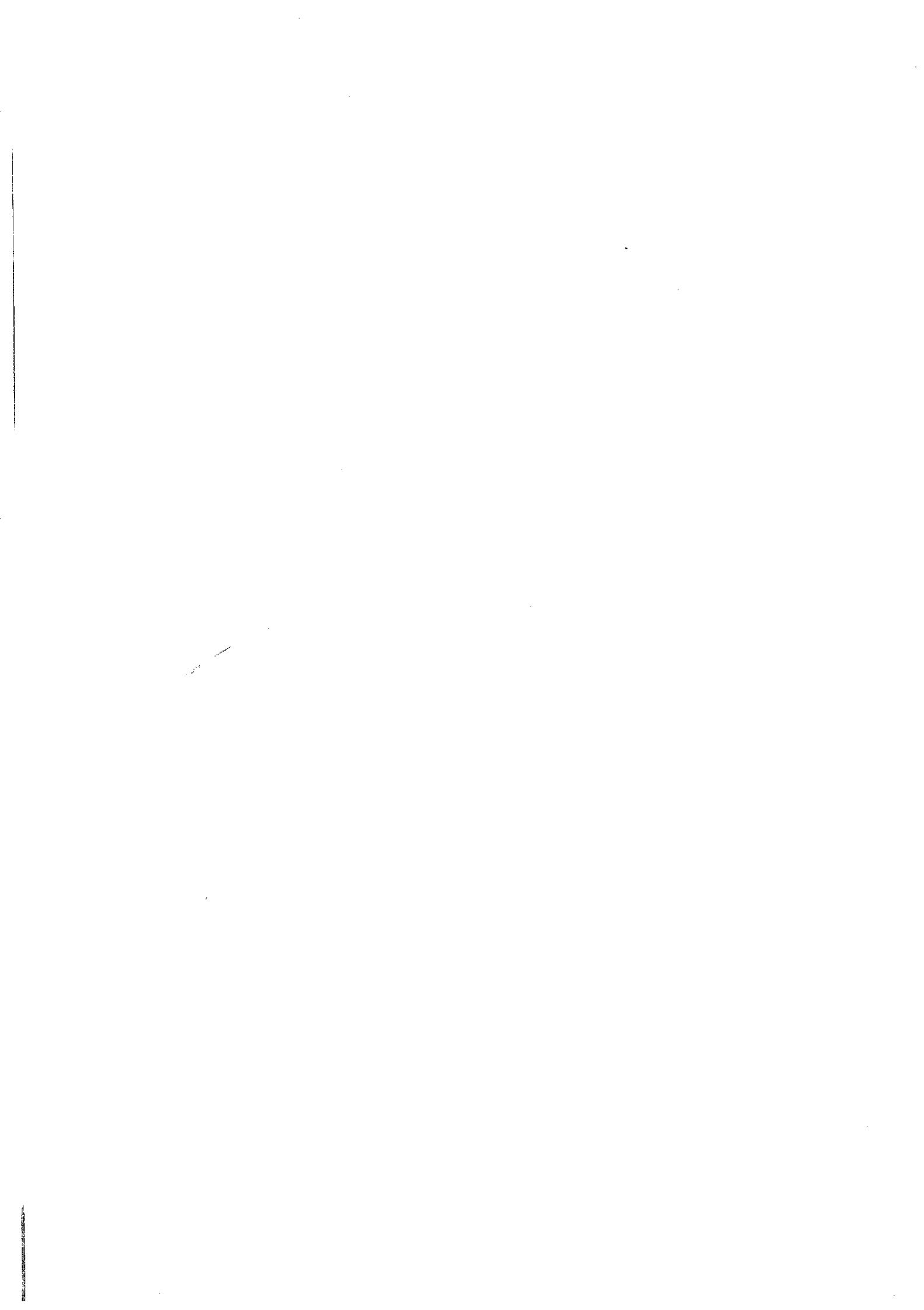
1) La frecuencia de la C.A. que proporciona un alternador depende de:

- a) Exclusivamente de la velocidad del rotor
- b) La velocidad del rotor y del número de polos del circuito inductor
- c) Del número de polos y de la corriente de excitación

2) Un alternador conectado a la red eléctrica:

- a) Debe funcionar a una velocidad constante
- b) Modifica el número de revoluciones por minuto según la potencia que se desea entregar a la red

- c) Entrega más potencia reactiva al aumentar la corriente de excitación
- 3) Averiguar la frecuencia que proporciona un alternador de un par de polos si gira a una velocidad de 3.600 rpm.
- 4) ¿Cuántos pares de polos deberá poseer un alternador que gira a 450 rpm para producir una frecuencia de 60 Hz?
- 5) Se desea producir una frecuencia de 60 Hz con un alternador de 3 pares de polos. Averiguar la velocidad a que debe girar.



Motores de C.A.



Introducción

En la actualidad, el motor de C.A. es el que más se utiliza para la mayor parte de las aplicaciones. Esto es debido fundamentalmente a que consiguen un buen rendimiento, bajo mantenimiento y sencillez en su construcción, sobre todo en los motores asincrónicos.

Seguidamente estudiaremos los siguientes tipos de motores: motor asíncrono trifásico, motor monofásico de inducción de rotor en cortocircuito, motor monofásico con espira en cortocircuito, motor síncrono, motor serie, motor paso a paso y servomotor. Dado que el motor asíncrono trifásico es el de mayor aplicación, lo estudiaremos más detalladamente.

Contenido

- Motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito.
- Sistemas de arranque de los motores asincrónicos trifásicos de rotor en cortocircuito.
- Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico.
- Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes.
- Regulación de velocidad de los motores asincrónicos trifásicos.
- Motor asíncrono monofásico de fase partida.
- Motor asíncrono monofásico con condensador de arranque.
- Motor monofásico con espira en cortocircuito.
- Motor trifásico como monofásico.
- Motor universal.
- Motor síncrono trifásico.
- Motor paso a paso.
- Servomotor.
- Ensayos de los motores de C.A.

Objetivos

- Clasificar las máquinas eléctricas.
- Describir el funcionamiento del motor asíncrono.
- Conectar adecuadamente el motor asíncrono.
- Seleccionar las características de un motor asíncrono.
- Seleccionar el sistema de arranque más adecuado de un motor asíncrono trifásico.
- Describir los tipos de ensayos fundamentales y normalizados que se deben realizar con los motores de C.A., identificando las magnitudes que se deben medir y explicando las curvas características que relacionan dichas magnitudes.

22.1 El motor asíncrono trifásico

Al igual que los motores de C.C., el motor asíncrono trifásico de C.A. funciona gracias a los fenómenos de inducción electromagnética. Son los más utilizados en la industria por su sencillez, robustez y fácil mantenimiento. Estos motores consiguen mantener su velocidad bastante estable para diferentes régimenes de carga y poseen un buen par de arranque. Como su velocidad depende de la frecuencia de la C.A. con la que se los alimenta, la única forma de regular su velocidad de giro consiste en alimentarlos a través de variadores electrónicos de frecuencia.

Dependiendo del tipo de rotor que utilicen, existen dos tipos fundamentales: *motores de rotor en cortocircuito o jaula de ardilla y motores de rotor bobinado*.

22.1.1 Principio de funcionamiento del motor asíncrono trifásico

Los motores de inducción asíncronos trifásicos basan su funcionamiento en la generación de un campo magnético giratorio en el estator, coincidente con la velocidad síncrona, que corta a los conductores del rotor y los hace girar.

Antes de ver cómo se origina el campo giratorio, vamos a estudiar, mediante un sencillo experimento, el principio general de funcionamiento de los motores asíncronos.

Para ello, se dispone de un imán en forma de U, de tal forma que pueda girar por su eje central mediante una manivela (Figura 22.1). Muy próximo a los polos se sitúa un disco de material conductor (cobre o aluminio), de tal forma que también pueda girar. Al girar el imán permanente se puede comprobar que el disco también gira, pero a un poco menos velocidad que el imán.

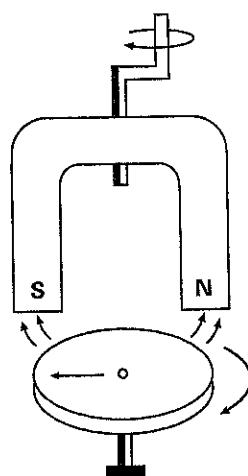


Figura 22.1. Al hacer girar el imán, el disco de material conductor también gira.

¿Por qué gira el disco si es de un material no magnético?

Cuando el imán se pone en movimiento, las líneas de campo que atraviesan el disco, también se ponen en movimiento (movimiento relativo del campo magnético frente a un conductor eléctrico fijo), por lo que según el principio de

inducción electromagnética (ley de Faraday), en el disco se induce una f.e.m.

Al estar el disco encerrado eléctricamente en sí mismo (cortocircuito), aparecen corrientes eléctricas por el mismo. Estas corrientes eléctricas quedan sometidas a la acción del campo magnético del imán, por lo que según la ley de Laplace se originan en el disco un par de fuerzas que ponen el disco en movimiento.

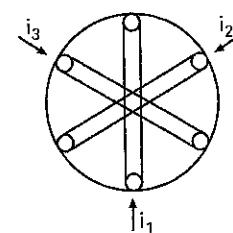
Según la ley de Lenz, el disco gira en un sentido tal que tiende a oponerse a las variaciones del campo magnético que originaron la corriente eléctrica, por lo que el disco gira en el mismo sentido que el campo magnético y que el imán.

El disco nunca puede alcanzar la misma velocidad de giro que el imán, ya que si esto ocurriese, el movimiento relativo de ambos se anularía y el campo magnético dejaría de ser variable respecto al disco, por lo que desaparecería la f.e.m. inducida, la corriente y con ella el par de fuerzas.

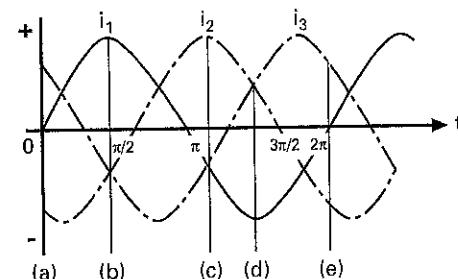
22.1.2 Campo magnético giratorio

Si conseguimos crear un campo magnético giratorio aprovechando las variaciones de corriente de un sistema de C.A. trifásica, como el desarrollado por el imán de la experiencia anterior, podremos hacer girar al rotor de un motor asíncrono.

El estator de un motor asíncrono trifásico se construye de igual manera que el de los alternadores trifásicos. En él se alojan tres bobinas desfasadas entre sí 120° (Figura 22.2 a). Cada una de estas bobinas se conecta a cada una de las fases de un sistema trifásico, por lo que por cada una de ellas circularán las corrientes instantáneas i_1 , i_2 e i_3 (Figura 22.2 b). Si analizamos los valores que alcanza el flujo magnético creado por cada una de estas corrientes en cada instante del tiempo, podremos comprobar que se genera un campo magnético de carácter giratorio.



a



b

Figura 22.2. Corrientes por las tres bobinas del estator de un motor asíncrono trifásico.

Para el instante (a) la corriente i_1 es cero, i_3 posee un valor positivo e i_2 negativo, lo que provoca un campo magnético instantáneo del sentido marcado por la flecha de la figura 22.3 a (se ha aplicado la regla de sacacorchos para las corrientes salientes y entrantes). En el punto (b), las corrientes i_2 e i_3 son negativas, mientras que i_1 ahora es positiva, por lo que, tal como se puede observar en la Figura 22.3 b, el campo magnético ha avanzado $1/4$ de ciclo. Si seguimos estudiando punto por punto, podremos observar cómo se obtiene un campo magnético giratorio, que en este caso avanza a la misma velocidad angular que el de la pulsación de la corriente. En el punto (e) se completa un ciclo y se inicia uno nuevo (Figura 22.3 e).

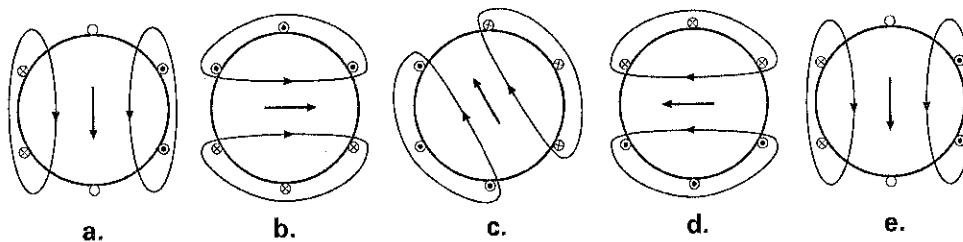


Figura 22.3. Estudio paso a paso de la formación del campo giratorio.

Al igual que ocurría en un alternador, la velocidad síncrona del campo giratorio depende del número de polos con el que se construyan los devanados en el estator y de la frecuencia.

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

n_s = velocidad del campo giratorio (r.p.m.)

f = frecuencia de la red (Hz)

p = número de pares de polos del devanado estatórico

Ejemplo: 22.1

Se dispone de un motor asincrónico trifásico de 2 pares de polos. Averiguar la velocidad del campo giratorio para la frecuencia europea de 50 Hz y para la americana de 60 Hz.

$$\text{Solución: } n_{s(50\text{ Hz})} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.500 \text{ r.p.m.}$$

$$n_{s(60\text{ Hz})} = \frac{60 \cdot 60}{2} = 1.800 \text{ r.p.m.}$$

22.2 Motor asincrónico trifásico de rotor en cortocircuito

En el **estator** de estos motores se colocan las bobinas encargadas de producir el campo magnético giratorio. Éstas se alojan en ranuras practicadas en un núcleo formado, por lo general, por paquetes de chapa magnética, tal como se muestra en la Figura 22.4. Las tres bobinas quedan desfasadas entre sí 120° eléctricos, y los 6 terminales de que constan se conectan a la placa de bornes del motor, pudiéndose conectar posteriormente en estrella o en triángulo.

El **rotor** es cilíndrico y en él se sitúan conductores de aluminio alojados en las ranuras del núcleo y cortocircuitados

por sus extremos mediante anillos conductores. A este rotor también se le da el nombre de jaula de ardilla. En motores de pequeña potencia el rotor se construye fundiendo en un bloque integral unas varillas de aluminio junto con los anillos.

El funcionamiento del motor asincrónico trifásico de rotor en cortocircuito es como sigue: al ser recorridas las bobinas del estator por una sistema de corrientes trifásicas, se origina en él un campo magnético gira-

torio. Los conductores del rotor, que en un principio están parados, son barridos por el campo magnético giratorio, por lo que se induce en ellos una f.e.m. Como estos conductores están en cortocircuito, aparece una corriente por los mismos que en unión con el campo magnético del estator da lugar a un par de fuerzas que pone en movimiento el rotor en el mismo sentido que el campo giratorio.

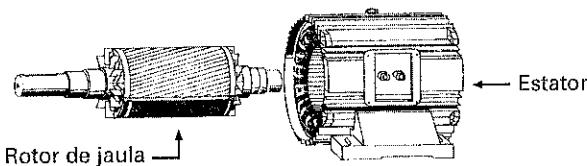


Figura 22.4. Constitución de un motor asincrónico trifásico de rotor en cortocircuito.

La velocidad del rotor nunca puede alcanzar a la del campo giratorio, ya que de ser éstas iguales no se induciría tensión alguna en el rotor, por lo que el rotor siempre gira a una velocidad inferior a la de sincronismo (de ahí viene el nombre de asincrónico). De esta forma, se define el deslizamiento de un motor asincrónico, como la diferencia de estas velocidades expresada en tantos por ciento:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

S = deslizamiento (%)

n_s = velocidad del campo giratorio

n = velocidad del rotor

Ejemplo: 22.2

Un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito posee una velocidad síncrona de 3.000 r.p.m. ¿Cuál será el deslizamiento del rotor a plena carga si se mide con un tacómetro una velocidad de 2.850 r.p.m.?

Solución:

$$S = \frac{3.000 - 2.850}{3.000} \cdot 100 = 5\%$$

22

El deslizamiento de un motor varía con la carga mecánica que tenga que arrastrar. De esta forma tenemos que, cuando el motor trabaja en vacío, el deslizamiento es mínimo (del orden de un 0,1%). Al arrastrar la carga nominal, el motor tiende a frenarse y el deslizamiento aumenta un poco (del orden del 4%).

Cuando el motor pasa de funcionar en vacío a arrastrar una carga mecánica, el rotor tiende a frenarse. Esto hace que el movimiento relativo del campo magnético giratorio respecto a los conductores del rotor aumente, lo que produce un aumento de la f.e.m. y de la corriente inducida en los mismos. Dado que el par de fuerzas que se desarrolla en el rotor depende de la corriente, se produce un aumento de dicho par que tiende a equilibrar el par resistente con el motor. De aquí se entiende que según aumenta la carga en el motor, también aumenta el deslizamiento, ya que de éste depende el par motor del mismo.

Arranque: Al conectar las bobinas del estator de un motor trifásico, permaneciendo el rotor sin movimiento, en un principio, el campo giratorio corta los conductores del rotor, induciendo en los mismos, como si fuese un transformador, una f.e.m. elevada (de la misma frecuencia que la del estator), que, a su vez, producirá una fuerte corriente (puede llegar a ser de cientos de amperios). Estas corrientes, al interactuar con el campo magnético, producen elevadas fuerzas mecánicas que, al actuar sobre el rotor, le proporciona un fuerte par de arranque.

Al igual que ocurría en los transformadores (el estator actúa como el primario y el rotor como el secundario), la fuerte corriente del rotor genera, a su vez, un campo magnético que intenta modificar el flujo común; como éste sólo depende de la tensión aplicada al estator, aparece un incremento de corriente en el mismo que intenta compensar la f.m.m. producida por el rotor. De esta forma, cuando aumenta la intensidad rotórica también lo hace la corriente estatórica, que corresponde a la corriente tomada de la red por el motor. En el arranque se produce, por tanto, una elevación de la corriente absorbida por el motor de la red, que, como ya veremos más adelante, a veces conviene suavizar.

Aceleración y carga: Tan pronto como empieza a circular corriente por el

rotor parado, éste empieza a girar con un movimiento acelerado y en el mismo sentido que el campo giratorio, por lo que el movimiento relativo entre el campo y el rotor disminuye y con él la f.e.m. inducida y la corriente (según disminuye el deslizamiento, la frecuencia del rotor f_2 va también disminuyendo). Si el motor está en vacío, rápidamente se alcanza una velocidad muy próxima a la de sincronismo. Si se aplica una carga mecánica resistente al eje del motor, el rotor tenderá a perder velocidad hasta alcanzar un equilibrio entre el par motor creado por el mismo y el par resistente ofrecido por la carga.

Si se aplica una carga mecánica resistente que sobrepase el par máximo que puede proporcionar el motor, éste tiende a pararse. Esto siempre debe de evitarse, ya que al estar el rotor bloqueado, tanto las corrientes rotóricas como las estatóricas se elevan muchísimo, pudiendo provocar la destrucción del motor si no se desconecta el motor rápidamente.

Se puede decir que el motor intenta desarrollar un par motriz exactamente igual al par opuesto por el resistente de la carga.

22.2.1 Característica mecánica de un motor asíncrono trifásico

La característica del motor nos indica la relación entre el par del motor y su velocidad. El par que desarrolla un motor de inducción está íntimamente relacionado con la velocidad del rotor. Dado que su relación matemática resulta un poco complicada, por lo general, esta relación se expresa gráficamente mediante una curva característica de par-velocidad.

A modo de ejemplo, en la curva de la Figura 22.5 se ha representado la relación par(C)-velocidad(n) de un motor asíncrono trifásico con rotor en cortocircuito. En el eje de abscisas se escriben los valores relativos del par referidos al par nominal C_n y en el de coordenadas el de la velocidad relativa del rotor expresada en porcentaje (en realidad se expresa el deslizamiento). En esta representación gráfica se ha trazado la evolución del par motor, así como la evolución del par resistente al que se le somete al motor. Este par resistente podría corresponder, por ejemplo, al transmitido por un eje al que se le ha acoplado un montacargas.

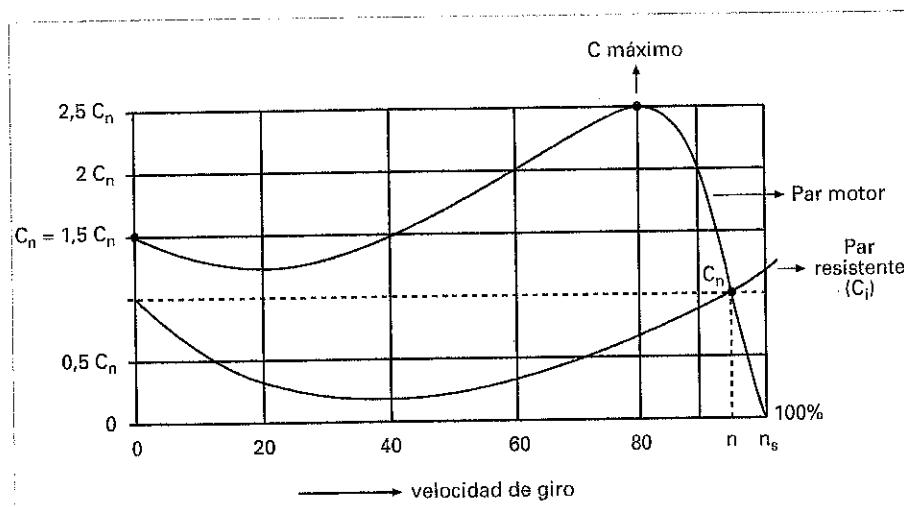


Figura 22.5. Característica mecánica de un motor asíncrono trifásico.

En la curva mostrada como ejemplo en la Figura 22.5 se puede observar que en el momento del arranque del motor ($n = 0$), se obtiene un par de arranque ($C_a = 1,5 C_n$) que es 1,5 veces el par a plena carga.

Si hacemos que este motor arrastre una carga que origine un par resistente C_i , el motor adaptará su velocidad hasta conseguir desarrollar un par motor C_n que consiga arrastrar la carga mecánica. Esto se consigue a la velocidad n . En el caso de que aplicásemos un par resistente mayor, la velocidad disminuiría hasta que se alcanzara el equilibrio entre el par motor y el par resistente.

En el caso de que el par resistente fuese mayor que el par máximo que puede desarrollar el motor (en nuestro ejemplo: $C_{\max} = 2,5 C_n$) el motor se pararía. En nuestro ejemplo esto ocurriría cuando la velocidad se redujese al 80% de la velocidad de sincronismo.

Ejemplo 22.3

Un motor asíncrono trifásico posee las siguientes características: potencia eléctrica absorbida de la red = 8 KW; 380 V; 50 HZ; $\cos \varphi = 0,85$; $\eta = 93\%$; pares de polos del devanado estatórico = 2; deslizamiento a plena carga = 4%. Calcular el par de rotación del rotor.

Solución: Primero calculamos la potencia útil del motor:

$$\eta = \frac{P_u}{P} \cdot 100 \Rightarrow P_u = \frac{P}{100} \cdot \eta = \frac{8.000}{100} \cdot 93 = 7.440 \text{ W}$$

La velocidad síncrona del campo giratorio, es:

$$n_s = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.500 \text{ r.p.m.}$$

La velocidad del rotor la calculamos mediante el deslizamiento:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \Rightarrow n = n_s - \frac{S \cdot n_s}{100} =$$

$$1.500 - \frac{4 \cdot 1.500}{100} = 1.440 \text{ r.p.m.}$$

La velocidad angular del rotor es, entonces:

$$C = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1.440}{60} = 151 \text{ rad/s}$$

Ahora ya podemos calcular el par útil del motor:

$$C = \frac{P_u}{\omega} = \frac{7.440}{151} = 49 \text{ Nm}$$

22.2.2 Características técnicas de un motor asíncrono trifásico

Una buena parte de las características de los motores eléctricos se suele expresar en la propia placa de características del motor, tal como tensiones, potencia, frecuencia, velocidad, nivel de protección, clase de aislamiento, factor de potencia, tipo de servicio, etc. Si queremos obtener otros datos, como el comportamiento en servicio a diferentes regímenes de carga, tendremos que recurrir a las características que se facilitan en las informaciones técnicas que proporcionan los propios fabricantes de los motores.

En la Tabla 22.1 se muestra, a modo de ejemplo, las características técnicas de una gama de motores asíncronos trifásicos con rotor en cortocircuito comerciales de un par de polos y 50 Hz.

Potencia KW CV	TIPO	Veloc. /min	In a. 380V	Rendimiento			Factor de Potencia			Ca. Ch	La. In	Peso: Kg	PD: Kgm²	Cm: Nm
				1/4	3/4	2/4	4/4	5/4	3/4					
110 150	WT315S-2	2.964	208	91,5	89,5	87	0,88	0,87	0,83	1,6	6	900	4	2,2
132 175	WT315M-2	2.966	247	92	91,5	91	0,89	0,88	0,85	1,8	6,2	1.000	4,6	2,3
160 220	WT315M-2	2.968	284	93	92	91	0,89	0,88	0,87	1,8	6,2	1.075	5,7	2,3
200 275	WT315M-2	2.975	363	93	92	90	0,9	0,89	0,87	1,5	6,5	1.150	8,3	2,2
220 300	WT355M-2	2.982	390	94,8	94,6	93,5	0,9	0,89	0,87	1,5	6,2	1.450	9,5	2,4
260 350	WT355M-2	2.982	445	95	94,8	94	0,9	0,89	0,87	1,5	6,2	1.700	11	2,4
300 400	WT355M-2	2.982	510	95,4	95,2	94,5	0,9	0,89	0,87	1,6	6,2	1.775	12,8	2,4
330 450	WT355M-2	2.982	575	95,8	95,4	95	0,9	0,89	0,87	1,6	6,2	1.850	14,5	2,4
365 500	WT400L-2	2.982	630	95	94,4	93,4	0,9	0,89	0,87	1,5	6,4	2.500	20	2,4
400 550	WT400L-2	2.982	695	95,5	95	94,2	0,9	0,89	0,87	1,5	6,4	2.650	22	2,4
440 600	WT400L-2	2.982	760	96	95,5	94,8	0,9	0,89	0,87	1,5	6,4	2.750	28,5	2,4

Tabla 22.1. Características de una gama de motores asíncronos trifásicos comerciales.

La potencia que habitualmente se indica en las características técnicas es la útil, o mecánica, que el motor puede transmitir por el eje. Para calcular la intensidad nominal habrá que tener en cuenta, entonces, el rendimiento del motor.

Ejemplo: 22.4

Vamos a comprobar si el motor tipo WT355M₁-2 absorbe realmente la intensidad que se indica para la potencia nominal (funcionamiento a 4/4): P_u = 220 KW; η = 94,8%; cos φ = 0,9; V_L = 380 V. (Nota: El funcionamiento a 4/4 indica que el motor funciona a plena carga, mientras que a 3/4 lo hace a tres cuartas partes de la potencia de carga.)

La potencia que el motor absorbe de la red a plena carga es igual a:

$$P = \frac{P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{220.000}{94,8} \cdot 100 = 232.068 \text{ W}$$

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{232.068}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9} = 392 \text{ A}$$

Valor que coincide con la intensidad indicada en la hoja de características técnicas de la Tabla 22.1.

En estas hojas se muestra cómo el rendimiento y el factor de potencia disminuyen con el régimen de carga. Cuando el motor trabaja en vacío su factor de potencia se hace muy pequeño, debido a que la mayor parte de la corriente que absorbe se dedica a crear el campo magnético, mientras que la potencia activa que absorbe el motor queda muy reducida (la necesaria para alimentar las pérdidas del motor).

C_a/C_n = indica la relación entre el par de arranque y el nominal par un arranque directo.

C_m/C_n = indica la relación entre el par máximo que puede desarrollar el motor y el nominal.

I_a/I_n = indica la relación entre la intensidad de arranque y la nominal para un arranque directo.

PD² = indica el momento de inercia del rotor.

Ejemplo: 22.5

Se dispone de un motor asincrónico trifásico de rotor en cortocircuito tipo WT315M₂-2. Averiguar el deslizamiento a plena carga, la intensidad cuando el motor trabaje a 2/4 de su potencia nominal, la intensidad en el arranque, par nominal, par de arranque y par máximo.

Solución: Según las características indicadas en las hojas técnicas (Tabla 22.1), este motor es de un par de polos, por lo que su velocidad de sincronismo par 50 Hz será de 3.000 r.p.m. Como su velocidad nominal es de 2.968, el deslizamiento que le corresponde, es:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{3.000 - 2.968}{3.000} \cdot 100 = 1,07\%$$

Para calcular la intensidad cuando el motor trabaje a 2/4 de su potencia nominal (mitad de la carga) tendremos que utilizar los datos que se muestran en las hojas de características para ese punto de trabajo: η = 91%; cos φ = 0,87.

La potencia eléctrica absorbida de la red es en este caso:

$$P = \frac{2/4 \cdot P_u}{\eta} \cdot 100 = \frac{2/4 \cdot 160}{91} \cdot 100 = 87,9 \text{ KW}$$

$$= \frac{P}{\sqrt{3} V_c \cos \varphi} = \frac{87.900}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87} = 154 \text{ A}$$

Según las características técnicas, la intensidad en el arranque es 6,5 veces superior a la nominal; como la intensidad nominal a plena carga es 284 A, tendremos que:

$$I_a = 6,5 I_n = 6,5 \cdot 284 = 1.846 \text{ A}$$

Calcular ahora el valor del par nominal:

$$C_n = \frac{P_u}{\omega} = \frac{160.000}{311} = 514 \text{ Nm}$$

La velocidad angular del rotor la hemos calculado así:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2.968}{60} = 311 \text{ rad/s}$$

Según las características técnicas, el par de arranque es 1,8 veces superior a la nominal y el par máximo se alcanza al hacerse 2,3 veces mayor que el nominal:

$$\text{Par de arranque: } C_a = 1,8 C_n = 1,8 \cdot 514 = 925 \text{ Nm}$$

$$\text{Par máximo: } C_m = 2,3 C_n = 2,3 \cdot 514 = 1.182 \text{ Nm}$$

22.2.3 Conexión de los devanados de un motor trifásico

El devanado trifásico del estator de un motor asincrónico se puede conectar en estrella o en triángulo, dependiendo de la tensión de la red y la que se indique en la placa de características del motor. De esta forma tenemos que los motores trifásicos pueden funcionar a dos tensiones.

Así, por ejemplo, en un motor que en su placa de características aparezcan las tensiones: 380/220 V, nos indica que se puede conectar en estrella a la tensión mayor (380 V, ya que en cada devanado del motor aparecerá $V_s = 380/\sqrt{3} = 220$ V) y en triángulo a la menor (220 V). De tal forma que cada bobina siempre queda sometida a la tensión menor (Figura 22.6).

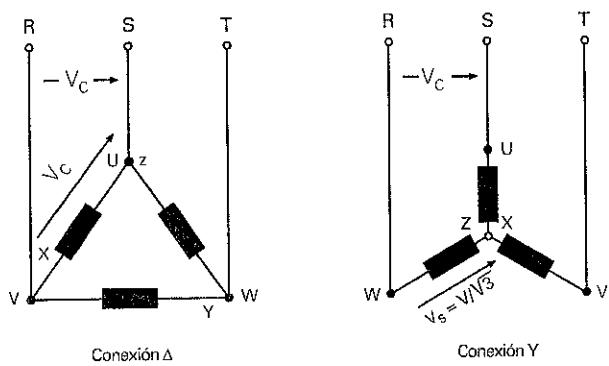


Figura 22.6. Conexiones de los devanados de un motor asincrono trifasico.

En la caja de bornes de los motores aparecen los seis terminales correspondientes a los tres devanados del motor más el terminal de conexión a tierra. La disposición de los terminales siempre se hace de la misma forma, siguiendo las normas internacionales. Para conseguir la conexión en estrella, basta con unir con unos puentes los finales Z-X-Y. La conexión en triángulo se consigue realizar con facilidad al unir con unos puentes los terminales (U-Z), (V-X), (W-Y) (Figura 22.7).

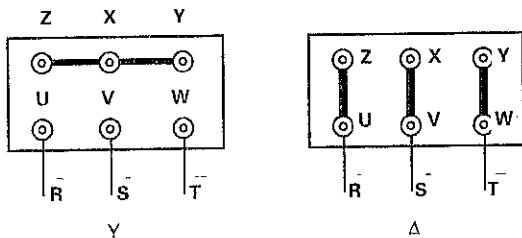


Figura 22.7. Conexiones en la placa de bornas de un motor asincrono trifasico.

22.2.4 Sistemas de arranque de los motores asincronos trifasicos de rotor en cortocircuito

Cuando se conecta el motor directamente a la red, éste absorbe una intensidad muy fuerte de la línea en el momento del arranque, lo que puede afectar no sólo a la duración de los aparatos de conexión, sino a las líneas que suministran energía eléctrica. Estas fuertes corrientes sobrecargan las líneas de distribución, pudiendo producir caídas de tensión y calentamiento en los conductores de las mismas. Por esta razón, las compañías de energía eléctrica editan normas para reducir dichas corrientes de arranque a unos valores que sean aceptables.

Una forma de reducir la corriente de arranque es reducir la tensión aplicada al motor. Con ello también se disminuye el par efectivo de arranque, ya que al disminuir la tensión, el flujo del estator también disminuye y con él la f.e.m. inducida en el rotor y la intensidad rotórica. En conclusión, el par de arranque disminuye con el cuadrado de la tensión.

Existen diferentes métodos para reducir la corriente de arranque disminuyendo la tensión: arranque estrella-triángulo,

arranque con resistencias estáticas y arranque por auto-transformador.

22.2.4.1 Arranque directo

El arranque directo está permitido para motores que posean una potencia inferior a 5,5 Kw. En la Figura 22.8 a se muestra el esquema de fuerza para el arranque directo de un motor asincrono trifásico de rotor en cortocircuito, y en la Figura 22.8 b el esquema de mando correspondiente.

F1F = Fusibles de protección del circuito de fuerza del motor.

K1M = Contactor.

S1A = Pulsador de marcha del motor.

S0A = Pulsador de paro del motor.

F2F = Relé térmico trifásico. Protege al motor de las sobrecargas que pudiera sufrir. Cuando aparece una sobrecarga, el commutador asociado a este dispositivo cambia de posición.

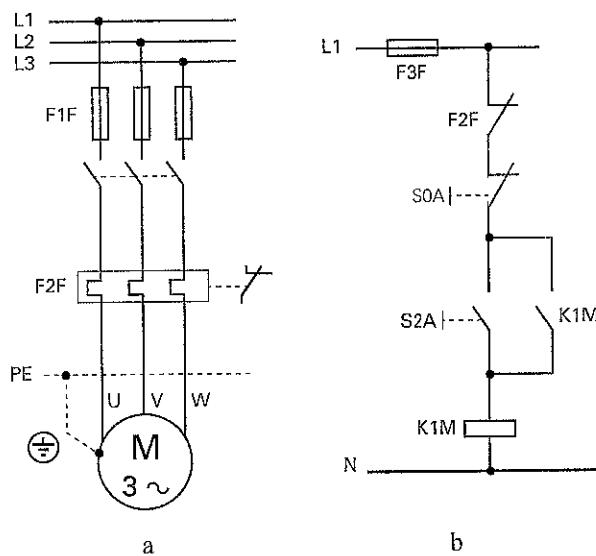


Figura 22.8. Esquema de fuerza y mando para el arranque directo de un motor asincrono trifasico de rotor en cortocircuito.

Su funcionamiento es como sigue: al apretar el pulsador S1A se cierra el circuito de la bobina del contactor, lo que provoca que tanto los contactos principales como los auxiliares cambien de posición y el motor se ponga en marcha.

En ese mismo instante el contacto auxiliar K1M, normalmente abierto y que está en derivación con el pulsador, se cierra. Al dejar de pulsar S1A, éste se abre, pero la bobina sigue siendo atravesada por una corriente, que ahora circula por el propio contacto auxiliar K1M del contactor.

El pulsador de paro S0A tiene su contacto normalmente cerrado. Al apretar el botón de dicho pulsador, se abre su contacto y corta la corriente de la bobina, con lo cual el contactor abre sus contactos principales y el auxiliar K1M, y el motor se para.

Para efectuar la parada del motor basta con accionar el pulsador de paro SOQ. En caso de sobrecarga, el contacto del relé térmico F2F desconecta igualmente a los contactores.

22.3 Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes

En estos motores el estator posee las mismas características que el rotor en cortocircuito, pero el rotor se construye insertando un devanado trifásico en las ranuras de un núcleo cilíndrico de chapas magnéticas (véase Figura 22.13). Este devanado se conecta normalmente en estrella y los tres terminales restantes se conectan a tres anillos colectores. Unas escobillas frotan estos anillos y permiten conectar unas resistencias externas en serie con el fin de poder limitar la corriente rotórica.

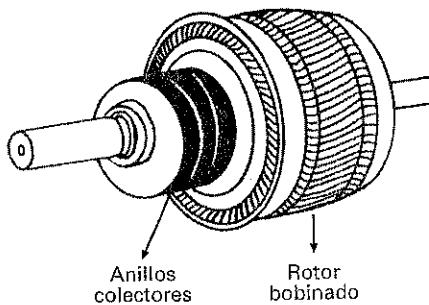


Figura 22.13. Rotor bobinado de un motor asíncrono.

En la placa de características de estos motores aparecen tres nuevos terminales correspondientes al bobinado del rotor, que para no confundirlos con los del estator se indican con las letras minúsculas u, v, w.

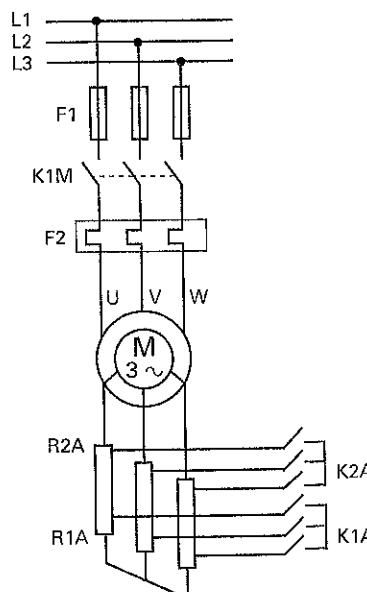


Figura 22.14. Esquema para el arranque de un motor asíncrono de rotor bobinado mediante resistencias rotóricas.

El principio de funcionamiento es exactamente igual que el del rotor en cortocircuito, pero ahora es posible la regulación directa de la corriente rotórica y con ella, la propia corriente del estator. Este sistema tiene la ventaja de que no es necesario disminuir la tensión en el estator para disminuir el flujo y, con él, la corriente rotórica, que siempre trae consigo una reducción del par motor.

En la Figura 22.14 se puede apreciar el circuito de fuerza del arranque de un motor asíncrono trifásico de rotor bobinado mediante resistencias rotóricas.

El arranque se hace en sucesivos escalones, obteniendo un arranque con corriente suave en el estator con un buen par de arranque. Calculando adecuadamente el valor de las resistencias rotóricas, incluso se puede llegar a obtener un arranque con el par máximo.

Al modificar la resistencia del rotor, el deslizamiento se hace mayor y la curva característica par-velocidad se desplaza, tal como se muestra en la Figura 22.15.

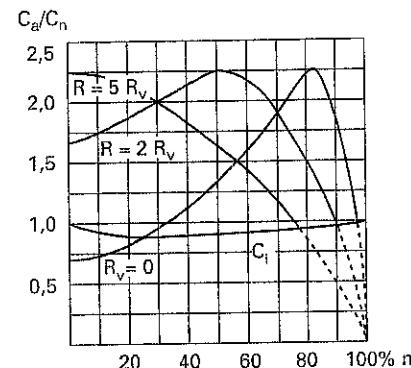


Figura 22.15. Característica mecánica correspondientes al proceso de arranque de un motor de asincrono trifásico mediante resistencias rotóricas.

El gran inconveniente que presentan estos motores frente a los de jaula de rotor en cortocircuito es que resultan bastante más caros y necesitan de un mayor mantenimiento. En la actualidad el control electrónico de los motores asíncronos de rotor en cortocircuito ha desplazado en casi todas las aplicaciones al motor de rotor bobinado, quedando éste último para casos especiales donde se requiera un par de arranque muy elevado (grúas, instalaciones de media tensión, etc).

22.4 Regulación de velocidad de los motores asíncronos trifásicos

La velocidad de un motor asíncrono depende fundamentalmente del número de polos con que está construido y de la frecuencia, por lo que si conseguimos modificar una de estas dos variables habremos conseguido controlar la velocidad.

22.4.1 Motores de dos velocidades conexión Dahlander

Estos motores se construyen con un devanado con varias posibles conexiones. Dependiendo de cómo se conecten exte-

riormente estos bobinados, se consigue variar el número de polos y, por lo tanto, la velocidad. La conexión más empleada es la Dahlander.

En el esquema de la Figura 22.16 se ha representado el circuito de fuerza de un motor trifásico de polos comutables para dos velocidades en conexión Dahlander.

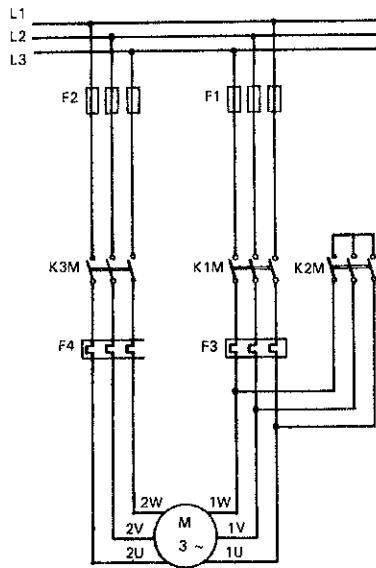


Figura 22.16. Esquema de fuerza de motor de dos velocidades en conexión Dahlander.

La velocidad inferior se obtiene cuando el contactor K1M está únicamente accionado. La velocidad superior se consigue desconectando K1M y accionando en conjunto los contactores K2M y K3M.

22.4.2 Motor de dos velocidades con dos devanados separados

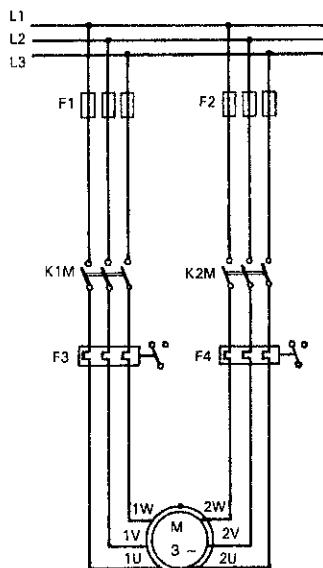


Figura 22.17. Esquema de fuerza de motor trifásico de dos velocidades con devanados separados.

También es posible conseguir dos velocidades de giro diferentes con dos devanados separados. Cada uno de los devanados posee un número de polos acorde con la velocidad deseada. Dependiendo del devanado que se conecte conseguimos una velocidad u otra.

En el esquema de la Figura 22.17 se ha representado el circuito de fuerza de un motor trifásico para dos velocidades de giro con dos devanados separados.

Cuando se acciona el contactor KM1 el motor marcha a velocidad más lenta. Al desconectar KM1 y conectar KM2, el motor funciona a la velocidad más alta.

22.4.3 Regulación de velocidad con variadores de frecuencia

Mediante un equipo electrónico especial, a base de tiristores, se puede regular la frecuencia de alimentación del motor. Con ello se consigue modificar entre amplios límites la velocidad de el motor (Figura 22.18).

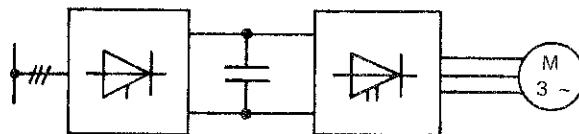


Figura 22.18. Variador de velocidad de un motor asíncrono trifásico a base de modificar la frecuencia de alimentación.

22.5 Motores monofásicos

El suministro de C.A. trifásica no siempre está disponible en todas las instalaciones eléctricas. Así, por ejemplo, las viviendas son alimentadas con C.A. monofásica (fase + neutro). En estos casos, dada la sencillez, robustez, bajo precio y ausencia de chispas, son de gran aplicación los motores asincrónicos monofásicos de inducción de rotor en cortocircuito. Para pequeños electrodomésticos (batidoras, molinillos, etc.) la tendencia es utilizar el motor universal. En cualquier caso, la utilización de motores monofásicos será factible para aplicaciones de pequeña potencia.

22.5.1 Motor monofásico de inducción de rotor en cortocircuito

Al igual que los trifásicos, están constituidos por un rotor de jaula de ardilla y un estator donde se alojan los devanados inductores. Su principio de funcionamiento es similar a los asincrónicos trifásicos, es decir se basan en las fuerzas que aparecen en los conductores del rotor en cortocircuito cuando es sometido a la acción de un campo giratorio. Aprovechando este principio se pueden construir diferentes tipos de motores, de los cuales estudiaremos los siguientes: *motor monofásico de fase partida*, *motor monofásico de fase partida con condensador de arranque*, *motor monofásico con espira en cortocircuito* y *motor trifásico como monofásico*.

Si en el estator situamos un bobinado monofásico y lo sometemos a una tensión alterna senoidal, el campo magnético que se obtiene no es giratorio. Lo que se produce es un campo magnético alternativo y fijo (el campo cambia de polaridad con la frecuencia de forma alterna). El motor se comporta como un transformador, induciéndose en los conductores del rotor una f.e.m. y una corriente que no es capaz de provocar un par de arranque efectivo en el rotor (los conductores del rotor desarrollan primero un par de fuerzas en un sentido y cuando cambia el flujo magnético desarrollan el par de fuerzas en sentido contrario, no consiguiendo así poner en marcha el motor) (véase Figura 22.19 a).

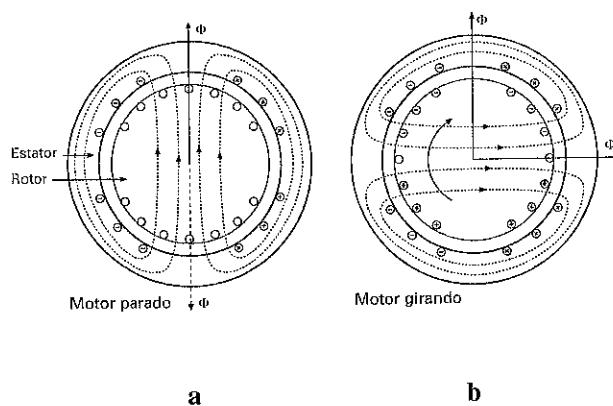


Figura 22.19. Motor monofásico de inducción. a) Al ser el campo generado por el devanado del estator alternativo, el motor no arranca; b) al empujar al rotor, se desplaza el campo magnético y el rotor se pone en movimiento.

Si en estas condiciones empujamos el rotor manualmente en uno de los sentidos, conseguiremos desplazar el eje del campo magnético del rotor y el motor comenzará a girar hasta alcanzar su velocidad nominal (Figura 22.19 b). Hay que tener en cuenta que al ponerse el rotor en movimiento, en los conductores del mismo aparece una nueva f.e.m. inducida debida al giro de los mismos en el seno del campo magnético alternativo producido por el estator. Esta f.e.m. genera unas corrientes que dan lugar a un campo magnético de reacción que queda desfasado un ángulo de 90° respecto al principal del estator. En estas condiciones ya aparece un par de fuerzas sobre el rotor que lo hace girar en el mismo sentido en el que se le haya impulsado inicialmente.

Al igual que los motores asincrónicos trifásicos, la velocidad de estos motores depende del número de pares de polos del devanado y de la frecuencia de la red.

22.5.2 Motor asíncrono monofásico de fase partida

Por supuesto, no sería muy práctico tener que arrancar los motores asincrónicos trifásicos de una forma manual. Para conseguir que el motor arranque automáticamente se inserta en las ranuras del estator un segundo bobinado auxiliar que ocupa $1/3$ de las mismas. En la Figura 22.20 se muestra un esquema de la disposición de los dos bobinados para un par de polos en un estator de 12 ranuras. Los terminales marcados con las letras mayúsculas U, X, indican el principio y final del bobinado principal, y los marcados con minúsculas u, x, los del auxiliar.

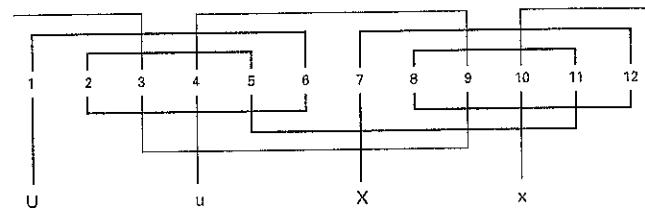


Figura 22.20. Bobinado principal y auxiliar de un motor asíncrono monofásico de fase partida.

Como la impedancia de las dos bobinas es diferente, se produce un ángulo de desfase en la corriente absorbida por el bobinado auxiliar respecto a la del principal. Este ángulo suele ser de adelanto, debido a que el bobinado auxiliar es de menor sección y, por lo tanto, más resistivo. El flujo que produce dicha bobina queda también adelantado al principal, lo que hace que se forme un campo giratorio suficiente para impulsar a moverse al rotor. Dado que el ángulo de desfase entre ambos flujos resulta muy pequeño, el par de arranque también lo es.

En la Figura 22.21 se muestra el esquema de conexiones de un motor asíncrono monofásico de fase partida, donde se puede observar que el devanado auxiliar se conecta en paralelo con el principal. Dada la alta resistencia que posee el devanado auxiliar, es conveniente desconectarlo una vez que el rotor gira a una velocidad cercana al 75% de su velocidad nominal. Para no tener que hacer esta operación de una forma manual, se intercala en el devanado auxiliar un interruptor centrífugo acoplado al eje de giro del motor, de tal forma que una vez arrancado y superado una cierta velocidad, el interruptor se abre y desconecta el devanado auxiliar.

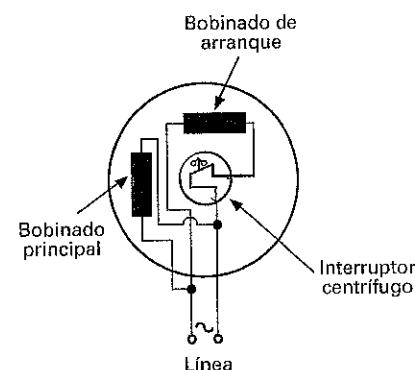


Figura 22.21. Esquema de conexiones de arranque motor asíncrono monofásico de fase partida mediante interruptor centrífugo.

Para invertir el sentido de giro de estos motores basta con invertir las conexiones del devanado auxiliar de arranque.

22.5.3 Motor asíncrono monofásico con condensador de arranque

Para aumentar el par de arranque de estos motores se añade un condensador en serie con el bobinado auxiliar, de tal forma

que el ángulo de desfase entre los flujos producidos por ambas bobinas se acerque a 90° . Dado que el desfase entre ambos devanados se consigue fundamentalmente gracias al condensador, es posible aumentar la sección de los conductores del devanado auxiliar, así como su número de espiras.

El par de arranque conseguido por estos motores aumenta con la capacidad del condensador. Sin embargo una capacidad excesivamente elevada puede reducir la impedancia total del devanado auxiliar a valores muy pequeños, lo que trae consigo un aumento de la corriente absorbida por el bobinado auxiliar. Si este devanado no se desconecta una vez arrancado el motor, el calor producido por la fuerte corriente puede llegar a destruirlo. Para que esto no ocurra, una vez que el motor ha alcanzado ciertas revoluciones, se procede a la desconexión del conjunto formado por el condensador y el devanado auxiliar mediante un interruptor centrífugo, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 22.22.

Existen motores donde el condensador y el devanado auxiliar de arranque se mantienen conectados en paralelo y de forma permanente con el devanado principal. De esta forma se evita el uso del interruptor centrífugo, consiguiendo que el motor sea más silencioso. En este tipo de motores la capacidad del condensador debe ser más pequeña, por lo que el par de arranque se ve reducido. En la Tabla 22.2 se muestra, como ejemplo, las características técnicas de una gama de motores monofásicos comerciales con condensador permanente. Aquí podemos comprobar como el par de arranque conseguido es

bastante inferior que el de los motores trifásicos. Observa también como aumenta la capacidad del condensador con la potencia nominal del motor.

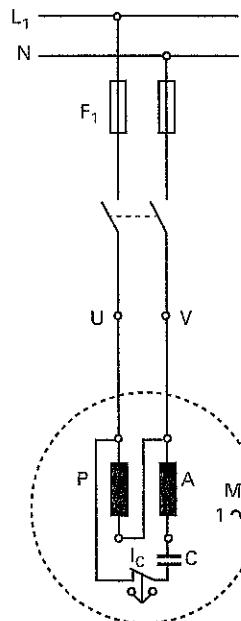


Figura 22.22. Esquema de conexiones de motor asincrónico monofásico con condensador de arranque e interruptor centrífugo.

Potencia nominal según VDE 0530	Tamaño constructivo	Tipo	Peso neto	Momento de inercia $J = GD^2$	Velocidad r.p.m.	Rendimiento %	Factor de potencia $\cos \phi$	Valores de servicio a potencia nominal	Relación entre	Condensador permanente que		
KW	CV		kg	Kg m ²	r.p.m.	%	clase	Intensidad en 220 V	Par en N.m	Corriente de arranque y nominal	μF	
0,12	0,16	63	1LF3 060-2AJ20	3,8	0,00018	2685	0,47	0,97	1,20	0,43	0,90	2,3
0,18	0,25		1LF3 063-2AJ20	4,4	0,0002	2660	0,50	0,92	1,80	0,65	0,95	2,4
0,25	0,33	71	1LF3 070-2AJ20	5,5	0,00038	2730	0,56	0,96	2,00	0,88	0,90	3,0
0,37	0,50		1LF3 073-2AJ20	7,0	0,00045	2740	0,60	0,93	3,10	1,30	0,85	3,1
0,55	0,75	80	1LF3 080-2AJ20	8,6	0,00085	2800	0,63	0,97	4,00	1,88	0,78	20
0,75	1,0		1LF3 083-2AJ20	10,4	0,0011	2810	0,66	0,97	5,25	2,56	0,76	4,0
1,1	1,5	90 S	1LF3 092-2AJ20	13,1	0,0018	2780	0,67	0,94	8,00	3,81	0,73	4,2
1,5	2,0	90 L	1LF3 098-2AJ20	16,8	0,002	2790	0,68	0,95	10,70	5,18	0,70	4,3

3000 r.p.m. (2 polos)

Potencia nominal según VDE 0530	Tamaño constructivo	Tipo	Peso neto	Momento de inercia $J = GD^2$	Velocidad r.p.m.	Rendimiento %	Factor de potencia $\cos \phi$	Valores de servicio a potencia nominal	Relación entre	Condensador permanente que		
KW	CV		kg	Kg m ²	r.p.m.	%	clase	Intensidad en 220 V	Par en N.m	Corriente de arranque y nominal	μF	
0,12	0,16	63	1LF3 060-2AJ20	3,8	0,00018	2685	0,47	0,97	1,20	0,43	0,90	2,3
0,18	0,25		1LF3 063-2AJ20	4,4	0,0002	2660	0,50	0,92	1,80	0,65	0,95	2,4
0,25	0,33	71	1LF3 070-2AJ20	5,5	0,00038	2730	0,56	0,96	2,00	0,88	0,90	3,0
0,37	0,50		1LF3 073-2AJ20	7,0	0,00045	2740	0,60	0,93	3,10	1,30	0,85	3,1
0,55	0,75	80	1LF3 080-2AJ20	8,6	0,00085	2800	0,63	0,97	4,00	1,88	0,78	20
0,75	1,0		1LF3 083-2AJ20	10,4	0,0011	2810	0,66	0,97	5,25	2,56	0,76	4,0
1,1	1,5	90 S	1LF3 092-2AJ20	13,1	0,0018	2780	0,67	0,94	8,00	3,81	0,73	4,2
1,5	2,0	90 L	1LF3 098-2AJ20	16,8	0,002	2790	0,68	0,95	10,70	5,18	0,70	4,3

Tabla 22.2. Características técnicas de una gama de motores monofásicos comerciales con condensador de arranque permanente.

Existe también la posibilidad de dotar a los motores asincrónicos monofásicos de un doble condensador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 22.23. En este caso se conecta un condensador fijo C en paralelo con el devanado principal y otro en serie con el devanado auxiliar de arranque. Aquí sí se incorpora un interruptor centrífugo para la desconexión del devanado auxiliar una vez arrancado el motor.

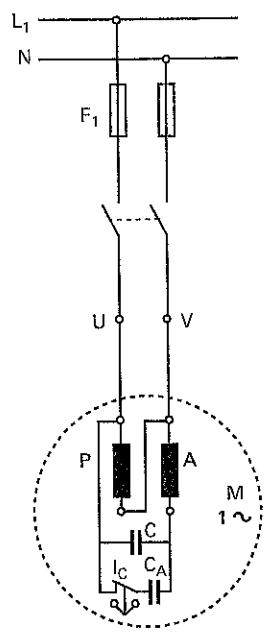


Figura 22.23. Esquema de conexiones de motor asincrónico monofásico de fase partida con doble condensador.

En la Figura 22.24 se muestra el aspecto de un motor con doble condensador.

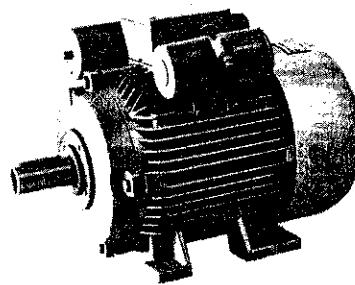


Figura 22.24. Motor asincrónico monofásico de fase partida con doble condensador.

Los motores con condensador poseen un buen factor de potencia y un rendimiento aceptable (es inferior al de los motores trifásicos) y se aplican, por ejemplo, para electrodomésticos, máquinas herramientas, bombas, etc.

En los motores sin condensador el campo de aplicación se ve limitado por su bajo par de arranque, por lo que se emplean, por ejemplo, para ventiladores, bombas centrífugas, etc.

22.5.4 Motor monofásico con espira en cortocircuito

Este motor es de muy sencilla construcción y se aplica para motores de pequeñas potencias (hasta 100 o 200 W).

El rotor de estos motores es de jaula de ardilla. El estator es de polos salientes, en el cual se arrolla la bobina principal como si fuese el primario de un transformador. En la parte extrema de cada polo se coloca una espira de cobre en cortocircuito (Figura 22.25). El devanado principal produce un campo magnético alternativo que atraviesa el rotor y las dos espiras en cortocircuito situadas en el estator. En estas espiras se induce una f.e.m. que hace que aparezca una pequeña corriente y un pequeño flujo magnético que queda retrasado respecto al flujo principal, lo que es suficiente para provocar un pequeño par de arranque en el motor.

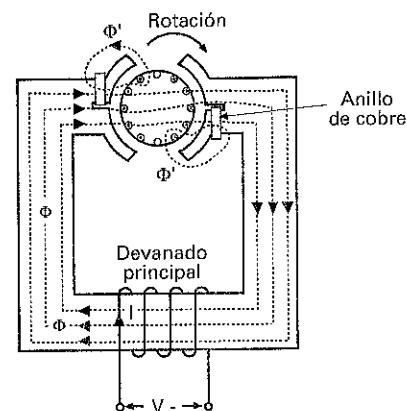


Figura 22.25. Motor monofásico con espira en cortocircuito.

El sentido de giro de estos motores depende de la disposición relativa de las espiras de cortocircuito y de los polos principales.

A pesar de que el par de arranque, el rendimiento y el factor de potencia de estos motores no es muy bueno, la gran sencillez de este motor lo hace ideal para aplicaciones de poca potencia y en los que el par de arranque no sea muy importante.

22.5.5 Motor trifásico como monofásico

Existe la posibilidad de hacer funcionar un motor trifásico conectándolo a una red monofásica. Para ello se realiza la conexión de una de sus fases mediante un condensador, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 22.26.

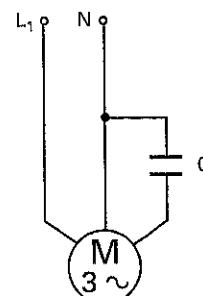


Figura 22.26. Motor trifásico funcionando como monofásico mediante condensador.

Este tipo de conexión sólo conviene realizarla para motores de pequeña potencia. Además la potencia útil que se consigue es inferior a la indicada en sus características nominales. Por otro lado, se reduce el par de arranque.

La capacidad recomendable para el condensador depende de la tensión y potencia del motor: para 125 V y 50 Hz se recomienda 200 μF de capacidad del condensador por cada KW de potencia del motor; para 220 V y 50 Hz, 70 μF por KW, y para 380 V y 50 Hz, 20 μF por KW.

22.5.6 Motor universal

El motor universal es un motor monofásico que se puede alimentar igualmente con C.C. o con C.A. En realidad se trata de un motor de C.C. con la excitación conectada en serie con el inducido, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 22.27.

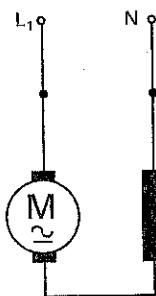


Figura 22.27. Esquema de conexiones de motor universal.

En los motores serie de C.C. el sentido de giro se invierte cuando cambiamos la polaridad de uno de sus dos devanados, el inducido o el inductor. Si invertimos el sentido de la corriente en los dos devanados a la vez, el sentido de giro no cambia. Ésta es la razón de por qué estos motores pueden funcionar también en corriente alterna, ya que en este caso se invierte el sentido de la corriente tantas veces como la frecuencia de la red.

En la práctica los motores diseñados para funcionar en corriente continua no funcionan adecuadamente en alterna, ya que las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas provocan fuertes calentamientos en los núcleos de hierro macizos. Además, aparecen fenómenos en los bobinados como la autoinducción, que limitan la circulación de corriente por los mismos. De esta forma, los motores universales se diseñan especialmente para funcionar con C.A., construyendo los núcleos con chapa magnética de hierro al silicio de alta permeabilidad, al igual que se hace con los motores de C.A.

Una de las principales ventajas de estos motores es que pueden funcionar a velocidades muy altas (por encima de las 10.000 r.p.m.). Además se puede regular fácilmente su velocidad, bien modificando la tensión total aplicada al motor, o la aplicada al circuito de excitación. Por contra, estos motores tienen el inconveniente de que al precisar de colector de delgas y escobillas, se producen chispas y desgastes en ambos elementos, que hacen aumentar la tareas de mantenimiento de los mismos.

Al igual que en los motores serie de C.C., la velocidad de estos motores disminuye con la carga aplicada, pudiéndose alcanzar velocidades excesivamente altas cuando trabajan en vacío.

La principal aplicación de estos motores es como elemento motriz de pequeños electrodomésticos y pequeñas máquinas herramientas: batidoras, robots de cocina, molinillos, taladradoras portátiles, etc.

22.6 Motor síncrono trifásico

La constitución de un motor síncrono trifásico es exactamente igual a la de un alternador trifásico. Este tipo de motor presenta la ventaja de que gira a una velocidad rigurosamente constante para diferentes regímenes de carga, siempre que se mantenga constante la frecuencia de alimentación.

Sin embargo, y como ya estudiaremos a continuación, estos motores no son capaces de arrancar por sí mismos, siendo necesario utilizar dispositivos auxiliares de arranque.

Cuando aplicamos C.A. al devanado trifásico, situado en el estator, de un motor síncrono, se produce un campo magnético giratorio que gira la velocidad síncrona. Si hacemos girar a las piezas polares del rotor a una velocidad igual, se produce una especie de acoplamiento entre los polos de distinta polaridad del rotor y los del campo giratorio, produciéndose un arrastre del rotor por parte de dicho campo giratorio (véase Figura 22.28). La velocidad del rotor coincide con la de sincronismo del campo giratorio.

$$n = \frac{60f}{p}$$

n = velocidad del motor síncrono (r.p.m.)

f = frecuencia de la red (Hz)

p = número de pares de polos del devanado estatónico

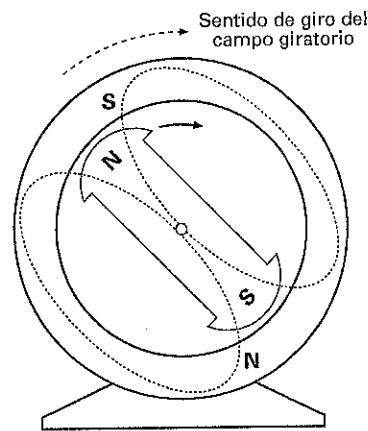


Figura 22.28. Motor síncrono trifásico.

El inconveniente principal de este motor es que necesita ser empujado hasta la velocidad de sincronismo para que pueda funcionar, por lo que se suelen arrancar en vacío. Para ello existen diferentes procedimientos, como son el arranque mediante motor auxiliar de lanzamiento o el arranque como motor asincrónico.

Estos motores necesitan de una fuente de C.C. para la alimentación de la excitación del rotor. Además, no se les puede someter a variaciones bruscas de la carga, ya que esto podría ocasionar la pérdida de la velocidad de sincronismo del rotor, provocando la parada del motor.

Las ventajas fundamentales que presentan estos motores es que desarrollan un factor de potencia muy alto, incluso alimentando adecuadamente a la excitación se puede conseguir que el factor de potencia sea capacitivo. Además, poseen un rendimiento muy bueno.

La utilización de motores trifásicos síncronos de mediana y gran potencia queda limitada a muy pocas aplicaciones. También se pueden construir pequeños motores síncronos monofásicos que consiguen una velocidad constante con una construcción relativamente sencilla. En estos casos el rotor no posee ningún tipo de bobinado y se construye de tal manera que se consigue que se formen polos magnéticos opuestos a los del campo giratorio generado por el estator. Estos pequeños motores son ideales para la construcción de relojes eléctricos, registradores y en todas aquellas aplicaciones en las que es importante mantener una velocidad constante.

22.7 Motores especiales

Con la aparición de las nuevas tecnologías se ha hecho necesario el desarrollo de pequeños motores eléctricos capaces de adaptarse en todo momento a las necesidades específicas de cada aplicación. La característica fundamental de estos motores es que poseen una amplio margen de control y regulación de sus características funcionales. Normalmente esta regulación se realiza mediante equipos electrónicos. Entre otros, cabe destacar los siguientes motores: motor paso a paso y *servomotor*.

22.7.1 Motor paso a paso

La principal característica de este motor es que podemos hacer que se posicione su eje en una determinada posición de giro; además, es posible tener un control muy preciso de su velocidad de giro.

El estator de estos motores está constituido por varias electroimanes y el rotor por uno o varios imanes permanentes (Figura 22.29). A las diferentes bobinas del estator se alimenta mediante impulsos, proporcionados normalmente por un circuito electrónico, consiguiendo que el rotor se posicione paso a paso según sea el avance de dichos impulsos.

La velocidad de giro del rotor depende de la frecuencia de los impulsos y del número de polos. Se fabrican motores con diferentes ángulos de paso, como por ejemplo, 24 pasos por revolución, 28, 96, 200, etc. De tal forma que si un motor paso a paso posee 24 pasos, su ángulo de paso será $24 / 360^\circ = 15^\circ$.

Entre otras, las aplicaciones de estos motores son: impresoras, plotters, teletipos, telefax, cintas magnéticas, equipos médicos, lectores de tarjetas magnéticas, taxímetros, contadores, etc.

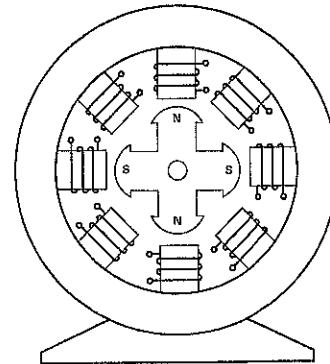


Figura 22.29. Motor paso a paso.

22.7.2 Servomotor

Estos motores son muy utilizados en las máquinas herramientas modernas. Su principal ventaja es que con ellos se consiguen movimientos precisos gracias a la regulación y control electrónica que se ejerce sobre ellos.

Se trata de motor de corriente continua de pequeña potencia en el que la excitación se realiza mediante imanes permanentes especiales de tipo cerámico que producen una elevada intensidad de campo magnético. El rotor es similar al de un motor de C.C. y es alimentado, a través de un colector, con C.C. regulada mediante circuitos electrónicos.

22.8 Ensayos de los motores de C.A.

De la misma forma que se hacía para los motores de C.C., a los motores de C.A. también se les somete a una serie de ensayos con el fin de determinar sus características y de analizar su comportamiento en diferentes situaciones de funcionamiento. De esta forma, se pueden realizar ensayos para determinar el rendimiento, para evaluar el calentamiento de la máquina para diferentes regímenes de funcionamiento, medición de la resistencia de aislamiento, medición de la rigidez dieléctrica, etc. Además, a través de los ensayos se pueden determinar las características electromecánicas de los motores, las cuales relacionan la velocidad de rotación (N), el par motor (C), y la corriente absorbida por el motor (I).

Al igual que hacíamos con los motores de C.C., aquí también necesitaremos dispositivos que sean capaces de medir el par motor y que además sean capaces de someter el motor a diferentes regímenes de carga. Para ello es posible utilizar frenos de polvo magnético o dinamo-freno, que acoplados al eje del motor pueden someterlo a diferentes pares de frenado, pudiéndose conocer en todo momento el par resistente aplicado.

Actividades

1. Observa detenidamente las partes de que consta los diferentes tipos de motores de C.A. que existen en el laboratorio de Electrotecnia y apunta las diferencias que existe entre cada uno de ellos, poniendo especial atención en las diferencias básicas entre un motor de C.C. y otro de C.A. Una vez hecho esto, realiza una clasificación de las máquinas eléctricas.
2. Consigue catálogos comerciales de todo tipo de motores y estudia sus características más relevantes.
3. Consigue los elementos necesarios para realizar el arranque directo de un motor asincrónico trifásico mediante contactores y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en este Capítulo. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor, así como un vatímetro y un voltímetro. Comprueba cómo el motor absorbe más corriente en el arranque. Con las lecturas de los aparatos de medida determina el factor de potencia del motor y calcula los condensadores necesarios para mejorar el factor de potencia a 0,95. Ahora conecta los condensadores y comprueba cómo se reduce la corriente con el factor de potencia mejorado.
4. Consigue los elementos necesarios para realizar la inversión de giro de un motor asincrónico trifásico y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en este Capítulo. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor y contrasta los valores de intensidad obtenidos en los siguientes casos: a) motor en marcha normal; b) motor invirtiendo su giro; c) motor arrancando.
5. Consigue los elementos necesarios para realizar el arranque estrella-triángulo de un motor asincrónico trifásico mediante contactores y lleva a cabo el montaje en el entrenador didáctico de los circuitos de fuerza y de mando expuestos en este Capítulo. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del circuito, intercala un amperímetro en una de las fases del motor y contrasta los valores de intensidad obtenidos en los siguientes casos: a) motor en conexión en estrella; b) motor en conexión en triángulo.
6. Vamos a estudiar el comportamiento del motor asincrónico trifásico en vacío y carga. Para ello conectaremos un motor trifásico a la red, tomando medidas de tensión, corriente, potencia y número de revoluciones del rotor mediante una tacodinamo. Una vez tomadas las medidas correspondientes se acoplará al eje del motor un freno de polvo magnético con posibilidad de medida del par motor. Ahora se le someterá al motor a diferentes pares de frenado para estudiar su comportamiento en carga. Toma las lecturas de todos los aparatos de medida para cada uno de los pares de frenado aplicados y con ellas: calcula el deslizamiento, el factor de potencia y traza una curva donde se represente el deslizamiento en función del par motor y otra donde se represente el par motor en función de la corriente.
7. Consigue un equipo para la regulación de velocidad de motores trifásicos de C.A. mediante variación de la frecuencia de alimentación. Estudia el comportamiento de un motor asincrónico trifásico cuando se le somete a diferentes frecuencias. Mide la frecuencia y velocidad del motor en diferentes puntos de funcionamiento y establece una relación entre dichas magnitudes.
8. Consigue un motor monofásico de inducción y conecta únicamente el bobinado principal a la red. Empuja el eje con la mano y consigue que el motor arranque en uno u otro sentido. Ahora conecta el bobinado auxiliar en paralelo con el principal. ¿Has conseguido que el motor arranque por sí solo? Si no es así, conecta un condensador en serie con el bobinado auxiliar y comprueba cómo arranca el motor. Invierte la conexión de una de las bobinas y comprueba cómo se invierte el sentido de giro del motor.
9. Consulta en Internet (<http://www.i2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) La velocidad de un motor asíncrono trifásico:
- Permanece constante con la frecuencia
 - Es siempre algo inferior a la velocidad del campo giratorio
 - Depende exclusivamente de la frecuencia y del número de polos del devanado estatórico
- 2) ¿Cómo habrá que conectar un motor de 127/220 a una red de 220 V?
- En estrella
 - En triángulo
- 3) ¿Cómo se consigue invertir el sentido de giro de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito?
- Invirtiendo la polaridad del devanado rotórico
 - Invirtiendo tres de las fases del devanado estatórico
 - Invirtiendo dos de las fases del devanado estatórico
- 4) ¿De qué tensiones tendrá que ser un motor para poder ser arrancado en Y-Δ en una red de 125 V?
- 125 V
 - 220/380
 - 125/220 V
- 5) ¿Qué número de pares de polos debe poseer el devanado estatórico de un motor asíncrono trifásico de inducción para conseguir una velocidad síncrona de 750 r.p.m. a 50 Hz?
- 6) Averiguar la velocidad síncrona de este motor para una frecuencia de 60 Hz.
- 7) ¿Cuál será el deslizamiento de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito de dos pares de polos a 50 Hz y a plena carga, si se mide con un tacómetro una velocidad de 1.425 r.p.m.?
- 8) Un motor asíncrono trifásico posee las siguientes características: potencia activa = 6 KW; 220 V; 60 HZ; $\cos \varphi = 0,89$; $\eta = 91\%$; pares de polos del devanado estatórico = 3; deslizamiento a plena carga = 2%. Calcular el par de rotación del rotor.
- 9) Se dispone de un motor asíncrono trifásico de rotor en cortocircuito tipo WT355M₁-2. Con la ayuda de las hojas de características, expuestas en la Tabla 6.1, averiguar: a) el deslizamiento; b) la intensidad cuando el motor trabaje a 4/4, 3/4 y 2/4 de su potencia nominal; c) la intensidad en el arranque; d) par nominal, par de arranque y par máximo.
- 10) Indica cuál de estos motores consigue mantener la velocidad constante para diferentes regímenes de carga.
- Motor síncrono
 - Motor universal
 - Motor asíncrono
- 11) Indica cuál de estos motores consigue una más fácil posibilidad de regulación de velocidad.
- Motor universal
 - Motor asíncrono monofásico de fase partida
 - Motor asíncrono trifásico como monofásico
- 12) Indica cuál de estos motores posee colector de delgas y escobillas.
- Motor paso a paso
 - Motor universal
 - Servomotor
- 13) Indica cuál de estos motores posee el mejor par de arranque.
- Motor síncrono trifásico
 - Motor de fase partida con condensador
 - Motor monofásico con espira de cortocircuito

Componentes Electrónicos Analógicos Básicos



Introducción

El sector electrónico ha conseguido hoy en día unas cotas de importancia en el sector productivo y de bienes de consumo que parecían inimaginables hace unos años. La electrónica y los componentes electrónicos comienzan su andadura a finales del siglo XIX con el desarrollo del diodo y del triodo de vacío. Con estos elementos ya era posible la amplificación de señales y multitud de aplicaciones. Con la invención del transistor bipolar a base de componentes de estado sólido, a finales de 1940, se produjo una verdadera revolución en el sector electrónico. El siguiente paso fue la aparición en 1959 del primer circuito integrado. Desde ese momento las posibilidades de miniaturización de los circuitos gracias al aumento de las posibilidades en la densidad de integración ha crecido exponencialmente, dando lugar a un nuevo concepto: la microelectrónica.

Contenido

- ✓ Resistencias para circuitos electrónicos.
- ✓ Los semiconductores.
- ✓ El diodo de unión.
- ✓ Aplicaciones del diodo a circuitos de rectificación.
- ✓ Filtro por condensador.
- ✓ El diodo Zener.
- ✓ El Zener como regulador de tensión.
- ✓ Dispositivos optoelectrónicos: diodos LED y fotodiodos.
- ✓ El transistor.
- ✓ Tiristores: el SCR, el diac, el triac y el UJT.

Objetivos

- ✓ Analizar la tipología y características funcionales de los componentes electrónicos analógico básicos y su aplicación en los circuitos electrónicos.
- ✓ Describir las curvas características más representativas de los componentes electrónicos básicos, explicando la relación existente entre las magnitudes fundamentales que los caracterizan.
- ✓ Interpretar los parámetros fundamentales de los componentes electrónicos básicos que aparecen en las hojas técnicas de los mismos.

23.1 Resistencias para circuitos electrónicos

En electricidad las resistencias cumplen una misión que ya todos conocemos, la de oponerse al paso de la corriente y transformar la energía eléctrica en calor. En unos casos este efecto es beneficioso (resistencias calefactoras de estufas y cocinas eléctricas, filamentos de lámparas incandescentes, etc.) y en otros perjudicial (calentamiento de conductores y pérdida de potencia).

En los circuitos electrónicos las resistencias cumplen un papel mucho más especial: permiten distribuir adecuadamente la tensión y la corriente eléctrica en los diferentes puntos del circuito. Para realizar esta correcta distribución se basan en todo momento en la ley de Ohm.

En los circuitos electrónicos estas corrientes y tensiones suelen ser muy pequeñas y por lo tanto las potencias que deben disipar también lo serán. Estas bajas potencias permiten construir las resistencias de pequeños tamaños con otro tipo de materiales más baratos y sencillos de manejar, tales como el carbón finamente troceado.

23.1.1 Tolerancia de una resistencia

Como ya sabemos la unidad de medida que caracteriza a una resistencia es el ohmio. Las resistencias se construyen con diferentes valores óhmicos, pero, ¿son exactos los valores que, según los fabricantes, poseen las resistencias?

Obtener en un proceso de fabricación una resistencia con un valor exacto es muy difícil. Es más, cuanto mayor sea la exactitud que se puede asegurar que tiene una resistencia, más se encarece el producto. De aquí nace el concepto de tolerancia. Éste indica los valores máximo y mínimo entre los que estará comprendida la resistencia. Estos valores se expresan como un porcentaje del valor en ohmios asignado teóricamente.

Ejemplo: 23.1

Se quieren determinar los valores en que puede estar comprendida una resistencia de 100Ω , si el fabricante asegura que ésta posee una tolerancia de $\pm 8\%$.

Solución: El 8% de 100Ω es exactamente 8Ω . Los valores buscados son: $100 + 8 = 108 \Omega$

$$100 - 8 = 92 \Omega$$

Si nosotros realizásemos ahora una verificación del valor óhmico de esta resistencia con un óhmetro de precisión y obtuviésemos un resultado menor que 92Ω o mayor que 108Ω , la medida mostraría que dicha resistencia no cumple con la tolerancia marcada.

Las tolerancias están normalizadas, de tal forma que sólo existen en el mercado resistencias con los siguientes valores:

- $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$
- $\pm 1\%$ y $\pm 2\%$ para resistencias de gran precisión.
- $\pm 5\%$ y $\pm 10\%$ son las más utilizadas en la práctica.
- $\pm 20\%$ están prácticamente en desuso.

23.1.2 Código de colores

La forma de inscribir el valor de una resistencia para que después sea fácilmente identificable a simple vista, es la de utilizar una serie de anillos de colores pintados sobre la superficie del cuerpo de la resistencia, que mediante un código permite cubrir toda la gama de valores de resistencias existentes en el mercado.

La razón de utilizar éste sistema es debido a que el reducido tamaño de éstas impide que sobre ellas puedan inscribirse cifras que sean legibles.

Toma una resistencia y obsérvala. Apreciarás que existen tres anillos de diferentes colores y un cuarto un poco más separado de éstos. Los tres primeros anillos que vamos a denominar A, B y C dan la clave del valor óhmico y el cuarto indica la tolerancia (Figura 23.1).

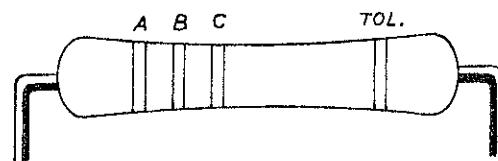


Figura 23.1. Las resistencias poseen una serie de anillos de color que nos indican el valor óhmico.

En la Tabla 23.1 está representado el código de colores:

COLOR	A		B		C	Multiplicador	Tolerancia
	1º dígt	2º dígt	1º dígt	2º dígt			
Negro	0		0		x1		$\pm 1\%$
Marrón	1		1		x10		$\pm 2\%$
Rojo	2		2		x100		
Naranja	3		3		x1000		
Amarillo	4		4		x10000		
Verde	5		5		x100000		
Azul	6		6		x1000000		

Violeta	7	7	x10000000
Gris	8	8	x100000000
Blanco	9	9	x1000000000
Oro	-	-	x0,1
Plata	-	-	x0,01
Sin.color	-	-	± 5% ± 10% ± 20%

Tabla 23.1. Código de colores.

Ejemplo: 23.2

Determinar el valor óhmico y la tolerancia de una resistencia que aparece con los colores Rojo, Azul, Naranja y Plata.

Solución: Situemos las cifras que van asociadas a los colores en el orden que aparecen inscritos los mismos:

Rojo – Azul – Naranja – Plata

(2) (6) (x1.000) (± 10%)

$$26 \cdot 1.000 = 26.000 \Omega = 26 \text{ K}\Omega \pm 10\%$$

23.1.3 Potencia de disipación de una resistencia

La misión de una resistencia en un circuito electrónico no es precisamente la de calentarse, pero resulta inevitable que se produzca este fenómeno. Este calentamiento dependerá de la mayor o menor potencia a que esta resistencia trabaje. Dicha potencia, a su vez, dependerá de los valores de tensión e intensidad a que esté sometida la misma.

Cuanto mayor sea la potencia a la que deba trabajar una resistencia, el calentamiento será mayor, corriendo el riesgo de que ésta se queme si no se diseña de forma adecuada.

Lógicamente, cuanto mayor sea el tamaño de la resistencia, mejor podrá evacuar o disipar el calor que produce. Es por esta razón que se fabrican resistencias de varios tamaños.

De tal forma que las resistencias aumentan de tamaño de acuerdo con la potencia a disipar.

En el mercado existen resistencias que van desde 1/8 de vatios (0,125 W) hasta más de 100 W (Figura 23.2).

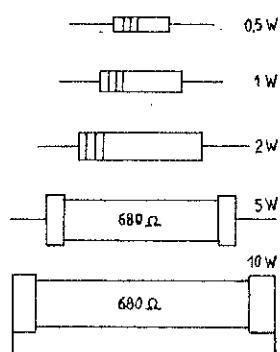


Figura 23.2. Tamaño de las resistencias en función de su potencia.

23.1.4 Clasificación de las resistencias

Existen en el mercado varios tipos de resistencias confeccionadas con diferentes procesos de fabricación. Esta amplia gama permite la elección del tipo más idóneo para cada aplicación específica.

En la Tabla 23.2 se muestra una clasificación de los diferentes tipos de resistencias.

CLASIFICACIÓN DE LAS RESISTENCIAS		
Fijas	Variables	Resistencias dependientes
– Aglomeradas	– Potenciómetros de capa	NTC
– De película de carbón	– Potenciómetros bobinados	PTC
– De película metálica	– Potenciómetros multivuelta	LDR
– Bobinadas	– Potenciómetros miniatura	VDR

Tabla 23.2

23.1.5 Resistencias fijas

Como su nombre indica, poseen un valor de resistencia fijo.

Resistencias aglomeradas: están constituidas por una mezcla de grafito (o carbón), y un material aislante (resina, talco, etc.), en las proporciones adecuadas para obtener una determinada gama de valores.

En los extremos del cilindro se colocan unos casquillos a presión donde van soldados los hilos. Por último, se recubre el conjunto por una resina o se plastifica y se pintan los colores que indicarán el valor de la resistencia.

El inconveniente que presentan es que su valor cambia en exceso con la temperatura, por lo que son poco empleadas.

Resistencias de película de carbón: es la más usada para pequeñas potencias. Consiste en un cilindro aislado en el que se deposita una delgada película de carbón con dos casquillos metálicos en los extremos (Figura 23.3).

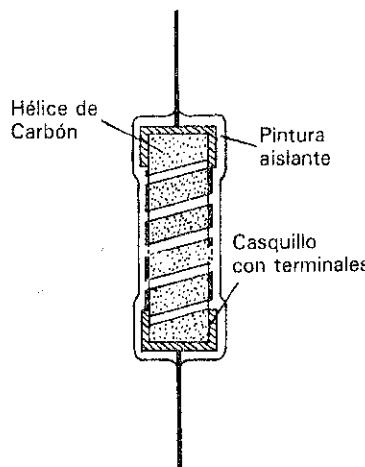


Tabla 23.3. Resistencia de película de carbón.

Para obtener el valor óhmico de la resistencia, se practican unos surcos en espiral a lo largo de la película de carbón. Con un control preciso del paso de la espiral, se fabrican resistencias de muchos valores y de buena precisión.

Sobre este conjunto se deposita la capa de esmalte y se pintan los anillos de colores.

Resistencias de película metálica: Estas resistencias son básicamente iguales que las anteriores, con la diferencia de que utilizan una película de una aleación metálica, que las hace muy estables con la temperatura. Con ellas se consiguen unas tolerancias muy bajas.

Resistencias bobinadas: Están fabricadas a base de bobinar hilo resistivo (generalmente una aleación de Ni-Cr-Al) sobre un cilindro aislante hasta obtener el valor óhmico deseado. Se utilizan para grandes potencias, por lo que el recubrimiento exterior es de porcelana o esteatita. La tolerancia habitual es del 10% y son capaces de disipar potencias por encima de los 100 vatios (Figura 23.4).

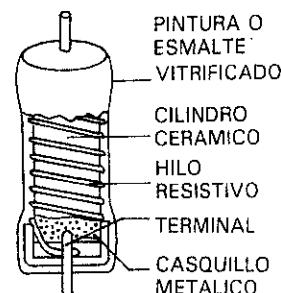


Figura 23.4. Resistencia bobinada.

23.1.6 Resistencias variables

Son resistencias a las que se les puede modificar su valor óhmico desde cero hasta un valor máximo.

Estas resistencias, también llamadas potenciómetros, se utilizan para ajustar las magnitudes eléctricas de los circuitos, o bien como control externo de aparatos electrónicos de uso general, tales como control de volumen, luminosidad de una pantalla de televisión, etc.

La estructura de estas resistencias consiste en una resistencia fija (que puede ser de película de carbón o bobinada) construida sobre un soporte circular por el cual se desplaza un contacto móvil o cursor (Figura 23.5). Este contacto está unido a un tercer terminal de conexión. De esta forma puede obtenerse el valor óhmico que se desee entre cualquiera de los extremos del potenciómetro y el punto móvil.

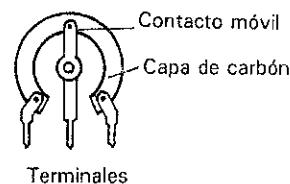


Figura 23.5. Resistencia variable.

23.1.7 Resistencias dependientes

Existen algunas aplicaciones prácticas en las que es de gran utilidad disponer de componentes cuya resistencia óhmica se modifique bajo la acción de una variable física, como la temperatura, luz, tensión, presión, tracción mecánica, etc.

23.1.7.1 Resistencias dependientes de la temperatura

Por lo general, las resistencias fabricadas con materiales metálicos modifican su valor óhmico con la temperatura. En la mayoría de los metales el coeficiente de temperatura es positivo, lo que significa que la resistencia tiende a aumentar un poco con la temperatura. Pues bien, se pueden fabricar resistencias a base de óxidos semiconductores que exageren esta dependencia del valor óhmico con la temperatura. De esta

forma, se pueden construir resistencias con coeficiente de temperatura negativo (NTC) y resistencias con coeficiente de temperatura positivo (PTC).

Este tipo de resistencias será de gran utilidad para aplicaciones en las que sea necesario el control, compensación, regulación y medida de la temperatura.

Experiencia 23.1: Consigue una resistencia NTC y, mediante el óhmetro, mide su valor óhmico a temperatura ambiente. Seguidamente, y sin desconectar el aparato de medida, acerca paulatinamente a la superficie de la NTC una lámpara incandescente encendida, para conseguir así aumentar la temperatura de la misma (Figura 23.6). Comprueba que el valor óhmico de la resistencia se hace más pequeño con los aumentos de la temperatura.

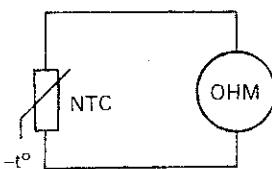


Figura 23.6. La NTC disminuye su resistencia al aplicar calor.

Répite la misma experiencia con una resistencia PTC.

Como sus siglas nos indican (NTC, Negative Temperature Coefficient), las NTC (Figura 23.7) son resistencias que poseen un coeficiente de temperatura negativo, lo que significa que su valor óhmico disminuye rápidamente cuando aumenta la temperatura.

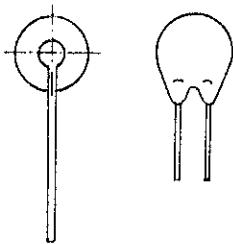


Figura 23.7. Resistencias NTC.

El valor nominal de la resistencia de estos componentes se especifica habitualmente para una temperatura de 25 °C. En la Figura 23.8 se puede apreciar la dependencia del valor óhmico de tres NTC en función de la temperatura.

La sensibilidad de las resistencias NTC es bastante más elevada que la de los termómetros y termopares convencionales. Se pueden fabricar resistencias NTC que modifiquen su valor óhmico en varios miles de ohmios por cada grado centígrado de temperatura, por lo que son ideales para la construcción de termómetros de precisión en los que sea importante la medición de pequeñas variaciones de temperatura.

Las aplicaciones prácticas que se hacen de las resistencias NTC, son: construcción de termómetros de resistencia, compensación térmica de instrumentos de medida, alarmas, construcción de sistemas de regulación y control.

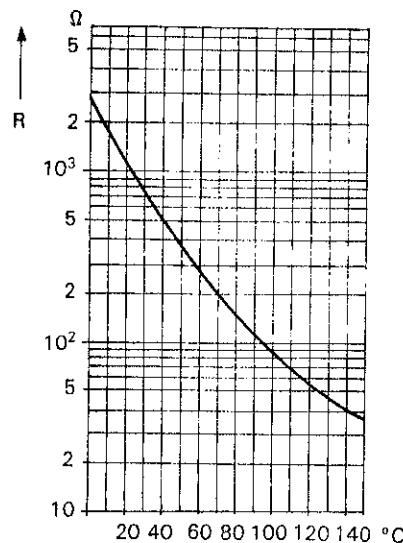


Figura 23.8. Característica de una NTC.

Al contrario que las NTC, las PTC son resistencias que poseen un coeficiente de temperatura positivo (PTC, Positive Temperature Coefficient). Estas resistencias aumentan rápidamente su valor óhmico al aumentar la temperatura.

Las aplicaciones prácticas de las resistencias PTC son similares a las de las NTC. Si bien, su campo de aplicación se ve más restringido por el estrecho margen de temperaturas a las que pueden operar.

23.1.7.2 Resistencias dependientes de la luz, LDR

Las resistencias LDR (Figura 23.9) (Light Dependent Resistor) son componentes que modifican su resistencia eléctrica de acuerdo con la intensidad luminosa que inciden sobre su superficie. Esta interesante propiedad es de gran utilidad para la fabricación de dispositivos de control, regulación y medida que estén relacionados con la luz, como son: regulación automática del contraste y brillo de los televisores en función de la intensidad de la luz de la estancia de visión, medida de la intensidad lumínosa para cámaras fotográficas (fotómetros), conexión y desconexión de la iluminación urbana según la intensidad de la luz solar, detectores para alarmas, etc.

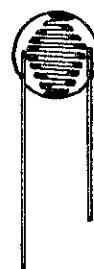


Figura 23.9. LDR.

Experiencia 23.2: Consigue una resistencia LDR y, mediante el óhmetro, mide su valor óhmico, procurando que no llegue nada de luz a la misma. Seguidamente, y sin desco-

nectar el aparato de medida, somete a la LDR a intensidades de luz creciente (Figura 23.10). Comprueba cómo el valor óhmico de la resistencia cambia con las diferentes iluminaciones.

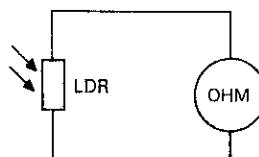


Figura 23.10. La LDR disminuye su resistencia con la intensidad de la luz.

En conclusión, una resistencia LDR posee una resistencia muy elevada a plena oscuridad y su resistencia eléctrica disminuye según se aumenta la intensidad luminosa (lux). En la Figura 23.11 se muestra la curva característica de una LDR.

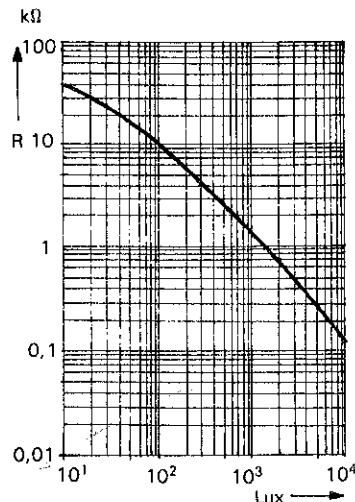


Figura 23.11. Característica de una LDR.

23.1.7.3. Resistencias dependientes de la tensión, VDR

Las resistencias VDR (Voltage Dependent Resistor) son componentes que modifican su resistencia eléctrica de acuerdo con la tensión que se aplica entre sus extremos. El valor de la resistencia disminuye al aumentar la tensión aplicada entre los extremos de la VDR, tal como se puede apreciar en la curva característica de la Figura 23.12.

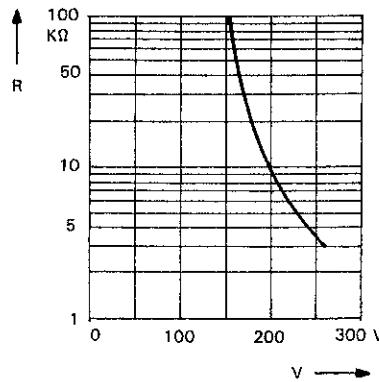


Figura 23.12. Característica de una VDR.

Una de las aplicaciones de las resistencias VDR es la estabilización de tensiones, con lo que puede evitarse las chispas que se producen en los contactos de elementos de accionamiento cuando éstos se abren con cargas inductivas y con ello, el desgaste irregular que esto produce.

En la Figura 23.13 se muestra el circuito correspondiente a la extinción de arcos en contactos mediante una VDR. Cuando se abre el contacto del interruptor, la bobina desarrolla una fuerza electromotriz elevada debido al fuerte coeficiente de autoinducción que ésta posee; esta elevada tensión provoca un arco entre los contactos que, con el tiempo, se acaban deteriorando; la VDR disminuye su valor óhmico drásticamente cuando se produce esta sobretensión, canalizando la energía producida por la bobina a través de la VDR, evitando así dicho arco.

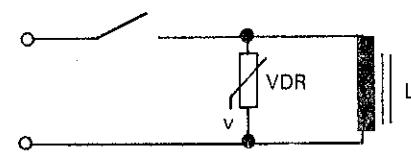


Figura 23.13. Extinción de arcos mediante VDR.

23.2 Los semiconductores

Los semiconductores han revolucionado el mundo de la electrónica. Con ellos han aparecido los diodos, transistores, tiristores y demás componentes electrónicos construidos gracias a los semiconductores que han sustituido a las válvulas electrónicas. Por otro lado, con la aparición de los circuitos integrados, que suplen la función de grandes cantidades de diodos, transistores, resistencias, condensadores y cualquier tipo de componente electrónico, se ha dado el gran paso hacia el futuro de la electrónica. Las ventajas que poseen los semiconductores es que son de reducido tamaño, pequeño consumo y bajo precio. En la Figura 23.14. se muestran los símbolos eléctricos de los semiconductores más comunes, y en la Figura 23.15 el aspecto de los mismos.

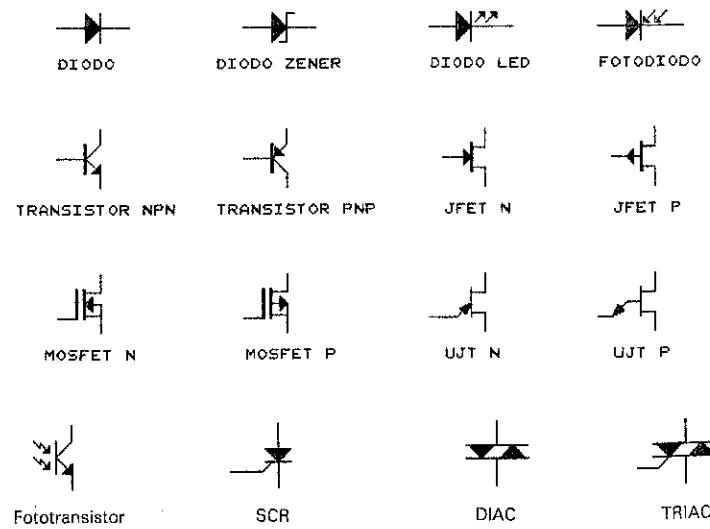


Figura 23.14. Símbolos eléctricos de los semiconductores.

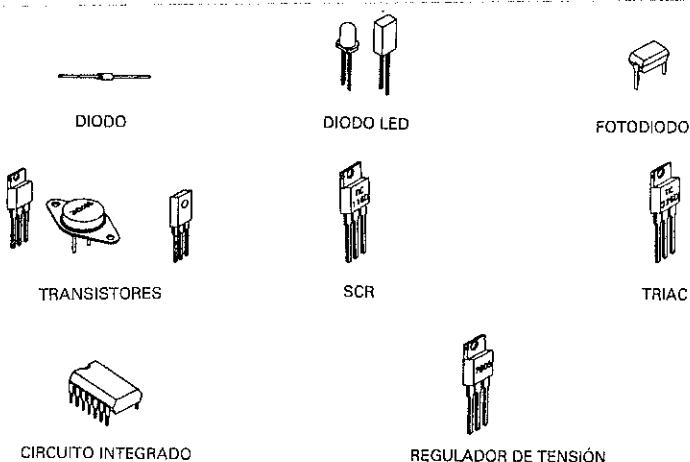


Figura 23.15. Aspecto de los semiconductores.

23.3 El diodo como semiconductor

El diodo es un elemento semiconductor que sólo permite la circulación de corriente en un sentido único (Figura 23.16).

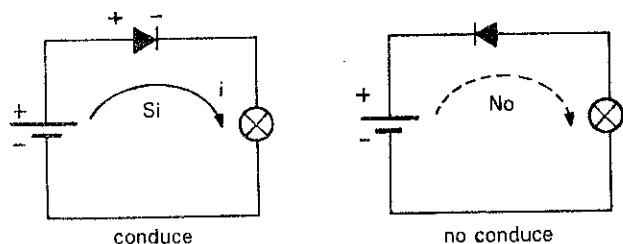


Figura 23.16

Su aplicación es especialmente interesante en aquellos dispositivos en que sea necesario esta cualidad, como, por ejemplo, en los rectificadores, que son capaces de convertir la C.A. en C.C.

Antes de pasar a estudiar los diodos de unión conviene tener una idea muy clara de lo que es un semiconductor.

Existen ciertos cuerpos como, por ejemplo, el selenio, el germanio y el silicio en los que en condiciones normales son aislantes, pero con ciertas modificaciones de su organización molecular se pueden convertir en conductores. Esto es debido a que en su estructura cristalina no se dispone de electrones libres capaces de establecer una corriente eléctrica; sin embargo, los electrones de sus últimas órbitas pueden ser liberados artificialmente, por lo que se convierten en cuerpos conductores. El procedimiento más habitual para conseguirlo consiste en introducir en el interior de estos materiales sustancias con una estructura atómica determinada.

Experiencia 23.3: Consigue un diodo y conéctalo intercalado en el circuito de una pila y una lamparita (Figura 23.17). Si conectas el cátodo del diodo (terminal negativo indicado por una raya en el componente) en el polo negativo de la pila, observarás que dicha lamparita se enciende. Sin embargo, si inviertes las conexiones del diodo la lamparita no se encenderá.

En definitiva el diodo actúa como un interruptor que estará cerrado en caso de estar bien polarizado, y abierto cuando la polarización esté invertida.

Esta propiedad es muy interesante y está motivada por la estructura interna del diodo. En efecto, este componente está constituido por la unión de dos cristales semiconductores, uno de tipo P y otro de tipo N (Figura 23.18).

Estos cristales son de silicio o de germanio con la adición de algún otro elemento que les confiere una cierta polaridad, ya sea P (exceso de cargas positivas) o N (exceso de negativas).

¿Cómo se forman estos cristales?

Estudiemos el caso del silicio como cuerpo semiconductor, por ser el más utilizado.

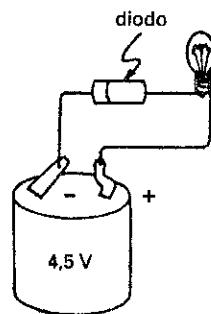


Figura 23.17

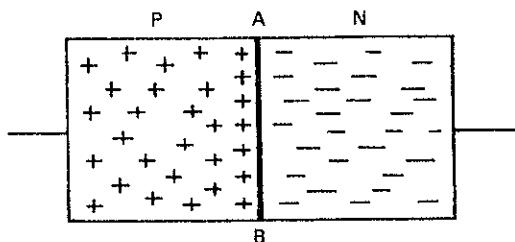


Figura 23.18. Unión de dos cristales tipo P y N.

23.3.1 Características atómicas del silicio

Es un cuerpo cristalino cuyas moléculas tienen formas geométricas regulares. Por otro lado, posee 4 electrones de valencia, es decir, que en su órbita exterior sólo existen cuatro electrones (Figura 23.19). Como se sabe, todo cuerpo precisa de 8 electrones de valencia para que mantenga una estabilidad normal. El silicio es un cuerpo estable con sólo 4 electrones de valencia, ya que se complementa con cuatro electrones de los átomos vecinos (enlace covalente) y así suma los 8 electrones precisos para su estabilidad.

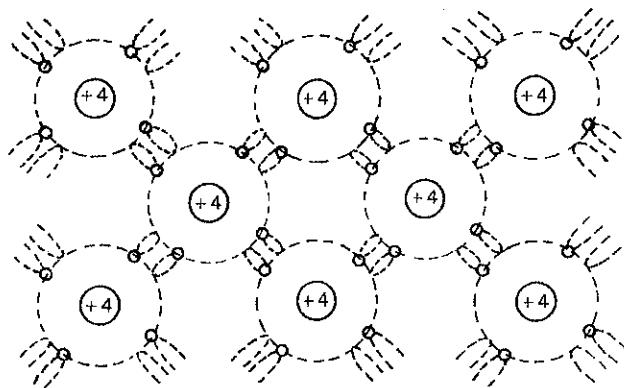


Figura 23.19. Enlaces covalentes en el silicio.

En estas condiciones, el átomo de silicio es completamente aislante, ya que no existen en su seno electrones libres capaces de establecer una corriente eléctrica.

Silicio tipo N: Existen elementos, como el antimonio, el arsénico, etc., que poseen 5 electrones de valencia. Si uno de estos elementos lo unimos con el silicio, se producirán enlaces covalentes incompletos, ya que uno de los electrones de estos elementos quedará libre por estar las órbitas completas. El resultado de la combinación del silicio con la impureza de antimonio es un cristal denominado silicio tipo N, ya que existen cargas negativas libres (Figura 23.20).

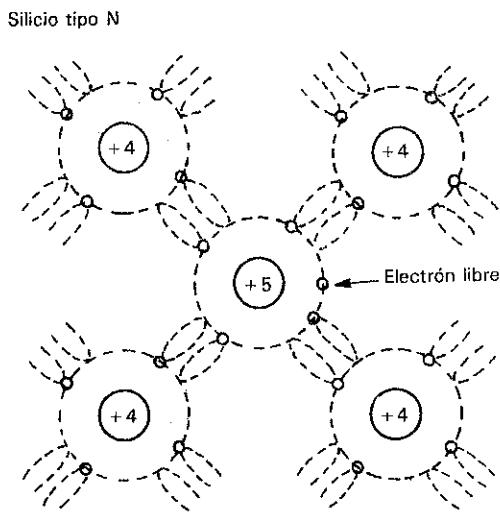


Figura 23.20. Enlaces covalentes incompletos de un cristal de silicio tipo N.

Silicio tipo P: De la misma forma que en el caso anterior, si al silicio en estado puro se le introducen impurezas que, en vez de tener cinco electrones de valencia, sólo dispongan de tres, como el indio, el aluminio, galio, boro, etc., el enlace covalente será, otra vez, incompleto (Figura 23.21).

El átomo de impureza, al tener sólo tres electrones, no llega a llenar todos los huecos, pues sólo satisface las necesidades de tres de los cuatro átomos de silicio. Se necesita pues un electrón más para llenar ese hueco.

Estos huecos representan una falta de electrones y producen una naturaleza positiva al cristal, que en este caso se denomina silicio tipo P.

Silicio tipo P

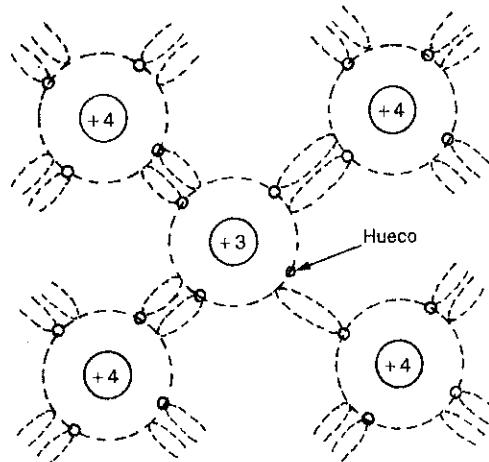


Figura 23.21. Enlaces covalentes incompletos en un cristal P.

23.3.2 El diodo de unión

El diodo de unión se forma al juntar un cristal tipo P con otro tipo N. Da la impresión de que al juntar estos dos cristales de cargas opuestas, en la unión AB se producirá una neutralización de cargas, pero no es así ya que en dicha unión aparece una pequeña barrera por efecto de la repulsión que evita este fenómeno.

Ahora bien, si conectamos una batería al diodo (Figura 23.22), de tal forma que el polo positivo de éste coincida con el cristal tipo P y el negativo con el cristal tipo N, las cargas negativas serán repelidas hacia la superficie de la unión con gran fuerza y vencerán de este modo la barrera AB. Por lo tanto, se producirá una corriente eléctrica I_F a través del diodo, neutralizándose los electrones con los huecos.

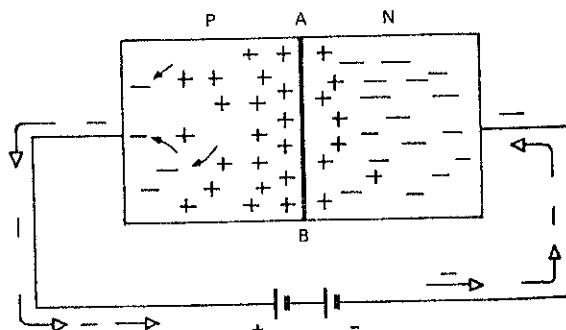


Figura 23.22. Polarización directa de un diodo de unión.

Veamos ahora qué pasaría si conectásemos la batería en sentido contrario (Figura 23.23).

Los electrones libres del cristal N se sentirán atraídos por el polo positivo de la batería y los huecos por el polo negativo de la misma, creándose en la unión AB una especie de vacío que evita la circulación de corriente a través del diodo. En este caso se ha conectado el diodo en sentido inverso. A pesar de ello siempre existe una pequeña corriente de fuga que recibe el nombre de *corriente inversa del diodo* (I_R).

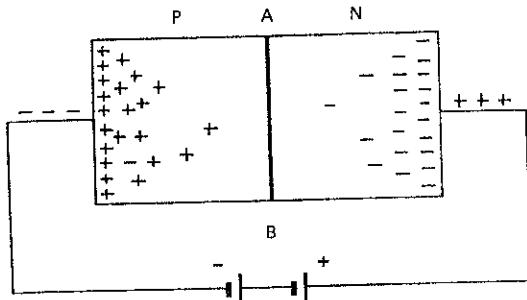


Figura 23.23. Polarización inversa del diodo de unión.

Para que el diodo conduzca polarizado en sentido directo necesita ser sometido a una tensión mínima de polarización, que en el caso del germanio es de 0,2 V, y de 0,6 V para el silicio.

Las características de los diodos semiconductores varían grandemente con la temperatura. De tal forma que, cuanto mayor sea la temperatura de la unión, mayor será el número de electrones libres y, por tanto, aumentará la corriente de conducción. En el germanio estas variaciones son excesivas, por encima de los 75 °C se hace difícil su utilización, mientras que el silicio puede emplearse hasta los 200 °C aproximadamente. En la actualidad la gran mayoría de semiconductores son de silicio.

23.3.3 Características en polarización directa de un diodo

Obtener las características de polarización de un diodo significa determinar la relación existente entre los diferentes valores de la tensión de polarización (V_F) y la corriente directa (I_F).

Para obtener experimentalmente esta relación habría que realizar el ensayo que se muestra en la Figura 23.24. En la misma, la lectura de V_F indica la tensión de polarización directa en voltios y la lectura de la corriente directa I_F .

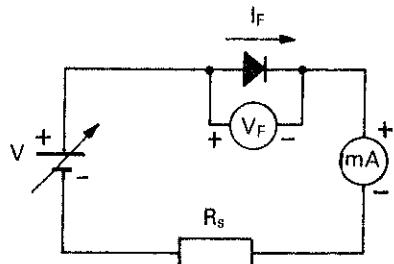


Figura 23.24. Circuito para obtener la curva de polarización directa de un diodo.

En la Figura 23.25 se puede apreciar la curva característica de polarización del diodo ensayado. La curva tiene forma exponencial en las proximidades del cero y se acerca al valor de la intensidad de corriente máxima admisible a medida que aumenta la tensión. Esto indica que la resistencia del diodo es de muy bajo valor y que disminuye rápidamente al aumentar la tensión.

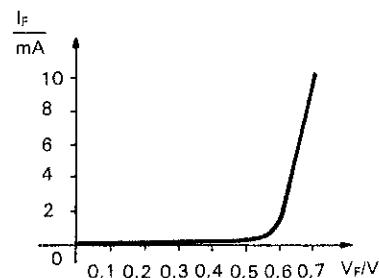


Figura 23.25. Curva de polarización directa de un diodo.

Cuando nosotros polarizamos directamente un diodo, éste no comienza a conducir de una forma apreciable hasta que le apliquemos la mínima diferencia potencial de barrera, conocida por el nombre de **tensión umbral**. En el caso del germanio esta tensión es de 0,2 V y en el del silicio 0,6 V. Por debajo de esta tensión la corriente es muy pequeña, y por encima aumenta considerablemente

23.3.4 Características en polarización inversa de un diodo

Para obtener la curva característica inversa bastará con invertir la corriente del diodo, de tal forma que el cristal N esté conectado al positivo de la pila y el P al negativo (Figura 23.26).

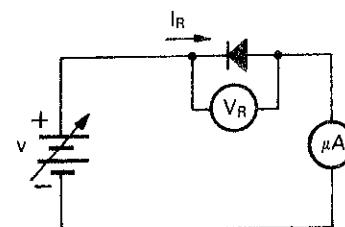


Figura 23.26. Circuito para obtener la característica inversa de un diodo.

Ya se expuso anteriormente que, cuando el diodo queda sometido a una tensión inversa V_R , aparece una pequeña corriente de fuga I_R , a la cual denominábamos corriente inversa. Esta corriente es del orden de unos nA, tal como se puede apreciar en la curva de la Figura 23.27 correspondiente a la característica inversa del diodo.

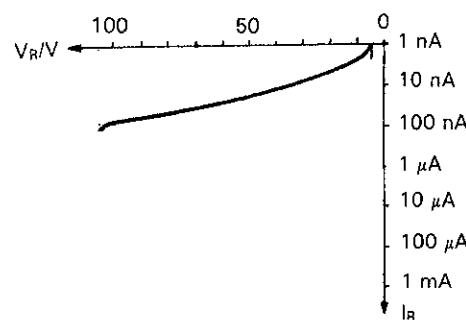


Figura 23.27. Característica inversa de un diodo.

Observa que, según se aumenta la tensión inversa, también lo hace la corriente, hasta que se llega a un valor V_Z , llamado tensión de ruptura del diodo. En este momento aparece un efecto de avalancha y aumenta bruscamente la intensidad de corriente inversa, lo que provoca la destrucción del diodo por la excesiva disipación de calor.

Por supuesto, a la mayoría de los diodos no se les permite llegar a la ruptura. Para que esto no ocurra, es necesario diseñar las condiciones de trabajo del diodo con una tensión inversa siempre menor a su tensión de ruptura.

23.3.5 Potencia y corriente nominal

Un diodo se diseña para trabajar óptimamente en unas condiciones nominales determinadas. Existen dos formas de provocar la destrucción de un diodo:

- Exceder la tensión inversa de ruptura.
- Exceder la potencia máxima nominal.

Como ocurría con las resistencias, los diodos poseen una cierta capacidad de disipar el calor que se produce en su unión. Este calor depende de la potencia a la que trabaja el diodo, que depende, a su vez, del producto de la corriente por la tensión del mismo.

Si la potencia que se produce en el diodo es superior a la capacidad de disipación del mismo, éste aumentará excesivamente su temperatura y acabará deteriorándose.

Existen algunos fabricantes que especifican la potencia nominal de sus diodos en las hojas de información técnica. No obstante, lo normal es que en estas informaciones únicamente aparezca la corriente máxima de polarización directa. Bastará con no sobrepasar este valor para que en ningún caso se supere la potencia máxima nominal.

23.3.6 Aplicación de los diodos a circuitos de rectificación

Como circuito rectificador se conoce aquél que tiene la función de convertir o rectificar la C.A. en C.C. Dependiendo del número de diodos que utilicemos y cómo los conectemos se pueden construir rectificadores de media onda y de onda completa, tanto para sistemas monofásicos como trifásicos.

23.3.6.1 Circuito rectificador monofásico de media onda

Cuando se introduce una tensión de C.A. a la entrada del circuito, mostrado en la Figura 23.28 en la salida aparece una tensión de C.C. pulsante. La resistencia R_L representa al receptor al que se le suministra C.C.

Este circuito funciona de la siguiente forma: en el momento en que los valores instantáneos de la tensión son positivos, y superiores a la tensión umbral del diodo (recuerda: 0,6 V para el silicio y 0,3 V para el germanio), éste se polariza directamente y, por tanto, aparece una corriente eléctrica por R_L . En el instante en que la tensión cambia de positiva a negativa, (siguiente semiciclo), el diodo queda polarizado inversamente y, no teniendo en cuenta la corriente de fuga, la corriente por R_L se interrumpe. Por esta razón, este semiciclo no aparece en la curva de la tensión continua de la salida.

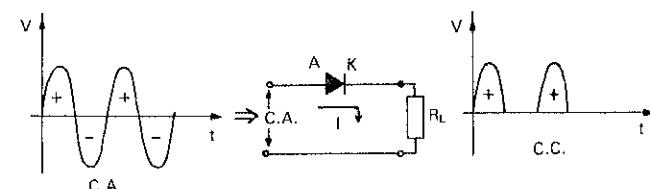


Figura 23.28. Circuito rectificador de media onda.

23.3.6.2 Circuito rectificador monofásico de onda completa

El circuito rectificador de media onda no proporciona una corriente continua demasiado perfecta. Esto es debido a que sólo es rectificada la mitad de un ciclo de la corriente alterna.

Para mejorar la calidad de la tensión continua rectificada, de tal forma que queden rectificados tanto los semiciclos positivos como los negativos, se hace necesario utilizar otro tipo de circuitos, como el puente rectificador, denominados de onda completa. El puente rectificador consta de cuatro diodos (Figura 23.29) que en muchos casos se encierran en un componente compacto.

Veamos a continuación en qué consiste su funcionamiento.

En el semiciclo positivo los diodos D_2 y D_3 se polarizan directamente, lo que provoca la circulación de una corriente por la carga R_L en la dirección que se muestra en la Figura 23.29 a. Por otro lado, los diodos D_1 y D_4 están polarizados inversamente y no conducen.

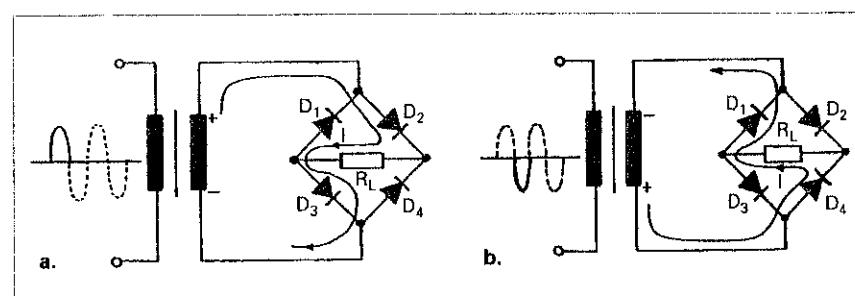


Figura 23.29. Funcionamiento del puente rectificador: a) Conducen los diodos D_2 y D_3 mientras que D_1 y D_4 permanecen bloqueados; b) conducen D_1 y D_4 mientras que D_2 y D_3 bloquen la corriente.

En el semiciclo negativo los diodos D_1 y D_4 comienzan a conducir por estar polarizados directamente, y dejan de hacerlo D_2 y D_3 . La dirección de la corriente que se establece por R_L es la misma que en el caso anterior (Figura 23.29 b).

En conclusión, la tensión que aparece en la carga posee siempre la misma polaridad, tal como se muestra en la Figura 23.30.

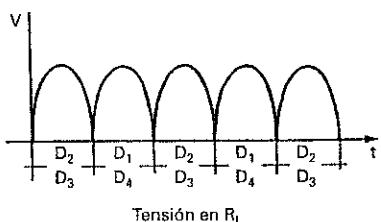


Figura 23.30. Tensión de salida de un puente rectificador.

23.3.6.3 Circuito rectificador trifásico de media onda

Cuando se quieren obtener grandes potencias de salida de C.C. resulta más conveniente la utilización de circuitos rectificadores trifásicos. Mediante estos circuitos se consigue mejorar sensiblemente la uniformidad de la tensión continua de salida.

En la Figura 23.31 se muestra el circuito correspondiente a un rectificador trifásico de media onda. En él se conectan tres diodos a la salida de un transformador trifásico con el secundario conectado en estrella. De esta forma, los diodos se conectan a cada una de las tensiones de fase del transformador, constituyendo tres circuitos monofásicos de media onda.

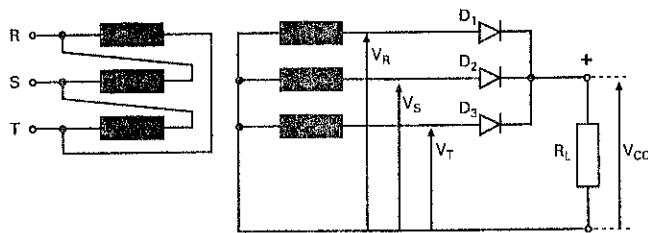


Figura 23.31. Circuito de un rectificador trifásico de media onda.

Como se aprecia en los gráficos de la Figura 23.32, correspondientes a la tensión de salida del rectificador, cada uno de los diodos conduce durante el tiempo que la tensión de fase correspondiente posee un valor más alto que las otras dos. La corriente fluye por cada uno de los diodos alternativamente, de tal forma que cada uno de los mismos sólo conduce durante un tercio de la corriente de salida. Para calcular la corriente por cada uno de los diodos habrá que dividir por tres la corriente por la carga.

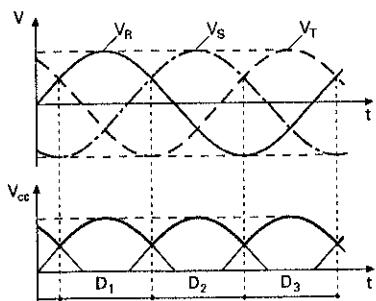


Figura 23.32. Tensión de entrada y salida de un rectificador trifásico de media onda.

23.3.6.4 Circuito rectificador trifásico de onda completa

Al igual que ocurría con los monofásicos, con este circuito rectificador se consigue una tensión continua de salida mucho más uniforme que con el de media onda. Además no requiere del neutro para su conexión. Por estas razones, el rectificador de onda completa es el que se emplea en aplicaciones industriales.

En la Figura 23.33 se muestra el circuito correspondiente a un rectificador trifásico de onda completa, donde se conectan tres pares de diodos rectificadores en paralelo con la carga a alimentar, conectándose los puntos de interconexión de los mismos a cada uno de los terminales de salida del transformador trifásico.

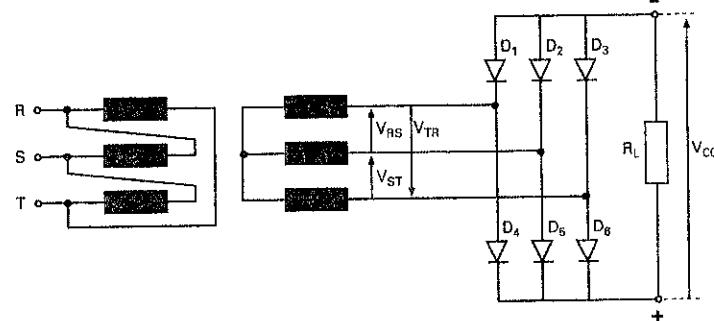


Figura 23.33. Circuito de un rectificador trifásico de onda completa.

Como se puede comprobar en la Figura 23.34, cada pareja de diodos se va sucediendo en la conducción, apareciendo en la salida una tensión continua con seis pulsos por período.

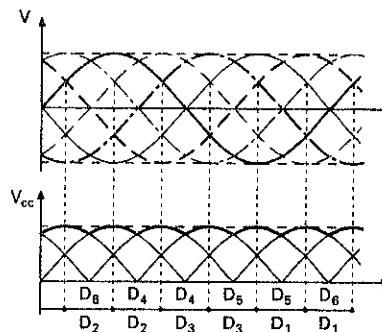


Figura 23.34. Tensión de entrada y salida de un rectificador trifásico de onda completa.

23.3.6.5. El filtrado

La corriente de salida de un rectificador no se corresponde a una corriente continua ideal, como por ejemplo la que proporcionan las pilas y acumuladores. Normalmente esta corriente es de tipo pulsatorio, lo cual implica que existen variaciones de amplitud en la misma. Este tipo de corriente no es muy recomendable en la mayoría de las aplicaciones, sobre todo para la alimentación de equipos electrónicos. Así, por ejemplo, si alimentásemos un amplificador de sonido, o un receptor de radio, con un circuito rectificador sin filtrado podríamos comprobar cómo aparece un zumbido de baja frecuencia en la salida del altavoz.

En la Figura 23.35 se muestra el aspecto de una C.C. pura, tal como la proporciona una pila. En contraste, en la Figura 23.36 aparece una C.C. pulsatoria procedente de un rectificador monofásico de onda completa.

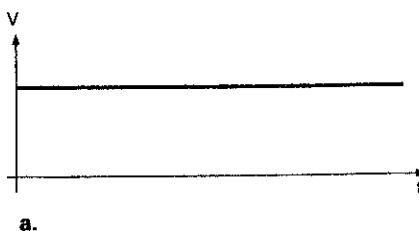


Figura 23.35

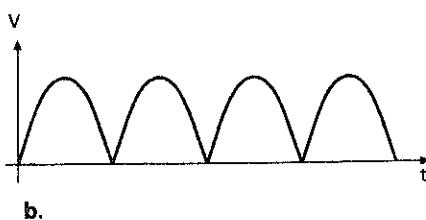


Figura 23.36

La misión de los circuitos de filtrado es la de reducir las variaciones de amplitud de la corriente y conseguir que ésta sea lo más constante posible en la carga a alimentar. Cuando se consigue esto se dice que se ha reducido la componente de corriente alterna de la corriente de salida del rectificador, o que se ha reducido el **rizado**.

Los circuitos de filtrado se pueden realizar con un condensador o con redes a base de inductancias y condensadores.

Por lo general, para conseguir los efectos de filtrado, se conecta un condensador de gran capacidad (normalmente electrolítico) en paralelo con la salida del rectificador. Evidentemente, el rizado que aparece en la tensión de salida será mucho más acentuado en el caso del rectificador de media onda que en el de onda completa. Por esta razón, nos concentraremos en el estudio de los filtros para estos últimos rectificadores, ya que son los que tienen más aplicaciones prácticas.

Experiencia 23.4: Consigue un puente rectificador encapsulado, aliméntalo con C.A. y conecta la salida de C.C. del mismo a una resistencia de carga. Seguidamente, mide con un osciloscopio la tensión en la resistencia de carga, visualizando la onda. A continuación, conecta un condensador de $1.000 \mu\text{F}$ en paralelo con la carga y repite la medida con el osciloscopio. Compara los resultados obtenidos en ambos casos (Figura 23.27).

Habrá podido comprobar que la tensión que aparece ahora en la pantalla del osciloscopio ya no posee tantas ondulaciones, y que el valor medio de la tensión de salida ha aumentado.

El aspecto que tiene la tensión de salida en un circuito rectificador de onda completa con condensador de filtrado es como el que se muestra en la Figura 23.28.

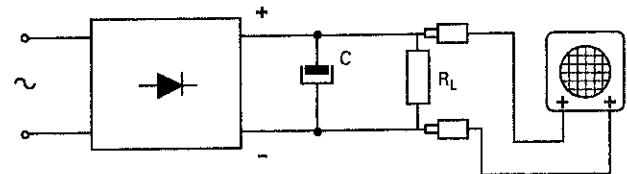


Figura 23.37. Verificación del efecto de filtrado de un condensador.

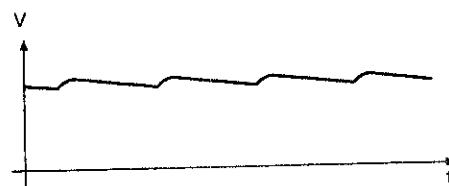


Figura 23.38. Tensión de salida de un rectificador con filtro por condensador.

Para poder explicar cómo actúa el condensador en el filtrado, en la Figura 23.39 se muestra la tensión de salida del filtro en superposición con la tensión de rectificación de onda completa aplicada a la entrada de dicho filtro.

t_0 a t_1 → el rectificador conduce y se carga el condensador.

t_1 a t_2 → el condensador se descarga y deja de conducir el rectificador.

t_2 a t_3 → el rectificador conduce y se carga el condensador.

t_3 a t_4 → el condensador se descarga y deja de conducir el rectificador.

t_4 a t_5 → etc.

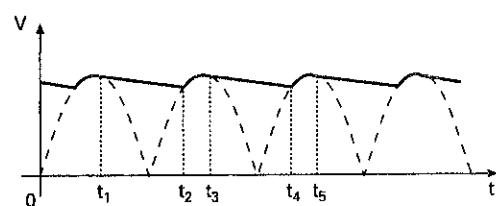


Figura 23.39. Tiempos de carga y descarga del condensador de filtro.

El funcionamiento de este filtro es como sigue:

En el primer instante (0 a t_1), los diodos del rectificador se polarizan directamente y el condensador se carga de energía mientras la tensión aplicada a sus bornes vaya en aumento. Una vez superada la tensión máxima (t_1), y mientras la tensión desciende de valor, los diodos del rectificador se polarizan inversamente, ya que la tensión con que ha quedado cargado el condensador es algo superior que la aplicada a los mismos. En consecuencia, los diodos dejan de conducir (t_1 a t_2) y el condensador descarga la energía acumulada por la resistencia de carga R_L . Este fenómeno se repite continuamente en cada uno de los ciclos de tensión pulsatoria de salida del rectificador, manteniendo así la tensión en la carga a un valor más constante.

Cuanto más constante sea esta tensión, más calidad de C.C. poseerá la tensión rectificada. Se dice, entonces, que se reduce el rizado de la misma.

El rizado que todavía perdura en la tensión de salida del filtro es debido a la carga y descarga del condensador. Un modo de aminorar el rizado consiste en aumentar el tiempo de descarga del condensador, lo cual se consigue con condensadores de gran capacidad, o lo que es lo mismo, aumentando la constante de tiempo de descarga, la cual está en función del producto de RLC .

23.4 El diodo Zener

Para reducir al máximo la tensión de rizado de la salida los circuitos de rectificación y así conseguir una tensión de C.C. lo más constante posible, se pueden utilizar circuitos estabilizadores (Figura 23.40). Una de las formas de conseguir este tipo de circuitos es con la utilización del diodo Zener.

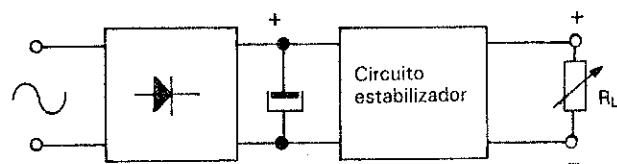


Figura 23.40. Circuito estabilizador conectado a la salida de un rectificador.

Al estudiar las características de los diodos de unión, pudimos comprobar que, al aplicar una tensión de polarización inversa a un diodo de unión PN, la corriente inversa que fluye por la unión es muy débil (del orden de unos pocos μA o nA) y que, aunque se aumente la tensión inversa aplicada, esta corriente apenas se modifica. Por otro lado, al aumentar gradualmente la tensión inversa, se llega a provocar un aumento brusco de la corriente (efecto de avalancha).

A este efecto de ruptura de la unión se le conoce con el nombre de **efecto Zener**, y a la tensión inversa a la que se produce se le denomina tensión Zener (V_Z). En la Figura 23.41 se puede apreciar las diferentes partes de la curva característica de un Zener con $V_Z = 6,8$ V.

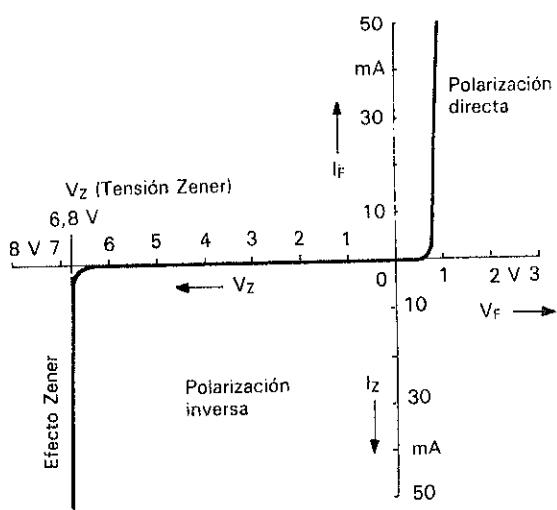


Figura 23.41. Curva característica del diodo Zener.

Existe un tipo de diodo fabricado de una forma especial, llamado Zener, que puede trabajar en estas condiciones de funcionamiento sin que la unión se destruya.

En la Figura 23.42 se puede ver el símbolo utilizado para la representación del diodo Zener.



Figura 23.42. Símbolo del diodo Zener.

El diodo Zener se comporta como un diodo normal al estar polarizado directamente, comenzando a conducir aproximadamente a una tensión de 0,7 V. Hay que indicar que este tipo de funcionamiento en los diodos Zener no es el habitual, ya que están diseñados para trabajar en polarización inversa.

Los diodos Zener se fabrican a base de silicio y en una gama de tensiones Zener escalonadas desde 2 hasta 200 V.

La corriente Zener (I_Z) que puede soportar un diodo Zener, trabajando en polarización inversa, dependerá de la potencia (P_Z) que éste pueda disipar térmicamente. Esta corriente aparece normalmente en las hojas de especificaciones técnicas que facilita el fabricante.

23.4.1 El Zener como regulador de tensión

Una de las aplicaciones más extendida del diodo Zener es como estabilizador de tensión para fuentes de alimentación. Eso se consigue aprovechando la propiedad que poseen dichos diodos de conducir con tensiones de polarización inversa, manteniendo la tensión entre sus extremos prácticamente constante, aunque se modifique apreciablemente la intensidad de corriente inversa que fluye por los mismos.

En la Figura 23.43 se muestra el esquema correspondiente a un regulador de tensión conectado a la salida de un puente rectificador. El diodo Zener consigue mantener la tensión en la carga (V_L) a valores constantes aunque existan variaciones de tensión (V) a la salida del circuito rectificador y aunque se modifique la corriente por la carga (I_L). La resistencia de polarización del Zener (R_S), que se conecta en serie con el circuito de regulación, tiene como misión mantener la tensión de polarización del Zener entre unos valores aceptables, valiéndose para ello de las caídas de tensión que se producen en la misma cuando la corriente que la atraviesa tiende a modificarse.

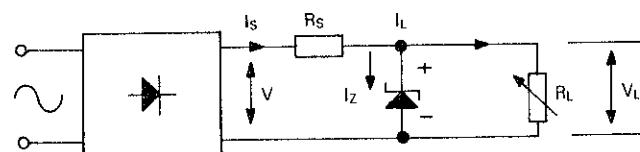


Figura 23.43. Estabilización de tensión a la salida de un rectificador mediante diodo zener.

Los procesos que se dan en este circuito de regulación son los siguientes: la tensión V_L que aparece en la carga y en el diodo Zener, es el resultado de sustraer a la tensión de entrada (V) del regulador, la caída de tensión que se produce en la resistencia de polarización (R_S); ($V_L = V - V_S$). En el caso de que la tensión de entrada se eleve, el diodo Zener aumenta su

corriente inversa (I_z) para evitar, en todo momento, que la tensión del Zener se modifique. Esto trae consigo un aumento de corriente por la resistencia R_s y, por tanto, un aumento de la caída de tensión que ésta produce en el circuito. De esta manera se consigue que el aumento de tensión de entrada quede compensado por dicha caída de tensión, manteniéndose la tensión en la carga (V_L) a un valor prácticamente constante. En el caso de que la tensión de entrada disminuya, los procesos que se dan son similares; la corriente por el diodo tiende a reducirse para mantener así una tensión constante entre los terminales del mismo. Esto provoca una disminución en la corriente por la resistencia R_s y, por tanto, una disminución de la caída de tensión en la misma. El resultado es que la tensión en la carga no se reduce debido a esta disminución en la caída de tensión.

23.5 Dispositivos optoelectrónicos

Dentro de la denominación de dispositivos optoelectrónicos se incluyen todos aquellos elementos semiconductores capaces de producir una radiación luminosa comprendida dentro del espectro visible o fuera del mismo (infrarrojos), como lo son los diodos LED. También se incluyen los componentes sensibles a la luz, como, por ejemplo, los fotodiodos.

23.5.1 Diodos luminiscentes (LED)

Seguro que ya conoces este tipo de dispositivo electrónico, ya que poseen grandes aplicaciones como elementos señalizadores del encendido de cualquier equipo electrónico, como puede ser: un equipo de sonido, un ordenador, etc.. Haciendo combinaciones con ellos, también pueden ser empleados para visualizar números y letras en pequeños indicadores luminosos (displays), con los cuales se pueden presentar resultados en equipos de medida, calculadoras, etc.

En la Figura 23.44 a se muestra el aspecto de un diodo led y en la Figura 23.44 b su representación esquemática.

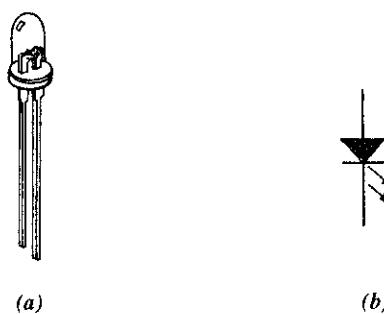


Figura 23.44. Diodo LED. (a) Aspecto físico; (b) símbolo.

Experiencia 23.5: Consigue un diodo LED, estudia su aspecto y conéctalo a través de una resistencia serie de unos $430\ \Omega$ a una fuente de alimentación de 8 V, tal como se muestra en la Figura 23.45.

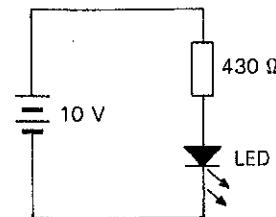


Figura 23.45

Habrás podido comprobar que para que el diodo LED se ilumine hay que conectarlo de tal forma que quede polarizado directamente. El terminal que representa al ánodo suele aparecer en el componente indicado con una marca (este terminal suele tener una longitud mayor que el del cátodo). Por si fuera poco, se añade un pequeño aplreamiento en la cápsula en la inmediaciones del terminal del cátodo). En el caso de no estar seguro cual es cada uno de los terminales, se puede verificar el estado de conducción con un polímetro, tal como se hacia con los diodos de unión PN.

¿Se enciende el diodo LED al polarizarlo directamente?

Los diodos LED se fabrican mediante la unión de dos cristales semiconductores PN, a los que se les ha contaminado de una forma especial. Cuando una unión de este tipo se polariza con una tensión directa, al igual que ocurría con los diodos convencionales, los electrones de valencia del cristal tipo N atraviesan la unión y se recombinan con los huecos del cristal tipo P. Dado que dichos electrones se trasladan de un nivel de energía más alto a uno más bajo, se produce una liberación de energía, que en este tipo de diodos se manifiesta en forma de radiaciones electromagnéticas dentro del espectro lumínoso.

Los diodos LED se fabrican con elementos especiales, como arseniuro de galio (GaAs) y fósforo. Para conseguir modificar la longitud de onda de la radiación de la onda lumínosa, y así conseguir diodos con emisiones de diferentes colores (rojo, naranja, verde, amarilla, azul, o infrarroja), se contaminan los cristales de una forma adecuada. Así por ejemplo, los diodos luminiscentes fabricados con galio y fósforo (GaP) emiten luz roja cuando se les añade óxido de cinc, y emiten luz verde con la adición de nitrógeno.

A parte del color de los diodos luminiscentes, las características más relevantes de los mismos son similares a los diodos convencionales:

La **tensión directa** (V_F) es la caída de tensión que se produce entre los extremos del diodo LED cuando por él fluye la corriente directa. Esta tensión suele ser del orden de 1,5 a 2,2 V para la mayor parte de los modelos. Cuando se desconoce la tensión directa exacta, bastará con tomar como valor aproximado 2 V.

La **corriente de excitación directa** (I_F) es la corriente que debe circular por el diodo LED para alcanzar la intensidad luminosa esperada. Para la mayoría de los modelos está corriente está comprendida entre 10 y 50 mA.

La **corriente inversa** (I_R) es la máxima corriente que puede fluir por el diodo luminiscente cuando a éste se le aplica una tensión de polarización inversa. Este valor suele estar en el entorno de los 10 μ A.

La **disipación de potencia** es aquella parte de la potencia que el diodo luminiscente no convierte en luz y que acaba degradándose en calor, teniendo que evacuarla al exterior. Por esta razón, los diodos LED se conectan en serie con una resistencia, con el fin de limitar la corriente que fluye por ellos.

Las ventajas que poseen los diodos LED para aplicaciones de señalización frente a las pequeñas lámparas incandescentes son innumerables, como gran duración, elevada resistencia mecánica frente a impactos y vibraciones, tamaño reducido y pequeño consumo, que los hace ideales para aplicaciones en combinación con otros semiconductores.

Una de las aplicaciones de los diodos LED es la fabricación de indicadores numéricos de siete segmentos (displays). Mediante 7 diodos luminiscentes dispuestos como se indica en la Figura 23.46, se pueden representar dígitos del 0 al 9. Para ello se excitan simultáneamente las combinaciones de diodos que se correspondan en cada caso.

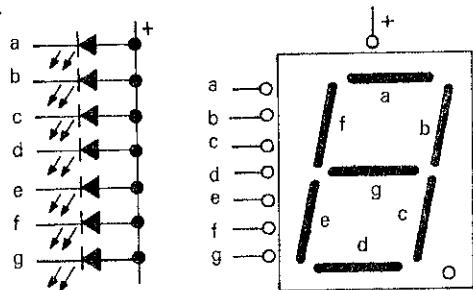


Figura 23.46. Indicador de siete segmentos con diodos LED.

¿Qué diodos habrá que excitar simultáneamente en el indicador de siete segmentos de la Figura 23.36 para que se ilumine el número 5?

En la actualidad, los indicadores de cristal líquido (LCD) están desplazando a los indicadores con diodos luminiscentes a campos de aplicación más reducidos.

23.5.2 Fotodiodos

Este dispositivo es un diodo especialmente diseñado para que sea sensible a las radiaciones luminosas que en él incidan. De tal forma que al aumentar éstas, también lo haga la corriente inversa que fluya por el fotodiodo. Una de las aplicaciones fundamentales de este dispositivo es como fotodetector, elemento capaz de transformar una magnitud luminosa en eléctrica.

Veamos como funciona este dispositivo: cuando a un diodo unión PN se le aplica energía térmica se rompen un número determinado de enlaces covalentes y, por tanto, aparecen en ambos cristales un número determinado de portadores de carga minoritarios. Pues bien, en este tipo de diodos además aparece un aumento de portadores minoritarios cuando se aplica energía en forma de radiaciones luminosas. De esta forma, si conectamos un fotodiodo con una tensión de polarización inversa, fluirá una pequeña corriente inversa por el mismo. Los fotodiodos se fabrican de tal forma que la luz pueda incidir en ellos, de modo que cuando la intensidad de la radiación luminosa se hace más grande, aumentan los portadores minoritarios, y con ellos la corriente inversa. De esta

forma se consigue que exista una relación determinada entre la luz y la corriente.

En la Figura 23.47 se muestra el circuito de un fotodiodo polarizado inversamente. Las flechas, que apuntan hacia el componente, indican que el diodo aprovecha la incidencia de la luz en él para funcionar.

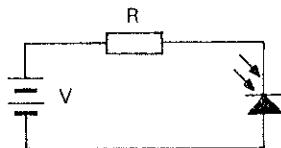


Figura 23.47. Fotodiodo.

En la Figura 23.38 se muestra la curva de polarización inversa de un fotodiodo.

Observa cómo al aumentar la intensidad de la radiación luminosa (su unidad de medida es el lux), también lo hace la corriente inversa.

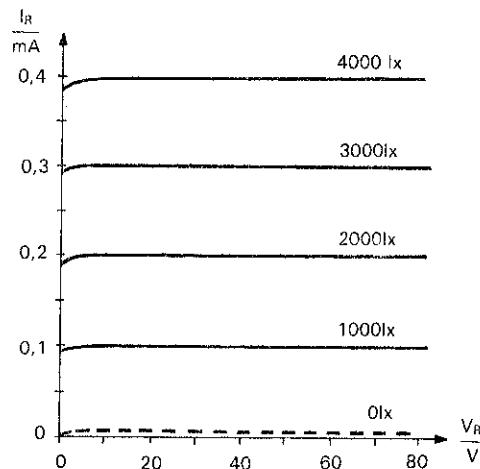


Figura 23.48. Curvas características de un fotodiodo.

Una de las aplicaciones que se puede hacer del fotodiodo, en combinación con el diodo luminiscente, es la fabricación de un **optoacoplador**, tal como se muestra en la Figura 23.39. Estos dos elementos se integran en un sólo elemento.

Con un optoacoplador se pueden aislar eléctricamente dos circuitos entre los que hay que intercambiar una determinada señal. La señal de entrada se aplica al diodo LED, generando éste una intensidad luminosa que estará en función de la corriente entregada por la señal. Esta radiación luminosa incide en el fotodiodo, el cual generará una corriente en la salida proporcional a la entrada del optoacoplador. Con el uso de optoacopladores se eliminan todos los riesgos que pueden surgir al conectar circuitos que, trabajan con señales de muy pequeñas tensiones, con otros circuitos que lo hacen con tensiones elevadas. Por ejemplo, se utilizan para aislar la salida de un ordenador con circuitos exteriores que estén alimentados con tensiones peligrosas. También se utilizan en electro-medicina para aislar los circuitos de los electrodos que se han de aplicar al cuerpo humano, y en otras muchas aplicaciones.

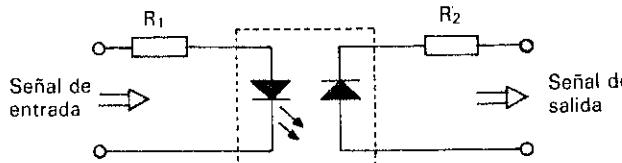


Figura 23.49. Optoacoplador.

23.6 El transistor

Los transistores son fundamentales en la mayoría de los circuitos electrónicos que realizan la función de amplificación, control, estabilización de la tensión, etc. Hay que pensar que los dispositivos electrónicos que generan las señales de control, como una resistencia NTC en un termostato, una LDR en una barrera fotoeléctrica, un micrófono de audio, etc., producen señales eléctricas muy débiles que, en la mayor parte de las aplicaciones, hay que aumentar (proceso de amplificación) para poder conseguir alimentar a dispositivos o receptores, que necesitan de un aporte mayor de energía para su funcionamiento (relés que ponen en marcha una lámpara o motor, altavoces, etc.).

Antes de descubrirse el transistor (1950), los circuitos electrónicos estaban construidos a base de válvulas de vacío. Éstas eran muy voluminosas y necesitaban para su funcionamiento de una resistencia de caldeo, que provocaba un consumo de energía excesivo y acortaba la vida de las mismas.

El invento del primer transistor por Shockley dio paso a una nueva era. A partir del transistor bipolar se han desarrollado otro tipo de transistores, como el transistor de efecto de campo "JFET" y el transistor de campo de óxido metálico "MOSFET" que por sus especiales características les hace ideales para el tratamiento de señales de radio frecuencia y en el diseño de circuitos digitales. Con ellos también se han desarrollado los circuitos integrados "chips", que reúnen en un sólo componente multitud de transistores de todo tipo, diodos, resistencias, etc., consiguiendo miniaturizar y simplificar enormemente los circuitos. Los circuitos integrados consiguen realizar múltiples funciones con un sólo componente, como las que realiza el microprocesador de un ordenador.

Al igual que los diodos de unión, los transistores bipolares se construyen gracias a la unión de cristales semiconductores de tipo P y de tipo N.

El transistor es un componente fácilmente identificable por sus tres terminales de conexión que asoman al exterior a través de una de las bases de su cápsula (Figura 23.50). Éstos suelen estar dispuestos en línea, o según los vértices de un triángulo imaginario.

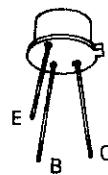


Figura 23.50. Aspecto de un transistor.

Cada uno de estos terminales está unido a un cristal semiconductor de tipo P o tipo N. De esta forma, nos encontramos

con un terminal de emisor, un terminal de base y otro de colector.

Existen dos tipos de transistores, los PNP y los NPN. En la Figura 23.51 se muestra la disposición de los cristales en cada uno de los tipos, así como su símbolo correspondiente. Obsérvese que si el transistor es PNP (PeNetra) la flecha correspondiente al emisor se dibuja hacia dentro, y si es NPN (No PeNetra) dicha flecha se dibuja hacia fuera.

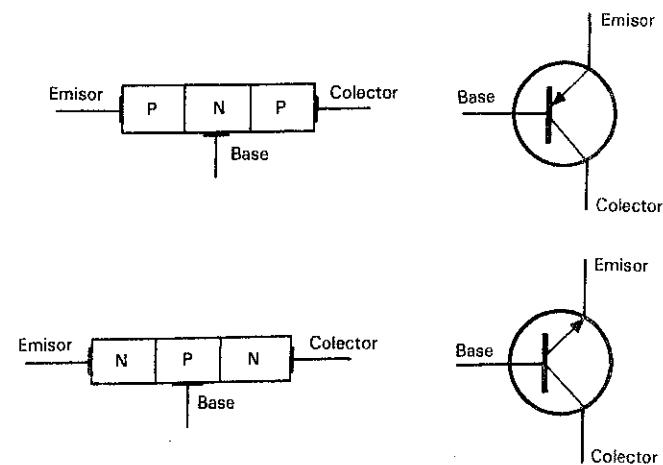


Figura 23.51. Transistores NPN y PNP.

En el proceso de fabricación de un transistor NPN se hace que el cristal semiconductor correspondiente al emisor esté muy contaminado, por lo que contendrá un exceso de portadores de carga; su tarea consistirá en enviar o emitir estos portadores de carga (electrones) a la base. El cristal semiconductor de la base se fabrica en una dimensión extremadamente delgada y un grado tenue de contaminación; los electrones emitidos por el emisor atraviesan, prácticamente en su totalidad, este cristal, para acabar dirigiéndose al colector. La misión de la base consistirá en controlar dicho flujo de electrones. El cristal semiconductor del colector se fabrica con un grado de contaminación intermedio y recibe este nombre por recoger los electrones enviados por el emisor.

23.6.1 Funcionamiento del transistor

Para estudiar el funcionamiento del transistor nos vamos a referir exclusivamente a tipo NPN.

Experiencia 23.6: a) Localiza un transistor NPN en el compartimento de componentes del entrenador didáctico, por ejemplo el SC 107, y monta el circuito de la Figura 23.52 mediante un diodo LED conectado en serie con una resistencia de $470\ \Omega$ y alimenta el conjunto por una pila o fuente de alimentación de 9 V.

Al probar el circuito el diodo LED se tendrá que encender. Veamos cuál es la explicación de este fenómeno.

Al conectar el polo positivo de la pila a la base (cristal tipo P) y el negativo al emisor (cristal tipo N) la unión queda polarizada directamente y por tanto circulará una elevada corriente a través del cristal (como si se tratase de un diodo), que hace que el LED se encienda (Figura 23.53).

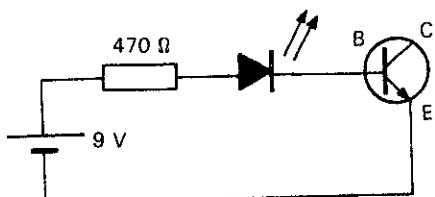


Figura 23.52

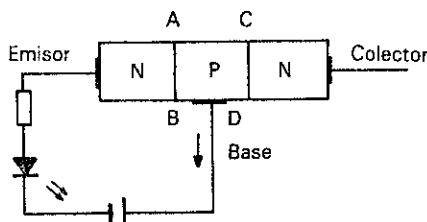


Figura 23.53

b) Ahora permuta los conductores de los terminales del transistor según se indica en el esquema de la Figura 23.54. Al probar el circuito, el diodo LED no se tiene que encender. ¿Cuál es la explicación?

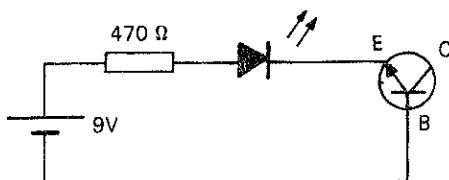


Figura 23.54

Si se polariza la unión emisor-base PN en sentido inverso, la corriente a través del cristal será prácticamente nula y por lo tanto el diodo LED permanecerá apagado (Figura 23.55).

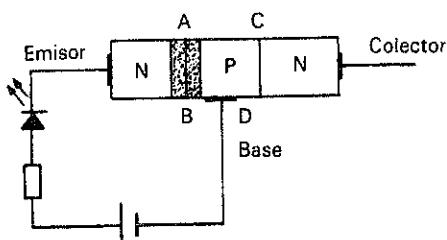


Figura 23.55

c) Realiza ahora las conexiones con los terminales de base y colector, tal como se indica en esquema de la Figura 23.56 y explica por qué se enciende el diodo en este caso.

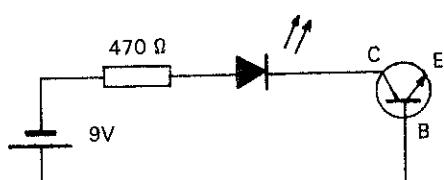


Figura 23.56

d) Ahora permuta los conductores de la pila, de tal forma que la base quede conectada al terminal negativo y el colector al diodo led. Dibuja tú mismo el esquema de conexiones y explica por qué no se enciende el diodo LED en este caso.

e) Seguidamente, conecta los terminales del colector y emisor, tal como se muestra en la Figura 23.57. Podrás comprobar cómo en este caso el diodo LED no se enciende. ¿Cuál es la explicación?

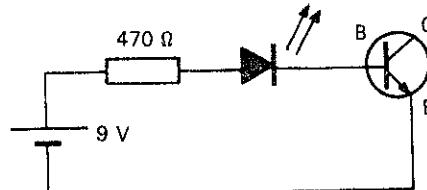


Figura 23.57

Los electrones libres del cristal N del emisor son repelidos por el polo negativo de la pila (Figura. 23.58), mientras que los electrones libres del cristal N del colector son atraídos por el polo positivo. De todo esto se deduce que se produce un desplazamiento de electrones en el sentido del emisor al colector. A pesar de ello, los electrones del emisor no poseen la suficiente energía para atravesar las barreras AB y CD de las uniones, las cuales los repelen.

La corriente emisor-colector es por tanto muy pequeña, y por eso el diodo LED no se enciende, considerándose a efectos prácticos como una corriente de fuga.

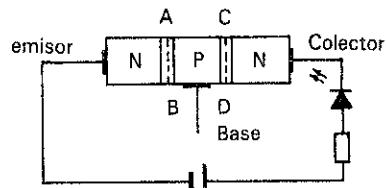


Figura 23.58

f) Consigue una resistencia de $1.000\ \Omega$ y una pila de 1,5 V y realiza el montaje que se propone en la Figura 23.59. Podrás comprobar como en este caso sí que se enciende el diodo LED. ¿Cuál es la explicación?

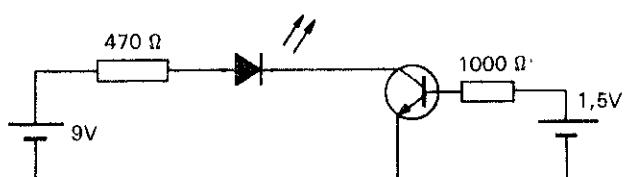


Figura 23.59

La principal barrera que se oponía al paso de los electrones desde el emisor al colector la constituye la barrera AB (Figura 23.60), ya que una vez atravesada ésta los electrones se encuentran bajo la influencia del campo eléctrico del polo positivo.

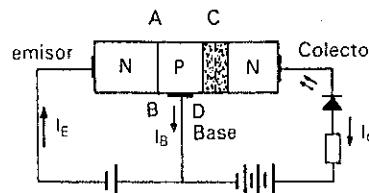


Figura 23.60

Al aplicar una pequeña tensión positiva a la base (cristal P), con respecto al emisor (cristal N), dicha barrera desaparecerá, por quedar polarizada directamente la unión de los cristales PN que la componen, sintiéndose atraídos los electrones por los potenciales positivos de la base y del colector. Dado que el potencial positivo del colector es mucho más elevado que el de la base, los electrones se sentirán más atraídos por el primero, por lo que se obtiene una elevada corriente de colector I_C (que hace que el diodo LED se encienda) y una pequeña corriente de base I_B .

A esta explicación hay que añadir que, al ser el cristal de la base extremadamente delgado y estar débilmente contaminado con unos pocos huecos, la base se satura rápidamente al ser invadida por la gran cantidad de electrones provenientes del emisor, causando una difusión de los mismos hacia la zona de empobrecimiento de la unión con el colector. Una vez que los electrones han superado la unión, son atraídos con fuerza por el fuerte campo eléctrico positivo a que está sometido el colector.

El número de electrones que fluyen hacia el colector será más elevado cuanto mayor sea la tensión de polarización directa del diodo base-emisor. Por lo que se puede decir que, esta tensión, junto con la corriente de base, controlan la corriente de colector. Haciendo un símil, podríamos decir que la tensión de polarización del diodo base-emisor abre más o menos una compuerta por donde pasan los electrones; esta compuerta se consigue abrir con un pequeño esfuerzo (débil corriente de base); sin embargo, por ella pasan una gran cantidad de electrones, que se dirigen hacia el colector, debido al fuerte potencial eléctrico que éste posee.

Si tenemos en cuenta que la corriente de base es muy pequeña con respecto a la del colector y que esta última varía en consonancia con la primera, habremos comprendido la más importante propiedad del transistor, consistente en su capacidad de amplificación de corriente.

Este fenómeno nos permitirá que, con la débil corriente que puede tener cualquier forma de variación en el tiempo, como pueden ser señales de radio, TV, sonido, etc, podamos obtener la misma forma de variación en el tiempo sobre una corriente mayor, procedente de una fuente de alimentación, lo que da lugar a poder transformar señales débiles en otras suficientemente fuertes para producir, por ejemplo, sonido en un altavoz, imagen en un televisor, etc (Figura 23.61).

El estudio que se ha hecho para el transistor NPN es igualmente válido para el PNP, con la única diferencia de que en el caso del transistor PNP la conducción se produce cuando se aplica una tensión negativa en el colector con respecto al emisor, y una tensión igualmente negativa, aunque de inferior valor a la base, con respecto al emisor (Figura 23.62).

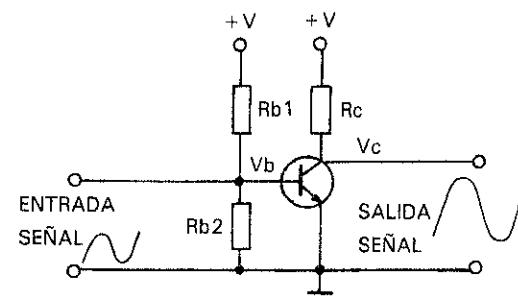


Figura 23.61. El transistor como amplificador.

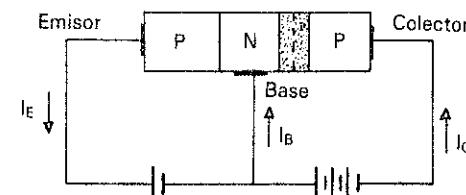


Figura 23.62. Polarizaciones en un transistor PNP.

23.6.2 Identificación de transistores

La mejor forma de identificar un transistor es anotar su referencia y, posteriormente, consultar sus características en las hojas de especificaciones técnicas del fabricante, o en un libro de características de transistores.

Mediante un método muy sencillo se puede determinar si un transistor desconocido es del tipo PNP o NPN. Este método consiste en tomar varias medidas, con el polímetro utilizado como óhmetro en el rango de $\times 100$, de las resistencias que aparecen entre los diferentes terminales del transistor (Figura 23.63).

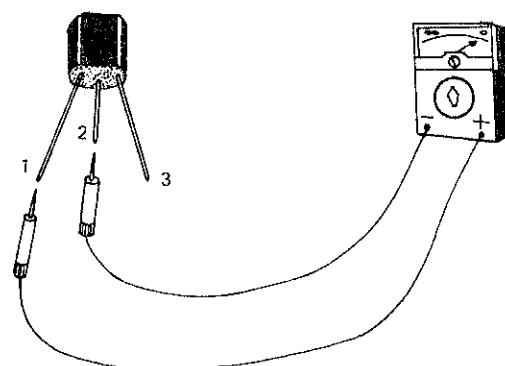


Figura 23.63. Identificación del tipo de transistor mediante polímetro.

Experiencia 23.7: Toma un transistor desconocido y averigua de qué tipo es, así como la disposición de sus terminales. Seguidamente, se exponen algunas ideas para conseguirlo.

Primero determinaremos cuál de los terminales del transistor corresponde a la base. Esto se consigue midiendo la resistencia con el óhmetro entre los diferentes terminales.

En un transistor en buen estado, la resistencia entre el colector y el emisor es siempre muy alta, cualquiera que sea la polaridad aplicada por el óhmetro; cuando se haga esta verificación, el otro terminal corresponderá a la base.

Una vez localizada la base, conectamos la punta de prueba positiva en la misma y la negativa en cualquiera de los otros dos terminales del transistor: si la resistencia obtenida es muy baja (se ha polarizado la unión de uno de los dos diodos por efecto de la tensión positiva aplicada con el óhmetro a la base P) se trata de un transistor tipo NPN; si obtenemos una resistencia muy alta (no se ha polarizado la unión) se trata de un transistor PNP.

Por si te sirve de ayuda, en la Tabla 23.3 se indican las medidas de resistencia que se dan en cada caso para los dos tipos de transistores.

Con este sencillo procedimiento también se puede llegar a averiguar cuál de los terminales corresponde al emisor y cuál al colector. Para ello, hay que tener en cuenta que:

La resistencia y tensión de barrera de la unión base-colector es algo menor que la correspondiente a la unión base-emisor.

Esta diferencia es más apreciable si medimos la tensión de barrera con un polímetro digital.

Punta (+)	Punta (-)		
		PNP	NPN
		Medida del ohmímetro	Medida del ohmímetro
colector	emisor	alta resistencia	alta resistencia
emisor	colector	alta resistencia	alta resistencia
emisor	base	baja resistencia	alta resistencia
base	emisor	alta resistencia	baja resistencia
base	colector	alta resistencia	baja resistencia
colector	base	baja resistencia	alta resistencia

Tabla 23.3

23.6.3 Comprobación del estado de un transistor

Para comprobar si un transistor está en buen estado utilizaremos el óhmetro. Con él verificaremos la resistencia entre los terminales del transistor con las diferentes posibilidades de polarización, teniendo en cuenta que: a) con cualquier polaridad, la resistencia obtenida al aplicar el óhmetro entre el colector y el emisor es siempre muy alta para un transistor en buen estado; b) al polarizar directamente cualquiera de las uniones entre base-colector y base-emisor la resistencia obtenida para un transistor en buen estado debe ser baja.

Por otro lado, los polímetros digitales suelen ir equipados con un dispositivo, llamado transistómetro, para poder conectar el transistor y así poder determinar su ganancia. Para ello dispone de dos filas de tres conexiones, una para transistores PNP y otra para NPN, tal como se muestra en la Figura 23.64.

Con este dispositivo podemos medir la ganancia de un transistor una vez conectado en el apartado que le corresponde, según su tipo, y en el orden de terminales correcto. Aprovechando el transistómetro, se puede verificar el estado de un transistor, ya que si el mismo está en buen estado tendrá que medirse una ganancia aceptable. Con este sistema también es posible comprobar la disposición de los tres terminales del transistor, ya que hasta que éste no se conecta adecuadamente al transistómetro no se mide ganancia alguna.

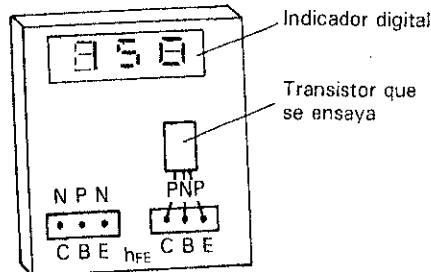


Figura 23.64. Medida de la ganancia mediante polímetro digital.

23.6.4 Intensidades de corriente en el transistor

En los apartados anteriores hemos estudiado, de una forma experimental, el funcionamiento del transistor. Completaremos ahora algunos otros aspectos más particulares del mismo, como son la relación de intensidades de corriente que aparecen en cada uno de los terminales del transistor. Pero antes vamos a realizar un pequeño repaso de los conocimientos ya adquiridos, intentando, a su vez, dar una mayor profundidad a los mismos.

Este estudio lo realizaremos también sobre un transistor NPN. Este tipo es más utilizado que el PNP, ya que actúa algo más rápido y se adapta mejor a los sistemas donde se conecta el negativo a masa. No obstante, es fácil encontrar los dos tipos de transistores en un mismo circuito, ya que su combinación amplia las posibilidades del diseñador.

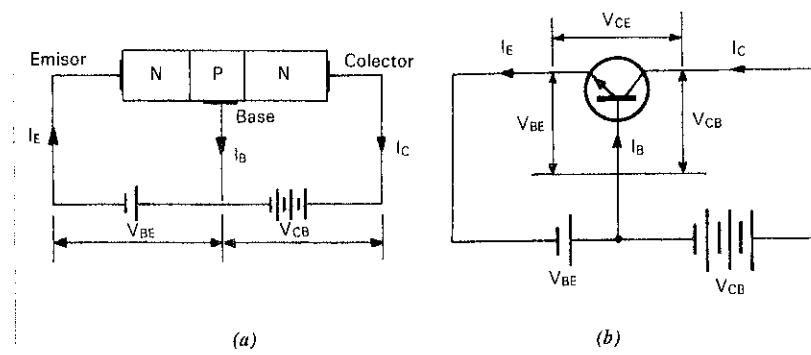


Figura 23.65. Sentido de la corriente en el circuito. (a) Segundo el flujo de electrones.
(b) sentido convencional de la corriente.

Tal como está polarizado el transistor NPN (Figura 23.65), el diodo formado por la unión del emisor y la base queda polarizada directamente con la tensión V_{BE} . Para que esto ocurra, será suficiente con una tensión mínima, superior a la umbral, que en el caso del silicio será de 0,6 V a 0,7 V. Este fenómeno de polarización directa hace que la resistencia base-emisor (R_{BE}) disminuya a un valor muy reducido (por debajo de los 100 Ω).

Por otro lado, el diodo formado por la unión de la base y el colector aparece polarizado inversamente por la tensión V_{CB} , que es de un valor mucho más alto que V_{BE} . De aquí, se deduce que la resistencia entre el colector y la base (R_{CB}) sea de un valor elevado (unos 10 K Ω).

Sin embargo, tal como se pudo apreciar en las experiencias llevadas a cabo, la corriente es capaz de atravesar tanto la unión polarizada directamente como la polarizada inversamente. De tal forma que el valor de la corriente que entra por el emisor I_E se acerca bastante a la del colector I_C , siendo la corriente que sale de la base muy pequeña.

Efectivamente, la región que ocupa la base del transistor es muy reducida y está mínimamente impurificada, por lo que posee muy pocos huecos. De esta forma, los electrones que emite el emisor superan sin dificultad la unión emisor-base, por estar polarizada directamente. Pero es probable que uno de estos electrones encuentre en la base un hueco libre con el que combinarse. Por ello, la corriente de base será muy débil. Sin embargo, estos electrones, una vez que superan la barrera de emisor-base, se sienten fuertemente atraídos por el potencial eléctrico positivo del colector, estableciéndose un valor considerable de corriente de colector I_C .

Lo normal es que el 99% de la corriente del emisor se dirija directamente al colector y que el 1% restante lo haga a la base.

Se puede establecer una ecuación que relacione estas tres corrientes, de tal forma que:

$$I_E = I_C + I_B$$

A pesar de que la corriente de base es muy débil, ésta es muy valiosa, ya que gracias a ella se pueden gobernar la gran corriente que aparece en el colector. De tal forma que, si la corriente de base fuese nula, no habría corriente de colector. Téngase en cuenta que al desaparecer la tensión de polarización de la unión emisor-base los electrones del emisor no pueden superar esta barrera.

23.6.5 Ganancia de corriente o parámetro beta (β) de un transistor

La circunstancia de que una pequeña corriente de base controle las corrientes de emisor y colector mucho más elevadas, indica la capacidad que posee un transistor para conseguir una gran *ganancia de corriente*. Así, la ganancia de corriente de un transistor es la relación que existe entre la variación o incremento de la corriente de colector y la variación de la corriente de base.

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Así, por ejemplo, en el caso de que en un transistor se obtenga una variación de corriente de colector de 8 mA y de 0,08 mA en la corriente de base, la ganancia será:

$$\beta = \frac{8}{0,08} = 100$$

La ganancia de corriente de los transistores comerciales varía bastante de unos a otros. Así, nos podemos encontrar transistores de potencia que poseen una β de tan sólo 20. Por otro lado, los transistores de pequeña señal pueden llegar a tener una β de 400. Por todo ello, se puede considerar que los valores normales de este parámetro se encuentran entre 50 y 300.

En las hojas de especificaciones técnicas que facilitan los fabricantes de transistores, en vez de utilizarse β para identificar la ganancia de corriente, se suele utilizar h_{FE} . Así por ejemplo, para el transistor con referencia BC 108, se lee en sus hojas de características, una h_{FE} entre 150 y 290; lo que nos indica que la ganancia de corriente de este transistor puede encontrarse entre estos valores.

La ganancia de corriente varía notablemente con la corriente de colector. Además, la temperatura ambiente influye positivamente en el aumento de dicha corriente. Hay que pensar que al aumentar la temperatura de la unión del diodo colector aumenta el número de portadores minoritarios y, por tanto se produce un aumento de la corriente de colector.

23.6.6 Tensiones de ruptura

Al igual que ocurría con los diodos, cuando se polariza inversamente cualquiera de las uniones de un transistor aparecen pequeñas corrientes inversas, que no provocarán la ruptura de dichas uniones si la tensión que se aplica no supera los valores máximos fijados en las hojas de especificaciones técnicas. Se pueden dar dos casos diferentes a tener en cuenta:

Tensión inversa colector-base (V_{CBO}) con el emisor abierto: En la Figura 23.66 se ha abierto el circuito del emisor; observa cómo la unión formada por la base y el colector están polarizadas inversamente con la tensión V_{CB} . Como ocurría con los diodos, esto provoca la circulación de una pequeña corriente de fuga (I_{CBO}) que no será peligrosa hasta que no se alcance la tensión de ruptura de la unión. Normalmente esta tensión suele ser elevada (del orden de 20 a 300 V).

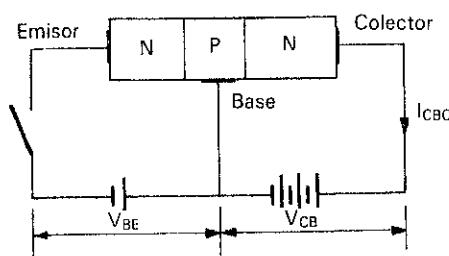


Figura 23.66. Transistor con el emisor abierto.

Nunca deberá trabajarse, por supuesto, con una tensión superior a la indicada por el fabricante en sus hojas técnicas. Este dato suele aparecer indicado con las siglas V_{CBO} .

Tensión inversa colector-emisor con la base abierta: En este otro caso, se ha abierto la base y, por tanto, se aplica una tensión entre el colector y el emisor que es igual a la suma de las tensiones de las dos fuentes (Figura 23.67). Esta fuerte diferencia de potencial provoca un pequeño flujo de electrones que emite el emisor y que se sienten fuertemente atraídos por el potencial positivo de la fuente. El resultado es una pequeña corriente de fuga de emisor a colector I_{CEO} . Al igual que ocurría anteriormente, el valor de esta corriente está determinado por la tensión colector-emisor (V_{CEO}) aplicada. En las hojas técnicas también aparece la tensión máxima de funcionamiento (V_{CEO}), que en ningún caso debe ser superada, para evitar el peligro de destrucción del semiconductor.

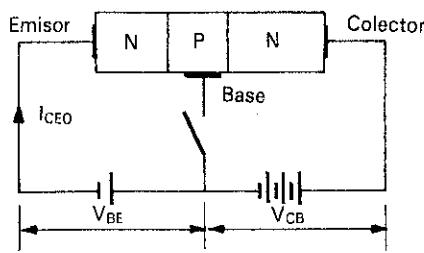


Figura 23.67. Transistor con la base abierta.

Así por ejemplo, para el transistor BC 108, en las hojas de especificaciones técnicas aparecen los siguientes valores para las tensiones de ruptura, $V_{CBO} = 30$ V y $V_{CEO} = 20$ V, lo que significa que este transistor nunca deberá operar con tensiones superiores a estos valores especificados.

23.6.7 Características de los transistores bipolares

Las curvas características del transistor relacionan entre sí todas las magnitudes de tensión e intensidad de corriente que se dan en él mismo, como son: la tensión colector-emisor (V_{CE}), la tensión base-emisor (V_{BE}), la tensión colector-base (V_{CB}), la corriente de base (I_B), la corriente de colector (I_C) y la corriente de emisor (I_E). De esta forma, conociendo las curvas características se puede entender el funcionamiento del transistor, así como determinar la mayor parte de los aspectos que definen al mismo.

23.6.7.1 Curvas características con el emisor común (EC)

La mayoría de los circuitos con transistores utilizan el emisor como terminal común entre la entrada y la salida. En la Figura 23.68 se muestra el circuito básico con la configuración en emisor común (EC).

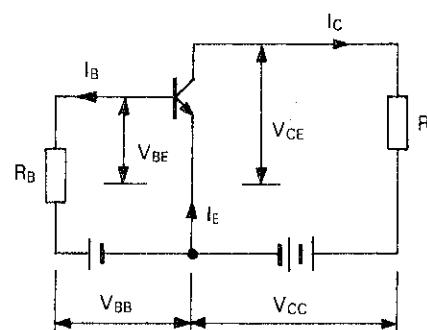
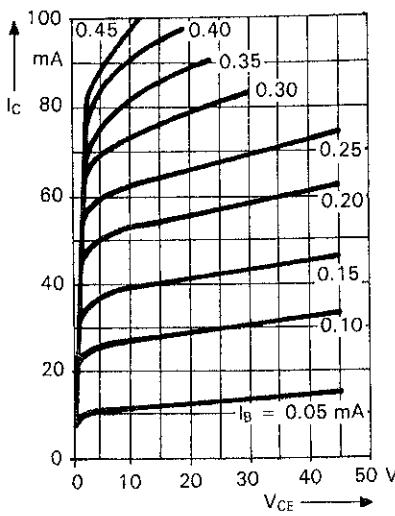


Figura 23.68. Transistor en emisor común.

Ahora la base hace de electrodo de entrada y el colector de electrodo de salida.

El funcionamiento del transistor es como sigue. Cuando la tensión de polarización directa V_{BE} del diodo emisor-base supera los 0,7 V (para transistores de silicio), los electrones libres, que provienen del emisor, traspasan la delgada capa de la base, en dirección al colector, empujados por el fuerte potencial eléctrico causado por la polarización inversa V_{CE} . Como podemos comprobar en las curvas **características** $I_C = f(V_{CE})$ para $I_B = \text{cte}$, el valor de la corriente de colector dependerá casi exclusivamente de la corriente de base.

Estas características también son conocidas como familia de colector, ya que son las correspondientes a la tensión e intensidad del colector. En la Figura 23.69 se muestra una familia de curvas de colector para diferentes valores constantes de la corriente de base.

Figura 23.69. Curvas $I_c = f(V_{CE})$ para I_b constante.

Estas curvas representan, en cierto modo, la forma de funcionamiento del transistor. Se puede comprobar que, para una tensión constante de colector-emisor, si se producen pequeñas variaciones de la corriente de base (del orden de μA) esto origina unas variaciones en la corriente del colector mucho más elevadas (del orden de mA). De lo cual se deduce la capacidad del transistor para amplificar corrientes.

Observa que, en la mayor parte de las curvas, la tensión V_{CE} afecta muy poco a la corriente de colector I_c . Si se aumenta V_{CE} demasiado (por encima de V_{CEO}), la unión del colector entra en la región de ruptura y éste puede llegar a destruirse. Sin embargo, si la tensión V_{CE} es muy pequeña (por debajo de 0,7 V), la corriente de colector será muy débil, obteniéndose una ganancia de corriente muy baja. En conclusión, para conseguir que el transistor trabaje como amplificador de corriente, la tensión de polarización inversa V_{CE} debe mantenerse por encima de 0,7 V y por debajo de la tensión de ruptura.

Experiencia 23.8: Esta experiencia consistirá en determinar las curvas de colector de un transistor NPN, por ejemplo el BC 107. Para trazar dichas curvas recurriremos al circuito de la Figura 23.70.

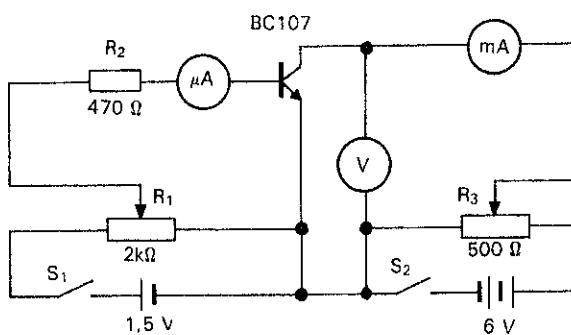


Figura 23.70. Ensayo para determinar las curvas de colector de un transistor.

Una vez montado el circuito de la Figura 23.52, el proceso que deberás seguir para trazar las curvas es el siguiente:

1) La primera curva a obtener será para una intensidad de base igual a cero ($I_b = 0$). Para lo cual es aconsejable seguir los siguientes pasos:

- Cerrar el interruptor S_2 y abrir S_1 ; ajustar el potenciómetro R_3 a su mínimo valor, hasta conseguir que el voltmetro indique cero voltios ($V_{CE} = 0$); anotar las medidas de I_c y V_{CE}
 - Ajustar R_3 hasta que la tensión V_{CE} indique el valor máximo que puede aportar la fuente de polarización inversa, es decir 6 V; anotar nuevamente las medidas de I_c y V_{CE}
 - Una vez que hemos averiguado los puntos extremos de la curva, escoger ocho puntos intermedios entre el límite inferior $V_{CE} = 0$ y el superior $V_{CE} = 6$ V. Para hacerlo ajustar R_3 y medir en cada uno de los puntos seleccionados los valores correspondientes de I_c .
 - Terminada esta operación, llevar los puntos a unos ejes de coordenadas y trazar la curva correspondiente a $I_b = 0$.
- 2) El siguiente paso será obtener otra curva para una intensidad de base lo más alta posible. El proceso a seguir es el siguiente:
- Cerrar los interruptores S_1 y S_2 ; ajustar R_3 hasta conseguir que $V_{CE} = 0$ V y R_1 hasta conseguir que I_b sea máximo; anotar las medidas de I_c y V_{CE}
 - Seguir el mismo procedimiento anterior para conseguir ocho puntos intermedios de la curva, procurando que la intensidad de base permanezca constante. Una vez hecho esto, trazar la curva correspondiente.
 - Para completar la familia de curvas, se escogen 4 o 5 valores intermedios de la corriente de base y, siguiendo el mismo procedimiento que el indicado con anterioridad, se trazan las curvas correspondientes a los mismos.

La familia de curvas obtenidas nos da una idea muy clara del efecto de regulación que posee la intensidad de base (I_b) sobre la de colector (I_c), ya que según aumenta débilmente I_b (μA), aumenta en mayor grado I_c (mA). Este fenómeno se plasma más claramente en el concepto de ganancia de corriente (β).

En la actualidad, no es habitual realizar un ensayo como el realizado en la experiencia para trazar las curvas a mano. Para ello existen unos equipos llamados trazadores, los cuales consiguen dibujar las curvas características en un tubo de imagen o en un papel.

23.6.7.2 Obtención de la ganancia de corriente de un transistor a partir de las curvas características

La ganancia de corriente de un transistor se definía como la relación que se da entre la variación de la corriente de colector (ΔI_c) y la variación de corriente de base (ΔI_b). Para determinar dicha ganancia se puede recurrir a las características de colector.

Supongamos que las curvas características del transistor ensayado es la que se muestra en la Figura 23.71.

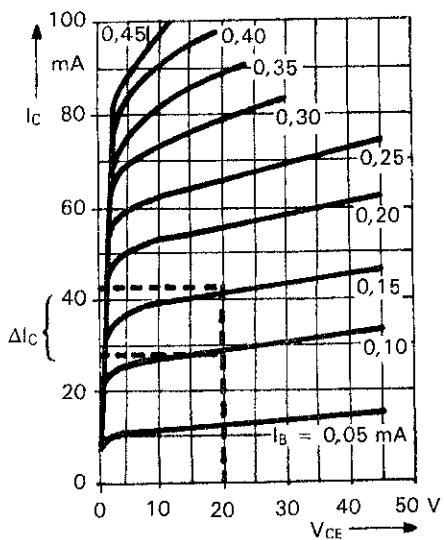


Figura 23.71

Para un punto de funcionamiento situado en $V_{CE} = 20$ V, según las curvas de la Figura 23.71, la intensidad de colector variará entre $I_C = 28$ mA e $I_C = 43$ mA, mientras que la intensidad de base lo hará entre $I_B = 0,10$ mA e $I_B = 0,15$ mA. La ganancia se calcula así:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{43 - 28}{0,15 - 0,10} = 300$$

¿Qué ganancia de corriente posee el transistor BC 107 que has ensayado en la Experiencia 23.8?

23.6.7.3 Influencia de la temperatura ambiente en la potencia máxima de un transistor

La potencia máxima que puede disipar, en forma de calor, un transistor depende de la temperatura máxima permitida en la unión del colector T_j (máx.). Esta temperatura nunca debe ser superada, ya que a partir de ella se puede destruir el transistor. Este dato aparece en las hojas de características del componente. Así, por ejemplo, el transistor BC 107 posee una T_j (máx.) de 175 °C.

La potencia máxima a que puede trabajar un transistor también depende de la temperatura ambiente. Hay que tener en cuenta que el calor producido en las uniones se conduce a través del encapsulado del transistor y se disipa al aire que le rodea. Cuanto mayor sea la temperatura de este aire (temperatura ambiente), peor será la ventilación del transistor, y por lo tanto, menor la potencia máxima que se le puede exigir al mismo.

Por lo general, en las hojas técnicas se indica la potencia máxima para una temperatura ambiente de 25 °C.

En el caso de que la temperatura ambiente fuese superior habría que encontrar la potencia máxima de funcionamiento

para que el transistor trabaje dentro de sus límites de temperatura admisibles.

En el caso de que se desee aumentar la potencia de un transistor, se puede acoplar un dissipador de calor, o aleta de refrigeración en la superficie de la cápsula. De esta forma, se consigue que el calor se evague con mayor facilidad hacia el aire exterior.

En otras ocasiones se une, mediante tornillos, la cápsula del transistor con el chasis, que en este caso actúa como dissipador de calor, por tener una gran superficie.

23.7 Tiristores

Los tiristores son una serie de componentes semiconductores que poseen unas características que los hace ideales para trabajar en el control de grandes corrientes eléctricas. Este tipo de semiconductores tiene un gran campo de aplicación en la electrónica industrial o electrónica de potencia. Con ellos es posible controlar la potencia de receptores en C.C. y en C.A. De esta forma, es posible regular la velocidad de motores eléctricos, controlar la intensidad luminosa de equipos de alumbrado, sustituir a los relés y contactores en el control y accionamiento de dispositivos de potencia, etc.

Los tiristores trabajan en forma de conmutación; es decir, poseen dos estados de funcionamiento: conducen o no conducen. De esta forma es posible controlar grandes corrientes eléctricas sin que el semiconductor se caliente excesivamente. Como ejemplos de tiristores tenemos el rectificador controlador de silicio (SCR) y el tiristor. El SCR es similar a un diodo rectificador, pero al que se le ha añadido un tercer terminal de puerta con el que se consigue iniciar la conducción del mismo (Figura 23.72 a). El triac también posee un tercer terminal de puerta, pero está preparado para conducir en ambos sentidos, a diferencia del SCR que conduce en un sólo, por lo que es capaz de controlar los dos semiciclos de la C.A (Figura 23.72 b).

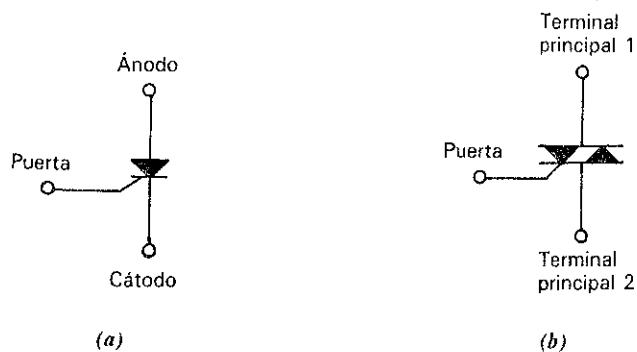


Figura 23.72. Representación esquemática de tiristores. (a) El SCR. (b) El triac.

Los tiristores son componentes semiconductores que poseen tres uniones, a diferencia de las dos con las que se construyen los transistores comunes. Estudiaremos primero el diodo PNPN de cuatro capas, y posteriormente, pasaremos al estudio concreto del tiristor o rectificador controlado de silicio (SCR).

A partir de este elemento aparecen otros con algunas variantes, como son los diac, triac y UJT.

23.7.1 El rectificador controlado de silicio (SCR)

Este elemento constituye uno de los dispositivos electrónicos más adecuados para sustituir al relé electromagnético. Su funcionamiento es muy rápido, seguro y, al no poseer contactos móviles, de gran duración.

En la Figura 23.73. se muestra la composición de un SCR y su símbolo.

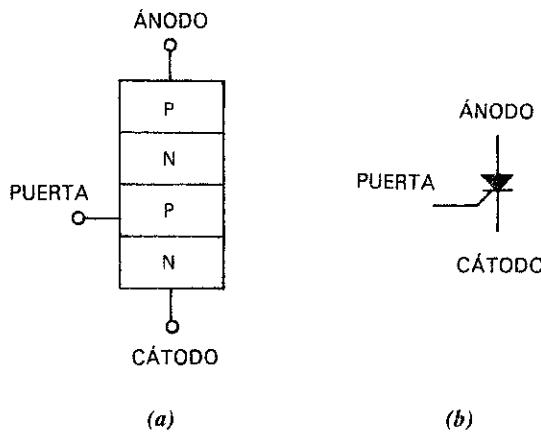


Figura 23.73. Rectificador controlado de silicio (SCR). (a) Composición. (b) Representación esquemática.

Este dispositivo conduce únicamente en un sentido cuando se cumplen las condiciones de disparo, que se darán cuando se excite positivamente la puerta o cuando se supere la tensión de ruptura del mismo. En las hojas de especificaciones técnicas de los SCR se facilitan los valores de tensión y corriente de disparo. Así, por ejemplo, el tiristor 2N 6389 posee una tensión de disparo en puerta (V_g) de 0,7 V y una corriente de disparo en puerta (I_g) de 8 mA, siendo su tensión de ruptura directa (V_d) de unos 600 V.

Por lo general, los SCR no están preparados para ser activados por tensión de ruptura; por esta razón, éstos casi siempre se diseñan para cerrarse por disparo de puerta.

En la Figura 23.74 se muestra la curva característica de tensión-corriente directa de un SCR.

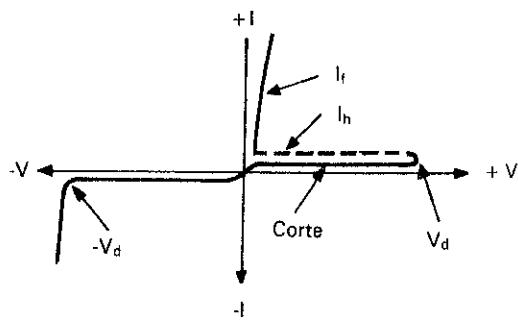


Figura 23.74. Curva característica del SCR.

I_f = Corriente de conducción

I_h = Corriente de mantenimiento

V_d = Tensión directa de ruptura

- V_d = Tensión inversa de ruptura

En esta curva no se ha tenido en cuenta la corriente de polarización de puerta (se ha trazado para $I_g = 0$). En ella se puede observar que para que el SCR entre en conducción, es necesario aplicar una tensión directa (V_d) bastante elevada entre el ánodo y el cátodo.

Una vez disparado el SCR, éste se pone en conducción y aumenta su corriente directa, comportándose como un interruptor cerrado. Por lo general, las corrientes directas que son capaces de conducir los SCR pueden llegar hasta algunos miles de amperios, lo que lo hace ideales para aplicaciones de tipo industrial (control de potencia de elementos de calefacción, iluminación, motores eléctricos, etc.). Así, por ejemplo el SCR 2N 6389 es capaz de conducir una corriente de 12 A con una pequeña corriente de disparo de 8 mA; o el S 6210 D, que es capaz de manejar una corriente de 170 A con una corriente de disparo de también 8 mA.

Es importante observar en las curvas que para que el SCR permanezca en el estado de conducción es necesario que por él circule una corriente mínima de mantenimiento (I_h). Para el 2N 6389 esta corriente es de 10 mA, mientras que para el S 6210 D es de 9 mA.

En la región de polarización inversa el SCR se comporta como un diodo normal.

En resumen, la forma habitual de disparar un SCR es aplicando a la puerta un pulso. Para desactivar el SCR bastará con reducir la corriente directa del mismo hasta un valor inferior a la de mantenimiento.

23.7.2 El diac

A diferencia del SCR, que únicamente admitía el paso de la corriente en un sentido, el diac permite que ésta fluya en ambas sentidos. Este dispositivo sólo posee dos terminales.

La aplicación fundamental de este dispositivo es la de producir los impulsos de disparo para los SCR y triacs.

Un diac está constituido por dos diodos de cuatro capas conectados en paralelo y en oposición, a los que se les ha desprovisto del terminal de puerta. En la Figura 23.75 se muestra su constitución y su símbolo.

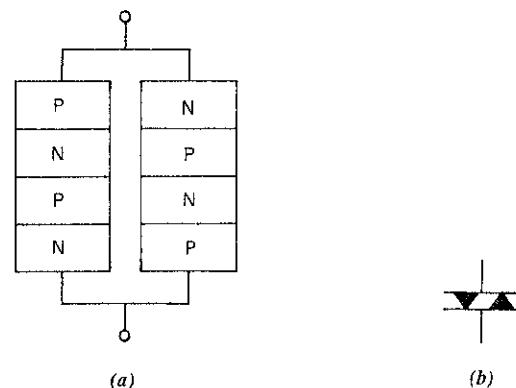


Figura 23.75. Diac. (a) Composición. (b) Representación esquemática.

Dado que no existe terminal de puerta, la única forma de que exista conducción en cualquiera de los dos diodos es apli-

cando una tensión directa superior al de ruptura de la unión polarizada.

La forma de que deje de conducir un diac, una vez disparado, es reduciendo la corriente directa a un valor inferior al de mantenimiento.

En la Figura 23.76 se puede apreciar la curva característica de un diac:

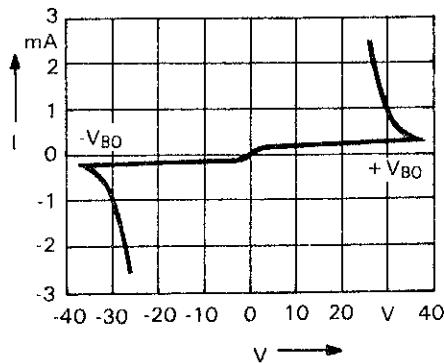


Figura 23.76. Curva característica del diac.

Aquí se puede comprobar que, hasta que no se supere la tensión de ruptura V_{BO} , el diac no entra en conducción y que además ésta puede ser positiva ($+V_{BO}$) o negativa ($-V_{BO}$).

Si aplicamos un C.A. a un diac, éste conduce en ambos sentidos cuando la tensión supere a la de ruptura.

En la Figura 23.77 se muestra una de las aplicaciones del diac. Se trata de controlar la potencia de un horno mediante un SCR y un diac. Para ello alimentamos el circuito con una C.A. senoidal y, mediante el potenciómetro R_2 , regulamos el tiempo de disparo del SCR gracias al circuito formado por el condensador C y el diac.

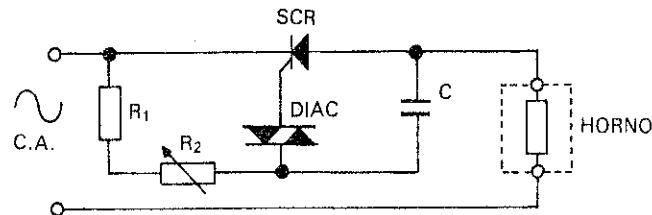


Figura 23.77. Control de potencia de una carga de C.A. mediante SCR controlado por diac.

Al disminuir el valor óhmico de R_2 se consigue que el tiempo de carga del condensador C sea menor. Al alcanzarse la tensión de ruptura del diac, éste entra en conducción y descarga al condensador hacia la puerta del SCR, provocando el disparo del mismo. De esta forma, variando el valor del potenciómetro R_2 podemos conseguir variar el período de conducción del SCR y con él la potencia del horno. En este circuito el SCR sólo conduce durante el semicírculo negativo, permaneciendo bloqueado durante el semicírculo positivo. Para conseguir que este circuito alimente al receptor durante los dos semicírculos será necesario el empleo de un nuevo componente: el triac.

23.7.3 El triac

El triac es un elemento que, al igual que el diac, admite el paso de la corriente en ambas direcciones. Este dispositivo posee tres terminales y se comporta como dos SCR invertidos en paralelo.

Al igual que el diac, el triac se forma al conectar en paralelo dos diodos de cuatro capas en oposición, con la diferencia de que ahora se conserva el terminal común de puerta. En la Figura 23.78 se puede ver su constitución y su símbolo.

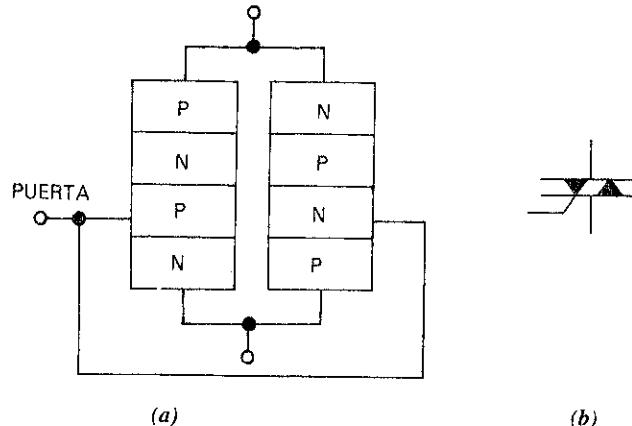


Figura 23.78. Triac. (a) Constitución. (b) Representación esquemática.

El funcionamiento de este dispositivo es básicamente como el del diac, con la gran diferencia de que ahora se le puede disparar mediante impulsos aplicados al terminal de puerta. Por esta razón, la tensión de ruptura de un triac suele ser bastante elevada.

Según la polaridad de la tensión aplicada a los terminales del triac, así será la polaridad del impulso aplicado al terminal de puerta para que éste se dispare.

La aplicación fundamental de los triacs está en el control y regulación de potencia en C.A.

23.7.4 El transistor de unijuntura (UJT)

Este dispositivo se utiliza, fundamentalmente, como generador de pulsos de disparo para SCR y triacs.

El UJT es un componente que posee tres terminales: dos bases y un emisor, tal como se muestra en la Figura 23.79.

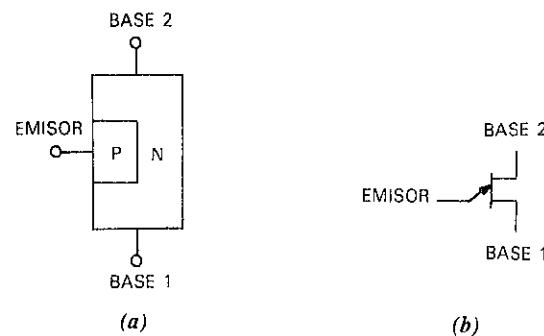


Figura 23.79. Transistor de unijuntura (UJT). (a) Constitución. (b) Representación esquemática.

En la Figura 23.79 a se puede apreciar la constitución de un UJT, que en realidad está compuesto solamente por dos cristales. Al cristal P se le contamina con una gran cantidad de impurezas, presentando en su estructura un número elevado de huecos. Si embargo, al cristal N se le dopa con muy pocas impurezas, por lo que existen muy pocas electrones libres en su estructura. Esto hace que la resistencia entre las dos bases R_{BB} sea muy alta cuando el diodo del emisor no conduce.

Para entender mejor cómo funciona este dispositivo, vamos a valernos del circuito equivalente de la Figura 23.80.

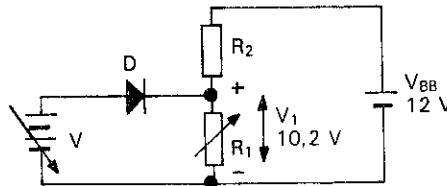


Figura 23.80. Circuito equivalente del UJT.

Al valor de V_1 se le conoce como tensión intrínseca, y es aquella que hay que aplicar para que el diodo comience a conducir. En nuestro ejemplo, si aplicamos una tensión de 8 V al emisor, éste no conducirá, ya que en el cátodo del diodo D existe un potencial positivo de 10,2 V (ver Figura 23.80), correspondientes a la tensión intrínseca, por lo que dicho diodo permanecerá polarizado inversamente. Sin embargo, si aplicamos una tensión superior a 10,9 V (los 10,2 V de V_1 más 0,7 V de la tensión de barrera del diodo D), el diodo comenzará a conducir, produciéndose el disparo o encendido del UJT. En resumen, para conseguir que el UJT entre en estado de conducción es necesario aplicar al emisor una tensión superior a la intrínseca.

Una vez que conseguimos que el diodo conduzca, por efecto de una tensión de polarización directa del emisor respecto a la base 1, los portadores mayoritarios del cristal P (huecos) inundan el tramo de cristal de tipo N comprendido entre el emisor y dicha base (recordar que el cristal P está fuertemente contaminado con impurezas y el N débilmente). Este efecto produce una disminución repentina de la resistencia R_1 y con ella una reducción de la caída de tensión en la base 1 respecto del emisor, lo que hace que la corriente de emisor aumente considerablemente.

Mientras la corriente de emisor sea superior a la de mantenimiento (I_V), el diodo permanecerá en conducción. Esta corriente se especifica normalmente en las hojas de características, y suele ser del orden de 5 mA.

Una de las aplicaciones del UJT más común es como generador de pulsos en diente de sierra. Estos pulsos resultan muy útiles para controlar el disparo de la puerta de triacs y SCR.

En la Figura 23.81 se muestra el esquema de uno de estos circuitos.

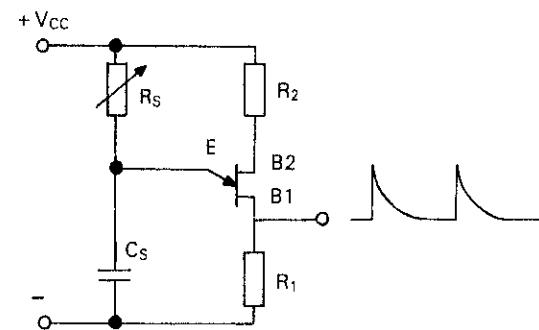


Figura 23.81. Generador de pulsos de diente de sierra mediante UJT.

El funcionamiento es como sigue: al aplicar un voltaje V_{CC} al circuito serie R-C, formado por la resistencia variable R_S y el condensador C_S , dicho condensador comienza a cargarse. Como este condensador está conectado al emisor, cuando se supere la tensión intrínseca, el UJT entrará en conducción. Debido a que el valor óhmico de la resistencia R_1 es muy pequeño, el condensador se descargará rápidamente, y en el terminal de B_1 aparecerá un impulso de tensión. Al disminuir la corriente de descarga del condensador, sobre el emisor del UJT, por debajo de la de mantenimiento, éste se desactiva y comienza otro nuevo ciclo de carga y descarga del condensador. Así, se consigue que en el terminal de la base 1 aparezca una señal pulsante en forma de diente de sierra, que puede utilizarse para controlar los tiempos de disparo de un SCR o de un triac. Para regular el tiempo de disparo es suficiente con modificar el valor óhmico de la resistencia variable R_S , ya que de ésta depende la constante de tiempo de carga del condensador.

En la Figura 23.82 se muestra una típica aplicación del generador de pulsos de diente de sierra con UJT para controlar el disparo de un SCR. Mediante este circuito controlamos la velocidad de un motor serie (o de cualquier otro tipo de carga: estufas, lámparas, etc.) gracias a la regulación de la corriente que realiza sobre medio ciclo el SCR. Para controlar la velocidad del motor, basta con modificar la frecuencia de los pulsos en dientes de sierra, lo cual se consigue variando el valor del potenciómetro R_S .

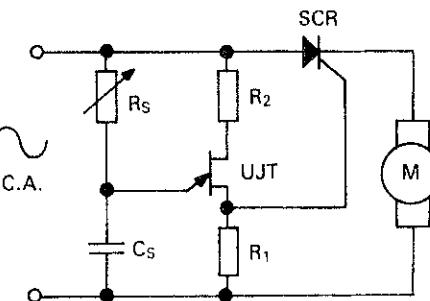


Figura 23.82. Control de velocidad de un motor mediante SCR y UJT.

Actividades

- Consigue resistencias de todos los tipos y realiza una clasificación de las mismas. Comprueba su valor óhmico mediante el código de colores y contrasta los resultados midiendo la resistencia mediante un óhmetro.
- Consigue un diodo y un polímetro. Para comprobar si el estado de la unión del diodo es perfecto, basta con conectar el polímetro utilizado como óhmetro entre los terminales del mismo, de tal forma que la punta de prueba (-) esté unida al cátodo del diodo, y la (+) al ánodo.
- Si el resultado de la medida es cero ohmios será señal de que el diodo está en buen estado. Una vez que hayas comprobado esto último, invierte las conexiones. Si el polímetro indica infinito, el diodo está en perfecto estado.
- Conviene tomar ciertas precauciones cuando se trata de comprobar diodos de pequeña potencia, ya que se puede dar el caso en que la corriente que proporciona el óhmetro para tomar la medida sea suficiente para destruirlo.
- Consigue algunos diodos y monta un circuito rectificador monofásico de media onda y otro de onda completa. Mide con un voltímetro la tensión de salida en ambos casos. Después conecta un oscilloscopio a la salida de cada uno de los rectificadores y compara los resultados.

- En la Figura 23.83 se muestra el circuito correspondiente a una fuente de alimentación estabilizada. El puente rectificador y el filtro con condensador consiguen una tensión continua con una tensión de rizado determinada. El efecto combinado del diodo Zener y la resistencia de polarización consiguen reducir la tensión de rizado a valores muy pequeños y estabilizar la tensión en la carga, aunque ésta se modifique.

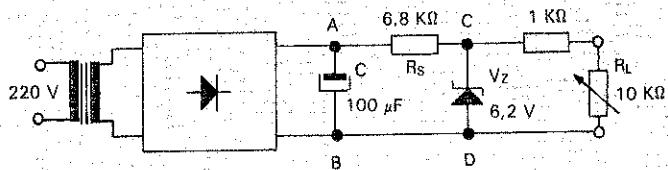


Figura 23.83. Fuente de alimentación estabilizada con diodo zener.

El diodo Zener utilizado como regulador podría ser el BZX85-C6V2 o el BZY96-C6V2, es decir un diodo que posea unos 6,2 V de tensión Zener. Para comprobar el efecto de estabilización cuando la carga se modifica, se ha utilizado un potenciómetro de 10 KΩ conectado con una resistencia fija de 1 KΩ.

- Consigue el Zener, observa su aspecto e identifica sus terminales. Seguidamente, consulta en las especificaciones técnicas que facilita el fabricante del mismo, y anota los valores característicos más relevantes del diodo seleccionado.
- Monta el circuito de la Figura 23.83 en el entrenador didáctico y, antes de suministrar energía al primario del transformador, sitúa en su máxima resistencia al potenciómetro que simula a la carga variable.
- Suministra energía al circuito y mediante un oscilloscopio comprueba el aspecto de la tensión de salida en el puente rectificador (puntos A-B). Realiza la misma operación para la tensión de salida del regulador (puntos C-D) y compara los resultados obtenidos, poniendo especial atención en la disminución que el regulador produce en el rizado. Con un voltímetro de C.C. mide también las tensiones en dichos puntos.
- Varía la carga mediante el potenciómetro, haciendo que su resistencia sea cada vez más pequeña. Repite las medidas del apartado (c) en cada una de las modificaciones de la carga y comprueba el efecto estabilizador del diodo Zener para cualquier régimen de carga.
- Consigue varios transistores y comprueba con el polímetro cuáles NPN y cuáles son PNP, así como la disposición de sus terminales. Al mismo tiempo, averigua si están en buen estado. Seguidamente, consigue las hojas de características de los fabricantes de los transistores verificados e identifica los valores característicos más significativos de los mismos. Para facilitar la tarea de identificación de los transistores, consigue los códigos y normas internacionales más usuales para identificar dispositivos semiconductores y comprueba las referencias dadas por los fabricantes de los mismos.
- Toma un transistor de silicio y otro de germanio, y mediante un polímetro digital con transistómetro, averigua su ganancia a temperatura ambiente. Seguidamente, aumenta la temperatura de los transistores (por ejemplo, acercando una lámpara incandescente) y comprueba cómo aumenta la ganancia de los mismos con la temperatura, especialmente en el de germanio.
- Se tratará de realizar un circuito que, aprovechando las propiedades del transistor, sea capaz de activar una lámpara cuando el nivel de iluminación se reduce hasta valores propios de la oscuridad de la noche. Este circuito es muy útil para el encendido automático del alumbrado público en los cambios de día-noche. En la Figura 23.84 se muestra el esquema correspondiente al circuito en cuestión.

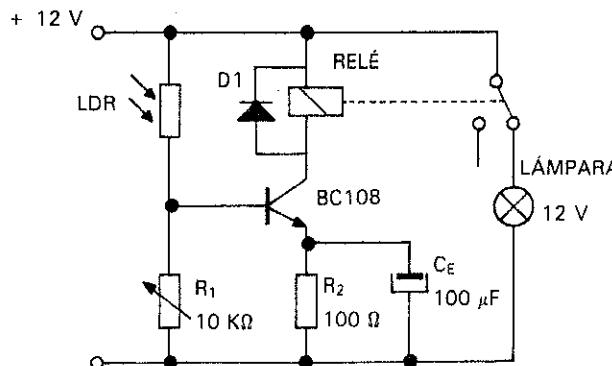


Figura 23.84. Circuito de un interruptor accionado por la luz.

Para su montaje necesitaremos:

- Una LDR, que es la que va hacer las veces de sensor luminoso.
- Un transistor BC 108 o similar, que es el que va ser capaz de aportar la suficiente corriente para excitar la bobina del relé electromagnético.
- Un relé, que es el que va a abrir y cerrar el circuito principal de las lámparas de alumbrado.
- Un potenciómetro R_1 de $10\text{ K}\Omega$, el cual se ajustará para conseguir la activación del relé para una determinada iluminación.
- Una resistencia R_2 de $100\text{ }\Omega$ y un condensador de $100\text{ }\mu\text{F}$, los cuales se encargarán de dar estabilidad al transistor.

- Un diodo D1 1N4001 para evitar la destrucción del transistor cuando se desconecte el relé (al desconectarse la bobina del relé, la energía acumulada por la misma, por el efecto de autoinducción, se manifiesta como una sobretensión inversa de descarga que puede llegar a destruir las uniones del transistor; el diodo conectado en derivación con dicha bobina, descarga esta energía por sí mismo, protegiendo al transistor).

El funcionamiento de este circuito es muy sencillo: para niveles de iluminación elevados (luz de día), la LDR posee un valor lo suficientemente bajo para polarizar la base del transistor y ponerlo en conducción. En estas condiciones, el transistor se comporta como un interruptor cerrado y excita la bobina del relé, el cual abre su contacto normalmente cerrado, quedando la lámpara de alumbrado apagada. Cuando la luz se reduce (noche), la LDR aumenta de valor y el transistor entra en corte (se comporta como un interruptor abierto), lo que provoca la desactivación del relé y el encendido de la lámpara.

Monta el circuito propuesto en la Figura 23.84 y comprueba su funcionamiento. Para conseguir el punto óptimo de activación de las lámparas deberás ajustar el potenciómetro R_1 .

8. Consigue un SCR, un triac, un diac y un UJT, comprueba la disposición de sus terminales y consulta sus características en las hojas de especificaciones técnicas que facilita el fabricante de los mismos.
9. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Autoevaluación

1) Determina el valor óhmico de las siguientes resistencias que aparecen con los colores

R₁: (rojo, violeta, naranja, plata)

R₂: (marrón, rojo, naranja, rojo)

R₃: (marrón, verde, gris, oro)

2) Determina el valor óhmico de las siguientes resistencias que aparecen con los colores

R₁ = 24 KW ± 5%

R₂ = 68 KW ± 10%

R₃ = 110 KW ± 2%

3) En una resistencia NTC:

- a) La resistencia aumenta con la temperatura
- b) La resistencia aumenta con la tensión
- c) La resistencia disminuye con la temperatura

4) Es una resistencia LDR:

- a) La resistencia aumenta con la luz
- b) La resistencia aumenta con la temperatura
- c) La resistencia disminuye con la luz

5) A qué tensión de polarización comienzan a conducir los diodos de silicio?

- a) 0,3 V
- b) 1 V
- c) 0,7 V

6) A qué se debe una corriente inversa elevada por el diodo?

- a) A la aplicación de una tensión directa también elevada
- b) A la aplicación de una tensión inversa también elevada
- c) A la elevación de la corriente por el diodo

7) Con qué sistema de rectificación se consigue una tensión de salida con menos rizado?

- a) Rectificador monofásico de onda completa
- b) Rectificador trifásico de media onda

c) Rectificador trifásico de onda completa

8) El diodo Zener funciona normalmente en polarización:

- a) Directa
- b) Sin polarización
- c) Inversa

9) Dibuja el circuito básico de un regulador de tensión con Zener y explica cómo se consigue el efecto estabilizador de la tensión en la carga.

10) ¿Qué ocurre con la corriente de colector al aumentar la tensión de polarización directa V_{BE} aplicada entre la base y el emisor de un transistor?

- a) Disminuye
- b) También aumenta
- c) Se mantiene invariable

11) ¿Cuál de las corrientes de un transistor es más baja?

- a) La de emisor
- b) La de colector
- c) La de base

12) En un transmisor se ha medido una variación de corriente de colector de 98 mA y una variación de 100 mA en la corriente de emisor. Teniendo en cuenta que en un transistor se cumple que I_E = I_C + I_B, determinar la ganancia del transistor.

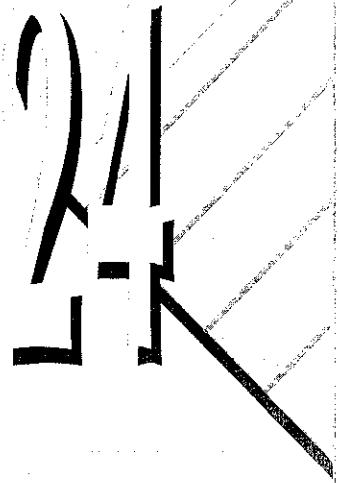
13) ¿Cómo se suele provocar habitualmente el disparo de los SCR?

- a) Aplicando una pequeña corriente en el terminal de puerta
- b) Aplicando una tensión directa disruptiva
- c) Aplicando una tensión inversa

14) ¿Cuál es la diferencia entre un SCR y un triac?

- a) El SCR puede conducir en ambos sentidos y el triac no.
- b) El triac puede conducir en ambos sentidos y el SCR no
- c) El SCR posee dos terminales y el triac tres

Circuitos Electrónicos Analógicos Básicos



Introducción

Gracias a componentes electrónicos como las resistencias, condensadores, bobinas, diodos, Zener, transistores, tiristores, etc., es posible construir circuitos electrónicos que sean capaces de realizar una tarea determinada, como, por ejemplo, fuentes de alimentación, circuitos para el control de la potencia de una carga, amplificadores, generadores de señal, osciladores, etc.

Contenido

- Fuentes de alimentación.
- Circuitos básicos para el control de potencia.
- Amplificadores.
- Amplificadores operacionales.
- Generadores de señal.
- Osciladores.

Objetivos

- Analizar funcionalmente los circuitos electrónicos analógicos básicos (rectificadores, filtros, amplificadores, etc) y sus aplicaciones más relevantes (fuentes de alimentación, amplificadores de sonido, circuitos básico de control de potencia, generadores de señal, osciladores, etc.).
- Analizar el funcionamiento de los circuitos electrónicos analógicos básicos y describir su tipología, parámetros característicos y formas de onda típicas.
- Explicar las características diferenciales entre los circuitos electrónicos analógicos básicos construidos con elementos discretos y los construidos con amplificadores operacionales integrados.

24.1. Fuentes de alimentación

Como ya hemos podido comprobar en el estudio de la Electrotecnia, las fuentes de alimentación son fundamentales para proporcionar las tensiones continuas a las que funcionan todos los circuitos construidos a base de semiconductores, como equipos de amplificación, equipos de recepción de radio y TV, etc. Además, las fuentes de alimentación son equipos imprescindibles para la realización de ensayos en el laboratorio de Electrónica, tales como ensayos de componentes, verificación de circuitos, construcción de prototipos, ajustes, etc.

En el tema 23 se estudió la parte fundamental de una fuente de alimentación: los diodos rectificadores (convierten la C.A. en C.C. pulsante) y los filtros (reducen el rizado excesivo de la C.C. proporcionada por los diodos rectificadores). Debido a las necesidades de dar una cierta estabilidad a la tensión de salida de la fuente de alimentación, se le añadió un diodo Zener como elemento de estabilización de dicha tensión.

Debido al avance de las nuevas tecnologías, las fuentes de alimentación deben proporcionar tensiones y corrientes mucho más estables, permaneciendo éstas insensibles a las variaciones de la carga y de la temperatura, así como disponer de la posibilidad de poder regular la tensión de salida entre un amplio margen o poseer protecciones contra cortocircuitos y sobrecargas.

La necesidad de las fuentes de alimentación estabilizadas se debe a que la tensión de salida de una fuente de alimentación sufre variaciones, que pueden afectar al buen funcionamiento del receptor a que alimentan. Estas variaciones pueden ser causadas por dos factores:

- Variaciones en la tensión de la red de C.A que producen, a su vez, variaciones del mismo carácter en la tensión de salida.
- Debido a que la fuente de alimentación posee una determinada resistencia interna, la corriente de carga produce una caída de tensión en la misma, produciéndose variaciones en la tensión de salida al variar la demanda de energía de la carga.

La función que poseen los circuitos estabilizadores es la de mantener constante la tensión de salida de la fuente de alimentación aunque varíe la corriente de carga o la tensión de la red.

Para evitar daños a los circuitos que componen una fuente de alimentación, los fusibles no presentan una protección segura en los casos de cortocircuito accidental y sobrecargas. Estos dispositivos actúan con excesiva lentitud ante las sobre-corrientes, produciéndose daños irreversibles en los semiconductores de potencia si no se actúa con rapidez. Por esta razón, las fuentes de alimentación suelen ir equipadas con circuitos electrónicos que, al detectar una sobrecorriente, reducen la tensión de salida, evitando que la corriente de carga supere valores peligrosos.

Algunas fuentes de alimentación, como las de laboratorio, poseen la posibilidad de ajustar, mediante un potenciómetro, el valor de la corriente máxima que la fuente entrega a la carga.

24.1.1 Fuentes de alimentación con reguladores de tensión integrados

Debido al gran avance de las nuevas tecnologías en la integración de circuitos, hoy en día se fabrican una gran variedad de reguladores de tensión en forma de circuito integrado de tan sólo tres terminales. Estos circuitos, que permiten integrar una gran cantidad de componentes discretos en una única cápsula (C.I.), hacen más fácil el trabajo del proyecto y abaratan considerablemente el producto final. En la Figura 24.1 se muestra el aspecto de algunos de estos circuitos.

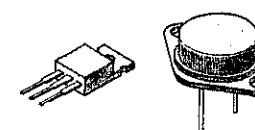


Figura 24.1. Reguladores de tensión integrados.

En la Figura 24.2 se muestra el circuito de una fuente de alimentación estabilizada mediante un regulador integrado.

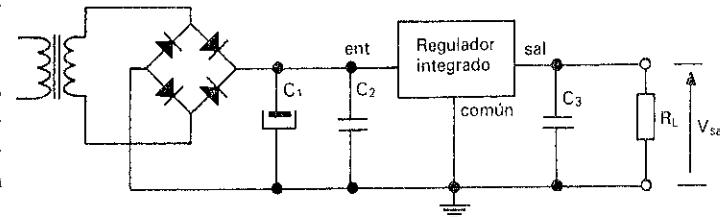


Figura 24.2. Fuente de alimentación con regulador integrado.

El regulador integrado consta de tres terminales: uno se corresponde con el de entrada de la tensión sin estabilizar y otro con el de salida de tensión estabilizada. El tercero se corresponde con el terminal común a la entrada y salida, que, por lo general, se conecta a masa.

Esta fuente de alimentación es muy sencilla, ya que, aparte de los componentes habituales (transformador, diodos rectificadores, condensador C_1 de alta capacidad que hace las funciones de filtro), se compone del C.I. del regulador al que se le añaden un condensador C_2 de baja capacidad a la entrada del regulador y otro C_3 a la salida. Estos condensadores poseen la función de proporcionar una tensión a la entrada y salida del regulador más estable para ruidos de alta frecuencia.

Los reguladores de tensión integrados ofrecen muy buenas características para las diferentes aplicaciones.

En las hojas de especificaciones técnicas que proporcionan los fabricantes de reguladores integrados (Data Book) se pueden encontrar las características más significativas de los mismos, como son:

- Corriente máxima de salida.
- Tensión de regulación.
- Protecciones internas (al cortocircuito, sobrecargas, sobrealentamientos, etc.).

- Tipo de encapsulado.
- Temperaturas de trabajo, temperatura máxima de la unión.
- Tensión de entrada máxima y mínima.
- Tensión de salida máxima, nominal y mínima.
- Tensión de rizado en la salida.

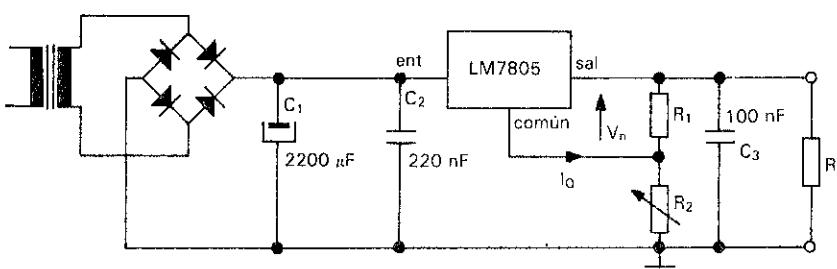


Figura 24.3. Fuente de alimentación con regulador de tensión ajustable.

Mediante un regulador integrado corriente es posible obtener en la salida un tensión ajustable a la salida. Para ello, se incluye entre los terminales de salida y común del regulador una resistencia fija R_1 y un potenciómetro R_2 , tal como se muestra en el circuito de la Figura 24.3.

Con este sistema es posible ajustar el valor de la tensión de salida por encima de la tensión nominal del regulador.

24.1.2 Fuentes de alimentación conmutadas

Dado el gran avance de la integración de circuitos, hoy en día se incorporan a la mayoría de los equipos de consumo del sector electrónico las fuentes de alimentación conmutadas. En un principio, este tipo de alimentación es mucho más compleja y cara, pero posee un rendimiento mucho mayor que las fuentes de alimentación convencionales (las fuentes de alimentación conmutadas consiguen hasta un rendimiento del 80% frente al 40 o 50% de las convencionales).

En las fuentes de alimentación convencionales, tanto los transistores de control como los reguladores de tensión integrados que se conectan en serie con la carga, consiguen controlar la tensión a un valor estable a costa de producir una caída de tensión entre los terminales de entrada y salida. De esta forma, estos elementos tienen que disipar una potencia igual a dicha caída de tensión por la intensidad máxima que fluye hacia la carga. Esta potencia se considera pérdida y se transforma íntegramente en calor, por lo que el rendimiento que se consigue es bajo, aparte del inconveniente añadido de tener que deshacerse del calor generado con voluminosas aletas de refrigeración o, incluso, ventiladores.

Las fuentes de alimentación conmutadas utilizan otro método de trabajo, ya que hacen trabajar al transistor de control, que queda en serie con la carga, en forma de conmutación.

Esto significa que dicho transistor va a trabajar únicamente en dos estados: en corte o saturación (como un interruptor abierto o como un interruptor cerrado). De esta forma, se consigue que la disipación de potencia en el transistor de control en cualquiera de los dos estados sea mínima (en corte, la corriente es prácticamente nula, mientras que la resistencia colector-emisor es elevada; en saturación, la corriente es elevada, pero la resistencia colector-emisor es muy pequeña), pudiendo aumentar la corriente que controla dicho transistor respecto al utilizado en una fuente de alimentación convencional.

En la Figura 24.4 se muestra en un diagrama de bloques las partes fundamentales de que consta una fuente de alimentación conmutada.

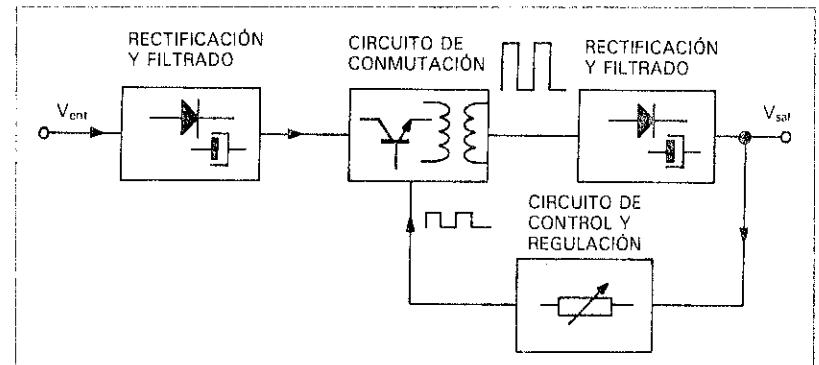


Figura 24.4. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación conmutada.

24.2. Circuitos básicos de control de potencia

En el tema anterior ya pudimos comprobar cómo se puede controlar la potencia de una carga mediante el empleo de tiristores. A continuación estudiaremos algunos de los circuitos que se emplean para esta función.

24.2.1 Control de potencia en C.C. con un SCR

En el circuito de la Figura 24.5 se muestra el circuito de control de potencia de una carga (a título de ejemplo hemos conectado como carga la resistencia calefactora de $10\ \Omega$ correspondiente a una estufa eléctrica).

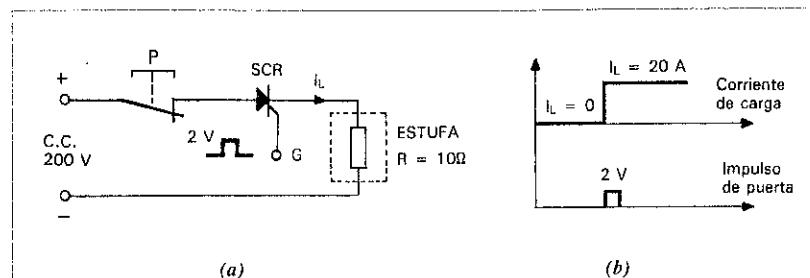


Figura 24.5. Circuito de control de una estufa mediante SCR. (a) Esquema eléctrico. (b) Impulso de disparo del SCR.

En el circuito de la Figura 24.5 a podemos hacer que el SCR entre en conducción aplicando un pequeño impulso, de unos 2 V, a la puerta del mismo. Mediante este pequeño impulso podemos controlar la gran corriente que fluye por el SCR hacia la carga, que será aproximadamente de $I = V/R = 200/10 = 20 \text{ A}$ (para hacer este cálculo no se ha tenido en cuenta la pequeña caída de tensión que se produce entre el ánodo y cátodo del SCR, ya que ésta es del orden de 1 V). Por supuesto, las características nominales del SCR deberán ser tal que soporten la intensidad de la carga sin sufrir daños.

Una vez disparado el SCR, éste continua conduciendo aunque el impulso de puerta desaparezca, tal como se muestra en los gráficos de la Figura 24.5 b. Para provocar la desconexión del SCR es necesario disminuir la corriente de carga a un valor inferior al de mantenimiento. Esto se consigue accionando el pulsador P durante un corto período de tiempo (este tiempo puede llegar a ser menor a $50 \mu\text{s}$).

24.2.2 Control de potencia en C.A. con un SCR

Seguidamente, vamos a mostrar un ejemplo de aplicación del SCR como elemento de control de potencia de una lámpara de C.A. En la Figura 24.6 aparece un circuito de este tipo.

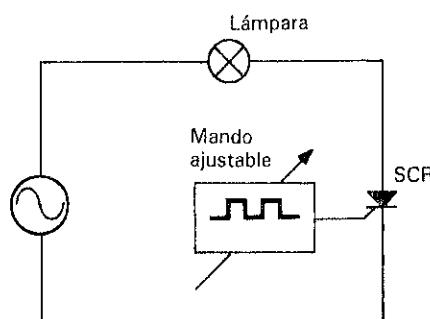


Figura 24.6. Control de potencia de una carga de C.A. mediante SCR.

El SCR conduce únicamente cuando se le aplica un impulso de corriente de polarización en su terminal de puerta y se desactiva automáticamente cuando la corriente pasa por cero. Para poder controlar el tiempo de disparo del SCR hay que accionar el mando ajustable del generador de impulsos que activa la puerta.

En el caso de que el SCR se dispare al comenzar el ciclo positivo, éste conducirá durante dicho semicírculo hasta que la corriente sea inferior a la de mantenimiento del tiristor; es

dicho, aproximadamente hasta que ésta se haga cero, tal como se muestra en la Figura 24.7 a. En este caso el SCR está activado durante el tiempo t_1 y, por tanto, se comporta como un rectificador de media onda. La potencia que se transfiere a la lámpara es la máxima y ésta luce con toda su intensidad.

En la Figura 24.7 b el SCR es disparado después de comenzado el ciclo, por lo que lo que la corriente circula por la lámpara tan sólo durante el tiempo t_2 . En este caso la lámpara baja su intensidad luminosa.

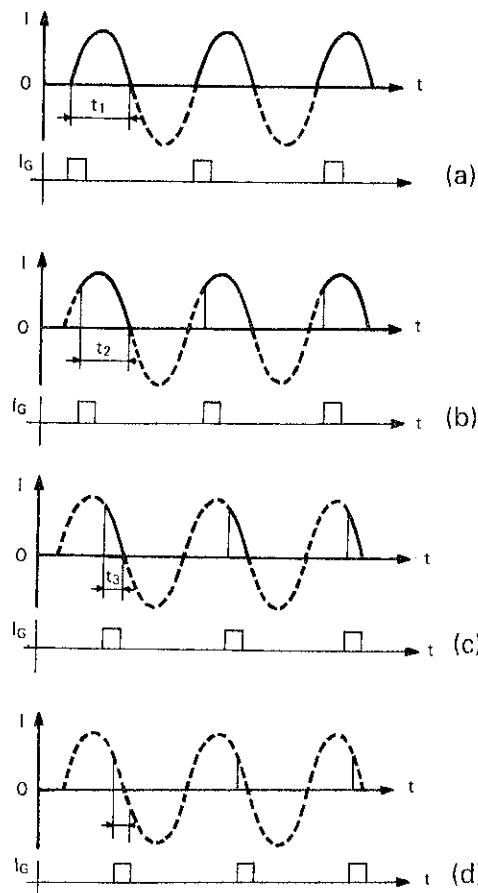


Figura 24.7. Tiempos de conducción del SCR.

En la Figuras 24.7 c y d se ha reducido drásticamente el tiempo de conducción del SCR, por lo que la potencia que se entrega a la lámpara es mínima.

24.2.3 Control de potencia en C.A. con un triac

En el circuito de la Figura 24.8 se muestra un sencillo ejemplo de aplicación de cómo se puede controlar la iluminación de una lámpara incandescente de gran potencia en C.A. Para ello, nos valemos de un triac, un diodo, una resistencia y un commutador de tres posiciones. Cuando el commutador S se sitúa en la posición 1, la lámpara permanece apagada, ya que la puerta del triac no ha sido activada. Para la posición 2 del

comutador, el terminal de puerta del triac recibe corriente a través del diodo, pero sólo en los semiciclos positivos, lo que provocará que el triac únicamente conduzca durante este período, dando como resultado una disminución de la potencia transferida a la lámpara. En la posición 3 del comutador, a la puerta se le suministra corriente en los dos semiciclos, lo que provoca la conducción del triac tanto en los semiciclos positivos como en los negativos; en este caso la lámpara trabaja a plena potencia, suministrando una luminosidad máxima. La misión de la resistencia R conectada en serie con el circuito de puerta es la de limitar la tensión y corriente de puerta a unos valores adecuados.

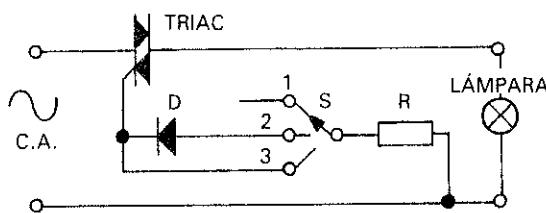


Figura 24.8. Circuito de control de potencia de una lámpara de C.A. mediante triac.

Al igual que un diac puede utilizarse como elemento que controla el disparo del SCR, es posible hacerlo para controlar a un triac. En la Figura 24.9 se muestra el circuito de control de potencia de un horno en C.A. Regulando el valor de la resistencia variable R_2 conseguimos controlar el tiempo de carga del condensador C. Una vez alcanzada la tensión de ruptura del diac, el triac se dispara y conduce. El diac puede disparar el triac tanto en el semiciclo positivo como en el negativo, pudiendo controlarse la corriente por el triac en todo el ciclo completo. El resultado es que es posible controlar la potencia de la carga en un margen mucho más amplio que con el obtenido por el SCR.

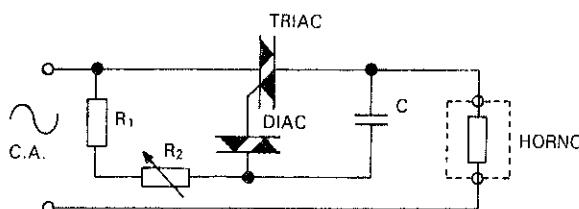


Figura 24.9. Circuito de control de potencia de una carga de C.A. mediante triac controlado por diac.

24.3. Amplificadores

En los amplificadores, gracias a los transistores se consigue elevar la intensidad de los sonidos y de las señales en general. El amplificador posee una entrada por donde se introduce la señal débil y otra por donde se alimenta con C.C. La señal de salida se ve aumentada gracias a la aportación de esta alimentación, siguiendo las mismas variaciones que la de entrada (Figura 24.10).

En la Figura 24.10 se muestra la disposición básica de un amplificador de sonido. La señal de entrada, de bajo nivel (del orden de unos pocos milivoltios), la aportan dispositivos

como el micrófono (transforma las ondas sonoras en señales eléctricas que siguen la misma variaciones que las primeras), el reproductor de discos (transforma las señales grabadas en los surcos del disco, en señales eléctricas), el magnetófono (transforma las señales grabadas magnéticamente en una cinta en señales eléctricas), etc. El amplificador de audio toma estas señales eléctricas y, manteniendo intacta sus cualidades, las eleva de valor (del orden de unos cuantos voltios). Estas señales ya son lo suficientemente fuertes como para poder ser transformadas en sonidos audibles por parte del altavoz.

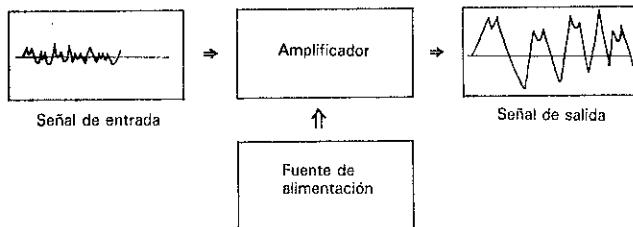


Figura 24.10. El amplificador eleva el nivel de la señal aplicada a su entrada.

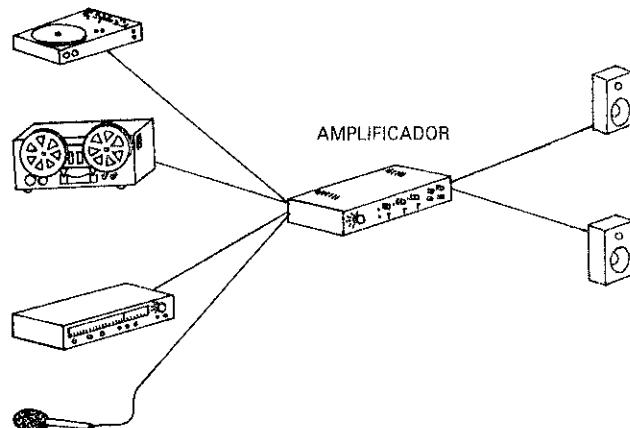


Figura 24.11. Amplificador de audio.

Estudiaremos ahora algunas de las características de los amplificadores que nos ayudarán a entender la función propia de los mismos.

24.3.1 Ganancia de un amplificador

Cuando un amplificador realiza la función de elevar la señal que ha sido aplicada a su entrada, se dice que ha producido una determinada **ganancia**. Se puede decir que la ganancia de un amplificador es la *relación que existe entre el valor de la señal obtenida a la salida y el de la entrada*. Dependiendo de la magnitud eléctrica que estemos tratando, se pueden observar tres tipos de ganancias (Figura 24.12).

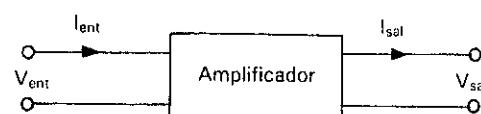


Figura 24.12. El amplificador produce ganancia en la señal de entrada.

Ganancia de tensión, que se obtiene midiendo el valor de la tensión de entrada y el de salida y realizando su cociente.

$$A_v = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}}$$

Ganancia de corriente, que se obtiene midiendo el valor de la intensidad de salida y el de entrada, efectuando su cociente.

$$A_i = \frac{I_{\text{salida}}}{I_{\text{entrada}}}$$

Ganancia de potencia, que se obtiene al dividir la potencia obtenida en la salida entre la potencia entregada a la entrada. Se puede comprobar con facilidad que al realizar esta operación, el resultado que se obtiene coincide con el producto de las ganancias de tensión y corriente.

$$A_p = A_v \cdot A_i$$

Ejemplo: 24.1

La señal de entrada de un amplificador es de 10 mV y 1 mA. Determinar la ganancia de tensión, potencia y corriente de este amplificador, si la señal que se obtiene en la salida es de 1 V y 10 mA.

Solución:

$$A_v = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{1}{0,01} = 100$$

$$A_i = \frac{I_{\text{salida}}}{I_{\text{entrada}}} = \frac{10}{1} = 10$$

$$A_p = A_v \cdot A_i = 100 \cdot 10 = 1.000$$

En conclusión, con este amplificador hemos conseguido una ganancia de 100 veces para la tensión y de 10 para la corriente, habiendo conseguido multiplicar por 1.000 la potencia de la señal de entrada.

24.3.2 Adaptación de impedancias

Los amplificadores poseen una característica fundamental que es la impedancia que presentan a su entrada.

La impedancia de entrada de un amplificador “ Z_{ent} ” limita el paso de corriente proporcionado por el generador de señales, de tal forma que se podría decir que es la carga que presenta a dicho generador de señales (Figura 24.13).

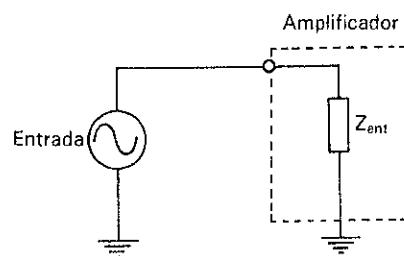


Figura 24.13. Impedancia de entrada del amplificador y del generador de señales.

Los generadores de señal también poseen una impedancia característica, dependiendo este valor del tipo de generador. Así, por ejemplo, para un receptor de radio, la antena es el generador de señales y su impedancia es de unos 50 Ω. En el caso de que el generador de señales fuera un micrófono, la impedancia podría ser algo mayor, del orden de los 10 KΩ.

Para que un sistema posea un rendimiento máximo, la impedancia del generador debe ser igual a la entrada del amplificador. Esto es lo que se conoce como “adaptación de impedancias”.

24.3.3 Clasificación de los amplificadores

No todos los amplificadores son iguales; existen diferencias entre unos y otros, dependiendo de la magnitud de la señal a amplificar, configuración, clase, acoplamiento y aplicaciones. En Tabla 24.1 se hace una clasificación de los mismos:

Seguidamente vamos a exponer a modo de ejemplo, algunas de los circuitos típicos con los que se puede conseguir un amplificador.

CLASIFICACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES	
Dependiendo de la señal	D de pequeña señal
Por su configuración	D de señales fuertes o de potencia
	Emisor común
	Colector común
	Base común

Por su clase	Clase A
Por la frecuencia de señal	Clase B
	Clase C
	Clase AB
	De corriente continua
	De audiofrecuencia (AF)
	De video frecuencia (AF)
	De radiofrecuencia (RF)
	De VHF y UHF

Tabla 24.1

24.3.4 Amplificador de emisor común (EC)

Este tipo de amplificador es muy empleado en etapas previas en los amplificadores de audio, ya que proporciona una respuesta lineal, es decir pertenece a la clase A.

En la Figura 24.14 se muestra un amplificador de emisor común.

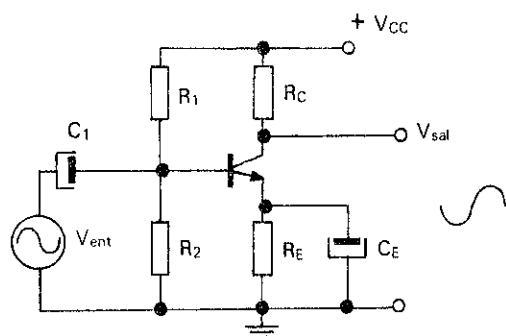


Figura 24.14. Amplificador de emisor común.

La señal de entrada se introduce al amplificador a través del condensador de acoplamiento C_1 y la señal de salida aparece amplificada entre los terminales del colector y masa.

La tensión V_{CC} de la fuente de alimentación y las resistencias R_1 , R_2 y R_E consiguen fijar y estabilizar el punto de trabajo del transistor, no interviniendo en la amplificación de la señal inyectada a la entrada.

El transistor debe estar polarizado adecuadamente para conseguir que el amplificador opere de una forma lineal o de alta fidelidad (sin distorsión en la salida).

La señal que aparece en la salida de este amplificador queda desfasada 180° respecto a la señal de entrada; es decir cuando la señal de entrada crece en sentido positivo, la señal de salida lo hace en sentido negativo. A este fenómeno se le conoce por *inversión de fase*.

24.3.5 Amplificador de colector común (CC)

Este circuito amplificador, del cual se muestra el esquema en la figura 24.15, también se conoce por el nombre de *seguidor de emisor*.

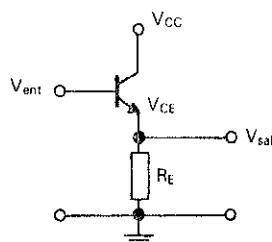


Figura 24.15. Amplificador de colector común.

Estos amplificadores poseen un impedancia de entrada muy elevada, del orden de cientos de miles de ohmios. Esta característica hace que el amplificador de colector común sea ideal en los casos en que el generador de señales posea una impedancia característica muy elevada. De esta forma, se consigue que la señal de C.A. no se pierda en la alta impedancia de dicho generador. Después de este amplificador, puede seguir una etapa amplificadora con emisor común, que posee una mayor ganancia de tensión.

Veamos como opera este amplificador.

Según se puede apreciar en la Figura 24.15, la tensión de entrada se aplica directamente a la base del transistor y la tensión de salida aparece en el emisor. Esta tensión es siempre algo inferior a la de entrada, tal como se deduce de la siguiente relación:

$$V_{\text{sal}} = V_{\text{ent}} - V_{\text{BE}}$$

Así, por ejemplo, si $V_{\text{ent}} = 10 \text{ V}$, como V_{BE} en un transistor de silicio es $0,7 \text{ V}$:

$$V_{\text{sal}} = 10 - 0,7 = 9,3 \text{ V}$$

De aquí se deduce que la ganancia de tensión en este amplificador siempre será menor que la unidad.

La tensión de salida sigue las mismas variaciones que la de entrada, por lo que se puede afirmar que no existe desfase entre las mismas.

La impedancia de entrada de este amplificador es extremadamente elevada, mientras que la impedancia de salida del mismo es muy baja, del orden de unas decenas de ohmios. Por esta razón, este amplificador posee un gran campo de aplicación como adaptador de impedancias; a veces también se le conoce por el nombre de *amplificador de aislamiento*.

Este amplificador es ideal en aquellas aplicaciones en las que el generador de señales posee una impedancia característica muy alta, ya que su gran impedancia de entrada representa una carga muy leve para éste. En estas circunstancias, la corriente que debe ceder el generador es muy pequeña, con lo que éste se ve aislado de la carga que supondría el resto del circuito.

Por último indicar que, al poseer este amplificador una ganancia cercana a la unidad, habrá que utilizarlo en combinación con amplificadores de emisor común para conseguir los efectos de amplificación deseados, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 24.16.

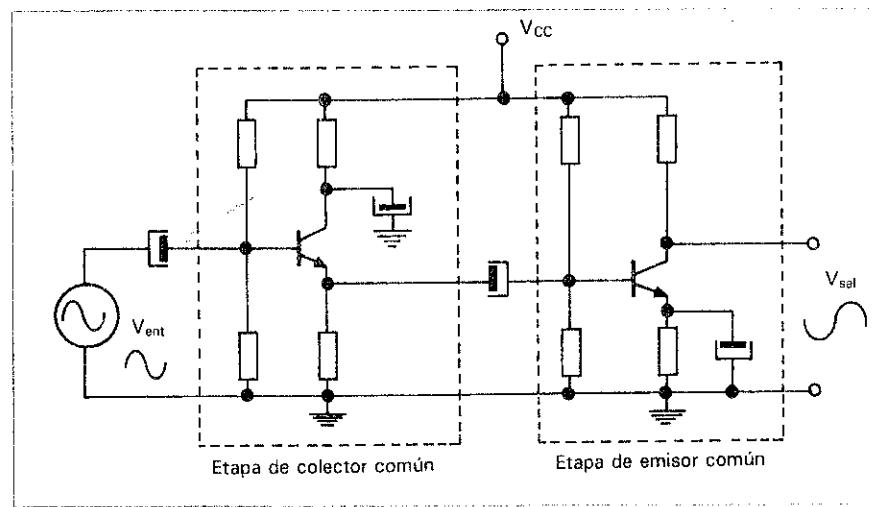


Figura 24.16. Combinación de un amplificador de colector común de gran impedancia de entrada con uno de emisor común de gran ganancia.

24.3.6 Amplificador de base común (BC)

En este amplificador la base es común a las señales de entrada y salida, tal como se muestra en el circuito de la Figura 24.17. La señal de entrada se aplica al emisor y la señal de salida se obtiene en el colector. Las resistencias R_1 y R_2 forman un divisor de tensión que polariza a la base. El condensador C_3 conecta la señal de C.A. de la base a masa.

La impedancia de entrada de un amplificador de base común es muy baja, del orden de decenas de ohmios (aproximadamente se cumple que $Z_{\text{ent}} = r_e$). Esto lo hace muy útil para etapas de amplificación en las que existen generadores de baja impedancia.

Sin embargo la impedancia de salida es muy elevada.

La ganancia de tensión de este amplificador es bastante buena, muy parecida a la del amplificador de emisor común.

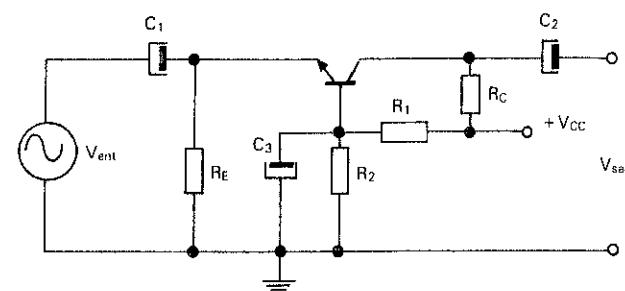
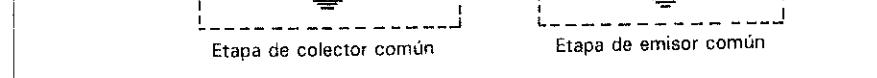


Figura 24.17. Amplificador de base común.

También responde excelentemente a las muy altas frecuencias, por lo que constituye un buen amplificador de radiofrecuencia (RF). En los sistemas de recepción de RF el generador de señales es la propia antena del receptor. Ésta proporciona una señal muy débil, y su impedancia característica es baja, de unos 50Ω , lo que hace que la impedancia de entrada de un amplificador de BC se adapte perfectamente a la misma.



24.3.7 Acoplamiento de amplificadores

Normalmente la ganancia producida por una sola etapa amplificadora es insuficiente para producir la amplificación deseada. En estos casos se acoplan dos, tres o más etapas en cascada, tal como se indica en el diagrama de bloques de la Figura 24.18.

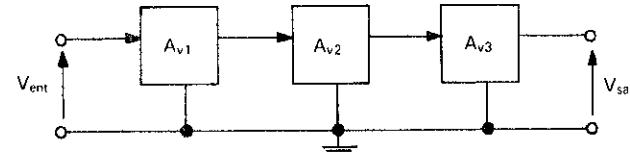


Figura 24.18. Diagrama de bloques del acoplamiento de amplificadores.

La ganancia total que se consigue con este acoplamiento, es:

$$A_{VT} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3}$$

El resultado obtenido nos indica que la ganancia de un amplificador con varias etapas en cascada es igual al producto de las ganancias de cada una de ellas.

Así, por ejemplo, si se acoplasen dos etapas en cascada que poseyeran una ganancia de 100 cada una, se conseguiría una ganancia en conjunto igual a:

$$A_{vt} = 100 \cdot 100 = 10.000$$

Para realizar este acoplamiento pueden utilizarse condensadores, transformadores, acoplamiento directo y otros sistemas.

24.3.8 Realimentación en los amplificadores

La ganancia de un amplificador depende de las características de sus componentes. De tal forma, que si, por alguna razón, un componente modifica su valor (cambios de temperatura, inexactitud en los valores de los componentes al ser sustituidos, etc.), el amplificador modifica su ganancia, entregando una señal en la carga diferente a la esperada. Además, se pueden producir fenómenos que causen distorsión en la señal de salida, como ruidos, atenuación de señales de baja o alta frecuencia, etc.

Un procedimiento para reducir estos fenómenos es la inclusión de una red de realimentación. La realimentación toma parte de la señal de salida y la retorna de nuevo a la entrada, consiguiendo que la señal de salida no dependa exclusivamente de las características de los componentes del amplificador (véase Figura 24.19). De esta forma, se consigue eliminar la distorsión y estabilizar el funcionamiento del amplificador.

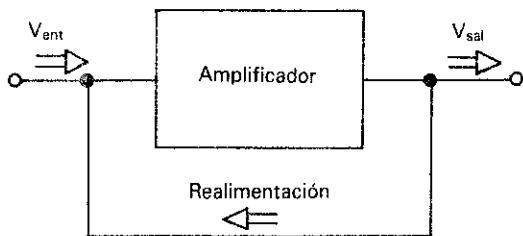


Figura 24.19. Realimentación en un amplificador.

El procedimiento que más se emplea para conseguir estos objetivos es la realimentación negativa. Consiste en tomar una parte de la tensión o corriente de la salida del amplificador y aplicarla, a través de la red de realimentación, en oposición de fase con la señal de entrada a amplificar. De esta manera, si la señal de salida se incrementase, éste incremento es aplicado en oposición de fase, a través de la red de realimentación, a la entrada, produciendo una disminución de la señal de entrada y, en definitiva, una compensación de esa tendencia al incremento de la señal de salida.

Gracias a la realimentación se consigue mejorar la distorsión en frecuencia y la distorsión alineal, así como ampliar el ancho de banda del amplificador. Además se consiguen valores más adecuados en los valores de la resistencia de entrada y salida del amplificador.

En la Figura 24.20 se muestra un ejemplo de un amplificador realimentado en disposición corriente paralelo. La resistencia R_r toma de la salida una parte I_{real} proporcional a la corriente I_{sal} y la transfiere a la entrada, acoplándose con la señal de entrada I_{ent} en conexión paralelo.

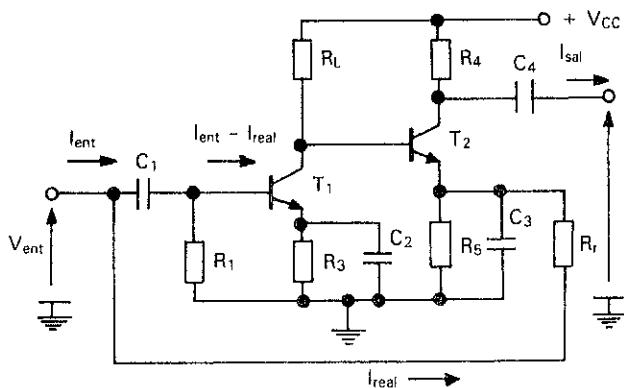


Figura 24.20. Amplificador realimentado.

24.3.9 Distorsión en los amplificadores

Sin un adecuado diseño del amplificador, la señal de salida del mismo puede no responder exactamente a la aplicada a la entrada, en cuyo caso nos encontramos ante el efecto indeseable de la distorsión.

La distorsión en la señal de salida es debida, básicamente, a que los componentes con los que se diseña el amplificador poseen unas características que no son del todo lineales. A esto hay que añadir las capacidades parásitas que se originan en los diferentes elementos del amplificador, así como las que corresponden a los condensadores utilizados en el circuito.

Dependiendo del factor que origina la distorsión, ésta puede modificar algunas de las magnitudes propias de la señal. Así, tenemos tres tipos de distorsión: distorsión alineal, distorsión de frecuencia y distorsión de fase.

• **Distorsión alineal:** Ésta se produce por la alinealidad de los componentes utilizados, sobre todo con los cambios de temperatura, dando como resultado una amplitud de la señal en la salida que no se corresponde exactamente con la de entrada en algunas partes del ciclo.

• **Distorsión de frecuencia y ancho de banda de un amplificador:** Por lo general, cuando se amplifica una señal, ésta no consta únicamente de una sola frecuencia, si no que está compuesta por la suma de un gran número de señales de diferentes frecuencias. Éste es el caso, por ejemplo, de una señal de audio que provenga de un micrófono: las señales eléctricas que éste produce recogen sonidos a muy distintas frecuencias, como el de las diferentes voces, instrumentos de cuerda y de viento, percusión, etc. Para que el amplificador sea fiel con la señal de entrada, deberá de aplicar la misma ganancia a las distintas frecuencias para, posteriormente, aplicarlas a un altavoz. En el caso de que el amplificador no consiga amplificar adecuadamente las muy bajas frecuencias o las muy altas, se producirá una distorsión de frecuencia, que dará como resultado un pérdida de calidad en el sonido entregado por el altavoz.

Esta distorsión es debida, fundamentalmente, a las capacidades que aparecen en los circuitos del amplificador, y que limitan el campo de actuación del mismo a una determinada gama de frecuencias. Así, tenemos que la ganancia de un amplificador se mantiene igual para un margen de frecuencias intermedias contenidas entre dos límites: superior (f_{c1}) e inferior (f_{c2}), denominadas frecuencias de corte. A la gama de frecuencias comprendido entre estos dos límites se le denomina *ancho de banda* (véase Figura 24.21).

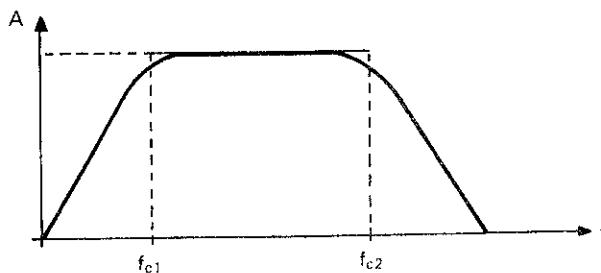


Figura 24.21. Ancho de banda de un amplificador.

Así, por ejemplo, si un amplificador posee una $f_{c1} = 20$ Hz y una $f_{c2} = 20$ KHz, su ancho de banda será:

$$\text{Ancho de Banda} = 20.000 - 20 = 19.980 \text{ Hz}$$

En función de este criterio se pueden clasificar los amplificadores en *amplificadores de banda ancha* y *amplificadores de banda estrecha*.

Los amplificadores de banda ancha son aquellos que son capaces de amplificar un gran variedad de frecuencias sin provocar distorsión, como por ejemplo 15 MHz.

Los amplificadores de banda estrecha poseen un pequeño ancho de banda. Tal es el caso de los amplificadores sintonizados utilizados en radio frecuencia.

• **Distorsión de fase:** Esta distorsión hace que la señal de salida quede desfasada un cierto ángulo respecto a la de entrada.

24.3.10 El amplificador operacional

Una de las grandes aplicaciones que se hace de la realimentación, tanto negativa, como positiva, es en los amplificadores operacionales (AO).

Un amplificador operacional es un ejemplo de un amplificador fabricado con las técnicas de los circuitos integrados. Este tipo de circuito ofrece a los diseñadores unas excelentes características a un precio reducido.

El nombre de amplificador operacional se debe a que ha sido empleado desde sus inicios para realizar operaciones matemáticas, como son la suma, resta, multiplicación, división, integración, diferenciación, etc. Para ello, se simula los términos que aparecen en una ecuación matemática a resolver con tensiones que son aplicadas al AO.

Con el uso de amplificadores operacionales se pueden conseguir grandes ganancias de tensión para aplicaciones de baja potencia, pudiéndose trabajar en un amplio margen de frecuencias. Las aplicaciones que encuentra este tipo de amplificadores son múltiples: amplificadores de señales, filtros, fuentes de alimentación, generadores de señal, comparadores, reguladores de tensión, temporizadores, etc.

En la Figura 24.22 se muestra, a modo de ejemplo, el aspecto de un AO encapsulado en forma de circuito integrado, con la denominación de los terminales más significativos.

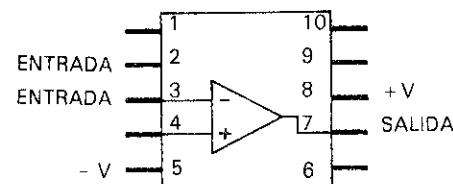


Figura 24.22. Amplificador operacional.

- (3) Entrada inversora
- (4) Entrada no inversora
- (7) Salida
- (5) Alimentación -V
- (8) Alimentación +V

El AO es el elemento que posee una entrada diferencial, lo que significa que tiene dos entradas en oposición de fase. En la Figura 24.23 se muestra el símbolo que se emplea para representar el AO.

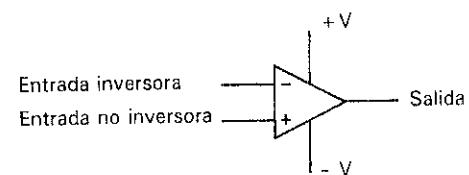


Figura 24.23. Representación esquemática del amplificador operacional.

Si aplicamos una señal a la entrada (-) inversora, obtendremos una señal en la salida en oposición de fase respecto a la aplicada dicha entrada. Al contrario, si aplicamos la señal a la entrada (+) no inversora, la señal que se obtiene en la salida se mantiene en fase con la de entrada. Por otro lado, si aplicamos una señal entre ambos terminales de entrada, la señal obtenida en la salida es proporcional a la diferencia entre ambas señales.

Un amplificador operacional está compuesto por diferentes etapas, tal como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 24.24.



Figura 24.24. Diagrama de bloques de un amplificador operacional.

La primera etapa consta de un amplificador diferencial, elemento éste esencial para conseguir que la señal de salida dependa de la diferencia de las señales aplicadas a la entrada. La segunda etapa amplificadora es la que proporciona una alta ganancia. Por último, existe una etapa amplificadora, habitualmente en colector común, que proporciona una baja impedancia de salida.

La forma habitual de trabajo de un AO es mediante las técnicas de realimentación negativa, dejando la realimentación positiva para los circuitos en los que se desea generar un estadio de oscilación, como es el caso de los generadores de señal.

La ganancia de un amplificador operacional integrado para señales de bajas frecuencia es muy elevada, pero muy inestable a los cambios de dicha frecuencia. Por esta razón, conviene disponer de menor ganancia a cambio de una mayor estabilidad dentro de unos límites de frecuencia más grandes. La forma de conseguir esto último es utilizando la realimentación negativa. Esta técnica consiste en tomar una parte de la señal de la salida del amplificador e introducirla de nuevo por la entrada inversora.

En el caso de que la señal de realimentación se introdujese por la entrada no inversora se trataría entonces de realimentación positiva.

Estudiaremos a continuación algunos de los montajes fundamentales del amplificador operacional.

Amplificador con realimentación no inversora de tensión (Figura 24.25):

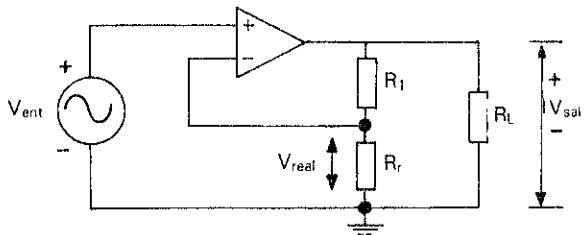


Figura 24.25. AO con realimentación no inversora de tensión.

La señal a amplificar (V_{ent}) se aplica a la entrada no inversora de tensión y la realimentación (V_{real}) se realiza tomando una parte de la tensión de salida (V_{sal}), que es aplicada a la entrada inversora del amplificador operacional. Como se puede apreciar en el circuito de la Figura 24.4, la tensión de realimentación se consigue mediante el divisor de tensión formado por R_1 y R_r , al que se le ha aplicado la tensión de salida. Así, se consigue que la tensión V_{real} , que aparece en los terminales de R_r , sea proporcional a la de salida.

Esta forma de realimentación es una de las más sencillas y con ella se consigue una buena estabilidad, una resistencia de entrada alta y una resistencia de salida baja, lo que le convierte en un sistema muy adecuado para amplificadores lineales.

La ganancia de tensión en un amplificador operacional sin realimentación es bastante elevada; así, por ejemplo, en el AO 741C: $A_V = 100.000$. Con la realimentación negativa se consigue estabilizar la ganancia y aumentar el ancho de banda a costa de reducir esta ganancia. La ganancia a bucle cerrado depende en gran medida de la red de realimentación, pudiéndose decir, con bastante aproximación, que:

$$A_{V(LC)} \approx 1 + \frac{R_1}{R_r}$$

Amplificador con realimentación inversora de tensión (Figura 24.26):

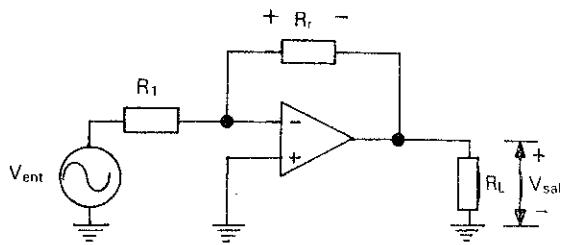


Figura 24.26. AO con realimentación inversora de tensión.

La señal a amplificar (V_{ent}) se aplica a la entrada inversora a través de la resistencia R_1 , por lo que la señal de salida aparecerá invertida. La resistencia R_r toma una muestra de la tensión de salida y la introduce por la entrada inversora.

Este sistema de realimentación posee una impedancia de entrada bastante baja y por esta razón se le conecta, en serie con el generador de señales, una resistencia R_1 que evita las sobrecargas de éste.

La ganancia de tensión a lazo cerrado está condicionado en este caso por las resistencias R_1 y R_r , de tal forma que se cumple la siguiente relación:

$$A_{V(LC)} = -\frac{R_r}{R_1}$$

El signo negativo indica que existe inversión de fase entre la entrada y la salida.

Si al AO de la Figura 24.26. se le suprime la resistencia R_1 , su impedancia de entrada tiende a cero. Dado que su impedancia de salida es también muy próxima a cero, éste se comporta como un convertidor ideal de corriente a tensión. En la Figura 24.27 se muestra el circuito mencionado.

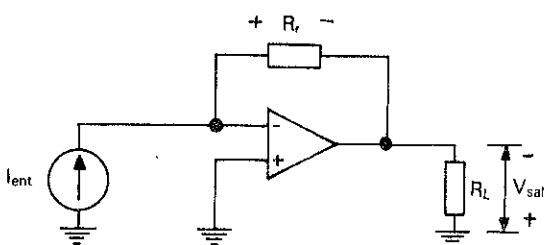


Figura 24.27. AO como convertidor ideal de corriente a tensión.

En estas condiciones se cumple que:

$$V_{\text{sal}} = R_r \cdot I_{\text{ent}}$$

Aprovechando las propiedades del convertidor de corriente a tensión del AO con realimentación inversora de tensión, se puede diseñar un amperímetro electrónico, tal como se muestra en la Figura 24.28.

Supongamos que las intensidades que deseamos medir sean de $100 \mu\text{A}$. Para este valor tan bajo de corriente sería necesario un amperímetro de gran sensibilidad, con el consiguiente costo adicional. Utilizando la entrada del amplificador operacional de la Figura 24.28 como puntas de prueba de un amperímetro, se pueden obtener tensiones proporcionales a la corriente a través de un voltímetro.

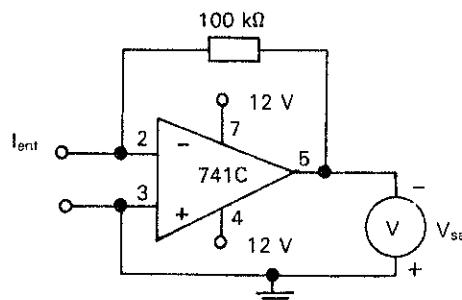


Figura 24.28. Amperímetro electrónico con AO.

En este caso el máximo alcance del voltímetro a utilizar será:

$$V_{\text{sal}} = R_r \cdot I_{\text{ent}} = 100 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 10 \text{ V}$$

La constante del voltímetro será:

$$K = \frac{10 \text{ V}}{100 \mu\text{A}} = 0,1 \text{ V} / \mu\text{A}$$

Es decir, por cada $0,1 \text{ V}$ que indica el voltímetro, la corriente medida es de $1 \mu\text{A}$.

Amplificador con realimentación no inversora de corriente (Figura 24.29):

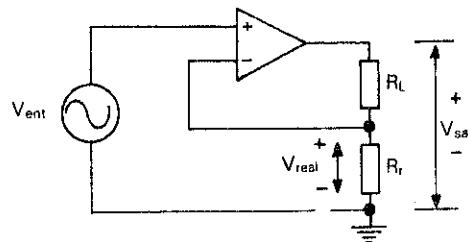


Figura 24.29. AO con realimentación no inversora de corriente.

La señal del generador se aplica a la entrada no inversora del amplificador operacional. En la salida se obtiene una señal no invertida. En serie con la resistencia de carga R_L , se conecta una resistencia R_r , de la cual se toma la tensión de realimentación V_{real} que, como en otras ocasiones, es aplicada por la entrada inversora. La realimentación que se consigue es proporcional a la corriente de salida ($V_{\text{real}} = R_r \cdot I_{\text{sal}}$).

Un amplificador con realimentación no inversora de corriente posee una resistencia de entrada y salida muy elevada, por lo que se puede considerar como un convertidor ideal de tensión corriente. Además, se cumple que:

$$I_{\text{sal}} \approx \frac{V_{\text{ent}}}{R_r}$$

Este tipo de circuito se utiliza en instrumentación para la construcción de voltímetros muy sensibles como convertidor de tensión a corriente. En la Figura 24.30 se muestra un ejemplo.

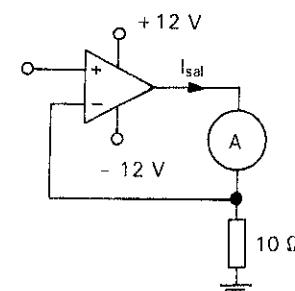


Figura 24.30. Voltímetro electrónico con AO.

Amplificador con realimentación inversora de corriente (24.31):

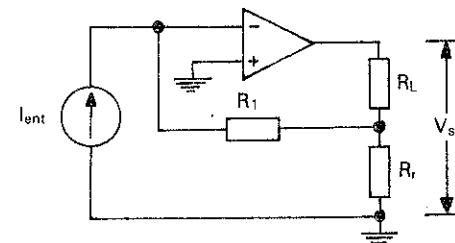


Figura 24.31. AO con realimentación no inversora de corriente.

En este caso la señal se aplica a la entrada inversora del amplificador operacional. La realimentación se consigue, como en el caso anterior, tomando una muestra de la señal de salida proporcional a la corriente e introduciéndola por la entrada inversora.

Este tipo de realimentación hace que el amplificador trabaje como un amplificador de corriente ideal, siendo su impedancia de entrada cero e infinita la de salida.

En este amplificador se cumple la siguiente relación:

$$I_{\text{sal}} = I_{\text{ent}} \left(\frac{R_1}{R_r} + 1 \right)$$

Expresión que nos indica que la corriente de salida es proporcional a la de entrada.

Con este sistema de realimentación se puede construir un amperímetro sensible, tal como se muestra en la Figura 24.32.

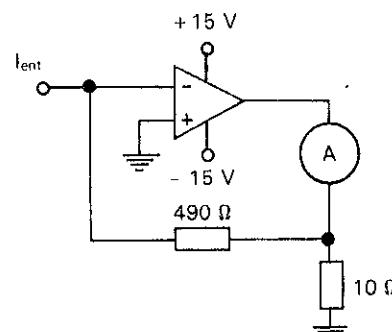


Figura 24.32. Amperímetro sensible con AO.

Así, por ejemplo, en el caso de que la corriente de entrada de este amperímetro sea $1 \mu\text{A}$, en la salida aparecerán:

$$I_{\text{sal}} = 1 \mu\text{A} \left(\frac{490}{10} + 1 \right) = 50 \mu\text{A}$$

Lo que nos indica que para medir $1 \mu\text{A}$ es necesario situar un amperímetro de fondo de escala igual a $50 \mu\text{A}$ en la salida.

Sumador inversor (Figura 24.33):

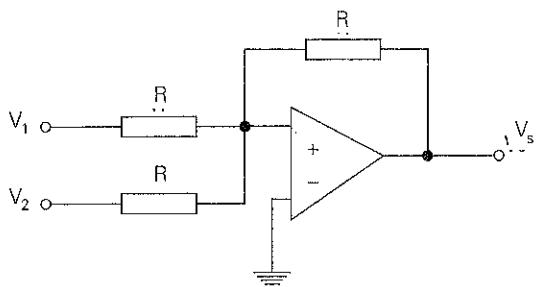


Figura 24.33. AO sumador inversor.

En este caso se muestra un ejemplo típico del uso del AO para realizar operaciones matemáticas. Se trata de un sumador que consigue que la señal de salida V_{sal} sea la suma de las señales de entrada. En este caso la señal queda invertida respecto a las de entrada.

$$V_{\text{sal}} = -(V_1 + V_2)$$

24.4 Generadores de señal y osciladores

Se puede decir que un generador de señales es un dispositivo elaborado para producir señales eléctricas de unas determinadas características, las cuales podremos aplicar a un circuito en el que se deseen analizar los efectos causados por las mismas.

Recuerda cómo utilizábamos este instrumento para analizar las características de los diferentes tipos de ondas mediante el osciloscopio.

Los generadores de señal se pueden utilizar como excitadores de un determinado circuito electrónico, con el fin de imitar una determinada condición de entrada que suela darse habitualmente en el mismo y así poder realizar un análisis total de la respuesta de dicho circuito.

Fundamentalmente, los generadores de señal se elaboran a partir de un circuito oscilador que tiene la propiedad de producir una determinada forma de onda, cuya frecuencia se regula mediante un mando situado en el panel de control del mismo. Los generadores de señal también incorporan un dispositivo de medición de la frecuencia, de tal forma que, según manipulamos el mando de selección podemos saber la frecuencia de la señal obtenida en la salida.

Las formas de ondas que puede proporcionar un generador de señal pueden ser variadas: senoidal, triangular, cuadrada, impulsos (Figura 24.34). Entre todas ellas, la que cuenta con más aplicaciones es indudablemente, la *senoidal*, sobre todo en equipos de audio.

Este apartado lo dedicaremos al estudio de los diferentes circuitos osciladores senoidales, así como al de los multivibradores astables (circuitos capaces de generar una onda cuadrada).

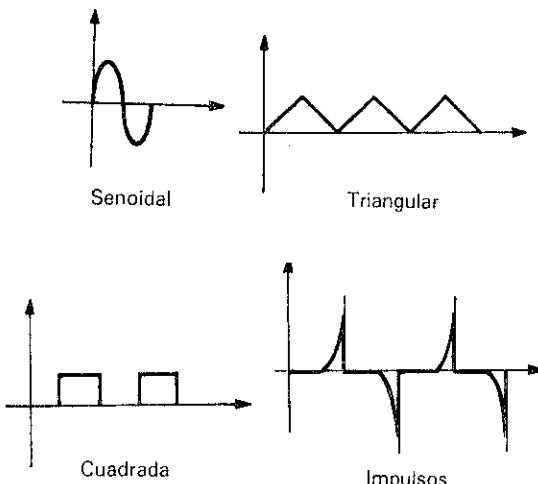


Figura 24.34. Formas de onda de un generador de señales.

24.4.1 Generadores senoidales

Un generador de onda senoidal es un instrumento que suministra una señal alterna de tipo senoidal de amplitudes y frecuencias regulables, que se pueden conocer en todo momento.

Los generadores de señales proporcionan una gama de frecuencias de señal bastante amplia; aun así, es necesario especializar esta gama según el uso que se le vaya a dar al instrumento. De esta forma, tenemos: los *generadores de baja frecuencia*, que proporcionan señales comprendidas entre 1 Hz y 100 KHz (las señales audibles se encuentran entre 20 Hz y 20 KHz) y que son de gran utilidad para el análisis de equipos de audio; y los *generadores de alta frecuencia o radiofrecuencia*, que pueden llegar a aportar señales comprendidas entre 100 KHz y 1.000 MHz y que son imprescindibles para medir las características de sintonizadores y emisoras de radio.

Las señales que se suelen utilizar con más frecuencia con este tipo de generadores son siempre las de forma senoidal. Los tipos de osciladores que se utilizan para obtener la señal senoidal suelen ser los RC para las bajas frecuencias y los LC y los de cristal para las altas. Los osciladores proporcionan una frecuencia variable gracias a la incorporación de condensadores o bobinas variables. A continuación, estudiaremos, el principio de oscilación y los diferentes tipos de osciladores senoidales.

24.4.2 Principio general de oscilación

Podríamos decir que un oscilador es un dispositivo electrónico dotado para generar una señal alterna, partiendo de una alimentación de corriente continua (véase Figura 24.35).

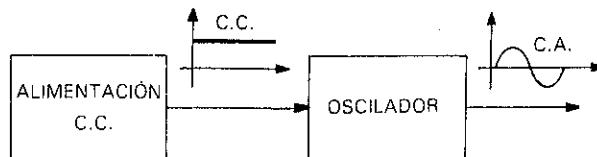


Figura 24.35. Oscilador.

Para la generación de la señal alterna se utilizan circuitos resonantes. Los circuitos resonantes se forman fundamentalmente mediante bobinas y condensadores conectados en serie o paralelo.

Un circuito resonante, aprovechando el intercambio de energía entre el condensador y la bobina, genera una señal de C.A. de frecuencia igual a la resonante, la cual se mantendrá de forma indefinida si tanto el condensador como la bobina fueran ideales.

Como cabía suponer, al no ser ideales estos componentes (ya que poseen una cierta resistencia óhmica), las pérdidas producidas por el condensador y la bobina provocan una oscilación en el circuito LC, que se va atenuando con el tiempo.

Para evitar la atenuación de la señal generada por el circuito resonante LC, y poder mantener su nivel de forma permanente, es necesario inyectar en cada ciclo de la señal la energía perdida, produciendo un efecto constante y regenerativo de la señal.

La regeneración de la señal se consigue gracias a un amplificador con una realimentación adecuada (habitualmente se utiliza la realimentación positiva). De esta forma, tendremos que un oscilador se compone básicamente de un circuito generador de la señal (circuito resonante) y de un amplificador con una realimentación tal que consiga regenerar la señal del circuito oscilante (véase Figura 24.36).

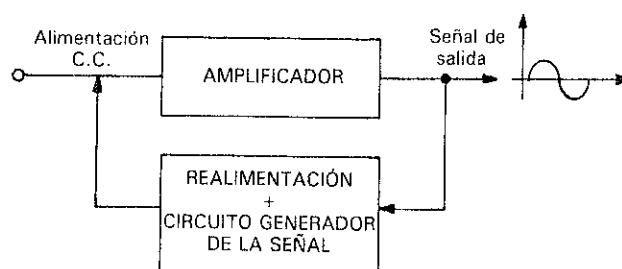


Figura 24.36. Diagrama de bloques de un oscilador.

Fundamentalmente, cualquier amplificador al que se le disponga de una red de realimentación positiva de la señal se puede convertir en un oscilador senoidal. Un ejemplo de esto podría ser el efecto que se produce cuando acercamos excesivamente el micrófono al altavoz de un amplificador de audio; en este caso se produce una especie de sonido vibratorio, que procede de la realimentación positiva que se produce al ser amplificados de nuevo los sonidos provenientes del altavoz. El efecto de oscilación de un amplificador realimentado positivamente se debe a que él mismo es capaz de generar y mantener su propia señal de entrada en un ciclo continuo y oscilante.

Para que un amplificador realimentado se convierta en un oscilador se deben dar dos condiciones imprescindibles:

1. Que la señal proporcionada por la red de realimentación esté en fase con la entrada del amplificador.

2. Que la ganancia conseguida entre el amplificador y la red de realimentación sea mayor o igual a la unidad.

En el caso de que la señal realimentada no estuviese en fase con la de entrada del amplificador, la señal se iría atenuando (esto ocurriría con una realimentación en un amplificador que proporcionase un inversión de fase en la salida, como, por ejemplo, en un amplificador de emisor común si conectamos su salida directamente con su entrada).

Si el conjunto formado por el amplificador y la red de realimentación posee una realimentación igual a la unidad, la señal se autorregenera, dando como resultado una señal senoidal en la salida; sin embargo, si dicha ganancia es bastante superior a la unidad, el amplificador trabaja en los niveles extremos de corte y saturación, produciéndose una distorsión en la señal de salida que da como resultado una onda cuadrada.

De hecho, para que un oscilador senoidal consiga su propósito, debe ser capaz de poseer una ganancia superior a la unidad en el momento en que se le conecta a la alimentación de C.C., para así conseguir que la señal oscilante vaya creciendo. Posteriormente, conforme la amplitud de la señal va aumentando, dicha ganancia va disminuyendo hasta alcanzar la estabilidad en el valor igual a la unidad.

Una condición importante que deben cumplir en los amplificadores utilizados en los osciladores es que deben poseer una impedancia de entrada lo más elevada posible. De esta forma se consigue que la señal realimentada no quede influenciada por dicha impedancia. Es por esta razón por la que se utilizan, en multitud de ocasiones, circuitos osciladores con transistores de efecto de campo JFET y amplificadores operacionales.

24.4.3 Osciladores RC

Los osciladores RC se construyen partiendo de un amplificador de inversión de fase y una red de realimentación que es capaz de desfasar la señal de salida 180° e introducirla de nuevo en la entrada.

En la Figura 24.37 se muestra un oscilador RC por desplazamiento de fase con amplificador operacional.

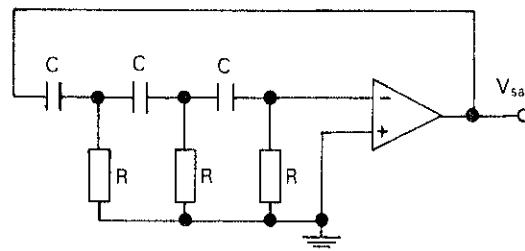


Figura 24.37. Oscilador RC con AO.

Se escogen células RC que provoquen un ángulo de desfase de aproximadamente 60° . El desfase total de 180° de la red de realimentación se produce exclusivamente para una frecuencia determinada.

La utilización de redes de realimentación RC se utilizan para osciladores de baja frecuencia, dejando las redes LC y los cristales para las altas frecuencias.

La frecuencia de la señal de salida de este circuito oscilante se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{2N}}$$

Donde N es el número de células RC (en este caso N = 3).

De esta expresión se deduce que para modificar la frecuencia entregada por el oscilador basta con variar los valores de las capacidades de los condensadores a la vez o de las resistencias.

Así, por ejemplo si el oscilador de la Figura 24.37 consta de 3 células RC de igual valor, R = 10 KΩ y C = 5 nF, la frecuencia obtenida por las tres células RC será igual a:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \sqrt{2 \cdot 3}} = 1.300 \text{ Hz}$$

24.4.4 Oscilador en puente de Wien

Se puede decir que este oscilador también pertenece a los osciladores RC, ya que su red de realimentación consta también de redes RC, pero difieren considerablemente de las de desplazamiento de fase.

En la Figura 24.38 se muestra un oscilador formado por un red de realimentación en puente de Wien y un amplificador operacional. Para que la realimentación sea positiva es necesario conectar la red de realimentación a la entrada no inversora de tensión. El circuito oscilante en puente de Wien consta de un circuito serie RC conectado con un circuito paralelo RC del mismo valor y donde es posible modificar la frecuencia de oscilación al variar la capacidad de los condensadores o el valor ohmico de las resistencias.

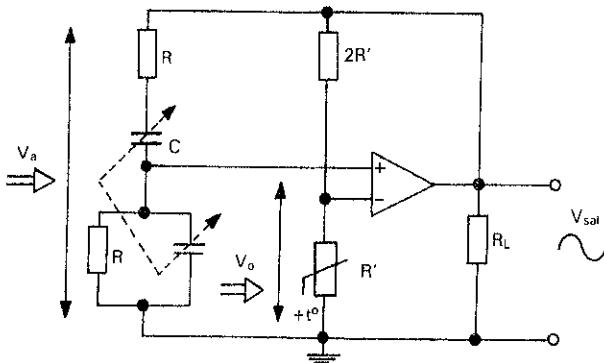


Figura 24.38. Oscilador en puente de Wien con AO.

Esta frecuencia es la de resonancia del circuito, que viene expresada por la relación:

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC}$$

Así, por ejemplo si el puente de Wien de la Figura 24.38 tiene una red de realimentación posee un valor de R = 20 KΩ y una capacidad variable C entre 50 pF y 1 nF, el margen obtenido en la frecuencia de la señal de salida del oscilador para los dos valores posibles de capacidad, es:

$$f_{r(\max)} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-12}} = 159.155 \text{ Hz}$$

$$f_{r(\min)} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 7.958 \text{ Hz}$$

24.4.5 Osciladores LC

Como ya se indicó en el apartado anterior, los osciladores RC trabajan bien en la generación de bajas frecuencias (BF). Para señales de alta frecuencia (AF) es necesario diseñar otro tipo de circuitos oscilantes, siendo uno de ellos el circuito resonante LC. Este tipo de osciladores funciona bien hasta frecuencias del orden de Mhz, es decir en la banda de radio frecuencia (RF).

El principio de funcionamiento de este tipo de osciladores es similar a los ya estudiados. Ahora se combina una red de realimentación LC con un amplificador con el fin de que se mantenga la oscilación. Basándose en este principio se pueden construir diferentes clases de osciladores, como por ejemplo el oscilador Hartley y el oscilador Colpitts.

Tanto el oscilador Hartley como el Colpitts se basan en una red de realimentación, formada por un circuito tanque a base de bobinas y condensadores. Como ya se indicó al principio de esta unidad de contenido, al acoplar circuitos LC se puede encontrar una frecuencia de resonancia; a la cual, las bobinas intercambian su energía con los condensadores generando una señal senoidal. Como los componentes poseen una cierta resistencia ohmica, la señal generada iría amortiguándose si no fuese por la acción autorregeneradora de un amplificador realimentado positivamente.

El Oscilador Colpitts es muy utilizado para generar altas frecuencias y su circuito es el que se muestra en la Figura 24.39.

El circuito oscilante en forma de tanque de la Figura 24.39 lo forman los condensadores C₁, C₂ y la bobina L.

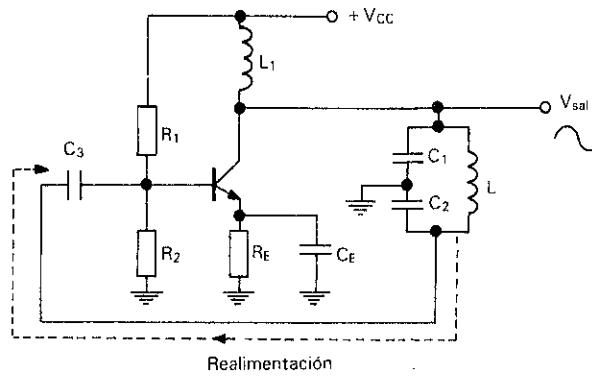


Figura 24.39. Oscilador Colpitts.

24.4.6 Osciladores de cristal

Existen multitud de aplicaciones en las que es necesario que la frecuencia de la señal generada por el oscilador sea mucho más estable que la generada por los osciladores LC (puede comprobarse cómo en un oscilador de alta frecuencia es fácil que se modifique la frecuencia de la señal de salida simplemente acercando un objeto al circuito tanque); además se pueden producir variaciones en la frecuencia de oscilación debido al envejecimiento de los elementos activos y pasivos con la temperatura. En estos casos, los osciladores de cristal proporcionan una frecuencia de oscilación muy estable.

En la Figura 24.40 se muestra el aspecto externo de un cristal de cuarzo, y en la 24.40 b su símbolo.

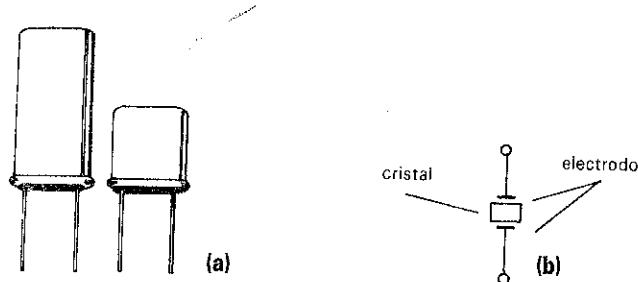


Figura 24.40. Cristal de cuarzo oscilador. (a) Aspecto.
(b) Representación esquemática.

Los cristales osciladores se construyen mediante sustancias, como el cuarzo, que poseen propiedades piezoelectráticas. El cristal suele ser muy delgado, fundamentalmente para trabajar en altas frecuencias, y se encapsula en un recipiente metálico, haciendo las conexiones a ambos lados del cristal mediante un par de electrodos.

La propiedad piezoelectrica confiere a estas sustancias la cualidad de generar una determinada tensión eléctrica entre sus caras cuando éstas son comprimidas o dilatadas mecánicamente; de manera análoga, si se aplica al cristal una tensión alterna a una determinada frecuencia, éste tiende a vibrar a dicha frecuencia. Se trata de una frecuencia propia de vibración muy estable y que se corresponde a la frecuencia propia de resonancia.

La frecuencia de resonancia de un cristal depende en gran medida del espesor del cristal; de tal forma que cuanto más grueso es el mismo, menor es dicha frecuencia.

En la Figura 24.41 se muestra el circuito correspondiente a un oscilador de cristal. Obsérvese que la configuración es similar al Colpitts, con la diferencia que ahora se ha sustituido la bobina por el cristal de cuarzo (X), consiguiendo que el mismo resuene con los condensadores C_1 y C_2 . El funcionamiento de este circuito es igual al estudiado para al Colpitts, con la diferencia de que eligiendo el cristal adecuado, podemos obtener una frecuencia exacta en la salida con una gran estabilidad.

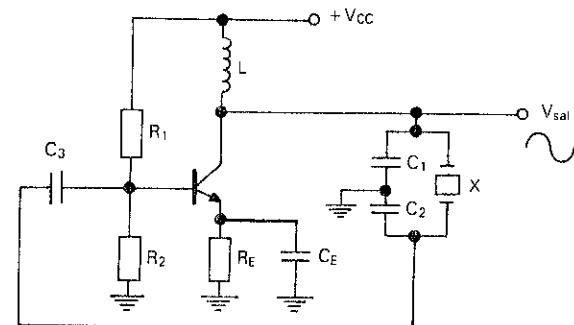


Figura 24.41. Oscilador con cristal de cuarzo.

Dada la gran estabilidad en la frecuencia de un oscilador a cristal (el desplazamiento de frecuencia de un cristal es menor a 1 Hz por cada 10^6 Hz), éstos encuentran gran aplicación en relojes, emisores y receptores de radio, telefonía móvil, micrófonos inalámbricos, etc.

Dado el gran avance de la electrónica digital, los cristales de cuarzo se han ido sustituyendo por sintetizadores de frecuencia digitales (circuitos digitales diseñados para sintetizar una gama amplia de frecuencias a partir de un cristal de cuarzo).

24.4.7 Multivibradores

A diferencia de los osciladores senoidales, los multivibradores son circuitos osciladores que son capaces de generar señales cuadradas o impulsos a partir de una alimentación de C.C.

A este tipo de osciladores se les conoce por el nombre de osciladores de relajación. Otro oscilador de este tipo es el generador de pulsos en diente de sierra mediante UJT, que ya estudiamos en el Capítulo 22, como elemento controlador del disparo de tiristores.

Dentro de los multivibradores existen tres tipos fundamentales:

–*Multivibrador astable*: es un circuito que no posee dos estados estables, por lo que genera un estado de oscilación (conducción no conducción) ininterrumpida.

–*Multivibrador monoestable*: es un circuito que mantiene un estado de conducción estable una vez aplicado una señal externa; transcurrido un tiempo, se recupera el estado inicial.

–*Multivibrador biestable*: es un circuito que posee dos estados estables de conducción; mientras no se aplique un disparo externo, permanece en uno de los estados, saliendo de él al aplicar un nuevo disparo. A este circuito también se le

conoce como flip-flop y tiene gran aplicación en circuitos que utilizan técnicas digitales.

Dado que el único de los multivibradores que tiene la condición de oscilador es el astable, pasaremos, a continuación, a su estudio detenido.

En la Figura 24.42 se muestra el circuito de un multivibrador astable.

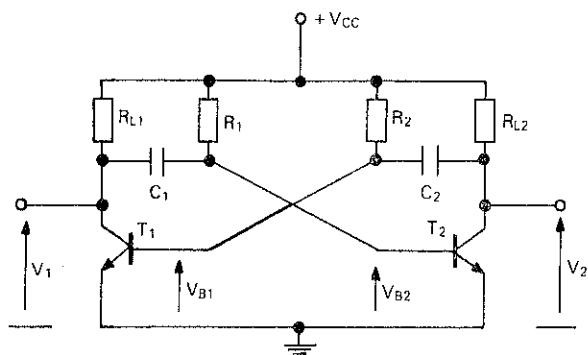


Figura 24.42. Multivibrator astable.

Con este circuito es posible conseguir una señal cuadrada en cualquiera de los colectores de ambos transistores, tal como se puede comprobar en los diagramas de la Figura 24.43 (V_1 y V_2), de tal forma, que mientras uno de los transistores conduzca el otro no lo haga, y viceversa, después de un período de tiempo.

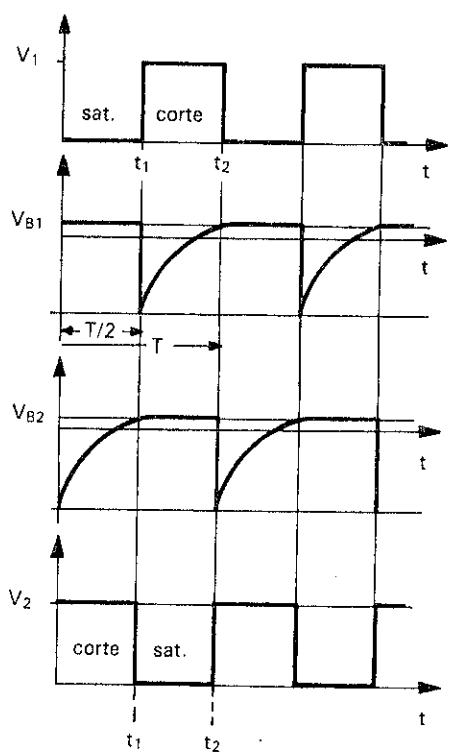


Figura 24.43. Diagramas de oscilación de un multivibrator astable.

Su funcionamiento es como sigue: en el momento de conectar el circuito a la fuente de alimentación, los transistores T_1 y T_2 tenderán a conducir y, como éstos no son exactamente iguales, uno de ellos tenderá a conducir en mayor grado. Supongamos que es T_1 el que se inicia con la mayor conductividad, con lo que su colector pasa de ser positivo a negativo. Esta tensión negativa aparece en el condensador C_1 y queda acoplada, a través del mismo, a la base del transistor T_2 , por lo que este transistor pasa al corte. El potencial del condensador C_1 mantiene al corte al transistor T_2 hasta que la resistencia R_1 proporciona a dicho condensador una carga positiva capaz de polarizar la base de T_2 . Ahora es el transistor T_2 el que conduce, mientras que se repite el mismo proceso para T_1 , pasando éste ahora al corte. Así tenemos que si T_1 conduce, T_2 no conduce; transcurrido un período de tiempo, el circuito bascula y T_2 conduce mientras que T_1 no conduce, repitiéndose este proceso de oscilaciones mientras se tenga conectada la fuente de alimentación.

En los diagramas de la Figura 24.43 se muestra como fluctúan las tensiones V_1 y V_2 correspondientes a los colectores de los transistores T_1 y T_2 , respectivamente. Observa cómo la tensión V_1 adquiere el valor de la fuente de alimentación durante un determinado tiempo ($T/2$), posteriormente será V_2 la que adquiera dicho valor. Los diagramas también muestran los ciclos de carga y descarga de los condensadores que quedan reflejados en las tensiones V_{B1} y V_{B2} que se corresponden con las tensiones de base de los transistores T_1 y T_2 , respectivamente.

Los períodos de tiempo que los transistores se mantienen en corte y en saturación dependen de las constantes de tiempo de las redes de temporización formadas por R_1-C_1 y R_2-C_2 . De esta forma, el tiempo en que el transistor T_1 se mantiene en corte está en función de la constante de tiempo de R_2 y C_2 ; de la misma forma T_2 se mantiene en corte en función de la constante de tiempo de R_1 y C_1 . Así, tendremos que un período T de la onda cuadrada consta de los tiempos t_1 y t_2 , tal como se muestra en la Figura 24.43.

$$T = t_1 + t_2$$

Se puede afirmar, con una cierta aproximación, que el circuito RC necesita 0,69 constantes de tiempo para conseguir la tensión suficiente como para polarizar la base del transistor. Por ello, se puede establecer que el tiempo que se mantendrá cada transistor en corte será igual a:

$$t = 0,69RC$$

Así, por ejemplo, si el multivibrator astable de la Figura 24.42 estuviese constituido por $R_1 = R_2 = 25\text{ k}\Omega$ y $C_1 = C_2 = 1\text{ nF}$, para determinar la frecuencia de la onda cuadrada producida operaríamos de la siguiente manera: como las resistencias y los condensadores son iguales, obtendremos unos tiempos $t_1 = t_2 = T/2$, que se corresponderán con medio período de una onda cuadrada.

$$T/2 = 0,69 \cdot R \cdot C = 0,69 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9} = 1,725 \cdot 10^{-5} \text{ segundos}$$

El período completo de la señal será igual a:

$$T = 2 \cdot 1,725 \cdot 10^{-5} = 3,45 \cdot 10^{-5}$$

La frecuencia se calcula partiendo del valor del período:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3,45 \cdot 10^{-5}} = 28.985 \text{ Hz}$$

24.4.8. Osciladores integrados

Al igual que ocurre con la mayor parte de circuitos, hoy en día existen en el mercado toda una gama de osciladores construidos en un sólo circuito integrado. Un C.I. de estas características puede generar distintos tipos de señales, como senoidales, triangulares, cuadradas, etc., y dentro de una amplia gama de frecuencias (desde menos de una milésima de Hz hasta varios cientos de KHz). Ejemplo de este tipo de osciladores es el ICL8038, que proporciona señales con un nivel bajo de distorsión. En la Figura 24.44 se muestra un ejemplo de aplicación de este oscilador integrado.

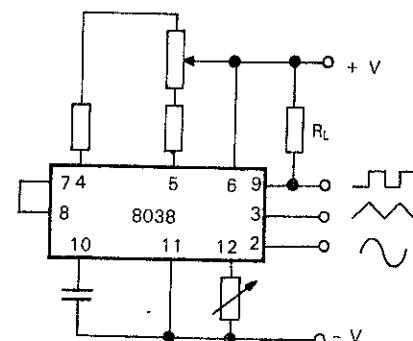


Figura 24.44. Oscilador integrado ICL8038.

Actividades

1. Toma la fuente de alimentación del laboratorio de Electrotecnia, así como su manual de especificaciones técnicas e intenta averiguar las posibilidades de funcionamiento de la misma, así como sus características más significativas. Si es posible, accede al circuito del que se compone la citada fuente, intentando identificar los componentes que componen a la misma. Observa si existe en su circuito algún tipo de regulador de tensión integrado. Si es así, identificalo, y con la ayuda de un Data Book, obtén las características más significativas del mismo.

Seguidamente, conecta una carga a la salida de la fuente de alimentación y observa con un osciloscopio la calidad de la corriente continua en las diferentes etapas de la fuente de alimentación: después de los rectificadores, después del filtrado y después del regulador integrado.

A continuación, conecta a la salida un reostato y modifica la corriente de carga suministrada por la fuente de alimentación, comprobando el grado de estabilidad de la tensión en la carga. Por último, somete a la fuente de alimentación a corrientes de carga superiores a la nominal y comprueba cómo actúa el sistema de limitación de corriente.

2. Consigue un SCR, un triac, un diac y un UJT; comprueba la disposición de sus terminales y consulta sus características en las hojas de especificaciones técnicas que proporciona el fabricante de los mismos.

3. En la Figura 24.45 se muestra el circuito para regular la velocidad de un motor serie en C.A. Mediante el potenciómetro R_2 controlamos el tiempo de carga del condensador C_2 conectado al diac. Al alcanzarse la tensión de disparo del diac, éste provoca el encendido del SCR durante uno de los semicírculos. El condensador C_1 y la bobina de reactancia L_1 se han incluido en el circuito para evitar interferencias en los aparatos de radio.

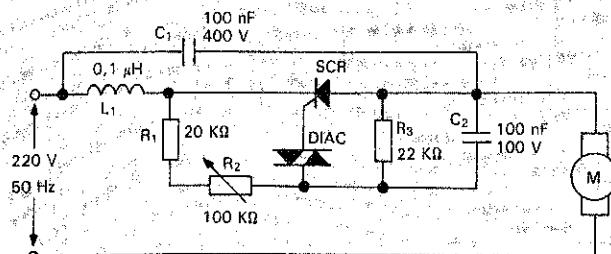


Figura 24.45. Circuito para el control de velocidad mediante SCR y diac.

Consigue los componentes necesarios para la realización de este circuito (la selección del SCR y del diac, dependerán de las características del motor) y monta el circuito en el entrenador o en un circuito impreso. Comprueba su funcionamiento, y mediante un osciloscopio obtén los oscilogramas relativos a los ciclos de encendido y apagado del SCR y del diac.

4. En la Figura 24.46 se muestra el circuito completo para realizar el control de luminosidad de una o varias lámparas incandescentes. Al realizar este circuito con un triac, obtendremos un control total de la potencia entregada a la lámpara en todo el ciclo completo de C.A. El control del triac lo conseguimos gracias al diac. Los ciclos de cebado del diac son controlados por la carga del condensador C_1 a través del potenciómetro R_1 . El resto de componentes se utiliza para mejorar las prestaciones del circuito; así, por ejemplo, con la resistencia R_2 se evitan los efectos que provocaría un valor excesivamente bajo al ajustar el potenciómetro R_1 .

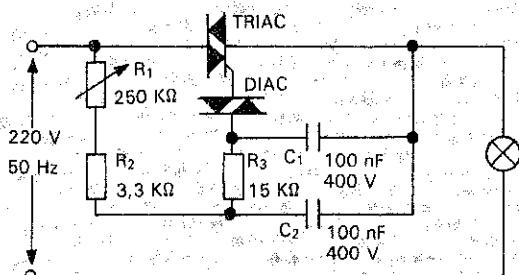


Figura 24.46. Circuito de control de la iluminación de lámpara incandescente.

Consigue los componentes necesarios para la realización de este circuito (la selección del triac y del diac dependerán de las características de la lámpara o lámparas a controlar) y monta el circuito en el entrenador o en un circuito impreso. Comprueba su funcionamiento, y mediante un osciloscopio obtén los oscilogramas relativos a los ciclos de encendido y apagado del triac y del diac.

5. Mediante el sencillo circuito de la Figura 24.47 podemos poner en marcha y parar un motor de C.A. El circuito trata de sustituir la acción de un relé o contactor electromagnético por medio de un triac. Al accionar el pulsador de marcha M, proporcionamos, a través de R_1 , suficiente corriente a la puerta del triac, provocando el disparo del mismo. Al estar en estado de conducción el triac, la red formada por R_2 y C_1 es sometida a casi toda la tensión de alimentación, por lo que la corriente que aparece por dicha red queda desfasada prácticamente 90° respecto a dicha tensión. Debido a este desfase, esta corriente, que fluye a través del terminal de puerta, alcanza su valor máximo cuando la tensión es prácticamente nula, por lo que cada vez que el triac tiende a desbararse, dicha corriente provoca un nuevo disparo del triac, dando como resultado un encendido continuo del triac. Para desactivar el triac basta con accionar el pulsador de paro P, el cual elimina el autoarranque del triac.

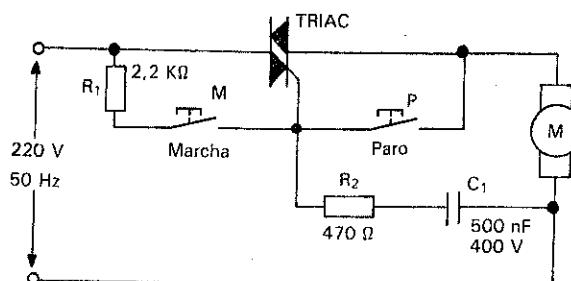


Figura 24.47. Circuito de relé mediante triac.

Como en otras ocasiones, consigue los componentes necesarios para la realización de este circuito (la selección del triac dependerá de las características del motor) y monta el circuito en el entrenador o en un circuito impreso. Comprueba su funcionamiento.

6. Consigue el circuito de un amplificador de emisor común, o en su defecto monta en el entrenador didáctico o en una placa de circuito impreso el circuito que se muestra en la Figura 24.48.

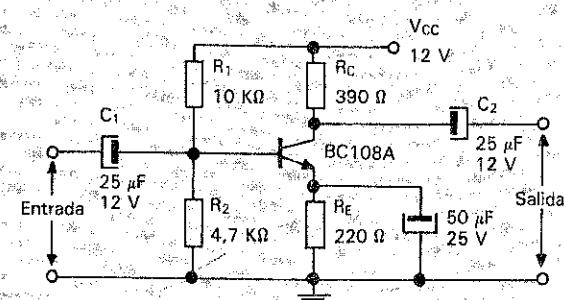


Figura 24.48. Amplificador de emisor común.

Una vez hecho esto, mediante un generador de señales, inyecta a la entrada del amplificador una señal senoidal de bajo nivel y de 1 KHz. Con un osciloscopio, visualiza la señal de salida en el canal B y la de entrada en el A, ajustando el nivel de entrada de dicho generador de señales hasta obtener una señal de salida sin distorsión.

Ahora dibuja los oscilogramas obtenidos, comprobando el desfase entre las señales de entrada y salida. Determina la ganancia de tensión.

7. Mediante este ejercicio práctico se pretende comprobar experimentalmente la dependencia de la ganancia del amplificador operacional comercial 741 al conectar una red de realimentación, así como comprobar el ancho de banda del mismo.

Antes de realizar el ejercicio, será conveniente conocer las especificaciones técnicas del AO 741:

- Tensión de alimentación: $\pm 18 \text{ V}$
- Dissipación de potencia: 500 mW
- Temperatura de funcionamiento: $0 \div 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Resistencia de entrada: $0,3 \text{ M}\Omega \div 2 \text{ M}\Omega$

- Resistencia de salida: 75Ω
- Ganancia de tensión: 150.000

El circuito con el que realizaremos las comprobaciones es el de la Figura 24.49.

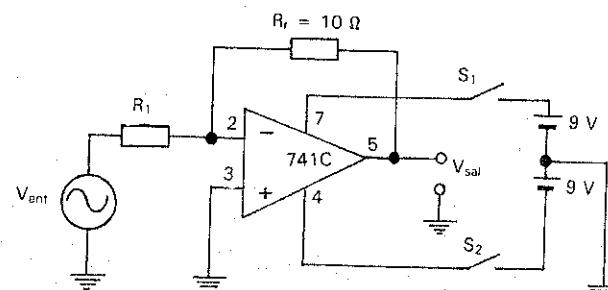


Figura 24.49. Circuito para el análisis de un AO.

- a) Para comenzar, monta el circuito de la Figura 24.49 en el entrenador didáctico, reservando un lugar para colocar diferentes valores óhmicos a la resistencia R_1 de $1/2 \text{ W}$.
- b) Sitúa una resistencia $R_1 = 2.200 \Omega$; conecta el canal B de un osciloscopio a la salida del amplificador operacional y el canal A a la entrada.
- c) Mediante un generador de señales, inyecta una señal senoidal de 1 KHz de tal amplitud que no llegue a generar distorsión en la salida. Dibuja los oscilogramas correspondientes a la señal de salida y entrada, determinando la ganancia obtenida por el AO con los valores pico a pico. Compara este valor con el calculado teóricamente ($A_{V(LC)} = R_2/R_1$).
- d) Una vez hecho esto, ir variando la frecuencia de la señal de entrada (desde unos pocos Hertzios hasta unos cuantos miles), sin variar la amplitud. Medir la amplitud de la señal de salida para diferentes valores de frecuencia, determinando, aproximadamente las frecuencias de corte inferior y superior (f_{c1} y f_{c2}) y el ancho de banda del amplificador. Seguidamente, dibujar sobre el papel la curva de respuesta del amplificador.
- e) Cambia la resistencia R_1 por los valores $10 \text{ k}\Omega$, $22 \text{ k}\Omega$, $47 \text{ k}\Omega$ y $100 \text{ k}\Omega$, comprobando el efecto que produce en la ganancia para una señal senoidal de 1 KHz.
8. Consigue los manuales técnicos de los generadores de señal incluidos en el instrumental del laboratorio de Electrotecnia, comprueba sus características técnicas, así como sus posibilidades de funcionamiento.
9. Consigue el circuito de un multivibrador astable o, en su defecto, monta el propuesto en la Figura 24.50.

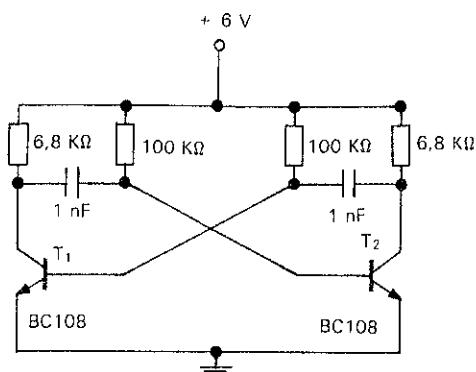


Figura 24.50

- a) Conecta el circuito a la alimentación y mide con un osciloscopio la forma de onda en el colector de T_1 y T_2 , así como en la base de T_1 y T_2 . Conviene disponer de un osciloscopio de dos canales para poder medir y comparar las diferentes señales medidas.

b) Teniendo en cuenta los componentes utilizados en el circuito, calcula el valor teórico de la frecuencia de este multivibrador y compárala con la medida obtenida por el osciloscopio.

c) Sustituir la resistencia R_1 por un potenciómetro. Ajustar dicho potenciómetro a diferentes valores óhmicos, observando el efecto que produce en las formas de onda del colector de uno de los transistores.

10. Consulta en Internet (<http://www.t2000idiomas.com/electrotecnia>) sobre los temas relacionados con este capítulo e intenta contrastar y ampliar la información obtenida.

Como en otras ocasiones, al finalizar cada una de estas actividades deberás elaborar un informe-memoria sobre la actividad desarrollada, indicando los resultados obtenidos y estructurándolos en los apartados necesarios para una adecuada documentación de las mismas (descripción del proceso seguido, medios utilizados, esquemas y planos utilizados, cálculos, medidas, etc.).

Autoevaluación

- 1) Dibuja en un diagrama de bloques las partes fundamentales de una fuente de alimentación estabilizada y explica cuál es la razón por la que se hacen necesarios los circuitos estabilizadores o reguladores de tensión.
- 2) ¿Cuál es la misión de los circuitos estabilizadores en una fuente de alimentación?
- 3) ¿Cuáles son las ventajas que se obtienen con un amplificador realimentado negativamente?
- 4) ¿Qué nos indica el ancho de banda de un amplificador?
- 5) ¿Qué ventajas presenta un amplificador operacional frente a uno de transistores de unión?
- 6) Se trata de construir un microamperímetro de 0 a $10 \mu\text{A}$ mediante un voltímetro de 0 a 20 V y un amplificador operacional. Dibujar el circuito con el que se puede conseguir tal objetivo, determinando el valor de la resistencia de realimentación, así como la constante del voltímetro. ¿Qué corriente medirá este dispositivo si el voltímetro indica 5 V?
- 7) La señal de entrada de un amplificador es de 6 mV y 2 mA. Determinar la ganancia de tensión, potencia y corriente de este amplificador, si la señal que se obtiene en la salida es de 2 V y 20 mA.
- 8) ¿Qué requisitos debe reunir un amplificador para convertirse en un oscilador?
- 9) Determinar la frecuencia de la señal de salida de un oscilador RC por desplazamiento de fase, como el de la Figura 24.35, si consta de una red de realimentación con tres células RC de valores $R = 25 \text{ k}\Omega$ y $C = 18 \text{ pF}$.
- 10) ¿Cuál será el valor capacitivo que deberán poseer los condensadores de un puente de Wien, como el de la Figura 24.36, para conseguir una señal de salida de frecuencia igual 1 KHz, teniendo en cuenta que $R = 50 \text{ k}\Omega$?
- 11) ¿Cuáles son las ventajas que aporta un oscilador a cristal?

Solución a los Ejercicios de Autoevaluación

1.1	B	4.1	B
1.2	C	4.2	C
1.3	A	4.3	3.456 Kcal
1.4	C	4.4	1 hora
1.5	B	4.5	88,5%
1.6	21 mA	4.6	C
2.1	A	4.8	$S = 6 \text{ mm}^2; \delta = 4,3 \text{ A/mm}^2$
2.2	B	4.9	$S = 4 \text{ mm}^2; \delta = 6,5 \text{ A/mm}^2$
2.3	30 mA	4.10	Según la Tabla 4.2: 4 mm^2 ; sin embargo, el reglamento electrotécnico para baja tensión (REBT) nos indica que para este tipo de instalaciones, por cuestión de seguridad, la sección será como mínimo de 6 mm^2 .
2.4	125 V	4.11	$S = 4 \text{ mm}^2; \delta = 2,18 \text{ A/mm}^2$
2.5	115 Ω	4.12	$S = 16 \text{ mm}^2$
2.6	B	5.1	A
2.7	A	5.2	A
2.8	B	5.3	6 A
2.9	C	5.4	c. puntos de iluminación: 2,3 KW; c. tomas de corriente uso general y frigorífico: 3,68 KW; c. de cocina y horno: 5,75 KW; c. de lavadora, lavavajillas y termo eléctrico: 4,6 KW; c. de tomas de corriente de cuartos de baño y cocina: 3,68 KW.
2.10	C	6.1	$I = 0,5 \text{ A}, V_1 = 100 \text{ V}, V_2 = 70 \text{ V}, V_3 = 50 \text{ V}, P_1 = 50 \text{ W}, P_2 = 35 \text{ W}, P_3 = 25 \text{ W}, P_T = 110 \text{ W}, R_T = 440 \Omega$
2.11	0,3 mm^2	6.2	21 V
2.12	100 m	6.3	31 Ω
2.13	6,09 Ω	6.4	Nº1 (96,8 Ω ; 132 V; 180 W), Nº2 (64,5 Ω ; 88 V; 120 W), Total (161,3 Ω ; 1,36 A, 300 W)
2.14	66,05 Ω ; 4 °C	6.5	13,5 Ω ; 16,7 W
3.1	$P = 75 \text{ W}, R = 133 \Omega$	6.6	$R_T = 2 \Omega; I_1 = 2 \text{ A}; I_2 = 3 \text{ A}; I_3 = 1 \text{ A}; I_T = 6 \text{ A}; P_1 = 24 \text{ W}; P_2 = 36 \text{ W}; P_3 = 12 \text{ W}; P_T = 72 \text{ W}$
3.2	$V = 237 \text{ V}, I = 3,16 \text{ A}$	6.7	215 Ω ; 1,02 A
3.3	a) $I = 13,6 \text{ A}$, b) $P = 968 \text{ W}$	6.8	4 Ω
3.4	15 A		
3.5	19,5 m.		
3.6	119 W		
3.7	a) 10,87 A; b) 21,16 Ω ; c) 150 KWh		
3.8	a) 5,8 A; b) 16.934 ptas.		
3.9	A		
3.10	C		

6.9	a) $R_T = 50 \Omega$; b) $I = 500 \text{ mA}$; $I_T = 10 \text{ A}$; c) $P = 250 \text{ W}$; $P_T = 5.000 \text{ W}$	9.13	$C_T = 20 \mu\text{F}$; $Q_T = 2 \cdot 10^{-3} \text{ C}$; $Q_1 = 15 \cdot 10^{-4} \text{ C}$; $Q_2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ C}$.
6.10	$R_1 = 24,2 \Omega$; $R_2 = 8,07 \Omega$; $R_3 = 16,13 \Omega$	10.1	B
6.11	A y B	10.2	A
6.12	A y C	10.3	B
6.13	R_T : (27 Ω , 7,5 A; 1501 W)	10.4	B
6.14	a) \mathbf{R}_1 : (3,7 A; 37 V; 137 W) \mathbf{R}_2 : (5 A; 100 V; 500 W) \mathbf{R}_3 : (2,1 A; 63 V; 132 W) \mathbf{R}_4 : (1,6 A; 63 V; 101 W) \mathbf{R}_T : (8,7 A; 100 V; 870 W)	10.5	$\mu = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ H/m}$
7.1	$I_1 = 1,25 \text{ A}$; $I_2 = -0,75 \text{ A}$; $I_3 = 0,5 \text{ A}$	10.6	$H = 1000 \text{ Av/m}$; $B = 1,3 \text{ T}$; $\Phi = 390 \mu\text{Wb}$, $\mu_r = 1034,5$; $\mathcal{F} = 100 \text{ Av}$; $\mathfrak{R} = 256.410 \text{ Av/Wb}$
7.2	0,7 V	10.7	$\Phi = 0,6 \text{ mWb}$; $H = 300 \text{ Av}$; $\mathcal{F} = 75 \text{ Av}$
7.3	16 Ω	10.8	$B = 1,5 \text{ T}$; $\Phi = 3,75 \text{ mWb}$; $\mathcal{F} = 5000 \text{ Av}$
7.4	20 Ω	10.9	18 A
7.5	R_{L1} (0,96 A, 96,2 V), R_{L2} (198 mA, 99,2 V), R_{L3} (7,14 A, 71,43 V), R_{L4} (33 mA, 99,86 V)	10.10	1.872 espiras
8.1	B	10.11	27 Kp
8.2	B	10.12	2,4 A
8.3	A	11.1	A y C
8.4	C	11.2	B y C
8.5	C	11.3	B
8.6	66 horas	11.4	A
8.7	a) 20 V; b) 17,4 V; 2,17 A; c) 87%; d) 16,7 A; e) 17,6 V	11.5	C
8.8	a) 2 V; b) 1,99 V; 0,25 A; c) 99%; d) 166 A; e) 1,98 V	11.6	B
8.9	a) $I = 50 \text{ A}$; $R = 0,35 \Omega$; $P = 875 \text{ W}$; b) $P_u = 87,5 \text{ W}$	11.7	450 V
8.10	A	11.8	712 mV
8.11	B	11.9	978 mH
8.12	C	11.10	20 Nw
9.1	C	12.1	B
9.2	A	12.2	C
9.3	C	12.3	A
9.4	B	12.4	B
9.5	C	12.5	B
9.6	0,004 C; 0,02 C; 0,1 C	12.6	C
9.7	0,49 mm	12.7	A
9.8	$\tau = 0,01 \text{ s}$, $t = 0,05 \text{ s}$	12.8	141 V
9.9	B	12.9	200 Hz
9.10	A	12.10	311 KV
9.11	B	12.11	$V_{\max} = 40 \text{ V}$; $V = 28,3 \text{ V}$; $T = 0,05 \text{ s}$; $f = 20 \text{ Hz}$; $v = 23,5 \text{ V}$
9.12	$C_T = 2 \mu\text{F}$; $Q_T = Q_1 = Q_2 = 0,0002 \text{ C}$; $V_1 = 33,33 \text{ V}$; $V_2 = 66,67 \text{ V}$	12.12	$\omega = 50 \pi \text{ rad/s}$; $T = 0,04 \text{ s}$; $f = 25 \text{ Hz}$
		12.13	96 V; 252 V; 311 V; 296 V; 0 V; -96 V; -252 V; 0 V
		12.14	127 V
		12.15	a) 4,24 V; b) 0 V; 6,67 Hz
		12.16	$I = 4,4 \text{ A}$; $P = 968 \text{ W}$; $E = 7,7 \text{ KWh}$
		12.17	$X_L = 150,8 \Omega$; $I = 2,5 \text{ A}$; $Q_L = 943 \text{ VAR}$; $E = 0 \text{ KWh}$

- 12.18 $I = 6,3 \text{ A}$; $Q_C = 314 \text{ VAR}$
- 13.1 B y C
- 13.2 B
- 13.3 A
- 13.4 A y C
- 13.5 $Z = 93 \Omega$; $I = 2,36 \text{ A}$; $\cos \varphi = 0,57,5^\circ$; $V_R = 118 \text{ V}$; $V_L = 185 \text{ V}$; $P = 279 \text{ W}$; $Q = 438 \text{ VAR}$; $S = 519 \text{ VA}$; $\cos \varphi = 0,54$
- 13.6 $I = 4,9 \text{ mA}$; $\cos \varphi = 0,49$; $V_R = 49 \text{ V}$; $V_C = 87 \text{ V}$; $P = 0,24 \text{ W}$; $Q = 0,43 \text{ VAR}$; $S = 0,49 \text{ VA}$
- 13.7 $I = 6,75 \text{ A}$; $V_R = 67,5 \text{ V}$; $V_C = 215 \text{ V}$; $V_L = 424 \text{ V}$; $P = 459 \text{ W}$; $Q = 1.412 \text{ VAR}$;
 $S = 1.485 \text{ VA}$; $\cos \varphi = 0,31$ (inductivo)
- 13.8 $\cos \varphi = 0,73$
- 13.9 Características de batería: (10 KVAR; 220 V; 604 μF); $I_{\cos \varphi=0,6} = 72 \text{ A}$; $I_{\cos \varphi=0,95} = 46 \text{ A}$
- 13.10 $1,12 \mu\text{F} / 220 \text{ V}$
- 13.11 $8,4 \mu\text{F}$, 181 V
- 13.12 $I = 0,5 \text{ A}$; $V_1 = 126 \text{ V}$; $V_2 = 95 \text{ V}$; $\cos \varphi = 0,1$; $P = 11 \text{ W}$; $Q = 109 \text{ VAR}$; $S = 110 \text{ VA}$; $C = 7 \mu\text{F}$
- 13.13 10 mm^2
- 13.14 25 mm^2 ; $\delta = 1 \text{ A/mm}^2$
- 14.1 b) $S_T = 27,6 \text{ KVA}$, $\cos \varphi_T = 0,88$; c) circuito general (160 A), circuito de batería de condensadores (80 A), circ.1 (35 A), circ.2 (80 A), circ.3 (20 A), circ.4 (20 A), circ.5 (5 A); d) $S = 70 \text{ mm}^2$; e) $Q_C = 8,1 \text{ KVAR}$, $C = 535 \mu\text{F}$, $V_C = 220 \text{ V}$. (Nota: para la selección de los calibres de los interruptores automáticos se ha consultado la información técnica que facilitan los catálogos comerciales.)
- 14.2 a) $P_T = 8,7 \text{ KW}$; $S_T = 10,4 \text{ KVA}$; $\cos \varphi_T = 0,87$; $I_T = 46 \text{ A}$; b) $F_1 = 50 \text{ A}$; $F_3 = 4 \text{ A}$; $F_4 = 25 \text{ A}$; $F_5 = 6 \text{ A}$; $F_6 = 20 \text{ A}$; c) 50 mm^2 d) $3,7 \text{ KVAR}$; $242 \mu\text{F}$; 220 V ; 17 A ; e) 50 mm^2
- 14.3 $R = 35,35 \Omega$; $X_L = 35,35 \Omega$
- 14.4 $I_T = 2,4 \text{ A}$; $I_R = 1,9 \text{ A}$; $I_L = 0,6 \text{ A}$
- 14.5 $I_T = 0,32 \text{ A}$; $I_R = 0,3 \text{ A}$; $I_L = 2,4 \text{ A}$; $I_C = 2,5 \text{ A}$; $\cos \varphi = 0,95$; $P_T = 36,4 \text{ W}$; $Q_T = 12,1 \text{ VAR}$; $S_T = 38,4 \text{ VA}$
- 14.6 $Z_T = 6,9 \Omega$; $I_T = 14,4 \text{ A}$; $I_1 = 10 \text{ A}$; $I_2 = 4,5 \text{ A}$; $I_3 = 8,9 \text{ A}$; $P_T = 1.200 \text{ W}$; $Q_T = 800 \text{ VAR}$; $S_T = 1.442 \text{ VA}$; $FP = 0,83$ (capacitivo)
- 14.7 $A = 2,8 \text{ A}$; $V = 17,9 \text{ V}$; $PT = 140 \text{ W}$; $QT = 20 \text{ VAR}$; $S = 141 \text{ VA}$
- 14.8 $I_T = 10 \text{ A}$; $I_1 = 20 \text{ A}$; $V_T = 141 \text{ V}$; $P_T = 1.000 \text{ W}$; $Q_T = 1.000 \text{ VAR}$; $S = 1.414 \text{ VA}$; $FP = 0,7$
- 14.9 $I = 1,37 \text{ A}$; $\cos \varphi = 0,62$; $P = 187 \text{ W}$; $Q = 235 \text{ VAR}$; $S = 301 \text{ VA}$.
- 14.10 bobina n° 1 (0,83 A; $\cos \varphi = 0,3$; 55 W), bobina n° 2 (0,98 A; $\cos \varphi = 0,53$; 114 W), total (1,8 A; $\cos \varphi = 0,43$; 169 W)
- 14.11 192 V; 19,6 Hz
- 14.12 $I = 0,5 \text{ A}$; $V_1 = 126 \text{ V}$; $V_2 = 95 \text{ V}$; $\cos \varphi = 0,1$; $P = 11 \text{ W}$; $Q = 109 \text{ VAR}$; $S = 110 \text{ VA}$; $C = 7 \mu\text{F}$
- 14.13 $R_{\text{adicional}} = 79,5 \Omega$
- 14.14 $I_C = 0,14 \text{ A}$; $I_L = 0,62 \text{ A}$; $I_T = 0,6 \text{ A}$
- 14.15 $S = 50 \text{ mm}^2$; Sección (para $\cos \varphi = 0,95$) = 25 mm²
- 14.16 125,8 Hz; 3.162 V
- 14.17 $10,13 \mu\text{F}$
- 15.1 B
- 15.2 B
- 15.3 A y C
- 15.4 C
- 15.5 A
- 15.6 $P = 8,96 \text{ KW}$; $Q = 7,9 \text{ KVAR}$; $S = 11,94 \text{ KVA}$
- 15.7 0,95
- 15.8 a) $S = 77 \text{ KVA}$; $I_{L,\text{pri.}} = 1,85 \text{ A}$; $I_{L,\text{sec.}} = 111 \text{ A}$; b) $S = 51 \text{ KVA}$; $I_{L,\text{pri.}} = 1,23 \text{ A}$; $I_{L,\text{sec.}} = 77,6 \text{ A}$
- 15.9 $P = 5.290 \text{ W}$; $I_L = 13,3 \text{ A}$; $I_f = 13,3 \text{ A}$
- 15.10 15.870 W ; $IL = 39,8$; $If = 23 \text{ A}$
- 15.11 $I_L = 9,3 \text{ A}$; $I_f = 5,3 \text{ A}$; $Q = 4.665 \text{ VAR}$; $S = 6.138 \text{ VA}$; $R = 48 \Omega$; $L = 0,17 \text{ H}$
- 15.12 $I_f = 3,7 \text{ A}$; $I_L = 6,4 \text{ A}$; $P = 657 \text{ W}$; $\cos \varphi = 0,25$
- 15.13 $\cos \varphi = 0,76$; $Q = 25,3 \text{ KVAR}$; $S = 38,7 \text{ KVA}$
- 15.14 $I_L = 21,5 \text{ A}$; $I_N = 0$; $Q_C = 3,5 \text{ KVAR}$
- 15.15 a) $\cos \varphi = 0,8$; b) $I_L = 40,4 \text{ A}$; c) $Q_C = 198,7 \text{ KVAR}$ ($C = 6,3 \mu\text{F}$; 5,8 KV) d); 14%
- 15.16 $P_T = 115 \text{ KW}$; $Q_T = 67 \text{ KVAR}$; $S_T = 133 \text{ KVA}$; $\cos \varphi_T = 0,87$; $I_L = 320 \text{ A}$
- 15.17 a) $A_1 = 0,53 \text{ A}$; $A_2 = 42 \text{ A}$; $A_3 = 17,5 \text{ A}$; $A_4 = 19 \text{ A}$; $A_5 = 8,2 \text{ A}$; $A_6 = 0$; $V_1 = 380 \text{ V}$; $V_2 = 220 \text{ V}$; $W = 7186 \text{ W}$; b) $10,6 \text{ KVAR}$; 380 V ; $77,8 \mu\text{F}$; c) sólo se modifican: $A_1 = 0,43 \text{ A}$; $A_2 = 34 \text{ A}$; $A_7 = 16 \text{ A}$
- 15.18 70 mm^2
- 15.19 $\Delta V\% = 1,94\%$; $P_{pl} = 1.980 \text{ W}$. Para $\cos \varphi = 0,95$ las pérdidas son de 1.075 W
- 16.1 B
- 16.2 A y B
- 16.3 A, B y C
- 16.4 A
- 16.5 A
- 16.6 C
- 16.7 B
- 16.8 A y B
- 16.9 $E_{ab} = 15 \text{ mA}$; $E_t = 4,5 \%$

- 16.10 Clase = 1,5
 16.11 12,5 W
 16.12 0,01 Ω
 16.13 $R_{shunt} = 0,1 \Omega$; $K = 0,125 \text{ A/div}$; K (con Shunt) = 2,5 A/div; $I = 8,125 \text{ A}$; I (con Shunt) = 162,5 A
 16.14 Transformador de intensidad con relación 250 /5 A; $m = 50$; $I = 218,75 \text{ A}$
 16.15 $R_s = 245 \text{ K}\Omega$; K (con R_s) = 10 V/div; $K = 0,2 \text{ mV/div}$; V (con R_s) = 220 V; $V = 4,4 \text{ V}$
 16.16 Transformador de tensión con relación 11 KV/110 V; $m = 100$; $K = 220 \text{ V/div}$; $V = 9900 \text{ V}$
 16.17 A y C
 16.18 B
 16.19 C
 16.20 B
 16.21 A, B y C
 16.22 A, B y C
 16.23 $K_{50 \text{ V}-5 \text{ A}} = 10 \text{ W/div}$; $K_{150 \text{ V}-5 \text{ A}} = 30 \text{ W/div}$; $P = 450 \text{ W}$
- 17.1 B
 17.2 B
 17.3 C
 17.4 B
 17.5 B
 17.6 C
 17.7 A
 17.8 A
 17.9 A
 17.10 C
 17.11 A
 17.12 Lámpara fluorescente: 62,5 lm/W; lámpara incandescente: 12,5 lm/W
- 18.1 A
 18.2 C
 18.3 B
 18.4 A
 18.5 B
 18.6 A
 18.7 A y C
 18.8 $m = 10$, $V_2 = 22 \text{ V}$
 18.9 $V_1 = 373 \text{ V}$, $V_2 = 1.865 \text{ V}$, $m = 0,2$
 18.10 $I_1 = 6,6 \text{ A}$; $I_2 = 19,7 \text{ A}$; $m = 3$
 18.11 a) $m = 25,12$; b) $P_{Fe} = 20 \text{ W}$; $I_0 = 0,15 \text{ A}$
 18.12 a) $I_{ln} = 16,66 \text{ A}$; $I_{2n} = 435 \text{ A}$; b) $P_{cu} = 1.571 \text{ W}$; c) $u_{cc} = 4,16\%$; $u_{Rcc} = 1,57\%$; $u_{Xcc} = 3,85\%$; d) $Z_{cc} = 15 \Omega$; $X_{cc} = 13,76 \Omega$; $R_{cc} = 5,98 \Omega$; $P_{Cu(C=3/4)} = 884 \text{ W}$
- 18.13 $V_2 = 220 \text{ V}$, $I_{cc1} = 1.148 \text{ A}$, $I_{cc2} = 9.980 \text{ A}$, $V_{2(2,5 \text{ kVA})} = 227,5 \text{ V}$
 18.14 $\eta = 99\%$
 18.15 $V_2 = 221 \text{ V}$; $\eta = 95\%$; $I_{cc1} = 625 \text{ A}$; $I_{cc2} = 1.087 \text{ A}$
 18.16 B
 18.17 C
 18.18 A
 18.19 a) $m_s = 52$; $m_c = 30$; b) $I_0 = 0,2$; c) $P_{Fe} = 400 \text{ W}$
 18.20 a) $P_{Cu} = 4.010 \text{ W}$; b) $u_{cc} = 4\%$; $u_{Rcc} = 1,6\%$; $u_{Xcc} = 3,66\%$; c) $V_2 = 385 \text{ V}$; $\eta = 97,8\%$; $I_{cc} = 119 \text{ A}$
- 19.1 A
 19.2 B
 19.3 A y B
 19.4 C
 19.5 B
 20.1 A y C
 20.2 B
 20.3 A
 20.4 B
 20.5 B y C
 20.6 B
 20.7 A
 20.8 B
 20.9 $I_{i(\text{arranque directo})} = 973 \text{ A}$, $I_{i(\text{arranque con resistencia adicional})} = 80 \text{ A}$
 20.10 $I_a = 360 \text{ A}$; $R_a = 0,29 \Omega$
 20.11 $P = 4.135 \text{ W}$; $I = 38 \text{ A}$
 20.12 1.333 N
 20.13 19,4 Nm
 20.14 26 CV
- 21.1 B
 21.2 A y C
 21.3 60 Hz
 21.4 8 pares de polo
 21.5 1.200 rpm
- 22.1 B
 22.2 A
 22.3 C
 22.4 C
 22.5 4 pares de polos
 22.6 900 r.p.m.
 22.7 5%

22.8	44 Nm	23.6	B
22.9	a) 0,6 %; b) 390 A; 298 A; 205 A; c) $I_n = 2.418$; d) $C_n = 705 \text{ Nm}$ $C_a = 1.057$; $C_m = 1.692 \text{ Nm}$	23.7	C
22.10	A	23.8	C
22.11	A	23.10	B
22.12	B y C	23.11	C
22.13	B	23.12	$\beta = 49$
		23.13	A
23.1	$R_1 = 27 \text{ K}\Omega \pm 10\%$; $R_2 = 12 \text{ K}\Omega \pm 2\%$; $R_3 = 1.500 \text{ M}\Omega \pm 5\%$	23.14	B
23.2	R_1 : (rojo, amarillo, naranja, oro), R_2 : (azul, gris, naranja, plata), R_3 : (marrón, marron, negro, rojo)	24.6	$R_t = 2 \text{ M}\Omega$; $2.5 \mu\text{A}$; $K = 2 \text{ V}/\mu\text{A}$
23.3	C	24.7	$A_v = 333$, $A_i = 10$, $A_p = 3333$
23.4	C	24.9	144.388 Hz
23.5	C	24.10	3,18 nF

Bibliografía

- Aeg-Telefunken**, *Máquinas de corriente continua*, Editorial Paraninfo.
- Alcalde**, *Electrotecnia*, Editorial Paraninfo.
- Alcalde**, *Curso general de electricidad*, Editorial Paraninfo.
- Alcalde**, *Principios fundamentales de electrónica*, Editorial Paraninfo.
- Angulo**, *Enciclopedia de electrónica moderna*, Editorial Paraninfo.
- Angulo**, *Prácticas de electrónica*, McGraw-Hill.
- Bergtold**, *Circuitos con triacs, diacs y tiristores*, Gustavo Gili.
- Ceac**, *Electrotecnia general*.
- Corrales, J.**, *Teoría general de máquinas eléctricas*, UNED.
- Dawes**, *Tratado de electricidad*, Gustavo Gili, S.A.
- García Gutiérrez**, *Amplificadores operacionales*, Editorial Paraninfo.
- Grob**, *Circuitos electrónicos y sus aplicaciones*, Editorial Paraninfo.
- Heumann**, *Fundamentos de la electrónica de potencia*, Editorial Paraninfo.
- Horn**, *Diseño de circuitos con transistores*, Editorial Paraninfo.
- Lehman**, *Diodos y transistores*, Editorial Paraninfo.
- Malvino, A.**, *Principios de electrónica*, McGraw-Hill.
- Ojeda**, *Montajes electrónicos*, Editorial Paraninfo.
- Reglamento electrotécnico de baja tensión**, Editorial Paraninfo.
- Roldán, J.**, *Manual del electricista de taller*, Editorial Paraninfo.
- Roldán, J.**, *Motores eléctricos-Aplicación industrial*, Editorial Paraninfo.
- Roldán, J.**, *Motores eléctricos-Automatismos de control*, Editorial Paraninfo.
- Schuler, Ch.**, *Electrónica-Principios y aplicaciones*, Reverté.
- Senner, A.**, *Principios de electrotecnia*, Reverté.
- Simón, A.**, *Electricidad industrial aplicada*, Editorial Paraninfo.
- Webster**, *1001 Circuitos electrónicos prácticos*, Editorial Paraninfo.
- Whitson**, *500 Circuitos electrónicos*, Editorial Paraninfo.
- Wildi, T.**, *Tecnología de los sistemas eléctricos de potencia*, Hispano europea.