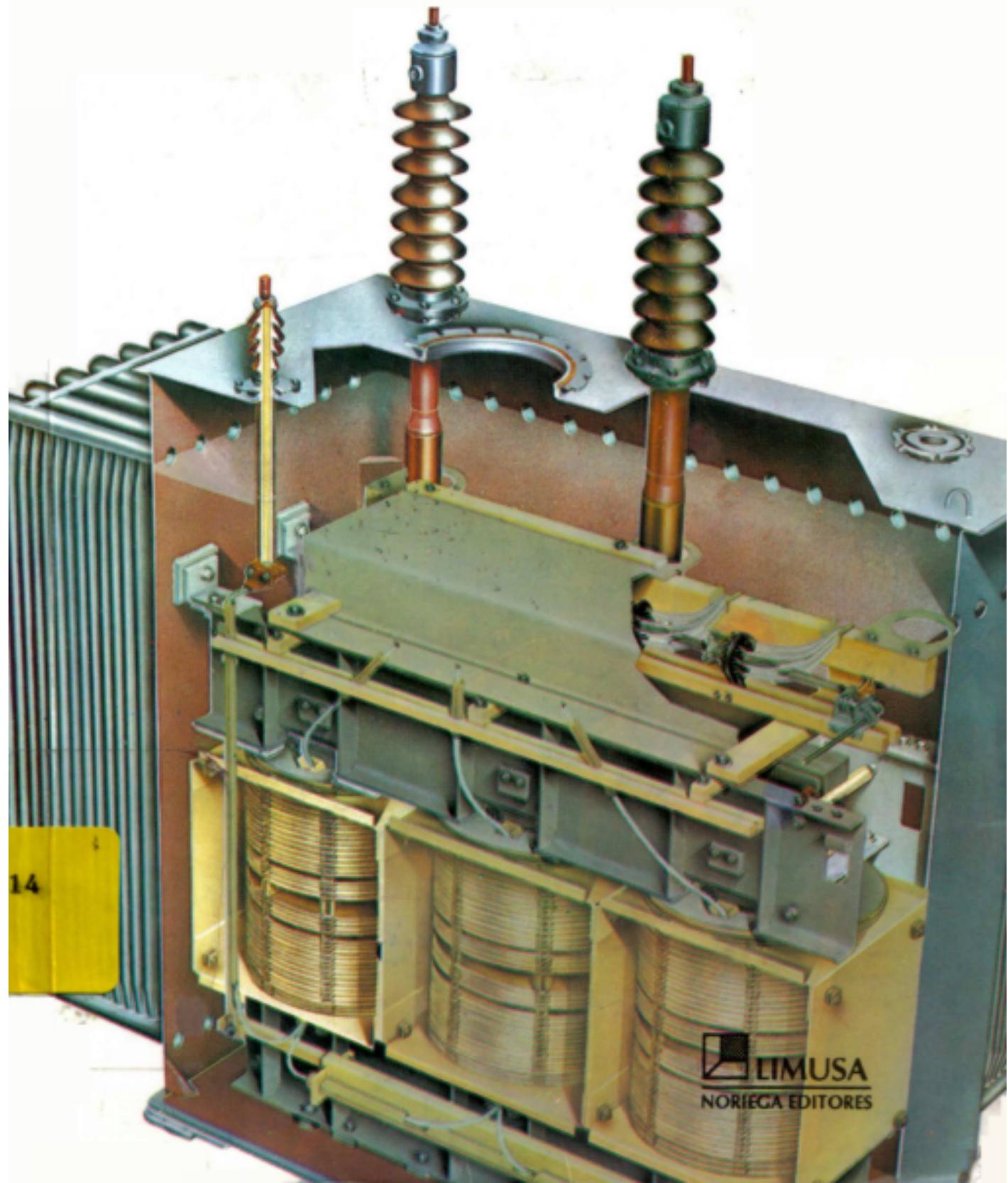


EL ABC DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

I. TRANSFORMADORES

ENRIQUEZ HARPER



Otras obras del autor:

- El ABC de las instalaciones eléctricas residenciales
- El ABC de las instalaciones eléctricas industriales
- Fundamentos de instalaciones eléctricas de mediana y alta tensión
- Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales
- Curso de máquinas síncronas
- Curso de máquinas de corriente continua
- Análisis moderno de sistemas eléctricos de potencia
- Curso de transformadores y motores trifásicos de inducción
- Elementos de centrales eléctricas I y II
- Elementos de diseño de subestaciones eléctricas
- Líneas de transmisión y redes de distribución de potencia eléctrica I y II
- Técnica de las altas tensiones I y II
- Fundamentos de protección de sistemas eléctricos por relevadores
- Introducción al análisis de los sistemas eléctricos de potencia
- Introducción al análisis de redes eléctricas en sistemas de potencia

EL ABC DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

I. TRANSFORMADORES

EL ABC DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

I. TRANSFORMADORES

GILBERTO ENRÍQUEZ HARPER

Profesor titular de la ESIME-IPN



NORIEGA EDITORES

EDITORIAL LIMUSA

**MÉXICO • ESPAÑA • VENEZUELA • ARGENTINA
COLOMBIA • PUERTO RICO**

*La presentación y disposición en conjunto de
EL ABC DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS I. TRANSFORMADORES
son propiedad del editor. Ninguna parte de esta obra
puede ser reproducida o transmitida, mediante ningún sistema
o método, electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado,
la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento
de información), sin consentimiento por escrito del editor.*

Derechos reservados:

© 1989, EDITORIAL LIMUSA, S. A. de C. V.
Balderas 95, Primer piso, 06040, México, D. F.

Miembro de la Cámara Nacional de la
Industria Editorial. Registro Núm. 121

Primera edición. 1987
Primera reimpresión. 1989
Impreso en México
(8034)

ISBN 968 – 18 – 2570 – 5

PROLOGO

El estudio de las máquinas eléctricas ha sido un tema de interés desde que estas aparecieron como parte integrante de los sistemas eléctricos. Dada la importancia que tienen en la vida moderna, por sus aplicaciones industriales y domésticas, - se ha considerado que es de utilidad disponer de una guía práctica en la selección, instalación, operación y mantenimiento de las máquinas eléctricas incluyendo algunos conocimientos básicos de teoría que permitan comprender mejor los temas prácticos.

Este trabajo está dirigido a los técnicos y electricistas prácticos, pero desde luego que puede ser utilizado por todas las personas relacionadas con el tema, por lo que se trata de cubrir cada capítulo con ejemplos resueltos y un buen número de ilustraciones, de manera que a cada tema se le dé la mayor claridad posible.

Como en otras publicaciones, en esta ocasión he contado nuevamente con la valiosa colaboración de mis amigos y compañeros de la C.F.E.; en las ilustraciones a los Señores Adolfo Fries F.; Benito y Patricio Reyes T. y en el trabajo de mecanografiado a la Sra. Magda Ponce Z. y la Sra. Ana María Fernández E., a quienes agradezco su ayuda valiosa y desinteresada.

A MI QUERIDA HIJA PAOLA

CONTENIDO

CAPITULO 1. CONCEPTOS GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES.

INTRODUCCIÓN	17
PRINCIPIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	20
PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR	25
EFEKTOS DE LA FRECUENCIA Y EL FLUJO	29
EL DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR EN VACÍO	33
RELACIÓN DE CORRIENTE	37
EL DIAGRAMA FASORIAL CON CARGA	51
EL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR	54
DIAGRAMA FASORIAL A PLENA CARGA	55
LA APLICACIÓN DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES	59
DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES DEL TRANSFORMADOR	66
PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS A PLENA CARGA	68
REGULACIÓN DEL TRANSFORMADOR	74
CAPITULO 2. POTENCIA Y RENDIMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS Y TRIFÁSICOS.	
LA POTENCIA DE LOS TRANSFORMADORES	83

Contenido 11

LA EFICIENCIA EN LOS TRANSFORMADORES	85
EFICIENCIA DIARIA DE LOS TRANSFORMADORES	92
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	94
CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE CONEXIONES	99
DEFASAMIENTO ENTRE LAS FASES	100
III. LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR.	
CONSIDERACIONES GENERALES	115
LA CONSTRUCCIÓN DEL NÚCLEO	115
ELEMENTOS DE LOS NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES	119
SECCIONES DE LAS COLUMNAS	123
TIPOS DE NÚCLEOS	124
HERRAJES O ARMADURA	128
LOS DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES	128
DEVANADOS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN	130
CONSTRUCCIÓN DE LOS DEVANADOS	138
CONEXIONES DE LOS DEVANADOS	144
MATERIALES ELÉCTRICOS USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES	152

10 Contenido

— CONDUCTORES ELÉCTRICOS	152
— MATERIALES AISLANTES	157
— PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES	157
— LA TEMPERATURA Y LOS MATERIALES AISLANTES	158
— CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES	160
— MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.	162

CAPÍTULO 4. FUNDAMENTOS DE CALCULO DE TRANSFORMADORES.

— INTRODUCCIÓN	177
— DIMENSIONAMIENTO DE LAS PARTES ACTIVAS DEL TRANSFORMADOR.	177
DETERMINACIÓN DEL FLUJO	178
— CÁLCULO DE NÚMERO DE ESPIRAS	184
— DENSIDAD DE CORRIENTE	186
RELACIÓN ENTRE LAS PÉRDIDAS EN EL FIERRO Y LAS PÉRDIDAS EN EL COBRE	186
— LOS AMPERE-ESPIRA POR UNIDAD DE LONGITUD EN LA COLUMNA	187
— AISLAMIENTO ENTRE DEVANADOS Y ENTRE DEVANADOS Y EL NÚCLEO	188
— DISTANCIAS ENTRE DEVANADOS Y EL YUGO Y ENTRE LOS DEVANADOS Y EL TANQUE	190

12 Contenido

DIMENSIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN AIRE	191
--	-----

DIMENSIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE DISTRIBUCIÓN ENFRIADOS POR ACEITE	193
---	-----

CAPITULO 5. PRINCIPALES CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES.

INTRODUCCIÓN	231
------------------------	-----

EL CONCEPTO DE POLARIDAD	231
------------------------------------	-----

LA PRUEBA DE POLARIDAD	234
----------------------------------	-----

CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	235
---	-----

SISTEMAS POLIFÁSICOS	236
--------------------------------	-----

CONEXIÓN TRIFÁSICA DE LOS TRANSFORMADORES	238
---	-----

CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES EN PARALELO	253
---	-----

CAPITULO 6. PRUEBAS A TRANSFORMADORES.

INTRODUCCIÓN	267
------------------------	-----

PRUEBAS AL ACEITE DEL TRANSFORMADOR	269
---	-----

PRUEBAS DE RIGIDEZ DIELÉCTRICA DEL ACEITE	271
---	-----

PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA DEL ACEITE	274
---	-----

REHABILITACIÓN DE ACEITES	276
-------------------------------------	-----

Contenido 13

PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO	279
MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS	283
PRUEBA DE POLARIDAD	284
PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO DE FASE	287
PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES	289
PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO	289
PRUEBA DE VOLTAJE INDUCIDO	291
PRUEBA DE IMPULSO	294
PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA A LAS BOQUILLAS DEL TRANSFORMADOR	297
MEDICIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN VACÍO Y LAS CARACTERÍSTICAS - DE CORTO CIRCUITO	299
PRUEBA DE VACÍO DEL TRANSFORMADOR	299
PRUEBA DE CORTO CIRCUITO	300
TRABAJOS DE MANTENIMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES	302

C A P I T U L O 1

CONCEPTOS GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES

CAPITULO 1

CONCEPTOS GENERALES DE LOS TRANSFORMADORES

INTRODUCCION.

PARA LAS PERSONAS NO FAMILIARIZADAS CON LA ELECTRICIDAD Y QUE DE UNA U OTRA FORMA HACEN USO DE ELLA EN LA VIDA COTIDIANA, RESULTA NATURAL ENCENDER UN FOCO, ACCIONAR UNA LICUADORA, CONECTAR UNA PLANCHITA, HACER FUNCIONAR UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO, ETC. - Y EN REALIDAD, SÓLO SABE EN FORMA MUY GENERAL, QUE POR EJEMPLO, - UNA LICUADORA ES ACCIONADA POR UN MOTOR ELÉCTRICO Y LO MISMO OCURRE CON UNA ASPIRADORA O UNA BATIDORA, O BIEN OTROS APARATOS DOMÉSTICOS.

PARA ALGUIEN QUE TIENE CONTACTO CON CIERTOS TIPOS DE INDUSTRIAS, COMO LAS DE MANUFACTURAS POR EJEMPLO, ES COMÚN OBSERVAR MAQUINARIA ACCIONADA POR MOTORES ELÉCTRICOS DE MEDIANO Y GRAN TAMAÑO, - CON EQUIPO AUXILIAR DE CONTROL Y PROTECCIÓN MÁS O MENOS COMPLEJA, TODOS ESTOS ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS RESIDENCIALES, COMERCIALES O INDUSTRIALES, OPERAN BAJO - CIERTOS PRINCIPIOS GENERALES Y ESTÁN CONSTRUIDOS CON ELEMENTOS - MÁS O MENOS COMUNES, ESTOS ELEMENTOS SE DISEÑAN Y CONSTRUYEN EN LAS FÁBRICAS DE APARATOS Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS, SE DEBEN INSTALAR Y OPERAR Y EVENTUALMENTE MANTENER Y REPARAR, ESTO HACE NECESARIO - QUE EXISTAN PERSONAS CON CONOCIMIENTOS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS, - QUE COMPRENDAN SUS PRINCIPIOS Y ESTEN EN POSIBILIDAD DE RESOLVER DISTINTOS PROBLEMAS QUE PLANTEA EL USO Y CONSERVACIÓN DE LAS MISMAS,

18 Conceptos generales de los transformadores

UNA DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS QUE DESEMPEÑA UN PAPEL FUNDAMENTAL EN EL PROCESO PRODUCCIÓN-UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA ES EL LLAMADO TRANSFORMADOR. AQUÍ, CONVIENE HACER UNA REVISIÓN GENÉRICA SOBRE LAS FORMAS DE OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA - EN LAS LLAMADAS CENTRALES ELÉCTRICAS, MEDIANTE UN PROCESO DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA Y EN DONDE LAS FUENTES PRIMARIAS PUEDEN SER EL AGUA EN FORMA DE CAÍDAS DE AGUA O CAUDAL EN LOS RÍOS, DENOMINADAS HIDROELÉCTRICAS, TAMBIÉN PUEDEN TENER COMO ENERGÍA PRIMARIA ELEMENTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO QUE ACCIONAN PRIMOS MOTORES MEDIANTE VAPOR OBTENIDO DE UN PROCESO TÉRMICO Y QUE SE CONOCEN COMO TERMOELÉCTRICAS. O BIEN AQUELLAS QUE USAN VAPOR NATURAL OBTENIDO DEL SUBSUELO Y QUE SE CONOCEN COMO GEOTERMOELÉCTRICAS. AQUELLAS QUE TIENEN COMO FUENTE PRIMARIA DE ENERGÍA, MATERIALES NUCLEARES COMO EL URANIO, SE DENOMINAN NUCLEOELÉCTRICAS.

PARA CADA UNO DE ESTOS TIPOS, EXISTEN VARIANTES EN CUANTO A PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y TAMAÑO, EL ESTUDIO DE ESTE TEMA ES MATERIA DE OTRAS PUBLICACIONES. LO QUE SE DEBE HACER NOTAR, ES QUE EN LA MAYORÍA DE LOS CASOS, LOS CENTROS DE PRODUCCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA, SE ENCUENTRAN DISTANTES DE LOS CENTROS DE CONSUMO, LO QUE HACE NECESARIO QUE ESTA ENERGÍA SE TRANSMITA HASTA CIENTOS Y EN OCASIONES LLEGAN A MILES DE KILOMETROS, PARA PODER HACER ESTO, ES NECESARIO EL USO DE LOS LLAMADOS TRANSFORMADORES QUE EN ESTE CASO TIENEN LA FUNCIÓN DE ELEVAR LOS VOLTAJES DE GENERACIÓN A VOLTAJES APROPIADOS PARA LA TRANSMISIÓN.

DE IGUAL FORMA, LOS VOLTAJES USADOS EN LA TRANSMISIÓN NO SON APROPIADOS PARA SU UTILIZACIÓN EN LAS DISTINTAS APLICACIONES DE LA

ENERGÍA ELÉCTRICA Y ES NECESARIO ENTONCES, REDUCIRLOS A DISTINTOS NIVELES ADECUADOS A CADA APLICACIÓN, ESTO REQUIERE DEL USO DE TRANSFORMADORES REDUCTORES. ÉSTOS, COMO LOS ELEVADORES SE LES DENOMINA EN GENERAL COMO TRANSFORMADORES DE POTENCIA. EXISTEN BAJO EL MISMO PRINCIPIO DE OPERACIÓN OTROS TIPOS DE TRANSFORMADORES, QUE SE LLAMAN DE INSTRUMENTO O PARA APLICACIONES ESPECÍFICAS.

LA INVENCIÓN DEL TRANSFORMADOR, DATA DEL AÑO DE 1884 PARA SER APLICADO EN LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN QUE EN ESA ÉPOCA ERAN DE CORRIENTE DIRECTA Y PRESENTABAN LIMITACIONES TÉCNICAS Y ECONÓMICAS. EL PRIMER SISTEMA COMERCIAL DE CORRIENTE ALTERNA CON FINES DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA QUE USABA TRANSFORMADORES, SE PUSO EN OPERACIÓN EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA, EN EL AÑO DE 1886 EN GREAT BARRINGTON, MASS., EN ESE MISMO AÑO, LA POTENCIA ELÉCTRICA SE TRANSMITIÓ A 2000 VOLTS EN CORRIENTE ALTERNA A UNA DISTANCIA DE 30 KILÓMETROS. EN UNA LÍNEA CONSTRUIDA EN CERCHI, ITALIA. A PARTIR DE ESTAS PEQUEÑAS APLICACIONES INICIALES, LA INDUSTRIA ELÉCTRICA EN EL MUNDO, HA CRECIDO DE TAL FORMA, QUE EN LA ACTUALIDAD ES FACTOR DE DESARROLLO DE LOS PUEBLOS, FORMANDO PARTE IMPORTANTE EN ESTA INDUSTRIA EL TRANSFORMADOR.

EL TRANSFORMADOR, ES UN DISPOSITIVO QUE NO TIENE PARTES MÓVILES, EL CUAL TRANSFIERE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DE UN CIRCUITO A OTRO BAJO EL PRINCIPIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA. LA TRANSFERENCIA DE ENERGÍA LA HACE POR LO GENERAL CON CAMBIOS EN LOS VALORES DE VOLTAJES Y CORRIENTES.

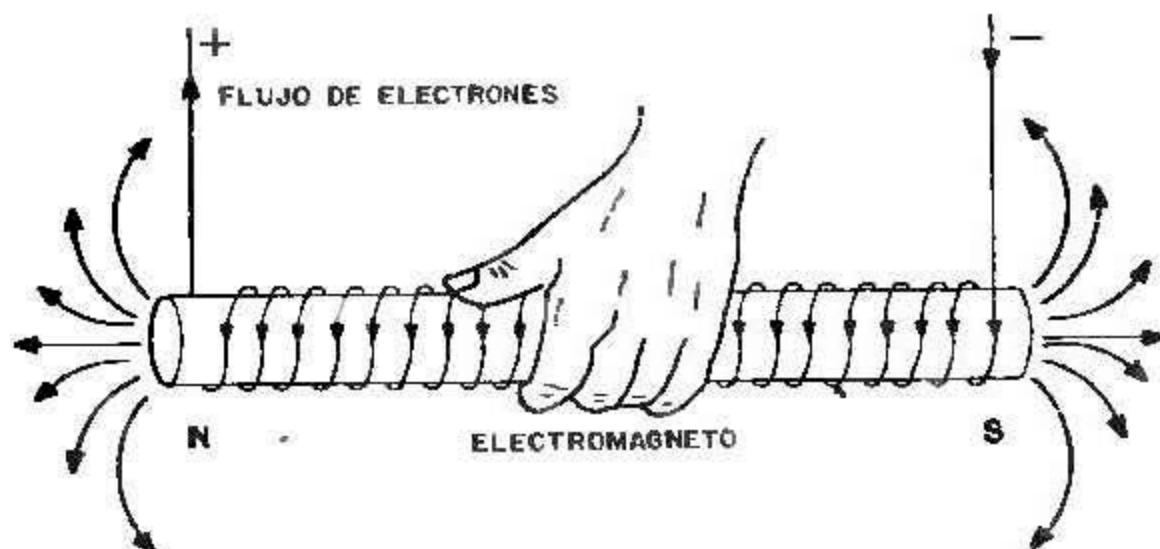
UN TRANSFORMADOR ELEVADOR RECIBE LA POTENCIA ELÉCTRICA A UN VA-

20 Conceptos generales de los transformadores

LOR DE VOLTAJE Y LA ENTREGA A UN VALOR MÁS ELEVADO, EN TANTO QUE UN TRANSFORMADOR REDUCTOR RECIBE LA POTENCIA A UN VALOR ALTO DE VOLTAJE Y LA ENTREGA A UN VALOR BAJO.

1.2. PRINCIPIOS DE INDUCCION ELECTROMAGNETICA.

COMO SE SABE, LA ELECTRICIDAD PRODUCE MAGNETISMO EN UN ELECTROIMÁN, QUE ES DISTINTO DE UN IMÁN PERMANENTE, YA QUE EL CAMPO MAGNÉTICO SE PRODUCE SÓLO CUANDO LAS ESPIRAS DE ALAMBRE ARROLLADAS ALREDEDOR DEL NÚCLEO MAGNÉTICO, TRANSPORTAN CORRIENTE ELÉCTRICA. PARA DETERMINAR LA POLARIDAD DE UN ELECTROIMÁN SE PUEDE USAR LA LLAMADA REGLA DE LA MANO IZQUIERDA.



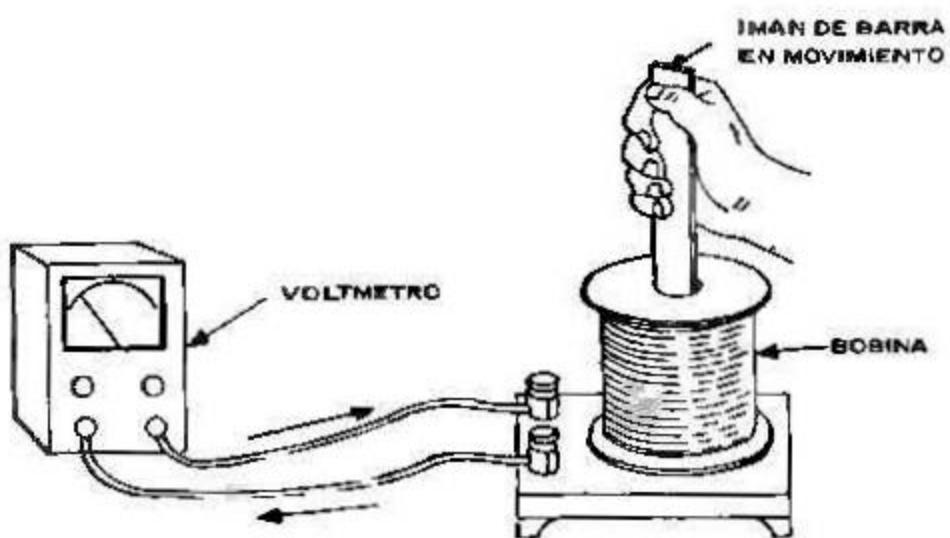
**METODO PARA ENCONTRAR LA POLARIDAD POR LA
REGLA DE LA MANO IZQUIERDA**

EL PROCESO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA SE PUEDE EXPLICAR EN FORMA SIMPLIFICADA CON LA FIGURA SIGUIENTE, EN DONDE SE MUESTRA COMO SE INDUCE UN VOLTAJE EN UNA BOBINA CUANDO UN IMÁN PERMANENTE SE MUEVE ALTERNATIVAMENTE HACIA ADENTRO Y HACIA FUERA DE LA BOBINA. A ESTE PROCESO SE LE CONOCE EN EL ESTUDIO DEL ELECTROMAGNETISMO COMO "INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA". SE PUEDEN DESTACAR TRES IMPORTANTES-HECHOS.

1. CUANDO EL IMÁN PERMANENTE NO SE MUEVE DENTRO DE LA BOBINA, - NO SE PRODUCE VOLTAJE.
2. SI EL IMÁN PERMANENTE SE MUEVE HACIA AFUERA DE LA BOBINA, - EL VÓLTMETRO MUESTRA UN VOLTAJE EN UNA POLARIDAD (SE DICE - QUE LA CORRIENTE FLUYE EN UNA DIRECCIÓN.)
3. SI EL IMÁN PERMANENTE SE MUEVE HACIA EL INTERIOR DE LA BOBINA, EL VÓLTMETRO MUESTRA UN VOLTAJE EN LA OTRA POLARIDAD -- (SE DICE QUE LA CORRIENTE FLUYE EN LA OTRA DIRECCIÓN).

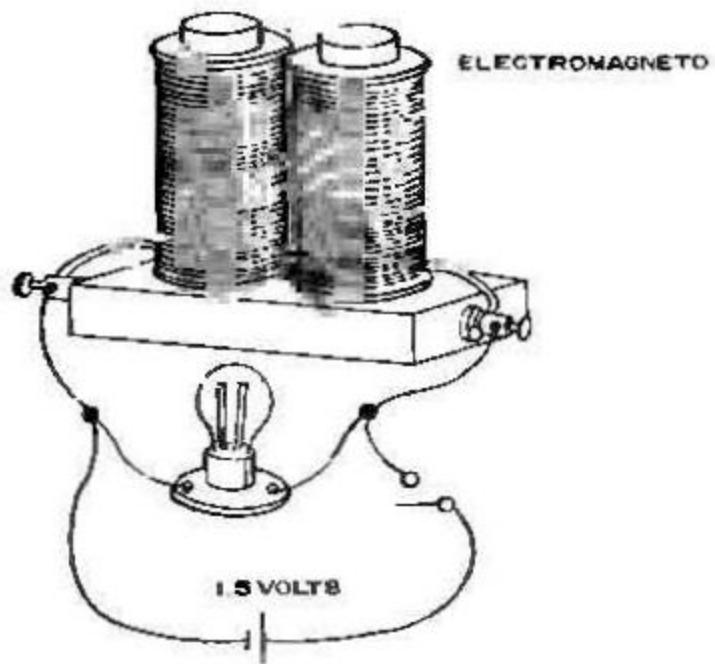
CUANDO SE MUEVE EL IMÁN PERMANENTE HACIA EL INTERIOR DE LA BOBINA, EL CAMPO SE HACE INTENSO Y CUANDO SE MUEVE HACIA AFUERA, SE DEBILITA. POR SUPUESTO QUE SI EL IMÁN NO SE MUEVE EN LA BOBINA, NO EXISTE CAMBIO EN EL CAMPO MAGNÉTICO Y NO SE INDUCE NINGÚN VOLTAJE EN LA BOBINA. ESTE HECHO CONSTITUYE UNA DE LAS LEYES BÁSICAS DE LA ELECTRICIDAD.

22 Conceptos generales de los transformadores



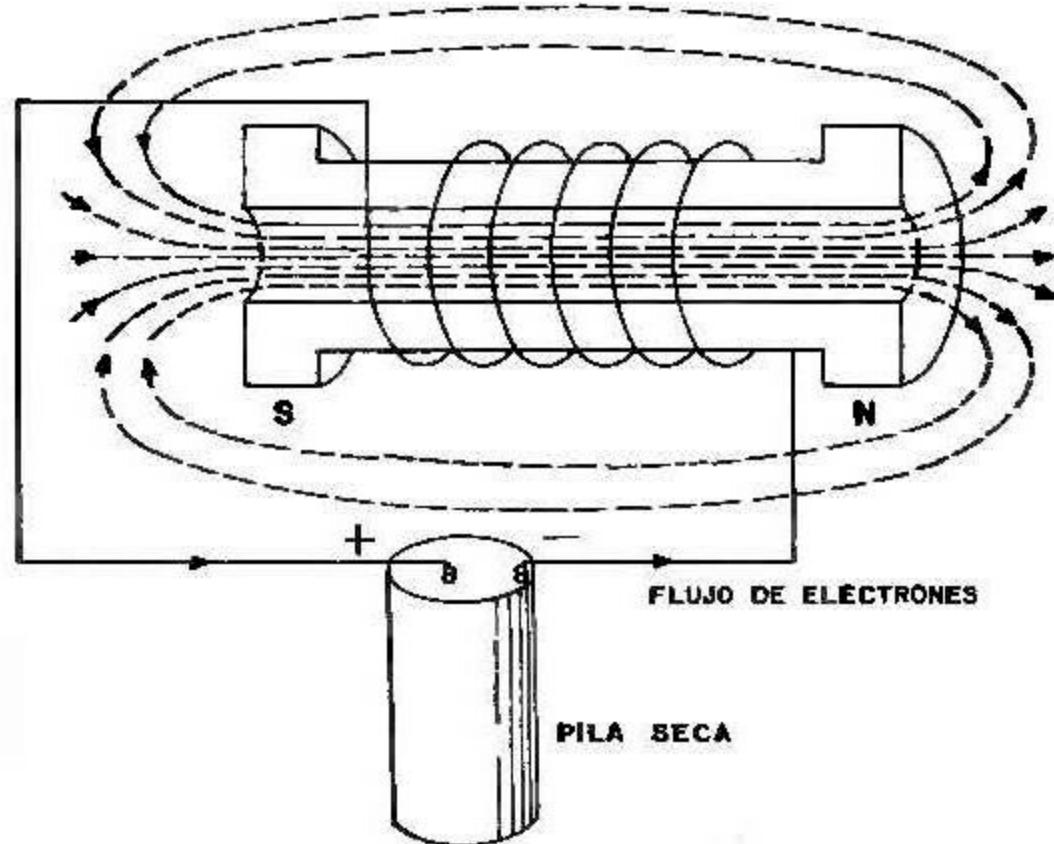
PRINCIPIO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNETICA

OTRO ASPECTO IMPORTANTE DE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA, ES LO QUE SE CONOCE COMO LA AUTOINDUCCIÓN DE UNA BOBINA, UNA FORMA DE EXPLICAR POR MEDIO DE UNA DEMOSTRACIÓN EL FENÓMENO DE AUTOINDUCCIÓN CONSISTE EN CONECTAR UNA LÁMPARA DE NEÓN A TRAVÉS DE LO QUE SE CONOCE COMO UN ELECTROMAGNETO COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA.

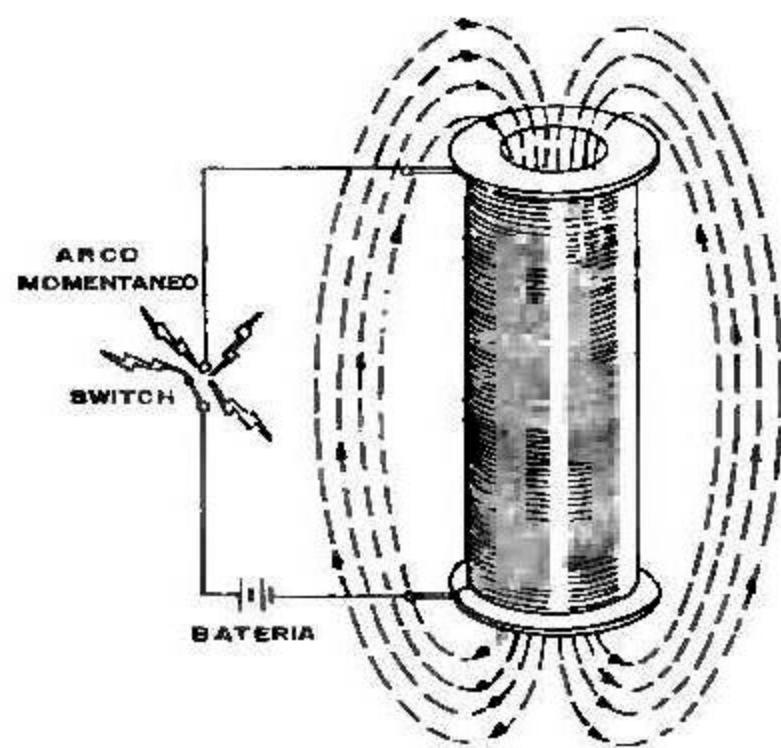


AUTOINDUCCIÓN DE UN ELECTROMAGNETO

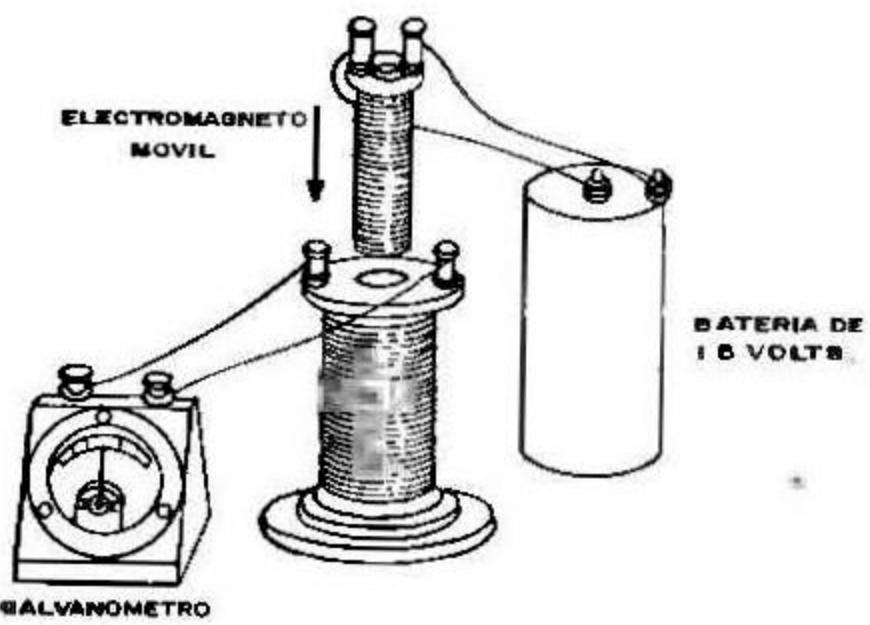
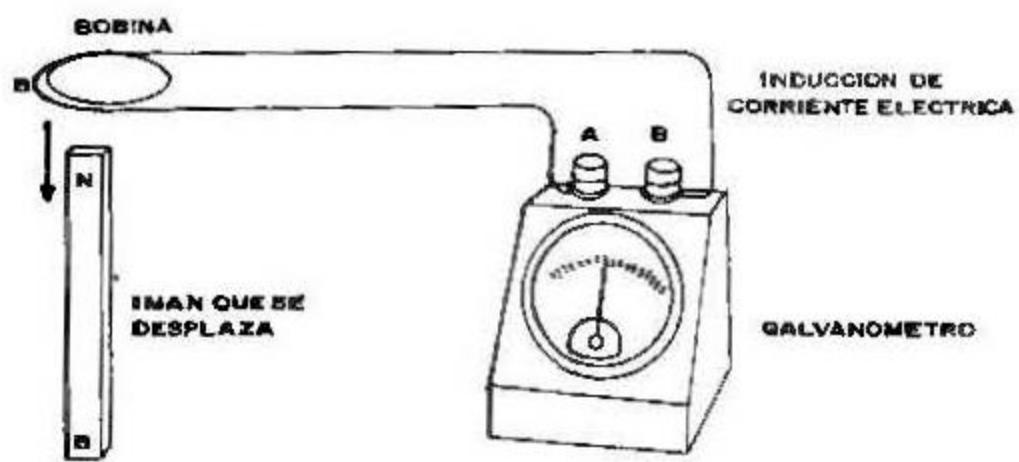
EN LA FIGURA ANTERIOR, SE OBSERVA QUE SE TIENE UNA BATERÍA CON UN SWITCH QUE SE USA PARA APLICAR UN VOLTAJE A TRAVÉS DE LA LÁMPARA Y LA BOBINA. DE UN EXPERIMENTO COMO ÉSTE, SE OBSERVAN LOS SIGUIENTES HECHOS:



CAMPO MAGNETICO ALREDEDOR DE UN ELECTROIMAN



EL FENOMENO DE AUTOINDUCCION CAUSA UN ARCO ELECTRICO ENTRE LOS CONTACTOS.



INDUCCION DE CORRIENTES POR MEDIO DE UN ELECTROMAGNETO MOVIL

1.3.

1. CUANDO EL SWITCH SE CIERRA, LA LÁMPARA PERMANECE APAGADA. - ESTO QUIERE DECIR QUE LA BATERÍA NO TIENE SUFFICIENTE VOLTAJE COMO PARA HACER QUE LA LÁMPARA ENCIENDA.
2. CUANDO SE ABRE EL SWITCH, LA LÁMPARA PARPADEA LIGERAMENTE POR UN INSTANTE. ESTO MUESTRA QUE UN VOLTAJE DE AUTOINDUCCIÓN ES MUCHO MAYOR QUE EL DE LA BATERÍA.
3. SI SE COLOCA UNA ARMADURA DE FIERRO DULCE A TRAVÉS DE LOS POLOS DEL ELECTROMAGNETO, LA LÁMPARA PARPADEA EN FORMA AÚN-MÁS BRILLANTE, ESTO PRUEBA QUE EL NÚCLEO A ARMADURA INCREMENTA LA INTENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO.

DE ESTE EXPERIMENTO SE PUEDE NOTAR QUE EL VOLTAJE INDUCIDO CUANDO EL SWITCH ES ABIERTO ES MUCHO MAYOR QUE AQUEL DE LA BATERÍA, DEBIDO A QUE EL CAMPO MAGNÉTICO SE COLAPSA EN UN PERÍODO DE TIEMPO -- MUY CORTO. ENTRE MAYOR ES EL NÚMERO DE LÍNEAS DE FLUJO QUE CORREN LA BOBINA, MAYOR ES EL VOLTAJE INDUCIDO.

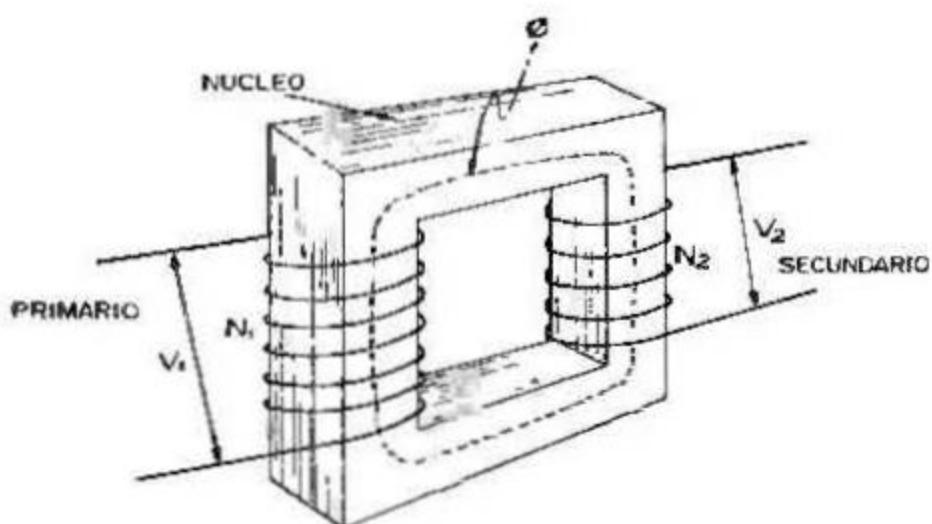
ESTA ES LA RAZÓN POR LA QUE A MAYOR CORRIENTE EN LA BOBINA O A MAYOR NÚMERO DE ESPIRAS EN LA MISMA, SE TENDRÁ UN MAYOR VOLTAJE INDUCIDO.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.

EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR, SE PUEDE EXPLICAR POR MEDIO DEL LLAMADO TRANSFORMADOR IDEAL MONOFÁSICO, ES DECIR, UNA MÁQUINA QUE SE ALIMENTA POR MEDIO DE UNA CORRIENTE ALTERNADA MONOFÁSICA.

Conceptos generales de los transformadores

A RESERVA DE ESTUDIOS CON MAYOR DETALLE, LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR, SUSTANCIALMENTE SE PUEDE DECIR QUE UN TRANSFORMADOR ESTÁ CONSTITUIDO POR UN NÚCLEO DE MATERIAL MAGNÉTICO QUE FORMA UN CIRCUITO MAGNÉTICO CERRADO, Y SOBRE DE CUYAS COLUMNAS O PIERNAS SE LO CALIZAN DOS DEVANADOS, UNO DENOMINADO "PRIMARIO" QUE RECIBE LA ENERGÍA Y EL OTRO EL SECUNDARIO, QUE SE CIERRA SOBRE UN CIRCUITO DE UTILIZACIÓN AL CUAL ENTREGA LA ENERGÍA. LOS DOS DEVANADOS SE ENCUENTRAN ELÉCTRICAMENTE AISLADOS ENTRE SÍ.



EL VOLTAJE EN UN GENERADOR ELÉCTRICO SE INDUCE, YA SEA CUANDO UNA BOBINA SE MUEVE A TRAVÉS DE UN CAMPO MAGNÉTICO O BIEN CUANDO EL CAMPO PRODUCIDO EN LOS POLOS EN MOVIMIENTO CORTAN UNA BOBINA-ESTACIONARIA. EN AMBOS CASOS, EL FLUJO TOTAL ES SUSTANCIALMENTE CONSTANTE, PERO HAY UN CAMBIO EN LA CANTIDAD DE FLUJO QUE ESLABONA A LA BOBINA. ESTE MISMO PRINCIPIO ES VÁLIDO PARA EL TRANSFOR-

MADOR, SOLO QUE EN ESTE CASO LAS BOBINAS Y EL CIRCUITO MAGNÉTICO SON ESTACIONARIOS (NO TIENEN MOVIMIENTO), EN TANTO QUE EL FLUJO MAGNÉTICO CAMBIA CONTINUAMENTE.

EL CAMBIO EN EL FLUJO SE PUEDE OBTENER APLICANDO UNA CORRIENTE ALTERNADA EN LA BOBINA. LA CORRIENTE, A TRAVÉS DE LA BOBINA, VARÍA EN MAGNITUD CON EL TIEMPO, Y POR LO TANTO, EL FLUJO PRODUCIDO POR ESTA CORRIENTE, VARÍA TAMBIÉN EN MAGNITUD CON EL TIEMPO.

EL FLUJO CAMBIANTE CON EL TIEMPO QUE SE APLICA EN UNO DE LOS DEVANADOS, INDUCE UN VOLTAJE E_1 (EN EL PRIMARIO). SI SE DESPRECIA -- POR FACILIDAD, LA CAÍDA DE VOLTAJE POR RESISTENCIA DE EL DEVANADO PRIMARIO, EL VALOR DE E_1 SERÁ IGUAL Y DE SENTIDO OPUESTO AL VOLTAJE APLICADO V_1 . DE LA LEY DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA, SE SABE QUE ESTE VOLTAJE [INDUCIDO E_1] EN EL DEVANADO PRIMARIO Y TAMBIÉN AL ÍNDICE DE CAMBIO DEL FLUJO EN LA BOBINA. SE TIENEN DOS RELACIONES IMPORTANTES.

$$V_1 = - E_1$$

$$E_1 \propto N_1 \left(\frac{\theta}{T} \right)$$

AL MISMO TIEMPO QUE EL FLUJO CAMBIA EN LA BOBINA PRIMARIA, TAMBIÉN CAMBIA EN LA BOBINA SECUNDARIA, DADO QUE AMBAS BOBINAS SE ENCUENTRAN DENTRO DEL MISMO MEDIO MAGNÉTICO, Y ENTONCES EL ÍNDICE DE CAMBIO DEL FLUJO MAGNÉTICO EN AMBAS BOBINAS ES EXACTAMENTE EL MISMO. ESTE CAMBIO EN EL FLUJO INDUCIRÁ UN FLUJO E_2 EN LA BOBINA SECUNDARIA QUE SERÁ PROPORCIONAL AL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO SECUNDARIO N_2 . SI SE CONSIDERA QUE NO SE TIENE CARGA -

Conceptos generales de los transformadores

CONECTADA AL CIRCUITO SECUNDARIO, EL VOLTAJE INDUCIDO E_2 ES EL -- VOLTAJE QUE APARECE EN LAS TERMINALES DEL SECUNDARIO, POR LO QUE SE TIENEN DOS RELACIONES ADICIONALES.

$$E_2 \propto N_2 \left(\frac{\theta}{T} \right)$$

$$E_2 = V_2$$

EN VIRTUD DE QUE AMBAS BOBINAS SE ENCUENTRAN DEVANADAS EN EL MISMO CIRCUITO MAGNÉTICO, LOS FACTORES DE PROPORCIONALIDAD PARA LAS ECUACIONES DE VOLTAJE SON IGUALES, DE MANERA QUE SI SE DIVIDEN LAS ECUACIONES PARA E_1 Y E_2 SE TIENE:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

ADEMÁS COMO NUMÉRICAMENTE DEBEN SER IGUALES E_1 Y V_1 Y E_2 CON V_2 - A ECUACIÓN ANTERIOR SE PUEDE ESCRIBIR COMO:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

EJEMPLO 1.1.

SE TIENE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO QUE SE USA PARA CONVERTIR - UN VOLTAJE DE 13200 VOLTS A 127 VOLTS EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN, SI SE TIENEN 2000 ESPIRAS EN EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE , CALCULAR EL NÚMERO DE ESPIRAS DEL DEVANADO SECUNDARIO.

SOLUCION

EL TRANSFORMADOR ES DE 13200/127 VOLTS, ES DECIR:

$$V_1 = 13200 \text{ VOLTS. } V_2 = 127 \text{ VOLTS}$$

$$N_1 = 2000 \text{ ESPIRAS}$$

$$N_2 = ?$$

DE LA ECUACIÓN PARA LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{13200}{127} = \frac{2000}{N_2}$$

$$N_2 = 2000 \left(\frac{127}{13200} \right) = 19.24 \text{ ESPIRAS}$$

1.4 EFECTOS DE LA FRECUENCIA Y EL FLUJO.

EN LAS ECUACIONES PARA VOLTaje INDICADAS ANTERIORMENTE, NO SE HA HECHO MENCION DEL TIPO DE ONDA DE CORRIENTE ALTERNA QUE SE APLICA AL TRANSFORMADOR. SIN EMBARGO, Ø SE TOMÓ COMO UN CAMBIO DE FLUJO Y T COMO EL TIEMPO TOTAL DURANTE EL CUAL ESTE TIEMPO OCURRE. EL VOLTaje INDUCIDO DEBE SER POR LO TANTO EL PROMEDIO. SI SE APLICA UNA ONDA SENOIDAL DE VOLTaje EN EL DEVANADO PRIMARIO, EL FLUJO VARÍA TAMBIÉN EN FORMA SENOIDAL. EL VOLTaje PROMEDIO-INDUCIDO ESTÁ DADO COMO

$$E_{\text{PROM.}} = N \left(\frac{\theta}{T} \right)$$

30 Conceptos generales de los transformadores

DONDE:

N = NÚMERO DE ESPIRAS.

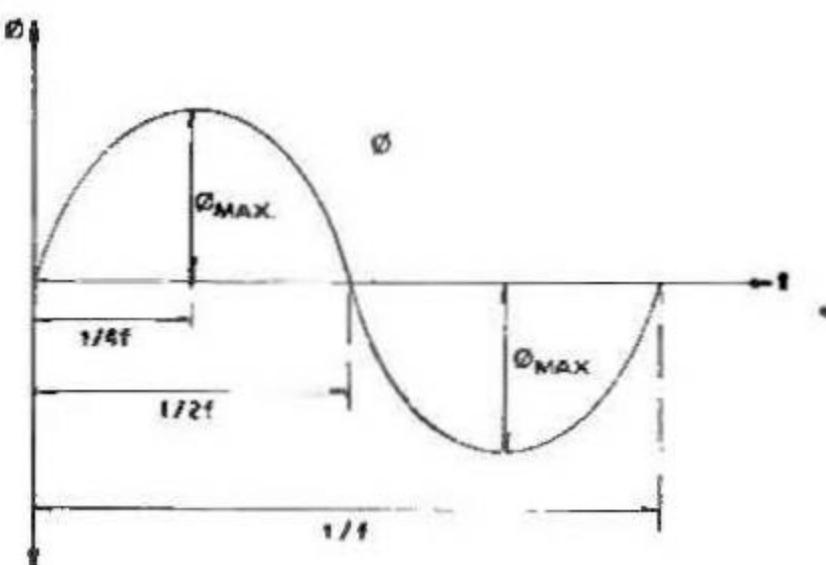
\emptyset = FLUJO EN WEBERS.

T = TIEMPO EN SEGUNDOS.

CUANDO EL FLUJO SE EXPRESA EN LÍNEAS O MAXWELL, COMO EN EL SISTEMA INGLÉS DE UNIDADES, LA ECUACIÓN ANTERIOR SE PUEDE EXPRESAR COMO:

$$E_{PROM.} = N \left(\frac{\emptyset}{T} \right) \times 10^{-8} \text{ VOLTS}$$

LA VARIACIÓN SENOIDAL DEL FLUJO CON RESPECTO AL TIEMPO SE MUESTRA EN LA FIGURA SIGUIENTE:



SI f ES LA FRECUENCIA DE LA ONDA EXPRESADA EN HERTZ, UN CICLO COMPLETO OCURRE EN $1/f$ SEGUNDOS, DE MANERA QUE UN CICLO DE UNA ONDA DE 60 Hz OCURRE EN $1/60$ Hz, EL TIEMPO QUE TOMA PARA $1/4f$ O $1/240$ SE GUNDOS. DE LA FIGURA ANTERIOR SE OBSERVA QUE EL CAMBIO EN EL FLUJO DURANTE EL PRIMER CUARTO DE CICLO VA DE CERO LÍNEAS AL MÁXIMO DE LÍNEAS Ø MÁX. ESTA CANTIDAD EN EL CAMBIO OCURRE DURANTE CADA CUARTO DE CICLO O DURANTE EL TIEMPO $T = 1/4 f$. EL VOLTAJE PROMEDIO INDUCIDO TIENE POR LO TANTO EL MISMO VALOR DURANTE CADA CUARTO DEL CICLO Y ES NECESARIO CONSIDERAR SÓLO ESTA PORCIÓN DE LA ONDA. SUSTITUYENDO ESTA CONSIDERACIÓN EN LA ECUACIÓN PARA EL VOLTAJE PROMEDIO:

$$EPROM = \left(\frac{\emptyset_{\text{MÁX.}}}{1/4 f} \right)$$

$$EPROM = N \cdot 4f \cdot \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

COMO POR LO GENERAL NO SE MIDEN LOS VALORES PROMEDIO DE LOS VOLTAJES EN APLICACIONES DE LA ELECTRICIDAD DE POTENCIA O SISTEMAS DE FUERZA, ES MÁS CONVENIENTE EXPRESAR LA ECUACIÓN ANTERIOR, DE MANERA QUE SE APLIQUEN LOS VALORES EFECTIVOS O CUADRÁTICOS MEDIOS PARA EL VOLTAJE. EN EL CASO PARTICULAR DE UNA ONDA SENOIDAL, LA RELACIÓN DEL VALOR EFICAZ DEL VOLTAJE AL VALOR PROMEDIO ES 1.11 EN OTRAS PALABRAS EL VALOR EFICAZ DE E ES IGUAL A 1.11 EPROM. DE TAL FORMA QUE LA ECUACIÓN PARA EL VOLTAJE ES:

$$E = 4.44 N f \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

32 Conceptos generales de los transformadores

SI ESTA ECUACIÓN SE APLICA A LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO-
DE UN TRANSFORMADOR, QUEDAN COMO:

$$E_1 = 4.44 N_1 F \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

$$E_2 = 4.44 N_2 F \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

EJEMPLO 1.2.

SI LA FRECUENCIA DEL VOLTAJE APLICADO AL TRANSFORMADOR DEL EJEM -
PLO 1.1 ES 60 Hz, CALCULAR EL MÁXIMO FLUJO EN EL HIERRO.

SOLUCION

CONSIDERANDO QUE EL VOLTAJE APLICADO ES EL VALOR EFICAZ, ENTONCES
LA ECUACIÓN:

$$E_1 = 4.44 N_1 F \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

$$13200 = 4.44 \times 2000 \times 60 \times \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

DE DONDE:

$$\emptyset_{\text{MÁX.}} = \frac{13200}{4.44 \times 2000 \times 60} = 0.2477 \text{ WEBER}$$

$$\emptyset_{\text{MÁX.}} = 24.77 \times 10^{-3} \text{ WEBER}$$

SI EL FLUJO SE EXPRESA EN MAXWELL O LÍNEAS

$$E_1 = 4.44 N_1 F \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

$$\emptyset_{\text{MÁX.}} = 24.77 \times 10^{-3} \times 10^8 = 2.477.000 \text{ LÍNEAS O } \\ \text{MAXWELL}$$

EJEMPLO 1.3.

SI EL VOLTAJE APLICADO AL TRANSFORMADOR DEL EJEMPLO 1.1 TIENE EL MISMO VALOR PERO LA FRECUENCIA ES DE 25Hz. CUÁL SERÍA EL MÁXIMO FLUJO REQUERIDO?

SOLUCIÓN

$$E_1 = 4.44 N_1 f \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

$$13200 = 4.44 (2000) (25) \emptyset_{\text{MÁX.}}$$

$$\emptyset_{\text{MÁX.}} = \frac{13200}{4.44 (2000) (25)} = 0.05945 = 59.45 \times 10^{-3} \text{ WB}$$

SE OBSERVA DE ESTE EJEMPLO, QUE EL FLUJO VARÍA EN FORMA INVERSA CON LA FRECUENCIA.

1.5. EL DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR EN VACÍO.

CUANDO UN TRANSFORMADOR ESTÁ ENERGIZADO EN SU DEVANADO PRIMARIO POR UNA FUENTE DE VOLTAJE Y EL DEVANADO SECUNDARIO ESTÁ EN CIRCUITO ABIERTO, CIRCULA POR SU DEVANADO PRIMARIO UNA CORRIENTE DE VACÍO. ESTA CORRIENTE ES NORMALMENTE INFERIOR AL 5% DE LA CORRIENTE A PLENA CARGA. DEBIDO A QUE NO CIRCULA CORRIENTE POR EL DEVANADO SECUNDARIO, EL PRIMARIO SE PUEDE CONSIDERAR COMO UNA BOBINA CON UNA REACTANCIA DE VALOR ELEVADO DEBIDO AL NÚCLEO DE HIERRO. ESTO CAUSA LA CIRCULACIÓN DE UNA CORRIENTE PEQUEÑA. POR OTRA PARTE, SI SE HACE LA SUPOSICIÓN DE QUE NO HAY PÉRDIDAS EN EL TRANSFORMADOR, LA CORRIENTE EN EL PRIMARIO SÓLO SE USA PARA PRODUCIR EL FLUJO \emptyset EN EL NÚCLEO Y ENTonces EN TÉRMINOS VECTORIALES SE ATRASA 90° CON RESPECTO AL VOLTAJE APLICADO,

34 Conceptos generales de los transformadores

LA CORRIENTE PEQUEÑA I_M ESTARÁ EN FASE CON EL FLUJO \emptyset EN EL HIERRO, SI EL HIERRO NO SE SATURA Y SE PUEDE ESTABLECER ESTO COMO UNA SUPOSICIÓN VÁLIDA. ESTAS RELACIONES SE MUESTRAN EN LA SIGUIENTE FIGURA:

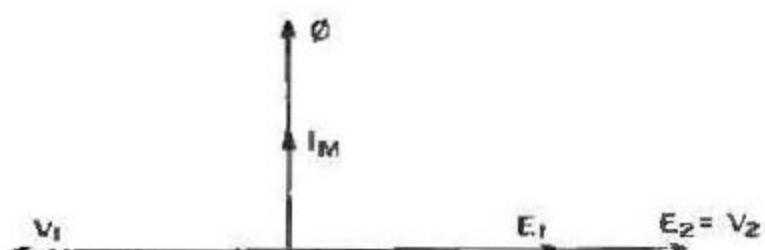


DIAGRAMA FASORIAL EN VACÍO

\emptyset = FLUJO MUTUO

I_M = CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN.

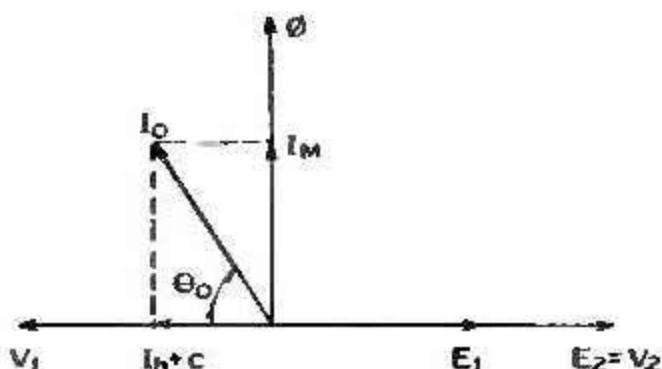
V_1 = VOLTAJE APLICADO.

E_1 = VOLTAJE INDUCIDO EN EL PRIMARIO.

E_2 = VOLTAJE INDUCIDO EN EL SECUNDARIO.

EL VOLTAJE INDUCIDO E_1 EN EL DEVANADO PRIMARIO, DEBE SER IGUAL Y OPUESTO AL VOLTAJE APLICADO V_1 Y POR LO TANTO ESTÁ DEFASADO 180° CON RESPECTO A ÉSTE. AÚN CUANDO NO CIRCULA CORRIENTE POR EL SECUNDARIO, SE INDUCE UN VOLTAJE E_2 DEBIDO AL FLUJO MUTUO \emptyset , QUE INDUCE TAMBIÉN AL VOLTAJE E_1 . POR LO TANTO, ESTÁN EN FASE Y SÓLO DIFEREN EN MAGNITUD DEBIDO AL NÚMERO DE ESPIRAS. LOS VOLTAJES TERMINALES V_1 Y V_2 SE ENCUENTRAN DEFASADOS 180° TAMBIÉN.

EN LA PRÁCTICA, CUANDO SE TIENE UN FLUJO VARIANTE EN UN NÚCLEO DE MATERIAL MAGNÉTICO, SE PRESENTAN PÉRDIDAS. UNA PARTE DE ESTAS PÉRDIDAS SON DEBIDAS A LAS CORRIENTES CIRCULANTES EN EL NÚCLEO MAGNÉTICO, Y LA OTRA ES DEBIDA AL LLAMADO EFECTO DE HISTERÉSIS. ESTAS DOS PÉRDIDAS SE COMBINAN Y SE DENOMINAN EN CONJUNTO "PÉRDIDAS EN EL FIERRO" O "PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO". CUANDO UN TRANSFORMADOR OPERA EN VACÍO, ESTAS PÉRDIDAS LAS SUMINISTRA SOLO EL VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN. CONSIDERANDO AHORA LA CORRIENTE DE VACÍO CON ESTAS DOS COMPONENTES: $I_0 = I_M + I_h + c$ DONDE $I_h + c$ = CORRIENTE DE HISTÉRESIS MÁS CORRIENTES CIRCULANTES:



$I_h + c$ = CORRIENTE DE PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO.

I_0 = CORRIENTE DE VACÍO O DE ENERGIZACIÓN.

θ_0 = FACTOR DE POTENCIA DE VACÍO.

EJEMPLO 1.4.

UN TRANSFORMADOR DE 100 KVA DE 1200/127 VOLTS, 60 Hz SE ENERGIZA POR EL LADO DE BAJO VOLTAJE CON EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE ABIERTO. LA POTENCIA QUE DEMANDA DE LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN ES DE 400W Y LA CORRIENTE ES DE 15A, SE DESEA CALCULAR:

36 Conceptos generales de los transformadores

- A) EL FACTOR DE POTENCIA EN VACÍO Y EL ÁNGULO CORRESPONDIENTE A ESTE FACTOR DE POTENCIA.
- B) LA COMPONENTE DE MAGNETIZACIÓN DE LA CORRIENTE.
- C) LA COMPONENTE DE CORRIENTE DE PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO.

SOLUCION

- A) EL FACTOR DE POTENCIA

$$\cos \theta_0 = \frac{P}{V I} = \frac{400}{127 \times 15} = 0.21$$

EL ÁNGULO CORRESPONDIENTE:

$$\theta_0 = \text{ANG. COS } (0.21) = 77.87^\circ$$

- B) LA COMPONENTE DE MAGNETIZACIÓN DE LA CORRIENTE DE VACÍO.

$$\begin{aligned}I_M &= I_0 \operatorname{sen} \theta_0 \\&= 15 \times \operatorname{sen} (77.87^\circ)\end{aligned}$$

$$I_M = 14.66 \text{ AMP.}$$

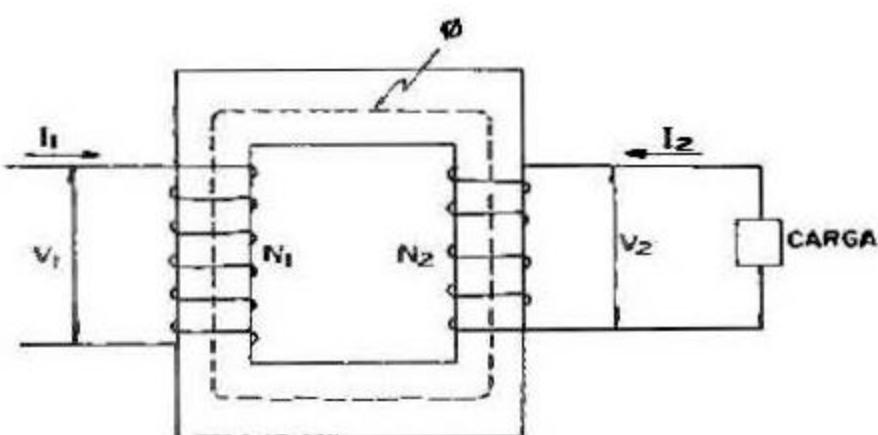
- C) LA COMPONENTE DE CORRIENTE DE PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO,

$$\begin{aligned}I_{H+C} &= I_0 \cos \theta_0 \\&= 15 \times \cos (77.87^\circ) = 15 \times 0.21\end{aligned}$$

$$I_{H+C} = 3.15 \text{ A}$$

1.6 RELACION DE CORRIENTE.

SI SE CONECTA UNA CARGA AL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR, EL VOLTAJE INDUCIDO E_2 HACE QUE CIRCULE UNA CORRIENTE I_2 EN EL DEVANADO - SECUNDARIO.



DEBIDO A LA CIRCULACIÓN DE CORRIENTES, SE TIENE EN EL DEVANADO - SECUNDARIO UNA FUERZA MAGNETOMOTRIZ (FMM) $N_2 I_2$ OPUESTA A LA DEL PRIMARIO $N_1 I_1$. Es conveniente recordar que el voltaje inducido en el primario E_1 es siempre directamente proporcional al flujo Φ y también es igual al voltaje aplicado V_1 , considerando como - ANTES, TODOS ESTOS VALORES COMO EFICACES. DADO QUE EL VOLTAJE - APLICADO NO CAMBIA, EL FLUJO EN EL NÚCLEO DEBE SER CONSTANTE. - CUALQUIER INCREMENTO EN LA CORRIENTE SECUNDARIA, SERÁ BALANCEADO POR UN INCREMENTO EN LA CORRIENTE PRIMARIA, DE MANERA QUE EL FLUJO DE ENERGIZACIÓN PRODUCIDO POR LA CORRIENTE EN EL PRIMARIO TENDRÁ UN VALOR EFECTIVO CONSTANTE DURANTE LA OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR. EN LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA DE VALOR RELATIVAMENTE PEQUEÑO, SE PUEDE DECIR QUE PRÁCTICAMENTE EL FLUJO QUE ES LABONA AL DEVANADO PRIMARIO, ES EL MISMO QUE ESLABONA AL SECUNDA

38 Conceptos generales de los transformadores

RIO Y DE AQUÍ QUE LA CORRIENTE DE VACÍO O DE ENERGIZACIÓN REPRESENTA SÓLO EL 2% O 3% DE LA CORRIENTE PRIMARIA DE PLENA CARGA Y SE PUEDE DECIR QUE LOS AMPERE-ESPIRA DEL PRIMARIO SON IGUALES A LOS AMPERE-ESPIRA DEL SECUNDARIO, ES DECIR:

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

SE PUEDE OBSERVAR QUE LA RELACIÓN DE CORRIENTES EN EL TRANSFORMADOR ES INVERSAMENTE PROPORCIONAL A LA RELACIÓN ENTRE ESPIRAS.

EJEMPLO 1.5

SE TIENE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO QUE TIENE 1000 ESPIRAS EN SU DEVANADO PRIMARIO Y 250 EN EL SECUNDARIO Y SE USA COMO TRANSFORMADOR ELEVADOR. SE ALIMENTA A 127 VOLTS, 60 Hz Y LA CORRIENTE QUE CIRCULA EN EL SECUNDARIO A LA CARGA ES DE 15A. CALCULAR:

- A) EL VOLTAJE EN EL DEVANADO SECUNDARIO.
- B) LA CORRIENTE EN EL DEVANADO PRIMARIO.

SOLUCIÓN

- A) $N_1 = 250$ ESPIRAS $I_1 = ?$
- $N_2 = 1000$ ESPIRAS $I_2 = 15A$
- $V_1 = 127$ VOLTS
- $V_2 = ?$

DE LA ECUACIÓN PARA LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{127}{V_2} = \frac{250}{1000}$$

$$V_2 = \frac{127 \times 1000}{250} = 508 \text{ VOLTS}$$

b) DE LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN PARA CORRIENTES

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$I_1 = I_2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right) = 15 \left(\frac{1000}{250} \right) = 60A$$

EJEMPLO 1.6

SE TIENE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 220/127 VOLTS, 60 Hz QUE SE USA COMO REDUCTOR Y SE LE CONECTA COMO CARGA UNA RESISTENCIA DE 10 OHMS EN EL SECUNDARIO. ¿QUÉ CORRIENTE CIRCULARÁ EN EL DEVANADO PRIMARIO?

SOLUCION

LA CORRIENTE EN EL DEVANADO SECUNDARIO.

$$I_2 = \frac{V_2}{R \text{ CARGA}} = \frac{127}{10} = 12.7 A$$

DE LA RELACIÓN PARA LAS POTENCIAS INVARIANTES EN LOS DEVANADOS - PRIMARIO Y SECUNDARIO.

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

40 Conceptos generales de los transformadores

$$I_1 = I_2 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$
$$= 12.7 \left(\frac{127}{220} \right)$$

$$I_1 = 7.33 \text{ A}$$

EJEMPLO 1.7

UN TRANSFORMADOR TIPO NÚCLEO SE CONSTRUYÓ CON LÁMINAS DE 0.355 MM DE GRUESO QUE TIENEN UN ANCHO UNIFORME DE 7 CM. EL FLUJO MÁXIMO ES DE 6.2×10^5 MAXWELL Y LA DENSIDAD DE FLUJO ES DE 1.01 POR 10^4 MAXWELL/CM². EL ESPACIO ENTRE LAMINACIONES OCUPA EL 8% DEL NÚCLEO ARMADO.

CALCULAR EL NÚMERO DE LAMINACIONES EN EL TRANSFORMADOR.

SOLUCION

EL ÁREA DEL NÚCLEO ES:

$$A = \frac{\Phi}{B} = \frac{6.2 \times 10^5}{1.01 \times 10^4} = 61.38 \text{ CM}^2$$

EL ÁREA DE CADA LÁMINA ES:

$$A_L = 7 \times 0.0355 = 0.2485 \text{ CM}^2$$

POR SER EL ESPACIO OCUPADO POR LAS LAMINACIONES EL 8% DEL NÚCLEO ARMADO, RESULTA QUE EL ÁREA NETA SE REDUCE EN ESTA PROPORCIÓN -- POR TANTO:

$$A_{ESP} = 0.08A = 0.08 \times 61.38 = 4.9104 \text{ cm}^2$$

EL ÁREA NETA DEL NÚCLEO ES:

$$A_{NETA} = A - A_{ESP} = 61.38 - 4.9104 = 56.47 \text{ cm}^2$$

POR TANTO, EL NÚMERO DE LAMINACIONES ES:

$$\text{No. LAM.} = \frac{A_{NETA}}{A_L} = \frac{56.47}{0.2485} = 227$$

EJEMPLO 1.8

UN TRANSFORMADOR DE 60 C.P.S. TIENE 2250 ESPIRAS EN EL PRIMARIO Y 250 ESPIRAS EN EL SECUNDARIO, SI EL VALOR MÁXIMO DEL FLUJO MUTUO ES DE 6×10^5 MAXWELL. CALCULAR:

- A) LOS VOLTAJES INDUCIDOS EN EL PRIMARIO Y EN EL SECUNDARIO.
- B) LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN

SOLUCIÓN

LA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA EN EL PRIMARIO Y EN EL SECUNDARIO DE UN TRANSFORMADOR ESTÁ DADA POR LAS SIGUIENTES:

$$E_P = 4.44 N_p F \Phi \times 10^{-8} \text{ (VOLTS)}$$

$$E_S = 4.44 N_S F \Phi \times 10^{-8} \text{ (VOLTS)}$$

42 Conceptos generales de los transformadores

SUSTITUYENDO VALORES, TENEMOS:

$$E_p = 4.44 \times 2250 \times 60 \times 6 \times 10^5 \times 10^{-8} = 3596.4 \text{ VOLTS}$$

$$E_s = 4.44 \times 250 \times 60 \times 6 \times 10^5 \times 10^{-8} = 399.6 \text{ VOLTS}$$

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ES:

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{2250}{250} = 9$$

EJEMPLO 1.9

CALCULAR LAS CORRIENTES A PLENA CARGA EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 5 KVA, 2400/120 VOLTS.

SOLUCIÓN

LA CORRIENTE PRIMARIA ES:

$$P_1 = V_1 I_1$$

$$\therefore I_1 = \frac{P_1}{V_1} = \frac{5000}{2400} = 2.08 \text{ AMPERES}$$

ANÁLOGAMENTE:

$$P_2 = V_2 I_2$$

$$P_1 = P_2$$

$$\therefore I_2 = \frac{P_2}{V_2} = \frac{5000}{120} = 41.6 \text{ AMPERES}$$

EJEMPLO 1.10

UN TRANSFORMADOR QUE OPERA A UNA FRECUENCIA DE 60 C.P.S. Y DE - - 13800/400 VOLTS, TIENE 6.5 VOLTS/ESPIRA. CALCULAR:

- A) EL NÚMERO DE ESPÍRAS EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO.
- B) EL FLUJO EN EL NÚCLEO.

SOLUCION

$$A) \quad N_1 = \frac{V_1}{V_2/\text{Esp.}} = \frac{13800}{6.5} = 2123 \text{ VUELTAS}$$

$$N_2 = \frac{V_2}{V_C/\text{Esp.}} = \frac{400}{6.5} = 62 \text{ VUELTAS}$$

- B) DE LA EXPRESIÓN:

$$E_1 = 4.44 N_1 F \theta \times 10^{-8}$$

... SE DESPEJA EL FLUJO θ

$$\therefore \theta = \frac{E_P}{4.44 N_1 F}$$

SUSTITUYENDO VALORES:

$$\therefore \theta = \frac{13800}{4.44 \times 2123 \times 60} \times 10^8 = 2.44 \times 10^6 \text{ MÁX.}$$

44 Conceptos generales de los transformadores

EJEMPLO 1.11

SABIENDO QUE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN SE EMPLEAN DENSIDADES DE CORRIENTE ENTRE 1.1 Y 2.5 AMPERE/MM², CALCULAR LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES Y EL NÚMERO DE ESPIRAS EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DE UN TRANSFORMADOR TIPO DISTRIBUCIÓN DE 100 KVA MONOFÁSICO, 13200/240 VOLTS, 60 Hz 10 VOLTS/ESPIRA. CONSIDÉRESE LA DENSIDAD DE CORRIENTE IGUAL A 2.5 AMPERE/MM².

SOLUCION

LA CORRIENTE EN EL PRIMARIO ES:

$$I_1 = \frac{KVA}{(kV)_1} = \frac{100}{13.2} = 7.58 \text{ AMPERES.}$$

Y EN EL SECUNDARIO ES:

$$I_2 = \frac{KVA_2}{(kV)_2} = \frac{100}{0.240} = 417 \text{ AMPERES.}$$

LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES EN CADA CASO ES:

$$S_2 = \frac{I_2}{D} = \frac{7.58}{2.5} = 3.032 \text{ MM}^2$$

$$S_2 = \frac{I_3}{D} = \frac{417}{2.5} = 167 \text{ MM}^2$$

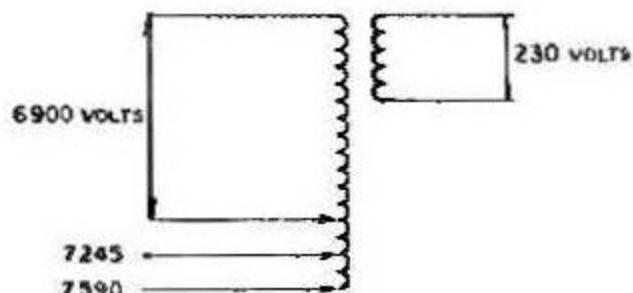
AHORA, SI TENEMOS LOS VOLTS ESPIRA, EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO PRIMARIO Y SECUNDARIO SON:

$$N_1 = \frac{13800}{10} = 1380 \text{ ESPIRAS}$$

$$N_2 = \frac{240}{10} = 24 \text{ ESPIRAS}$$

EJEMPLO 1.12.

UN TRANSFORMADOR DE 6900/230 VOLTS TIENE TAPS (DERIVACIONES) DE -2.5, 5, 7.5 Y 10% SOBRE EL VALOR NOMINAL EN EL DEVANADO PRIMARIO. DETERMINE LOS VOLTAJES QUE PUEDEN SER USADOS EN EL DEVANADO PRIMARIO PARA UN VOLTaje CONSTANTE DE 230 VOLTS EN EL SECUNDARIO Y LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN EN CADA CASO.

SOLUCION

LOS TAPS QUE TIENE EL TRANSFORMADOR SIGNIFICAN QUE LA TENSIÓN EN ÉL SE VA A INCREMENTAR EN EL VALOR DEL TAP. ES DECIR, SI LA DERIVACIÓN ES DEL 2.5%, EL INCREMENTO DE TENSIÓN SERÁ:

A) $V_P = 6900 (1 + 0.025) = 7072.5 \text{ VOLTS}$

SI LA DERIVACIÓN ES DEL 5%

B) $V_P = 6900 (1 + 0.05) = 7245 \text{ VOLTS.}$

46 Conceptos generales de los transformadores

PARA UNA DERIVACIÓN DEL 7.5%:

c) $V_P = 6900 (1 + 0.075) = 7417.5 \text{ VOLTS.}$

Y PARA EL 10% DE DERIVACIÓN:

d) $V_P = 6900 (1 + 0.10) = 7590 \text{ VOLTS.}$

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN EN CADA CASO ES:

$$N_1 = \frac{N_1}{N_2} = \frac{6900}{230} = 30$$

a) $N = \frac{7072.5}{230} = 30.75$

b) $N = \frac{7245}{230} = 31.5$

c) $N = \frac{7417.5}{230} = 32.25$

d) $N = \frac{7590}{230} = 33$

EJEMPLO 1.13

UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA DE 1000 KVA MONOFÁSICO DE 660/400 -- VOLTS, 60 Hz. TIENE 500 ESPIRAS EN SU DEVANADO PRIMARIO. SI SE SABE QUE LAS DENSIDADES DE CORRIENTE PARA ESTE TIPO DE TRANSFORMADORES (AUTO-ENFIRADOS EN ACEITE), VARÍAN ENTRE 2.2 Y 3.0 AMPERE /MM², CONSIDERANDO QUE D ES IGUAL A 2.8 AMPERE/MM². CALCULAR:

- A) EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO SECUNDARIO.
- B) LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y - SECUNDARIO.

SOLUCIÓN

LA CORRIENTE EN AMBOS DEVANADOS ES:

$$I_P = \frac{KVA}{(kV)_P} = \frac{1000}{6.6} = 151.51 \text{ AMPERES.}$$

$$I_2 = \frac{KVA}{(kV)3} = \frac{1000}{0.44} = 2272.72 \text{ AMPERES.}$$

CONSIDERANDO UNA DENSIDAD IGUAL A 2.8 AMP/MM^2 , LA SECCIÓN CORRESPONDIENTE ES:

$$S_P = \frac{I_P}{D} = \frac{151.51}{2.8} = 54.1 \text{ MM}^2$$

$$S_S = \frac{I_S}{D} = \frac{2272.72}{2.8} = 811.6 \text{ MM}^2$$

DE ACUERDO CON LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad N_2 = \frac{I_1}{I_2} = N_1$$

$$N_2 = \frac{I_1}{I_2} N_1 = \frac{151.1}{2272.72} \times 500 = 33 \text{ ESPIRAS}$$

48 Conceptos generales de los transformadores

EJEMPLO 1.14

EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE -- 100 KVA, 2300/550 VOLTS, 60 C.P.S. TIENE 200 ESPIRAS DE CONDUCTOR DE SECCIÓN RECTANGULAR DE 13.2 X 2.5 MM DE COBRE.

DETERMINAR:

- EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE.
- LAS CORRIENTES EN LOS DEVANADOS DE ALTO Y BAJO VOLTAJE.
- LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE.
- LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE SI SE TRABAJA A LA MISMA DENSIDAD DE CORRIENTE QUE EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE.

SOLUCION

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad \therefore \quad N_2 = \frac{V_2}{V_1} \times N_1 .$$

$$N_2 = \frac{500}{2300} \times 200 = 48 \text{ ESPIRAS}$$

LAS CORRIENTES SON:

$$I_1 = \frac{KVA_1}{(KV)_1} = \frac{100}{2.3} = 43.6 \text{ AMPERES}$$

$$I_2 = \frac{KVA_2}{(KV)_2} = \frac{100}{0.55} = 182 \text{ AMPERES.}$$

EL ÁREA PARA EL CONDUCTOR DE ALTO VOLTAJE ES:

$$S_p = 13.2 \times 2.5 = 33 \text{ MM}^2$$

LA DENSIDAD ES AHORA:

$$D = \frac{I_1}{S_1} = \frac{43.6}{33} = 1.32 \text{ AMP/MM}^2$$

LA SUPERFICIE EN EL SECUNDARIO PARA ESTA DENSIDAD DE CORRIENTE ES:

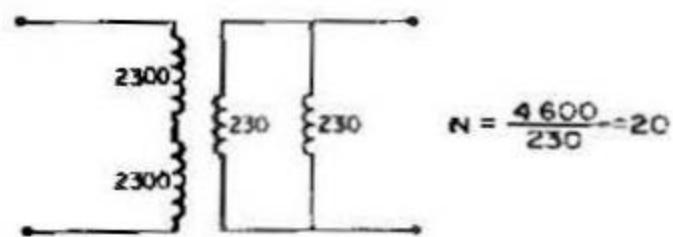
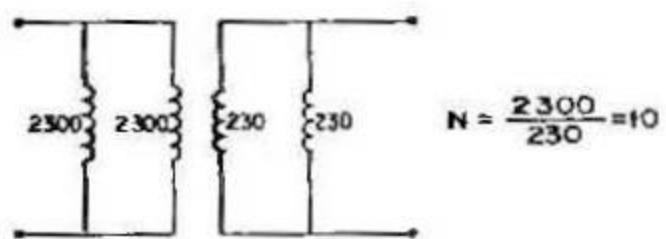
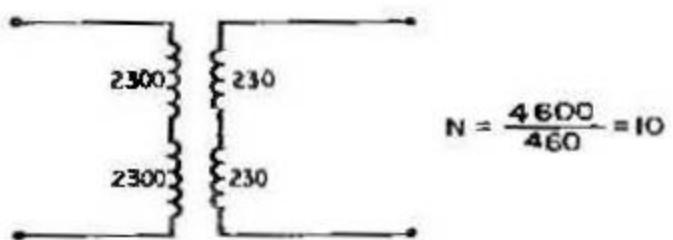
$$S_2 = \frac{I_2}{D} = \frac{182}{1.32} = 137.80 \text{ MM}^2$$

50 Conceptos generales de los transformadores

EJEMPLO 1.15

UN TRANSFORMADOR TIENE DOS BOBINAS EN SU DEVANADO PRIMARIO DE -- 2300 VOLTS. INDIQUE POR DIBUJO LAS CUATRO POSIBLES MANERAS DE CONECTAR EL TRANSFORMADOR, Y PARA CADA UNA, DETERMINE LA RELACION DE TRANSFORMACION DEL VOLTAJE PRIMARIO AL SECUNDARIO, CON 2 BOBINAS DE 230 VOLTS.

SOLUCION



1.7 EL DIAGRAMA FASORIAL CON CARGA.

EN ESTA PARTE SE HARÁ UNA BREVE REVISIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR CUANDO SE ENCUENTRA BAJO CONDICIONES DE CARGA EN LAS TERMINALES DE SU DEVANADO SECUNDARIO. LA CORRIENTE QUE CIRCULA A TRAVÉS DEL DEVANADO SECUNDARIO, DEBE CIRCULAR EN TAL DIRECCIÓN QUE SE OPONGA AL FLUJO PRODUCIDO POR LA CORRIENTE PRIMARIA. CUANDO EL VOLTAJE SE REDUCE MOMENTÁNEAMENTE, EL VOLTAJE INDUCIDO EN EL DEVANADO PRIMARIO, TAMBIÉN SE REDUCE Y POR LO TANTO TIENDE A CIRCULAR MÁS CORRIENTE EN ESTE DEVANADO. ESTE INCREMENTO EN LA CORRIENTE, PRODUCIRÁ QUE EL FLUJO SE INCREmente A SU VALOR ORIGINAL. CUANDO CIRCULA MÁS CORRIENTE EN EL DEVANADO SECUNDARIO, EL PROCESO SE REPITE Y LA CORRIENTE PRIMARIA SE VOLVERÁ A INCREMENTAR.

EL DIAGRAMA FASORIAL QUE SE ESTUDIÓ ANTERIORMENTE PARA LA CONDICIÓN DE OPERACIÓN EN VACÍO, SE PUEDE MODIFICAR DE MANERA QUE INCLUYA A LA CORRIENTE DE CARGA COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA SIGUIENTE, EN DONDE ESTA CORRIENTE I_2 SE ENCUENTRA ATRASADA CON RESPECTO AL VOLTAJE INDUCIDO E_2 . I_1' ES LA CORRIENTE QUE CIRCULA EN EL DEVANADO PRIMARIO PARA EQUILIBRAR EL EFECTO DE DESMAGNETIZACIÓN DE I_2 . EN VIRTUD DE QUE EL FLUJO Φ PERMANECÉ CONSTANTE, I_0 DEBE SER LA MISMA CORRIENTE QUE ENERGICE AL TRANSFORMADOR EN VACÍO. LA CORRIENTE QUE CIRCULA EN EL DEVANADO PRIMARIO I_1 , ES ENTONCES LA SUMA FASORIAL DE I_1' Y I_0 .

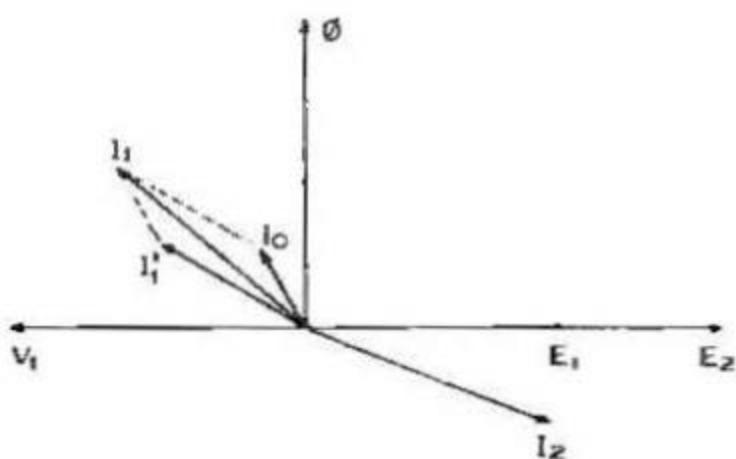


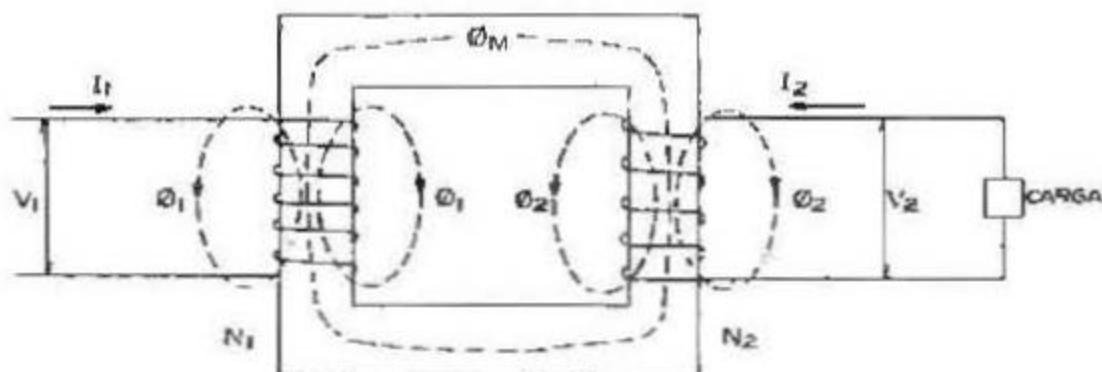
DIAGRAMA FASORIAL ELEMENTAL DEL TRANSFORMADOR CON CARGA

1.7.1. EL CONCEPTO DE REACTANCIA DE DISPERSIÓN.

COMO SE HA MENCIONADO ANTERIORMENTE, SE HA PARTIDO DE LA SUPOSICIÓN QUE TODO EL FLUJO Φ PRODUCIDO POR EL DEVANADO-PRIMARIO, ESLABONA Y CORTA A CADA ESPIRA DE LOS DEVANADOS-PRIMARIO Y SECUNDARIO. ESTO SIGNIFICA QUE EXISTE UN ACOPLAMIENTO MAGNÉTICO PERFECTO O EN OTRAS PALABRAS, QUE EXISTE UN COEFICIENTE DE ACOPLAMIENTO DEL 100 POR CIENTO. SIN EMBARGO, PARTE DEL FLUJO PRODUCIDO POR EL DEVANADO PRIMARIO ESLABONA SOLO LAS ESPIRAS PRIMARIAS, COMO UN FLUJO Φ_1 . TAMBÍEN PARTE DEL FLUJO PRODUCIDO POR LA CORRIENTE SECUNDARIA I_2 ESLABONA SOLO A LA PROPIA BOBINA SECUNDARIA COMO Φ_2 . ESTOS FLUJOS Φ_1 Y Φ_2 SE CONOCEN COMO "FLUJOS DISPERSOS", ES DECIR SON "FLUJOS QUE QUEDAN FUERA DEL NÚCLEO Y NO ESLABONAN AMBOS DEVANADOS".

EL FLUJO QUE NO PASA COMPLETAMENTE A TRAVÉS DEL NÚCLEO Y -

ESLABONA AMBOS DEVANADOS, SE CONOCE COMO EL FLUJO MUTUO Y SE DESIGNA COMO \emptyset_M . DESDE LUEGO QUE EL FLUJO DISPERSO Y EL FLUJO MUTUO VARIAN A LA MISMA FRECUENCIA Y POR LO TANTO INDUCIRÁN VOLTAJES EN AMBOS DEVANADOS. ESTOS VOLTAJES SON DISTINTOS Y MENORES QUE LOS VOLTAJES INDUCIDOS. E_1 Y E_2 PRODUCIDOS POR EL FLUJO MUTUO \emptyset_M . ESTO SE DEBE AL FLUJO DISPERSO RELATIVO Y AL NÚMERO DE ESPIRAS RELATIVAMENTE BAJO QUE SON ESLABONADAS. LOS VOLTAJES PRODUCIDOS POR LOS DOS FLUJOS DISPERSOS REACCIONAN COMO SI FUERAN INDUCIDOS EN BIBINAS SEPARADAS QUE ESTÁN EN SERIE POR CADA UNO DE LOS DEVANADOS. DEBIDO A ÉSTO, LOS FLUJOS DISPERSOS SE PUEDEN REEMPLAZAR POR REACTANCIAS PURAS Y SE CONOCEN COMO "REACTANCIAS DISPERSAS" X_1 Y X_2 .



FLUJOS DISPERSOS

54 Conceptos generales de los transformadores

POR OTRA PARTE, DADO QUE LAS CAÍDAS DE VOLTaje COMBINADAS - DE AMBOS DEVANADOS, SON DIFÍCILMENTE MAYORES DEL 3 PORCIEN- TO A PLENA CARGA, EL FLUJO MUTUO \emptyset_m SE PUEDE SUPONER QUE ES CONSTANTE EN EL RANGO TOTAL DE OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR- DE POTENCIA. ESTO, SIN EMBARGO, NO ES LO MISMO EN LOS - TRANSFORMADORES PEQUEÑOS EN DONDE LAS CAÍDAS DE VOLTaje EN LOS DEVANADOS PUEDEN SER HASTA EL 25 PORCIENTO DE VACÍO A - PLENA CARGA.

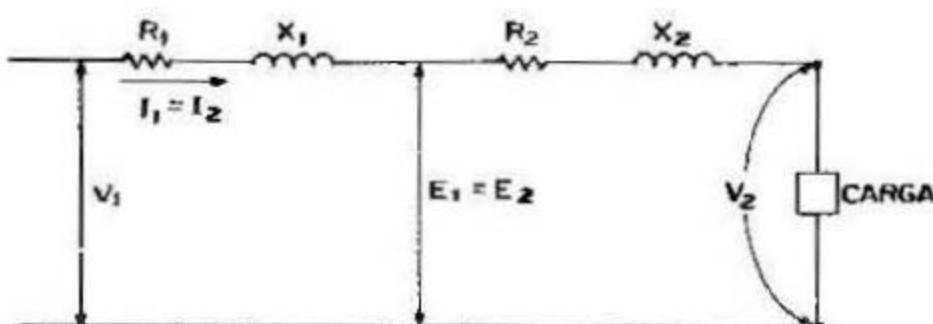
1.7.2. El circuito equivalente de un transformador.

HASTA AHORA SE HA HECHO UNA BREVE DESCRIPCIÓN DEL TRANSFOR- MADOR PARA SUS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN VACÍO, TOMANDO- EN CONSIDERACIÓN QUE LA LLAMADA CORRIENTE DE VACÍO I_0 ES - MUY PEQUEÑA EN COMPARACIÓN CON LA CORRIENTE DE PLENA CARGA, PARA EL ESTUDIO DEL LLAMADO CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANS- FORMADOR, POR LO GENERAL, SE DESPRECIA Y POR OTRA PARTE, - TRATANDO DE SIMPLIFICAR EL ESTUDIO, SE CONSIDERA QUE SE -- TIENE UN TRANSFORMADOR DE RELACIÓN 1:1 DE MANERA QUE LOS - VOLTAJES Y CORRIENTES TENGAN UNA REFERENCIA COMÚN EN EL -- DIAGRAMA.

SE CONSIDERA QUE SE APLICA UN VOLTAJE EN EL DEVANADO PRIMA- RIO Y SE CONECTA UNA CARGA EN EL SECUNDARIO, ENTONCES LAS- CORRIENTES PRIMARIA Y SECUNDARIA SON IGUALES, DADO QUE SE- ESTÁ SUPONIENDO UNA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN DE 1:1. DE- BIDO A LA RESISTENCIA (R_1) Y REACTANCIA (X_1) DEL DEVANADO- PRIMARIO, SE PRESENTARÁ UNA CAÍDA DE VOLTaje, QUE SE RESTA AL VOLTAJE APLICADO V_1 , DANDO ASÍ EL VOLTAJE INDUCIDO E_1 -

PRODUCIDO POR EL FLUJO MUTUO \emptyset_m : EL VOLTAJE E_2 , QUE POR TENER RELACIÓN 1:1 ES IGUAL A E_1 , TAMBIÉN SE INDUCE POR EL FLUJO \emptyset_m EN EL DEVANADO SECUNDARIO.

ESTE VOLTAJE E_2 NO ES EL QUE APARECE EN LAS TERMINALES DEL DEVANADO, DEBIDO A QUE LA CORRIENTE DE CARGA I_2 PRODUCE UNA CAÍDA DE VOLTAJE EN LA RESISTENCIA SECUNDARIA (R_2) Y EN LA REACTANCIA SECUNDARIA (X_2). EN LA FIGURA SIGUIENTE SE MUESTRA ESTE CIRCUITO SIMPLIFICADO.

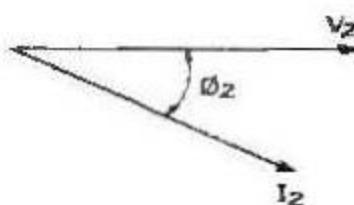


CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

1.7.3. DIAGRAMA FASORIAL A PLENA CARGA.

TOMANDO EN CONSIDERACIÓN LAS CONDICIONES INDICADAS EN EL PÁRRAFO ANTERIOR, SE SUPONE QUE SI EN LAS TERMINALES DEL DEVANADO SECUNDARIO SE CONECTA UN VÓLTMETRO, UN AMPÉRMETRO Y UN WATTMETRO, SE PUEDEN HACER MEDICIONES DEL VOLTAJE SECUNDARIO V_2 , LA CORRIENTE DE CARGA I_2 Y TAMBIÉN CALCULAR EL FACTOR DE POTENCIA DE LA CARGA. SI SE DESIGNA POR θ_2 ESTE FACTOR DE POTENCIA Y SE CONSIDERA COMO ATRASADO, TOMANDO COMO REFERENCIA EL VOLTAJE V_2 SE TIENE EL DIAGRAMA PARA LAS RELACIONES DE CARGA.

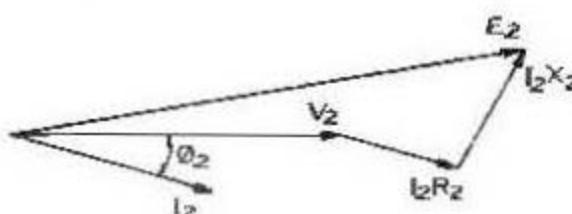
56 Conceptos generales de los transformadores



COMO SE HA MENCIONADO ANTES, SI SE TIENE UNA CAÍDA DE VOLTAJE DEBIDO A LA RESISTENCIA Y REACTANCIA DEL DEVANADO SECUNDARIO, EL VOLTAJE INDUCIDO EN EL DEVANADO SECUNDARIO ES ENTONCES:

$$E_2 = V_2 + I_2 (R_2 + jX_2)$$

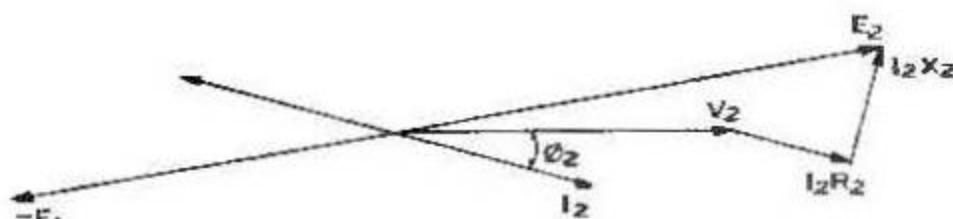
EN LA FIGURA SIGUIENTE SE MUESTRA E_2 , ESTANDO $I_2 R_2$ EN FASE CON LA CORRIENTE Y LA CAÍDA DE VOLTAJE $I_2 X_2$ ADELANTE 90° - DE LA CORRIENTE I_2



CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL SECUNDARIO

CUANDO SE REVISÓ EN EL PÁRRAGO ANTERIOR EL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN - 1:1, LA CORRIENTE PRIMARIA ALIMENTADA PARA NEUTRALIZAR EL EFECTO DE LA CORRIENTE DE CARGA, ES EXACTAMENTE IGUAL Y OPUESTA A ESTA, ES DECIR I_1 ESTÁ 180° DEFASADA CON RESPECTO A I_2 . E_1 ESTÁ INDUCIDO POR EL FLUJO MUTUO θ_m QUE TAM-

BIÉN INDUCE E_2 , LOS DOS VOLTAJES INDUCIDOS ESTÁN EN FASE - Y SI SE DIBUJA $-E_1$ A 180° CON RESPECTO A E_2 , SE TIENEN LAS CONDICIONES DEL DIAGRAMA SIGUIENTE.



CORRIENTE PRIMARIA Y FEM INDUCIDA

AL VOLTAJE APLICADO V_1 SE LE OPOÑEN DOS VOLTAJES, QUE SON EL VOLTAJE INDUCIDO DEBIDO AL FLUJO MUTUO Y LAS CAÍDAS DE VOLTAJE POR RESISTENCIA Y REACTANCIA DEL PROPIO DEVANADO, - ESTO SE PUEDE EXPRESAR COMO:

$$V_1 = -E_1 + I_1 (R_1 + j X_1)$$

SI SE AGREGA LA CAÍDA DE VOLTAJE RESISTIVA EN FASE, SON -- LA CORRIENTE PRIMARIA Y LA CAÍDA DE VOLTAJE REACTIVA 90° - ADELANTE DEL VOLTAJE INDUCIDO $-E_1$ PARA OBTENER EL VOLTAJE- APLICADO V_1 , COMO SE MUESTRA EN EL DIAGRAMA VECTORIAL EN - DONDE θ_1 REPRESENTA EL FACTOR DE POTENCIA DEL PRIMARIO, SE TIENE EL DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR OPERANDO A -- PLENA CARGA.

58 Conceptos generales de los transformadores

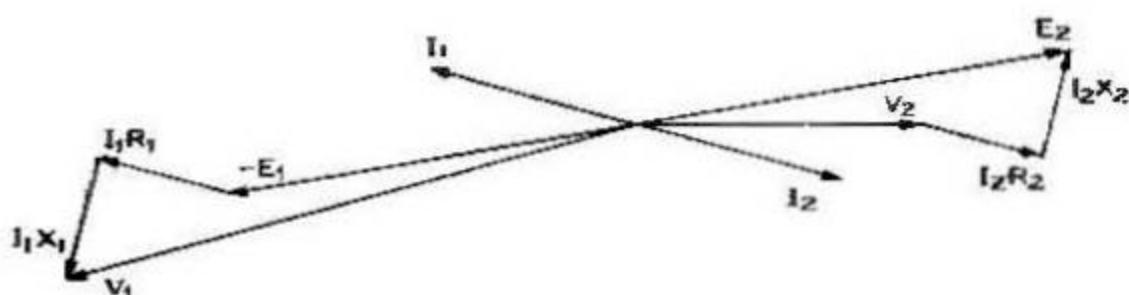


DIAGRAMA FASORIAL DEL TRANSFORMADOR A PLENA CARGA

DE ACUERDO AL DIAGRAMA FASORIAL ANTERIOR DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL VOLTAJE APLICADO EN EL DEVANADO PRIMARIO, V_1 SE PUEDEN VER NUEVAMENTE LAS DOS CAÍDAS DE VOLTAJE SUCESSIONES, UNA EN CADA DEVANADO, PARA OBTENER EL VOLTAJE TERMINAL CON LA CARGA V_2 . SI SE SUPONE QUE SE GIRA EL LADO PRIMARIO — DEL DIAGRAMA FASORIAL, HACIA EL LADO SECUNDARIO, Y NUEVAMENTE SE CONSIDERA QUE LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ES 1:1. EL DIAGRAMA FASORIAL TIENE UNA SIMPLIFICACIÓN CONSIDERABLE COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA SIGUIENTE Y DE ESTA FORMA SE OBTIENE EL DIAGRAMA FASORIAL DEL "CIRCUITO EQUIVALENTE-SERIE DEL TRANSFORMADOR".

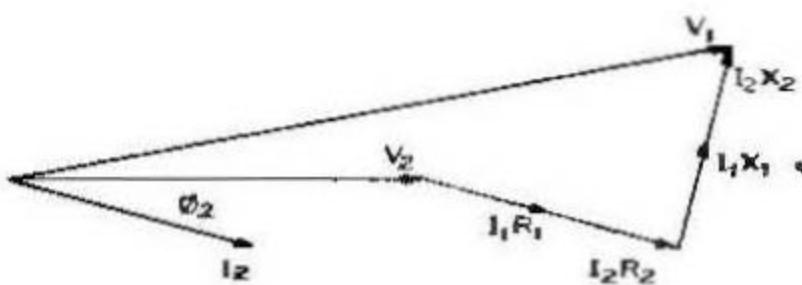
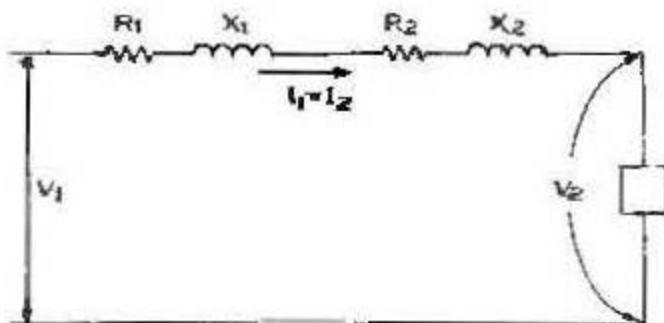


DIAGRAMA FASORIAL SIMPLIFICADO



CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

1.7.4. LA APLICACIÓN DE LOS CIRCUITOS EQUIVALENTES.

CUANDO LOS TRANSFORMADORES SE USAN DENTRO DE UNA RED COMPLEJA PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO POR LO QUE SE REFIERE A LA DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA, LAS CAÍDAS DE TENSIÓN, - EL CORTO CIRCUITO, ETC. CONVIENE, CON RELACIÓN HASTA LO AHORA EXPUESTO SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR , CONSIDERANDO CON LO QUE SE CONOCE COMO "EL CIRCUITO EQUIVALENTE" QUE EN SU FORMA MÁS COMPLETA ESTÁ CONSTITUIDO POR UN TRANSFORMADOR "IDEAL" (DE RELACIÓN N_1/N_2) CONECTADO A LAS RESISTENCIAS R_0 , R_1 Y R_2 Y A LAS REACTANCIAS X_0 , X_1 Y X_2 COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA:

60 Conceptos generales de los transformadores

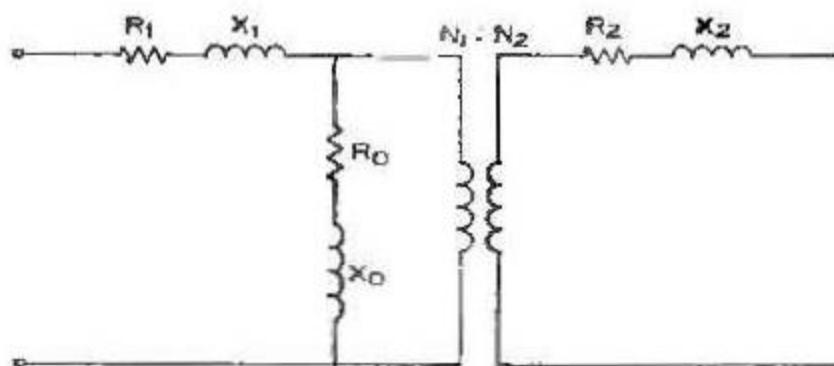


DIAGRAMA EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR MONOFASICO

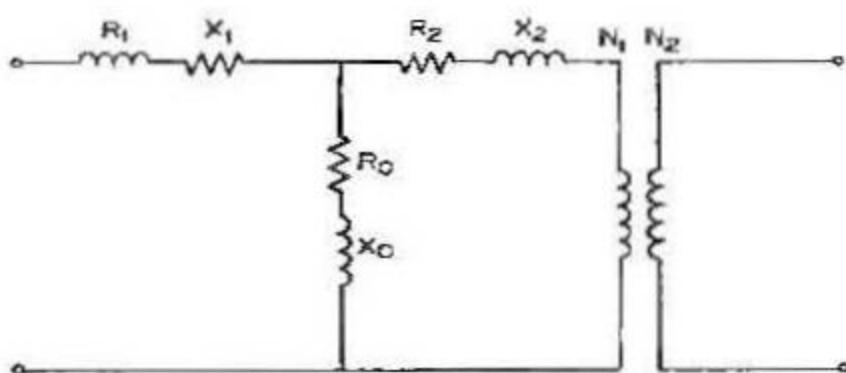
LA RESISTENCIA R_0 REPRESENTA EL EFECTO DISIPATIVO, DEBIDO A LAS PÉRDIDAS EN VACÍO. R_1 ES LA RESISTENCIA DEL DEVANADO PRIMARIO, R_2 LA DEL SECUNDARIO.

EN FORMA ANÁLOGA X_0 REPRESENTA EL EFECTO DE ABSORCIÓN DE LA CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN, EN TANTO QUE X_1 Y X_2 REPRESENTAN LOS EFECTOS DE LOS FLUJOS DISPERSOS EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO.

PARA ALGUNOS ESTUDIOS, NO SE REQUIERE CONSIDERAR LOS EFECTOS DE LA SATURACIÓN DEL NÚCLEO DEL TRANSFORMADOR Y SON DESPRECIAZABLES, EN CAMBIO EN OTROS SE REQUIERE DE MAYOR PRECISIÓN Y ENTONCES A R_0 Y X_0 SE LES ATRIBUYEN PROPIEDADES NO LINEALES.

COMO SE MENCIONÓ ANTES, PARA ALGUNOS ESTUDIOS ES CONVENIENTE HACER REFERENCIA A LOS VALORES DE TENSIONES Y CO-

RRIENTES REFERIDOS A UN DEVANADO O A UN LADO DEL TRANSFORMADOR, POR LO GENERAL, EL PRIMARIO QUE ES EL DE ALIMENTACIÓN. EN ESTOS CASOS EL ESQUEMA EQUIVALENTE SE SIMPLIFICA A UN CIRCUITO "T" COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA:



CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR REFERIDO AL LADO PRIMARIO

LA RESISTENCIA Y REACTANCIA SECUNDARIAS SE REFIEREN AL DEVANADO PRIMARIO DE ACUERDO CON LAS RELACIONES:

$$R_{21} = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

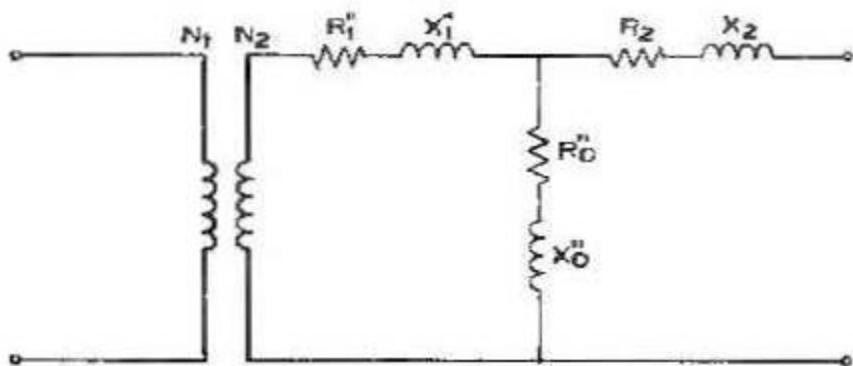
$$X_{21} = X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

EN FORMA ANÁLOGA LA RESISTENCIA Y REACTANCIA PRIMARIAS SE PUEDEN REFERIR AL SECUNDARIO CON LAS RELACIONES:

$$R_1'' = R_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \quad X_1'' = X_1 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2$$

62 Conceptos generales de los transformadores

EL DIAGRAMA EQUIVALENTE ES EL SIGUIENTE:



EJEMPLO 1.16

DIBUJAR A ESCALA EL DIAGRAMA VECTORIAL A PLENA CARGA DEL SIGUIENTE TRANSFORMADOR: 10 KVA. 220/110 VOLTS, 60 Hz R2 = 0.03 OHMS, X2 = 0.06 OHMS, I0 = 1.0 AMPERES Y, FACTOR DE POTENCIA UNITARIO.

SOLUCION

$$A = \frac{V_1}{V_2} = \frac{220}{110} = 2$$

LA CORRIENTE DE CARGA EN EL DEVANADO SECUNDARIO ES:

$$I_2 = \frac{KVA}{KV_2} = \frac{10}{0.11} = 91 \text{ AMPERES}$$

ESTA CORRIENTE, AL CIRCULAR POR DICHO DEVANADO, ORIGINA - PÉRDIDAS POR RESISTENCIA Y REACTANCIA:

$$I_2 R_2 = 91 \times 0.03 = 2.73 \text{ VOLTS}$$

$$I_2 X_2 = 91 \times 0.06 = 5.46 \text{ VOLTS}$$

EL VOLTAJE EN VACÍO EN EL SECUNDARIO ES:

$$\begin{aligned} E_s &= \sqrt{(V_2 + I_2 R_2)^2 + (I_2 X_2)^2} \\ &= \sqrt{(110 + 2.73)^2 + (5.46)^2} = 113 \text{ VOLTS} \end{aligned}$$

REFIRIENDO ESTE VOLTAJE AL PRIMARIO:

$$E_1 = A E_2 = 2 \times 113 = 226 \text{ VOLTS}$$

LA CORRIENTE DE CARGA EN EL DEVANADO PRIMARIO:

$$I_1 = \frac{KVA}{KV_1} = \frac{10}{0.22} = 45.2 \text{ AMP.}$$

LA CORRIENTE TOTAL I QUE CIRCULA POR EL PRIMARIO ESTÁ COMPUESTA POR LA CORRIENTE DE CARGA Y LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN, POR LO TANTO:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_0$$

$$\therefore |I| = \sqrt{I_1^2 + I_0^2} = \sqrt{(45.5)^2 + (1)^2} = 45.51 \text{ AMP.}$$

CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL PRIMARIO SON:

$$I_{R1} = 45.51 \times 0.12 = 5.50 \text{ VOLTS}$$

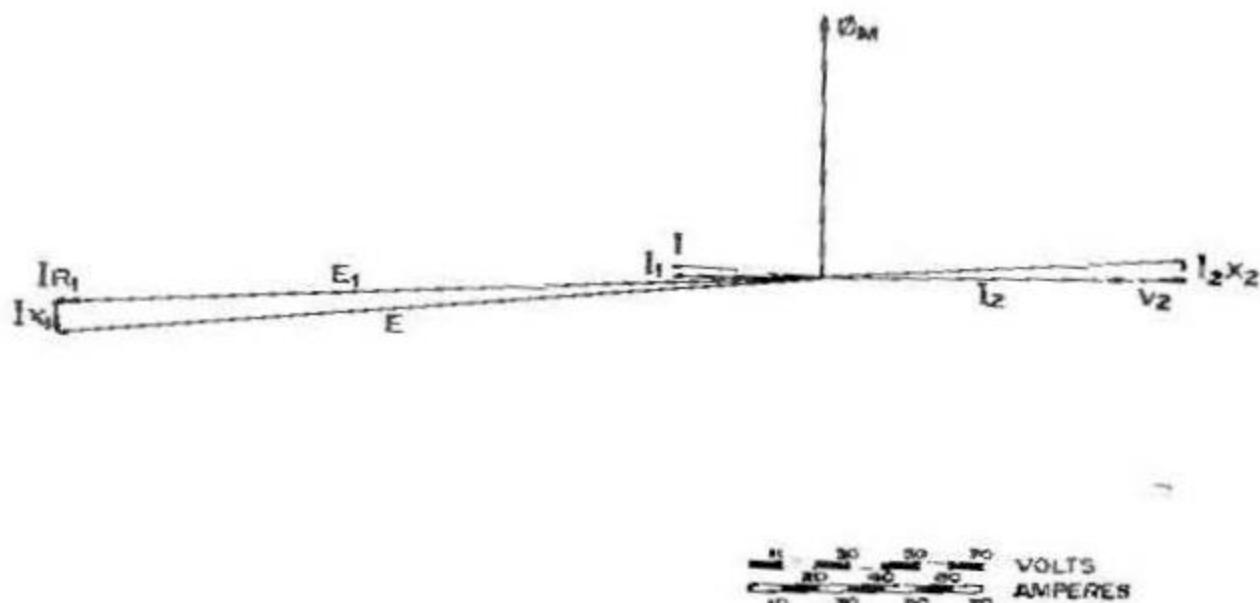
$$I_{X1} = 45.51 \times 0.20 = 9.10 \text{ VOLTS}$$

64 Conceptos generales de los transformadores

POR LO TANTO, EL VOLTAJE QUE SE APLICA AL PRIMARIO DEL -- TRANSFORMADOR ES:

$$E = \sqrt{(E_1 + I_{R1})^2 + (I_1 X_1)^2} = \sqrt{(226 + 5.50)^2 + (9.1)^2} = 231.6V$$

EL DIAGRAMA VECTORIAL ES EL SIGUIENTE



EJEMPLO 1.17

DETERMINE LOS VALORES DE RESISTENCIA Y REACTANCIA EQUIVALENTES DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 500 KVA, 4200/2400 VOLTS QUE TIENE COMO DATOS: $R_1 = 19.00 \text{ OHMS}$, $X_1 = 39 \text{ OHMS}$, $R_2 = 0.051 \text{ OHMS}$, $X_2 = 0.11 \text{ OHMS}$.

- A) EN TÉRMINOS DEL PRIMARIO.
- B) EN TÉRMINOS DEL SECUNDARIO

SOLUCION

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ES:

$$A = \frac{V_1}{V_2} = \frac{4200}{2400} = 1.75$$

EN CONSECUENCIA, LA RESISTENCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO ES:

$$R_1' = R_1 + A^2 R_2 = 1.9 + (1.75)^2 0.015 = 19.046 \Omega$$

$$X_1' = X_1 + A^2 R_2 = 39 + (1.75)^2 0.11 = 39.33 \Omega$$

EN TÉRMINOS DEL SECUNDARIO:

$$R_1'' = R_2 + \frac{R_1}{A^2} = 0.015 + \frac{19}{3.0625} = 6.219 \Omega$$

$$X_1'' = X_2 + \frac{X_1}{A^2} = 0.11 + \frac{39}{3.0625} = 12.84 \Omega$$

66 Conceptos generales de los transformadores

1.8 DETERMINACION DE LAS CONSTANTES DEL TRANSFORMADOR.

LOS VALORES REALES DE RESISTENCIA Y REACTANCIA DE LOS DEVANADOS - DE UN TRANSFORMADOR, SE PUEDEN OBTENER DE PRUEBAS DE LABORATORIO- MEDIANTE MEDICIONES Y ALGUNOS CÁLCULOS RELATIVAMENTE SIMPLES Y -- QUE SON LA BASE DE LOS VALORES USADOS EN LOS CIRCUITOS EQUIVALEN- TES. ALGUNOS DE ESTOS VALORES O PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR OB- TENIDOS PARA EL TRANSFORMADOR PUEDEN NO EXISTIR FISICAMENTE, PERO PUEDEN AYUDAR A COMPRENDER LA OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR.

1.8.1. LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO EN EL TRANSFORMADOR.

LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO CONSISTE EN CERRAR O PONER EN- CORTO CIRCUITO, ES DECIR, CON UNA CONEXIÓN DE RESISTENCIA- DESPRECIABLE, LAS TERMINALES DE UNO DE LOS DEVANADOS Y ALI- MENTAR EL OTRO CON UN VOLTAJE REDUCIDO (APLICADO EN FORMA- REGULADA) DE UN VALOR REDUCIDO DE TENSIÓN QUE REPRESENTA - UN PEQUEÑO PORCENTAJE DEL VOLTAJE DEL DEVANADO POR ALIMEN- TAR, DE TAL FORMA, QUE EN LOS DEVANADOS CIRCULEN LAS CO- RRIENTES NOMINALES. EN ESTAS CONDICIONES SE MIDEN LAS CO- RRIENTES NOMINALES Y LA POTENCIA ABSORBIDA.

DEBIDO A QUE LA TENSIÓN APLICADA ES PEQUEÑA EN COMPARA- CIÓN CON LA TENSIÓN NOMINAL, LAS PÉRDIDAS EN VACÍO O EN - EL NÚCLEO SE PUEDEN CONSIDERAR COMO DESPRECIAZABLES, DE MA- NERA QUE TODA LA POTENCIA ABSORBIDA ES DEBIDA A LAS PÉRDI- DAS POR EFECTO JOULE EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDA- RIO.

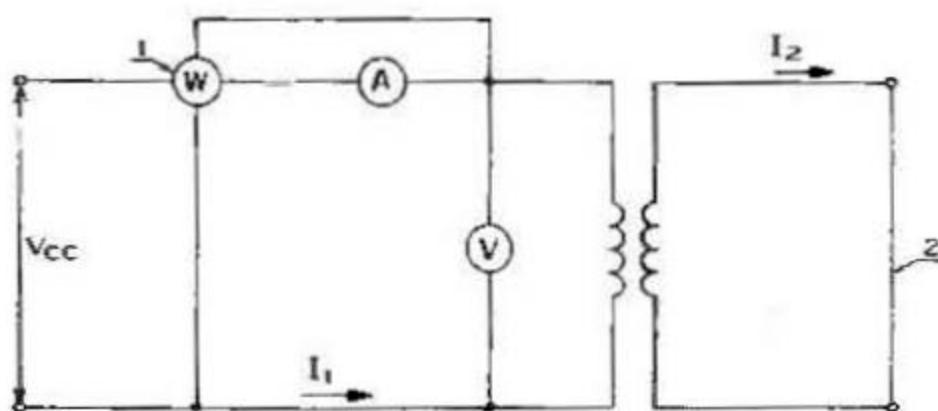


DIAGRAMA PARA LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO DE UN TRANSFORMADOR MONOFASICO,

WATTMETRO QUE INDICA LA POTENCIA DE PÉRDIDAS POR EFECTO DE CIRCULACIÓN DE LAS CORRIENTES EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y-SECUNDARIO.

CONEXIÓN DE CORTO CIRCUITO ENTRE LAS TERMINALES DEL DEVANADO.

CC VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN DE VALOR REDUCIDO, DE MANERA QUE SE HAGAN CIRCULAR LAS CORRIENTES I_1 , I_2 DE VALOR NOMINAL - EN CADA DEVANADO.

EL VOLTAJE APLICADO (V_{CC}) ES REGULADO Y SE VARÍA COMO SE INDICÓ ANTES, HASTA QUE CIRCULE LA CORRIENTE DE PLENA CARGA EN EL PRIMARIO. DE LOS VALORES MEDIDOS SE OBTIENE "LA IMPEDANCIA TOTAL" DEL TRANSFORMADOR COMO:

$$Z_T = \frac{V_{CC}}{I_1}$$

68 Conceptos generales de los transformadores

DONDE:

I_1 = CORRIENTE NOMINAL PRIMARIA.

V_{CC} = VOLTAJE DE CORTO CIRCUITO APLICADO EN LA PRUEBA

Z_T = IMPEDANCIA TOTAL INTERNA REFERIDA AL DEVANADO PRIMARIO. ESTA IMPEDANCIA SE CONOCE TAMBIÉN COMO IMPEDANCIA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR

1.8.1. PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS A PLENA CARGA.

DEBIDO A QUE EL FLUJO ES DIRECTAMENTE PROPORCIONAL AL VOLTAJE, EL FLUJO MUTUO EN EL TRANSFORMADOR BAJO LAS CONDICIONES DE PRUEBA DE CORTO CIRCUITO ES MUY PEQUEÑO, DE MANERA QUE LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO SON DESPRECIABLES. SIN EMBAIGO, LA CORRIENTE QUE CIRCULA A TRAVÉS DE LA RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS PRODUCE LAS MISMAS PÉRDIDAS EN ÉSTOS, QUE CUANDO OPERA EN CONDICIONES DE PLENA CARGA, ESTO SE DEBE A QUE EN AMBOS DEVANADOS SE HACE CIRCULAR LA CORRIENTE NOMINAL.

EN EL CIRCUITO PARA LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO, SI EL WATTMETRO SE CONECTA EN EL DEVANADO PRIMARIO O DE ALIMENTACIÓN, ENTONCES SE "MIDEN" LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS YA QUE NO HAY OTRAS PÉRDIDAS CONSIDERADAS. DE ESTE VALOR QUE SE TOMA DE LAS PÉRDIDAS, SE PUEDE CALCULAR "LA RESISTENCIA EQUIVALENTE" DEL TRANSFORMADOR COMO:

$$R_T = \frac{P_{CC}}{(I_1)^2}$$

DONDE:

P_{CC} = PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS Y QUE SE OBTIENEN DE LA-
LECTURA DEL MÁTTMETRO.

SE DEBEN TENER SIEMPRE EN MENTE, QUE EL VALOR DE LA RESIS-
TENCIA R_T , NO ES LA SUMA ARITMÉTICA DE LAS RESISTENCIAS EN
LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO, Es un valor que se -
DETERMINA DEL CIRCUITO EQUIVALENTE Y POR TAL MOTIVO SE LE
DENOMINA "LA RESISTENCIA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR".

LA IMPEDANCIA EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR SE PUEDE EX-
PRESAR EN TÉRMINOS DE LA RESISTENCIA Y REACTANCIA EQUIVALEN-
TE COMO:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

DE TAL FORMA, QUE LA REACTANCIA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMA-
DOR SE CALCULA COMO:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

ESTOS VALORES ESTÁN POR LO GENERAL REFERIDOS AL DEVANADO-
DE ALTO VOLTAJE, DEBIDO A QUE SE ACOSTUMBRA PONER EN COR-
TO CIRCUITO EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE, ES DECIR LAS ME-
DICIONES SE HACEN EN EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE. Esto -
Es por lo general el método normal de prueba. Las razo-
nes principales para esto:

70 Conceptos generales de los transformadores

1. LA CORRIENTE NOMINAL EN EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE ES MENOR QUE LA CORRIENTE NOMINAL EN EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE. POR LO TANTO, SON MENOS PELIGROSAS Y POR OTRA PARTE ES MÁS FÁCIL ENCONTRAR INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DENTRO DEL RANGO.
2. DEBIDO A QUE EL VOLTAJE APLICADO ES POR LO GENERAL MENOR QUE EL 5% DEL VALOR DEL VOLTAJE NOMINAL DEL DEVANADO ALIMENTADO, SE OBTIENE UNA LECTURA DEL VÓLTMETRO CON UNA DEFLEXIÓN APROPIADA PARA EL RANGO DE VOLTAJES QUE SE MIDEN.

EJEMPLO 1.18

SE DESEAN OBTENER LOS VALORES DE IMPEDANCIA, RESISTENCIA Y REACTANCIA EQUIVALENTES DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO- 20 KVA, 2 200/200 VOLTS, 60 Hz. DURANTE LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO, SE PONE EN CORTO CIRCUITO EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE Y SE APLICA VOLTAJE VARIABLE EN EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE HASTA HACER CIRCULAR LA CORRIENTE NOMINAL. - LOS DATOS OBTENIDOS DE PRUEBA SON LOS SIGUIENTES:

$$V_{cc} = 66 \text{ VOLTS.}$$

$$P_{cc} = 260 \text{ WATTS}$$

SOLUCION

LA CORRIENTE NOMINAL EN EL DEVANADO PRIMARIO ES:

$$I_1 = \frac{20,000}{2200} = 9.1 \text{ AMPERES}$$

LA IMPEDANCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO ES:

$$Z_T = \frac{V_{CC}}{I_1} = \frac{66}{9.1} = 7.25 \text{ OHMS}$$

LA RESISTENCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO

$$R_T = \frac{P_{CC}}{I_{12}^2} = \frac{260}{(9.1)^2} = 3.14 \text{ OHMS}$$

LA REACTANCIA EQUIVALENTE ES:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(7.25)^2 - (3.14)^2}$$

$$X_T = 6.53 \text{ OHMS}$$

EJEMPLO 1.19

CALCULE EL CAMBIO EN EL VOLTAJE PRIMARIO NECESARIO PARA --
QUE EL VOLTAJE TERMINAL SECUNDARIO DEL SIGUIENTE TRANSFOR-
MADOR SE MANTENGA CONSTANTE A 230 VOLTS DESDE PLENA CARGA-
A VACÍO. DATOS DEL TRANSFORMADOR: 15 KVA, 2300/230 VOLTS,
60 Hz Y $R_1 = 2.50 \text{ OHMS}$, $X_1 = 10.1 \text{ OHMS}$, $R_2 = 0.02 \text{ OHMS}$, -
 $X_2 = 0.09 \text{ OHMS}$.

DESPRECIE LA CORRIENTE DE VACÍO Y CONSIDERE UN FACTOR DE-
POTENCIA 0.8 ATRASADO EN LAS TERMINALES DEL SECUNDARIO.

72 Conceptos generales de los transformadores

SOLUCION

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN A = $\frac{2300}{230} = 10$

LA CORRIENTE QUE DEMANDA LA CARGA ES:

$$I_2 = \frac{KVA}{(KV)1} = \frac{15}{2.3} = 6.52 \text{ AMPERES}$$

LA RESISTENCIA Y REACTANCIA EQUIVALENTE REFERIDAS AL PRIMARIO SON:

$$R_T = R_1 + A^2 R_2 = 2.5 \times 10^2 \times 0.02 = 4.5 \text{ OHMS}$$

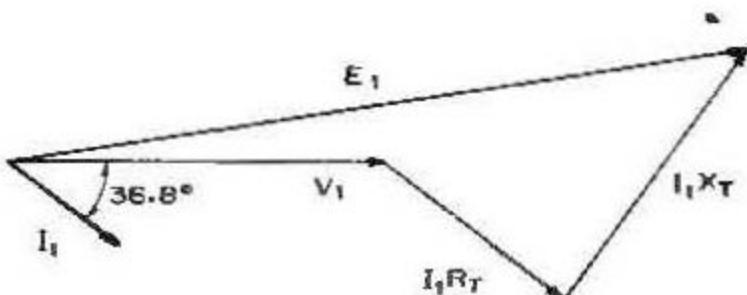
$$X_T = X_1 + A^2 X_2 = 10.10 \times 100 \times 0.09 = 19.10 \text{ OHMS}$$

LAS CAÍDAS DE VOLTAJE SON:

$$I_2 R_T = 6.52 \times 4.5 = 29.28 \text{ VOLTS.}$$

$$I_2 X_T = 6.52 \times 19.10 = 124.53 \text{ VOLTS}$$

EL VOLTAJE PRIMARIO EN VACÍO PARA FACTOR DE POTENCIA 0.8-ATRASADO



$$\begin{aligned}
 E_1 &= \sqrt{(V_1 \cos 36.8 + I_1 R_1)^2 + (V_1 \sin 36.8 + I_1 X_T)^2} = \\
 &= \sqrt{(2300 \times 0.8 + 29.28)^2 + (2300 \times 0.6 + 124.532)^2} = \\
 &= 2640 \text{ VOLTS}
 \end{aligned}$$

POR TANTO, EL VOLTAJE EN EL PRIMARIO CAMBIA DESDE 2640 EN VACÍO HASTA 2300 VOLTS A PLENA CARGA.

EJEMPLO 1.20

CALCULE EL PORCIENTO DE CAÍDAS DE VOLTAJE POR RESISTENCIA-REACTANCIA E IMPEDANCIA REFERIDAS AL PRIMARIO DE UN TRANSFORMADOR CON LOS DATOS SIGUIENTES' 10 KVA, 240/120 VOLTS , 60 Hz Y $R_1 = 0.13$ OHMS, $X_1 = 0.20$ OHMS, $R_2 = 0.03$ OHMS Y $-X_2 = 0.05$ OHMS

SOLUCION

LA CORRIENTE EN EL PRIMARIO ES:

$$I_1 = \frac{\text{KVA}}{(\text{KV})_1} = \frac{10}{0.24} = 41.66 \text{ AMPERES}$$

LA RESISTENCIA, REACTANCIA E IMPEDANCIA, LAS REFERIMOS AL PRIMARIO:

$$R_T = R_1 + A^2 R_2 = 0.13 + 22 \times 0.03 = 0.133 \Omega$$

$$X_T = X_1 + A^2 X_2 = 0.20 + 4 \times 0.05 = 0.4 \Omega$$

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} = \sqrt{(0.133)^2 + (0.4)^2} = 0.422 \Omega$$

74 Conceptos generales de los transformadores

LAS CAÍDAS DE VOLTAJE

$$I_1 R_T = 41.66 \times 0.133 = 13.78 \text{ VOLTS}$$

$$I_1 X_T = 41.66 \times 0.4 = 16.66 \text{ VOLTS}$$

$$I_1 Z_T = 41.66 \times 0.422 = 17.58 \text{ VOLTS}$$

POR DEFINICIÓN:

$$\% I_1 R_T = \frac{I_1 R_T}{V_1} 100 = \frac{13.78}{240} 100 = 5.74$$

$$\% I_1 X_T = \frac{I_1 X_T}{V_1} 100 = \frac{16.66}{240} 100 = 6.94$$

$$\% I_1 Z_T = \frac{I_1 Z_T}{V_1} 100 = \frac{17.58}{240} 100 = 7.32$$

1.9. REGULACION DEL TRANSFORMADOR.

LA REGULACIÓN DE UN TRANSFORMADOR SE DEFINE COMO LA DIFERENCIA ENTRE LOS VOLTAJES SECUNDARIOS EN VACÍO Y A PLENA CARGA, MEDIDOS EN TERMINALES, EXPRESADA ESTA DIFERENCIA COMO UN PORCENTAJE DEL VOLTAJE A PLENA CARGA. PARA EL CÁLCULO DEL VOLTAJE EN VACÍO SE DEBE TOMAR EN CONSIDERACIÓN EL FACTOR DE POTENCIA DE LA CARGA.

$$\% \text{ REG.} = \frac{V_{\text{VACÍO}} - V_{\text{CARGA}}}{V_{\text{CARGA}}} \times 100$$

EJEMPLO 1.21

UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 2300/230 VOLTS TIENE 2.6% DE REGULACIÓN. CALCULAR:

- A) EL VOLTAJE DE VACÍO EN EL SECUNDARIO.
- B) LA RELACIÓN DE ESPIRAS.

SOLUCIÓN

$$\% \text{ REG} = \frac{V_1 \text{ (VACIO)} - V_1 \text{ (PLENA CARGA)}}{V_1 \text{ (PLENA CARGA)}} \times 100$$

$$\begin{aligned}\therefore V_1(\text{VACIO}) &= \frac{\% \text{ REG. } V_1 \text{ (PLENA CARGA)} + V_1 \text{ (PLENA CARGA)}}{100} \times 100 \\ &= \frac{V_1 \text{ (PLENA CARGA)} (\% \text{ REG} + 100)}{100} \\ &= \frac{2300 (2.6 + 100)}{100} \\ &= 2359.8 \text{ VOLTS}\end{aligned}$$

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ES:

$$N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{2300}{230} = 10$$

76 Conceptos generales de los transformadores

EJEMPLO 1.22

UN TRANSFORMADOR MONOFASICO DE 100 KVA, 2200/220 VOLTS, 60 Hz, TIENE LAS SIGUIENTES CONSTANTES $R_1 = 0.42$ OHMS, $X_1 = 0.72$ OHMS, $R_2 = 0.0035$ OHMS, $X_2 = 0.070$ OHMS.

CALCULAR EL PORCENTAJE DE REGULACIÓN PARA LOS SIGUIENTES CASOS:

- A) A FACTOR DE POTENCIA UNITARIO.
- B) A FACTOR DE POTENCIA 0.8 ATRASADO.
- C) A FACTOR DE POTENCIA 0.8 ADELANTADO.

SOLUCIÓN

LA CORRIENTE EN LA CARGA ES:

$$I_2 = \frac{KVA}{KV_2} = \frac{100}{2.2} = 45.45 \text{ AMP.}$$

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ES:

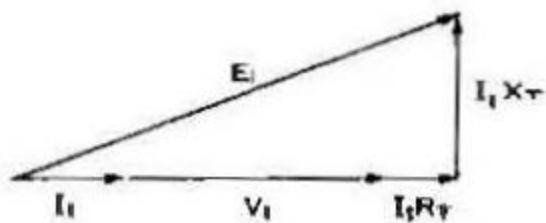
$$N = \frac{N_P}{N_S} = A \frac{2200}{220} = 10$$

POR LO TANTO, LA RESISTENCIA Y REACTANCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO ES:

$$R_T = R_1 + A^2 R_2 = 0.42 + 10^2 \times 0.0035 = 0.77 \text{ OHMS}$$

$$X_T = X_1 + A^2 X_2 = 0.72 + 10^2 \times 0.070 = 7.72 \text{ OHMS}$$

EL VOLTAJE EN VACÍO A FP = 1 ES:



$$E_1 = \sqrt{(V_1 + I_1 R_T)^2 + (I_1 X_T)^2} = \sqrt{(2200 + 0.77 \times 45.45)^2 + (45.45 \times 7.71)^2}$$

$$\therefore E_1 = 2230 \text{ VOLTS}$$

Y LA REGULACIÓN:

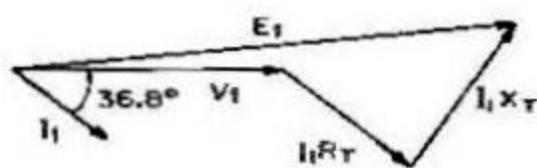
$$\% \text{ REG} = \frac{E_1 - V_1}{V_1} \times 100 = \frac{2230 - 2200}{2200} \times 100 = 1.363.$$

b) PARA UN FACTOR DE POTENCIA 0.8 (-)

$$R_T I_1 = 0.77 \times 45.45 = 34.99 \text{ VOLTS}$$

$$X_T I_1 = 7.72 \times 45.45 = 350.87 \text{ VOLTS}$$

DE ACUERDO CON EL DIAGRAMA:



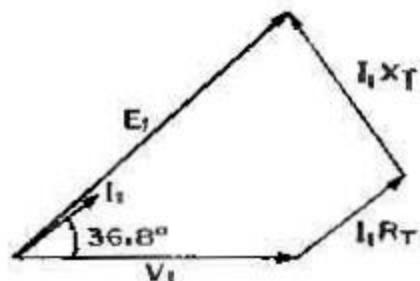
78 Conceptos generales de los transformadores

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \sqrt{(V_1 \cos 36.8 + I_1 R_T)^2 + (V_1 \sin 36.8 + I_1 X_T)^2} = \\
 &= \sqrt{(2200 \times 0.8 + 34.99)^2 + (2200 \times 0.6 + 350.87)^2} = \\
 &= 2452.20 \text{ VOLTS}
 \end{aligned}$$

LA REGULACIÓN ES:

$$\% \text{REG} = \frac{E_1 - V_1}{V_1} \times 100 = \frac{2452.2 - 2200}{2200} \times 100 = 11.46$$

c) PARA UN FACTOR DE POTENCIA 0.8 (+) :



$$\begin{aligned}
 E_1 &= \sqrt{(V_1 \cos 36.8 + I_1 R_T)^2 + (V_1 \sin 36.8 - I_1 X_T)^2} = \\
 &= \sqrt{(1794.99)^2 + (-969.13)^2} = 2040 \text{ VOLTS}
 \end{aligned}$$

LA REGULACIÓN ES:

$$\% \text{REG} = \frac{E_1 - V_1}{V_1} \times 100 = \frac{2040 - 2200}{2200} \times 100 = -7.27$$

EJEMPLO 1.23

CONSIDERANDO QUE EL VOLTAJE TERMINAL EN EL SECUNDARIO A PLENA CARGA DEL TRANSFORMADOR DEL EJEMPLO ANTERIOR ES DE 100 KVA:

CALCULE LA REGULACIÓN A:

- A) A FACTOR DE POTENCIA UNITARIO.
- B) A FACTOR DE POTENCIA 0.8 ADELANTADO.

SOLUCION

- A) CORRIENTE EN EL SECUNDARIO A CARGA PLENA:

$$I_2 = \frac{KVA}{KV_2} = \frac{10}{0.10} = 100 \text{ AMPERES.}$$

LA RESISTENCIA Y REACTANCIA EQUIVALENTES REFERIDAS AL SECUNDARIO SON:

$$R_T = R_2 + \frac{R_1}{A^2} = 0.03 + \frac{0.12}{22} = 0.06 \text{ OHMS}$$

$$X_T = X_2 + \frac{X_1}{A^2} = 0.06 + \frac{0.20}{22} = 0.011 \text{ OHMS}$$

LAS CAÍDA DE VOLTAJE PRODUCIDAS POR LA RESISTENCIA Y REACTANCIA EQUIVALENTES SON:

$$R_T I_2 = 0.06 \times 100 = 6 \text{ VOLTS}$$

$$X_T I_2 = 0.11 \times 100 = 11 \text{ VOLTS}$$

80 Conceptos generales de los transformadores

EL VOLTAJE EN VACÍO ES:

$$E_2 = \sqrt{(V_2 + I_2 R_T)^2 + (I_2 X_T)^2}$$

$$= \sqrt{(100 + 6)^2 + (11)^2} = 106.57 \text{ VOLTS}$$

$$\therefore \% \text{ REG} = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \times 100 = \frac{106.57 - 100}{100} \times 100$$

$$\therefore \% \text{ REG} = 6.57$$

b) CUANDO EL FP ES 0.8 (+)

$$E_s = \sqrt{(V_2 \cos 36.8^\circ + I_{SRES})^2 + (V_2 \sin 36.8^\circ + I_2 X_T)^2}$$

$$= \sqrt{(100 \times 0.8 - 6)^2 + (100 \times 0.6 - 11)^2} = 98.98 \text{ V}$$

Y LA REGULACIÓN VALE POR TANTO:

$$\% \text{ REG} = \frac{98.98 - 100}{100} \times 100 = - 1.02$$

C A P I T U L O 2

**POTENCIA Y RENDIMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES
MONOFASICOS Y TRIFASICOS**

CAPITULO 2

POTENCIA Y RENDIMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS Y TRIFASICOS

2.1. LA POTENCIA DE LOS TRANSFORMADORES.

COMO SE SABE, LA POTENCIA EN CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA ESTÁ DADA COMO EL PRODUCTO DE LA TENSIÓN POR LA CORRIENTE Y POR EL FACTOR DE POTENCIA, DE ACUERDO A LA EXPRESIÓN.

$$P = VI \cos \theta$$

ESTA FÓRMULA EXPRESA LA "POTENCIA REAL" QUE SE MIDE EN WATTS, EL PRODUCTO DEL VOLTAJE (SÓLO) POR LA CORRIENTE DA LA DENOMINADA POTENCIA APARENTE.

$$P = VI$$

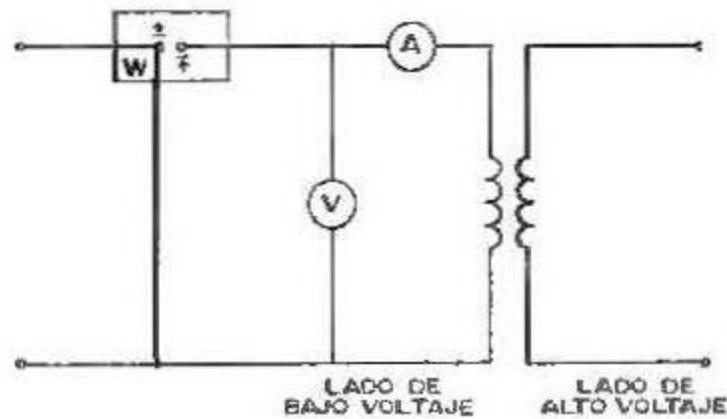
LAS NORMAS PARA TRANSFORMADORES CUANDO HABLAN DE POTENCIA NOMINAL, SE REFIEREN A UNA POTENCIA QUE ES EL PRODUCTO DE LA CORRIENTE POR EL VOLTAJE EN VACÍO. LA POTENCIA NOMINAL ES POR LO TANTO UNA "POTENCIA APARENTE" QUE ES LA MISMA, YA SEA QUE SE CONSIDERE EL DEVANADO PRIMARIO O EL DEVANADO SECUNDARIO. LA RAZÓN DE ESTA DEFINICIÓN QUE ES SÓLO CONVENCIONAL, SE DEBE AL HECHO DE QUE SE CARACTERIZA A LA MÁQUINA DESDE EL PUNTO DE VISTA DEL DIMENSIONAMIENTO. LAS PRESTACIONES DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA ESTÁN LIMITADAS POR EL CALENTAMIENTO DE SUS COMPONENTES, LAS CUALES ESTÁN CAUSADAS POR LAS PÉRDIDAS QUE TIENE. EN PARTICULAR, EN UN TRANSFORMADOR SE TIENEN LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO Y LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS.

84 Potencia y rendimiento de los transformadores

PARA EL NÚCLEO MAGNÉTICO, LAS PÉRDIDAS DEPENDE DE LA INDUCCIÓN-MAGNÉTICA B , LA CUAL ES PROPORCIONAL A LA TENSIÓN INDUCIDA, EN LOS DEVANADOS, LAS PÉRDIDAS SON PROPORCIONALES AL CUADRADO DE LA CORRIENTE.

LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO DEL TRANSFORMADOR, PERMITE OBTENER LAS PÉRDIDAS A PLENA CARGA CON LOS DEVANADOS, A PARTIR DE ÉSTAS SE PUEDEN CALCULAR PARA CUALQUIER OTRO VALOR DE CARGA.

LA LLAMADA PRUEBA DE "CIRCUITO ABIERTO" EN EL TRANSFORMADOR, PERMITE OBTENER EL VALOR DE LAS LLAMADAS PÉRDIDAS EN VACÍO O PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO, QUE COMO SE MENCIONÓ, CONSISTEN DE DOS PARTES, LAS PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS Y LAS PÉRDIDAS POR CORRIENTE CIRCULANTES



CONEXIONES PARA LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

EN LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO, EL DEVANADO QUE SE ALIMENTA, -
ES POR LO GENERAL EL DE BAJO VOLTAJE, DEBIDO A QUE RESULTA EL --
MÁS CONVENIENTE PARA LA MEDICIÓN

LA EFICIENCIA EN LOS TRANSFORMADORES.

EN GENERAL, LA EFICIENCIA DE CUALQUIER MÁQUINA ELÉCTRICA, SE --
CALCULA COMO:

$$\text{EFICIENCIA} = \frac{\text{POT. SALIDA}}{\text{POT. ENTRADA}} = \frac{\text{POT. SALIDA}}{\text{POT. SALIDA} + \text{PÉRDIDAS}}$$

EN VIRTUD DE QUE LA CAPACIDAD DE UN TRANSFORMADOR ESTÁ BASADA EN
SU POTENCIA DE SALIDA, ESTA ECUACIÓN SE PUEDE ESCRIBIR COMO:

$$\text{EFICIENCIA} = \frac{\text{KVA SALIDA X FP}}{\text{KVA SALIDA POR FP} \quad \text{PERD. NÚCLEO} + \text{PERD. DEVANADOS}}$$

EJEMPLO 2.1.

A UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 10 KVA, 2200/220 VOLTS, 60 Hz SE
LE HICIERON LAS PRUEBAS DE VACÍO Y DE CORTO CIRCUITO Y SE OBTU-
VIERON LOS DATOS QUE SE DAN A CONTINUACIÓN. CALCULAR LOS VALO-
RES DE EFICIENCIA A PLENA CARGA Y A LA MITAD DE LA CARGA PARA --
FACTORES DE POTENCIA UNITARIO Y 0.8 ATRASADO.

LOS DATOS DE LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO (VACÍO) CON EL DEVANA-
DO DE ALTO VOLTAJE ABIERTO SON:

$$V_0 = 220 \text{ VOLTS}$$

$$I_0 = 1.5 \text{ A}$$

$$P_0 = 153 \text{ WATTS}$$

86 Potencia y rendimiento de los transformadores

LOS DATOS DE LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO CON EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE EN CORTO CIRCUITO SON LOS SIGUIENTES:

$$V_{CC} = 115 \text{ VOLTS} \quad I = I_{\text{NOMINAL}}$$

$$P_{CC} = 224 \text{ WATTS}$$

A) PARA LAS CONDICIONES DE PLENA CARGA

$$P_0 = 153 \text{ WATTS}$$

$$\underline{P_{CC}} = \underline{224 \text{ WATTS}}$$

$$\text{PÉRD.TOT. } 377 \text{ WATTS}$$

LA EFICIENCIA A FACTOR DE POTENCIA UNITARIO.

$$\text{EFIC.} = \frac{10,000 \times 100}{10,000 + 377} = \frac{10,000}{10,377} \times 100$$

$$\text{EFIC.} = 96.4 \%$$

PARA FACTOR DE POTENCIA 0.8 ATRASADO LAS PÉRDIDAS TOTALES --
A PLENA CARGA PERMANECEN CONSTANTES, PERO LAS POTENCIAS DE --
ENTRADA Y SALIDA CAMBIAN.

$$\text{EFIC.} = \frac{10,000 \times 0.8}{10,000 \times 0.8 + 377} \times 100$$

$$\text{EFIC.} = 95.8\%$$

B) PARA LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN A LA MITAD DE SU CARGA.

DEBIDO A QUE LA CORRIENTE EN AMBOS DEVANADOS REPRESENTA LA -

MITAD DE LA CORRIENTE DE PLENA CARGA, LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS QUE VARÍAN CON EL CUADRADO DE LA CORRIENTE, SON POR LO TANTO UNA CUARTA PARTE DE LOS VALORES A PLENA CARGA.

LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO PERMANECEN CONSTANTES PARA CUALQUIER VALOR DE CARGA

$$P_0 = 153 \text{ WATTS.}$$

$$P_{CC} = 1/4 (224) = 56 \text{ WATTS}$$

$$\text{PÉRD. TOTALES} = 153 + 56 = 209 \text{ WATTS}$$

A FACTOR DE POTENCIA UNITARIO Y 50% DE CARGA

$$\text{EFIC.} = \frac{5000}{5000 + 209} \times 100$$

$$\text{EFIC.} = \frac{5000}{5209} \times 100 = 96\%$$

A FACTOR DE POTENCIA 0.8 ATRASADO Y 50% DE CARGA.

$$\text{EFIC.} = \frac{5000 \times 0.8}{5000 \times 0.8 + 209} \times 100$$

$$\text{EFIC.} = \frac{4000}{4209} \times 100$$

$$\text{EFIC.} = 95\%$$

88 Potencia y rendimiento de los transformadores

EJEMPLO 2.2.

UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 10 KVA 2200/110 VOLTS, 60 Hz, SE LE HICIERON PRUEBAS Y SE OBTUVIERON LOS SIGUIENTES DATOS:

PRUEBA DE VACÍO.

$$V_0 = 110 \text{ VOLTS.}$$

$$I_0 = 18 \text{ AMPERES.}$$

$$P_0 = 68 \text{ WATTS.}$$

PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.

$$V_{CC} = 112 \text{ VOLTS.}$$

$$I_{CC} = 4.55 \text{ AMPERES.}$$

$$P_{CC} = 218 \text{ WATTS.}$$

LA RESISTENCIA DEL DEVANADO PRIMARIO A 20° C ES DE 5.70 OHMS.

CALCULAR:

a) Z_T A 20° C (REFERIDOS AL PRIMARIO)

b) LOS VALORES DE R_1 , R_2 , Z_M , Z_2 .

$$a) Z_T = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{112}{4.55} = 25.6 \text{ OHMS}$$

$$R_T = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} = \frac{218}{(4.55)^2} = 10.5 \text{ OHMS}$$

$$X_T = \sqrt{(Z_T)^2 - (R_T)^2}$$

$$X_T = \sqrt{(25.6)^2 - (10.5)^2}$$

$$X_T = 26.3 \text{ OHMS}$$

b) $R_T = A_2 R_2 + R_1$

$$R_2 = \frac{R_T - R_1}{A_2}$$

$$R_2 = \frac{10.5 - 5.70}{(20)^2}$$

$$R_2 = 0.012 \text{ OHMS}$$

EJEMPLO 2.3.

SE PROBÓ UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 75 KVA, 230/115 VOLTS 60 HZ Y SE OBTUVIERON LOS SIGUIENTES DATOS.

PRUEBA DE VACÍO

$$V_o = 115 \text{ VOLTS}$$

$$I_o = 8.15 \text{ A}$$

$$P_o = 0.75 \text{ KW}$$

PRUEBA DE CIRCUITO CORTO

$$V_{cc} = 943 \text{ VOLTS}$$

$$I_{cc} = 326 \text{ AMPERES}$$

$$P_{cc} = 1.2 \text{ KW}$$

A) LA EFICIENCIA Y REGULACIÓN A PLENA CARGA Y FP = 1.0

B) LA EFICIENCIA Y REGULACIÓN A PLENA CARGA Y FP = 0.8 ATRASADO.

C) LA EFICIENCIA A 1/2, 3/4 DE CARGA Y FP = 0.8 ATRASADO

90 Potencia y rendimiento de los transformadores

SOLUCION

A) LA EFICIENCIA Y REGULACION A PLENA CARGA.

$$Z_T = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{9.43}{326} = 0.0289 \Omega$$

$$R_T = \frac{P_{CC}}{I_{22}^2} = \frac{1200}{326^2} = 0.0112 \Omega$$

$$X_T = Z_T^2 - R_T^2 = 0.0282 - 0.0112^2 = 0.0266$$

LAS CAÍDAS DE VOLAJE PRODUCIDAS SON:

$$I_1 R_T = 326 \times 0.0112 = 3.65 \text{ VOLTS}$$

$$I_1 X_T = 326 \times 0.0266 = 8.67 \text{ VOLTS}$$

LA TENSIÓN INDUCIDA EN EL PRIMARIO

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(V_1 + I_1 R_T)^2 + (I_1 X_T)^2} \\ &= \sqrt{(230 + 3.65)^2 + (8.67)^2} = 232 \text{ VOLTS} \end{aligned}$$

POR TANTO:

$$\% \text{ REG.} = \frac{E_1 - V_1}{V_1} \times 100 = \frac{232 - 230}{230} \times 100 = 0.86$$

LA EFICIENCIA ES:

$$N = \frac{P_{SALIDA}}{P_{SALIDA} + P_{HIERRO} + P_{COBRE}}$$

$$= \frac{75}{75 + 1.2 + 0.75}$$

$$N = 97\%$$

- b) FACTOR DE POTENCIA A PLENA CARGA Y F = 0.8 ATRASADO

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(V_1 \cos 36.8)^2 + (V_1 \sin 36.8 + I_1 X_T)^2 + (I_1 R_T)^2} \\ &= \sqrt{(230 \times 0.8 + 3.65)^2 + (230 \times 0.6 + 8.67)^2} \\ &= 272 \text{ VOLTS} \end{aligned}$$

POR TANTO LA REGULACIÓN ES:

$$\% \text{ REG.} = \frac{E_1 - V_1}{V_1} \times 100 = \frac{272 - 230}{230} \times 100 = 18.26$$

LA EFICIENCIA RESULTA AHORA:

$$N = \frac{75 \times 0.8}{75 \times 0.8 + 0.75 + 1.2} = 0.96$$

- c) SI EL FACTOR DE POTENCIA ES AHORA 0.8 (-), LA EFICIENCIA PARA 1/2 DE CARGA ES:

$$\begin{aligned} N &= \frac{1/2 \text{ PSALIDA}}{1/2 \text{ PSALIDA} + P_{IERRO} + (1/2)^2 \text{ PCOBRE}} \\ &= \frac{0.5 \times 75 \times 0.8}{0.5 \times 75 \times 0.8 + 0.75 + 0.25 \times 1.2} = 0.966 \end{aligned}$$

LA EFICIENCIA PARA 3/4 CARGA Y F = 0.8 ATRASADO

$$\begin{aligned} N &= \frac{3/4 \text{ PSALIDA}}{3/4 \text{ PSALIDA} + P_{IERRO} + (3/4)^2 \text{ PCOBRE}} \\ &= \frac{0.75 \times 75 \times 0.8}{0.75 \times 75 \times 0.8 + 0.75 + 0.5625 \times 1.2} = 0.969 \end{aligned}$$

92 Potencia y rendimiento de los transformadores

2.3. EFICIENCIA DIARIA DE LOS TRANSFORMADORES.

DEPENDIENDO DE LA APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES, CON FRECUENCIA SE USAN PARA OPERAR LAS 24 HORAS POR DÍA, AÚN CUANDO LA CARGA NO SEA CONTINUA EN EL PERÍODO TOTAL DE OPERACIÓN. EN ESTAS CONDICIONES UN TRANSFORMADOR TIENE DOS CONCEPTOS DE EFICIENCIA, UNA GLOBAL PARA CONDICIÓN DE PLENA CARGA Y OTRO PARA DISTINTAS CARGAS AL DÍA, ES DECIR, LA LLAMADA EFICIENCIA DIARIA. ESTA EFICIENCIA DIARIA SE EXPRESA COMO LA RELACIÓN DE LA ENERGÍA DE SALIDA A LA ENERGÍA DE ENTRADA DURANTE EL PERÍODO DE 24 HORAS.

EJEMPLO 2.4.

CALCULAR LA EFICIENCIA DIARIA DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 10 KVA, 2220/220 VOLTS, 60 Hz QUE TIENE PÉRDIDAS EN VACÍO DE 153 WATTS Y PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS DE 224 WATTS. EL CICLO DE OPERACIÓN ES EL SIGUIENTE:

2 HORAS A 5/4 DE SU CARGA.

6 HORAS A PLENA CARGA.

8 HORAS A LA MITAD DE SU CARGA.

4 HORAS A 1/4 DE CARGA.

4 HORAS EN VACÍO.

SOLUCIÓN

LA ENERGÍA DE SALIDA DEL TRANSFORMADOR ES:

$$\frac{5}{4} (10000)^2 = 25 \text{ 000 WATTS-HORA}$$

$$10\ 000 \times 6 = 60,000 \text{ WATTS-HORA}$$

$$5\ 000 \times 8 = 40,000 \text{ WATTS-HORA}$$

$$2,500 \times 4 = 10,000 \text{ WATTS-HORA}$$

$$\text{SALIDA TOTAL} = 135\ 000 \text{ WATTS-HORA}$$

LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN EL COBRE SON:

A 5/4 DE CARGA:

$$(514)^2 (224) (2) = 700 \text{ WATT-HORA}$$

$$(224) (6) = 1344 \text{ WATT-HORA}$$

$$(1/2)^2 (224) (8) = 448 \text{ WATT-HORA}$$

$$(1/4)^2 (224) (4) = \underline{56 \text{ WATT-HORA}}$$

$$\text{PÉRDIDAS TOTALES DE ENERGÍA} = 2548 \text{ WATT-HORA}$$

ENERGÍA EN LOS DEVANADOS.

LAS PÉRDIDAS TOTALES DE ENERGÍA SON:

$$3672 + 2548 = 6220 \text{ WATT-HORA}$$

LA ENERGÍA DE ENTRADA TOTAL ES:

$$1350 + 6220 = 14122 \text{ kW-HORA}$$

94 Potencia y rendimiento de los transformadores

LA EFICIENCIA DIARIA ES ENTONCES:

$$\text{EFIC.} = \frac{13500}{14122} \times 100$$

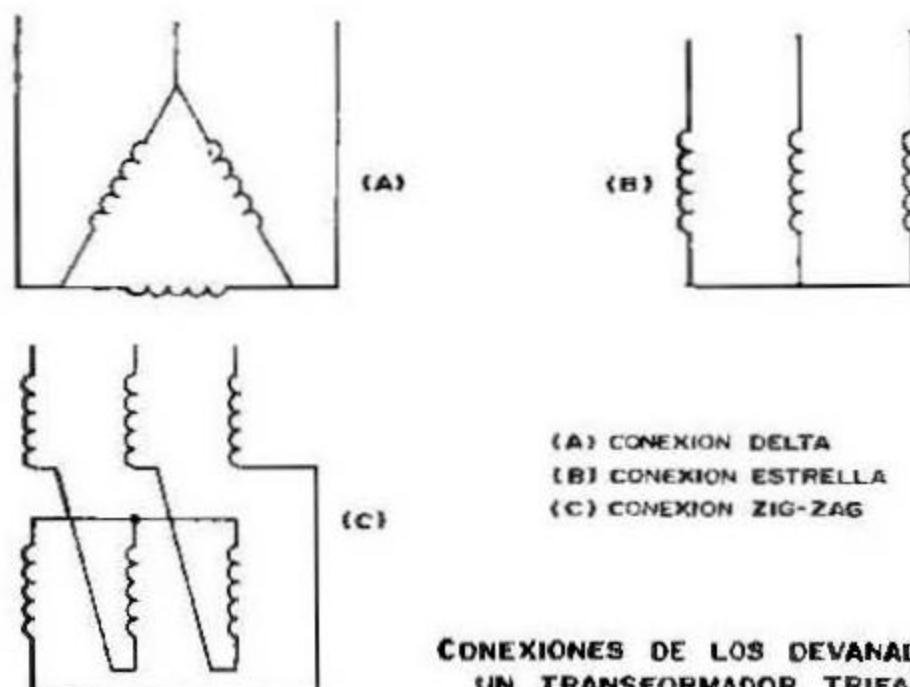
$$\text{EFIC.} = 95.6 \%$$

2.4. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

LA MAYORÍA DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN SON TRIFÁSICAS Y TAMBIÉN UN BUEN NÚMERO DE USUARIOS DE TIPO COMERCIAL E INDUSTRIAL HACEN USO DE SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN TRIFÁSICOS. ESTO HACE QUE SEA NECESARIO CONSIDERAR LA IMPORTANCIA QUE TIENEN LOS SISTEMAS TRIFÁSICOS EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS Y EN CONSECUENCIA LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN ESTAS

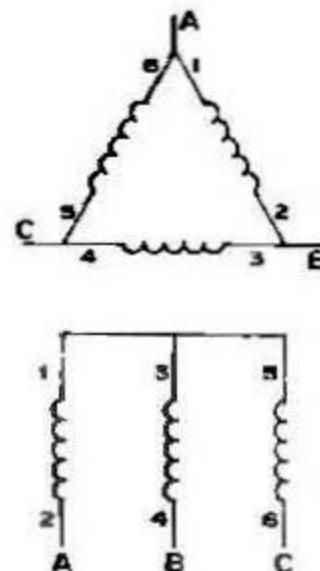
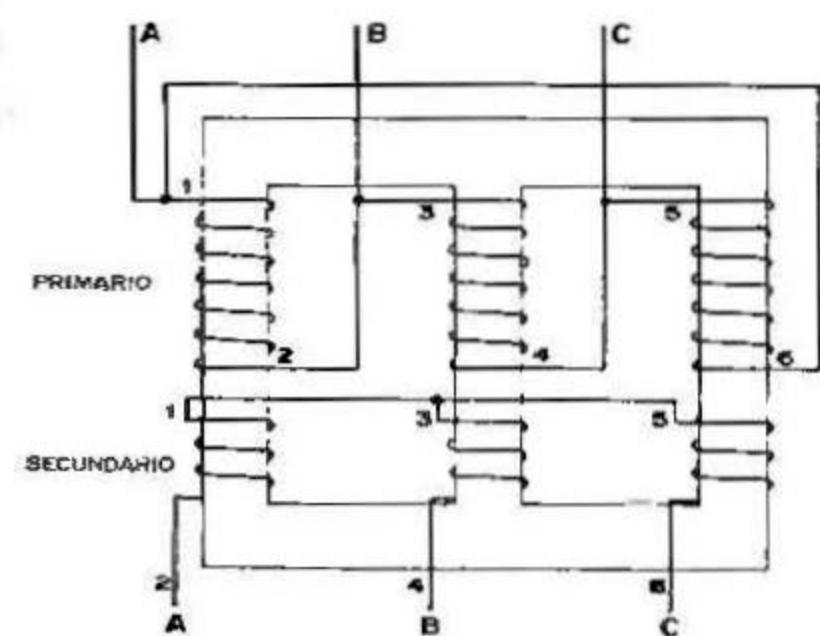
LA ENERGÍA DE UN SISTEMA TRIFÁSICO SE PUEDE TRANSFORMAR, YA SEA POR MEDIO DE TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS (FORMANDO UN BANCO TRIFÁSICO) O BIEN MEDIANTE EL USO DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. POR RAZONES DE TIPO ECONÓMICO, DE ESPACIO EN LAS INSTALACIONES Y CONFIABILIDAD EN LOS EQUIPOS, SE PUEDE DECIR, QUE EN GENERAL, ES PREFERIDA LA SOLUCIÓN DEL USO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS QUE REQUIEREN DE ESTE TIPO DE ALIMENTACIÓN.

LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS NORMALMENTE ESTÁN CONSTITUIDOS DE UN NÚCLEO QUE TIENE 3 PIERNAS O COLUMNAS, SOBRE CADA UNA DE LAS CUALES SE ENCUENTRAN DISPUESTOS LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DE LA MISMA FASE. ESTOS DEVANADOS PARA CADA UNA DE LAS FASES SE PUEDEN CONECTAR EN ESTRELLA, DELTA A ZIG-ZAG.



CONEXIONES DE LOS DEVANADOS DE UN TRANSFORMADOR TRIFASICO

LAS CONEXIONES ENTRE LOS DEVANADOS SECUNDARIOS PUEDEN SER IGUALES O DISTINTAS DE AQUELLAS QUE SE USEN ENTRE LAS FASES DEL PRIMARIO, POR LO QUE EN TEORIA PUEDE HABER NUEVE COMBINACIONES DE CONEXIÓN. EN LA PRÁCTICA SE PUEDEN USAR LAS SIGUIENTES CONEXIONES ENTRE LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO: ESTRELLA-ESTRELLA, DELTA-ESTRELLA, ESTRELLA/ZIG-ZAG, ESTRELLA-DELTA Y DELTA-DELTA.

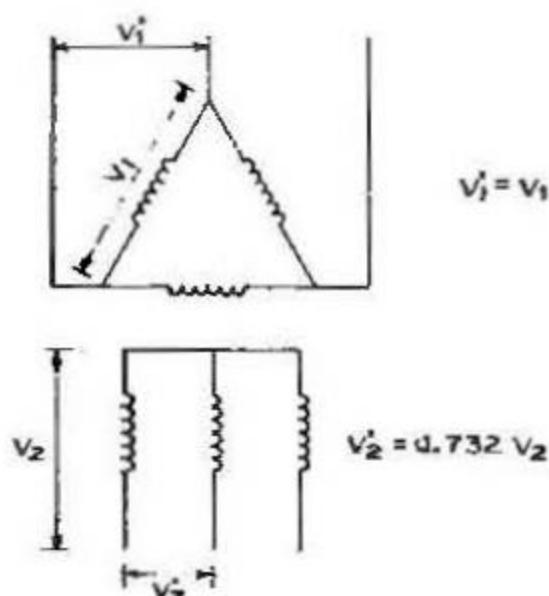
CONEXION DELTA-ESTRELLA
PARA UN TRANSFORMADOR TRIFASICO

96 Potencia y rendimiento de los transformadores

2.4.1. RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN PARA LOS TRANSFORMADORES -- TRIFÁSICOS.

CUANDO LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIENEN CONEXIONES DISTINTAS, LA RELACIÓN ENTRE LAS DOS TENSIONES DE VACÍO (SIN CARGA) EN LAS TERMINALES, NO ES IGUAL A LA RELACIÓN ENTRE LAS ESPIRAS DE UNA FASE PRIMARIA Y SECUNDARIA. ESTO DEPENDE DE LOS TIPOS DE CONEXIONES QUE SE SELECCIONEN. DEBIDO A QUE, COMO SE HA NOTADO, CADA TIPO DE CONEXIÓN CORRESPONDE UNA DETERMINADA RELACIÓN ENTRE LAS TENSIONES CONCATENADAS Y LAS TENSIONES DE FASE.

SI SE CONSIDERA POR EJEMPLO UN TRANSFORMADOR CON DEVANADO PRIMARIO EN DELTA Y DEVANADO SECUNDARIO EN ESTRELLA. SI SE DESIGNAN POR V_1 Y V_2 LAS TENSIONES DE UNA FASE DEL PRIMARIO Y DE UNA FASE DEL SECUNDARIO RESPECTIVAMENTE Y CON V'_1 Y V'_2 , LOS VOLTAJES CONCATENADOS (INDICADOS) EN TERMINALES DEL PRIMARIO Y SECUNDARIO, RESPECTIVAMENTE,



RELACION ENTRE LAS TENSIONES DE FASE Y DE LINEA PARA UN TRANSFORMADOR CON DEVANADO PRIMARIO EN DELTA Y SECUNDARIO EN ESTRELLA.

EN EL DEVANADO PRIMARIO, POR ESTAR CONECTADO EN DELTA SE TIENE:

$$V'_1 = V_1$$

EN EL DEVANADO SECUNDARIO CONECTADO EN ESTRELLA:

$$V'_2 = \sqrt{3} V_2 = 1.732 V_2, \text{ POR LO TANTO, LA RELACION -}$$

ENTRE LAS TENSIONES EN VACÍO EN LAS TERMINALES SERÁ:

$$\frac{V'_1}{V'_{20}} = \frac{V_1}{1.732 V_{20}}$$

HASTA AHORA, SE HA HABLADO DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS, Y EN ESTOS, LA RELACIÓN ENTRE LAS TENSIONES PRIMARIA Y SECUNDARIA EN VACÍO SE LE CONOCE COMO "RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN" (SE DESIGNA CON LA LETRA A) Y ESTA RELACIÓN ES VÁLIDA TAMBIÉN PARA EL NÚMERO DE ESPIRAS PRIMARIAS N_1 Y SECUNDARIAS N_2 . SI SE LE QUIERE DAR EL SIGNIFICADO DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN A LA RELACIÓN ENTRE ESPIRAS:

$$A = \frac{N_1}{N_2}$$

98 Potencia y rendimiento de los transformadores

PARA EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO SE ESTÁ CONSIDERANDO:

$$\frac{V'_1}{V'_{20}} = \frac{V_1}{1.732 V_{20}} = \frac{N_1}{1.732 N_2} = \frac{A}{1.732}$$

LO ANTERIOR SIGNIFICA QUE CON ESTAS CONEXIONES (DELTA/ESTRELLA), PARA OBTENER EN LAS TERMINALES UNA DETERMINADA RELACIÓN, SE DEBE CONSTRUIR EL DEVANADO PRIMARIO CON UN NÚMERO DE ESPIRAS MAYOR DE 1.732 VECES QUE AQUELLAS DEL TRANSFORMADOR QUE TIENE UNA CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA, EN DONDE LA RELACIÓN ENTRE LAS TENSIONES EN TERMINALES ES:

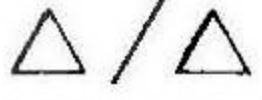
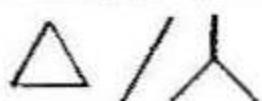
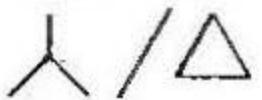
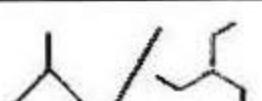
$$V'_1 = 1.732 V_1, V'_{20} = 1.732 V_{20}$$

DE DONDE:

$$\frac{V'_1}{V'_{20}} = \frac{1.732 V_1}{1.732 V_{20}} = \frac{V_1}{V_{20}} = A$$

TABLA 2.1.

RELACIONES ENTRE LAS ESPIRAS CON RELACION AL TIPO DE CONEXION DE LOS DEVANADOS

CONEXIONES PRIMARIO/SECUNDARIO	DESIGNACION GRAFICA	RELACION ENTRE ESPIRAS DE UNA - fase a = $\frac{N_1}{N_2}$ PARA TENER UNA DE TERMINADA RELACION ENTRE LAS TENSIONES EN VACIO	TENSION SECUNDARIA EN VACIO OBTENIDA EN TERMINALES DADA LA TENSION EN TERMINALES Y LA RELACION DE UNA FASE
ESTRELLA/ESTRELLA		$a = \frac{V_1}{V_{20}}$	$V_{20} = \frac{V_1}{a}$
DELTA/DELTA		$a = \frac{V_1}{V_{20}}$	$V_{20} = \frac{V_1}{a}$
DELTA/ESTRELLA		$a = 1.73 \frac{V_1}{V_{20}}$	$V_{20} = 1.73 \frac{V_1}{a}$
ESTRELLA/DELTA		$a = \frac{1}{1.73} \frac{V_1}{V_{20}}$	$V_{20} = \frac{V_1}{1.73 a}$
ESTRELLA/ZIG-ZAG		$a = 0.86 \times \frac{V_1}{V_{20}}$	$V_{20} = 0.86 \frac{V_1}{a}$

2.4.2. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE CONEXIONES.

LA SELECCIÓN DE LA COMBINACIÓN DE LAS CONEXIONES DEPENDE DE CONSIDERACIONES ECONÓMICAS Y DE LAS EXIGENCIAS QUE IMPONE LA OPERACIÓN. POR EJEMPLO, EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN QUE USAN TRES FASES CON NEUTRO, ES NECESARIO EL USO DE DEVANADOS SECUNDARIOS EN ESTRELLA, YA QUE ÉSTOS TIENEN

100 Potencia y rendimiento de los transformadores

UN PUNTO ACCESIBLE PARA EL NEUTRO.

EN LOS TRANSFORMADORES CON DEVANADO PRIMARIO EN DELTA Y SECUNDARIO EN ESTRELLA/ O CON PRIMARIO EN ESTRELLA Y SECUNDARIO EN ZIG-ZAG LOS DESEQUILIBRIOS O DESBALANCES EN LA CARGA (CUANDO LAS FASES NO SE ENCUENTRAN IGUALMENTE CARGADAS), REPERCUTEN MENOS SOBRE LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN PRIMARIA.

CON RESPECTO A LOS EFECTOS ECONÓMICOS, SE PUEDE DECIR COMO CRITERIO GENERAL QUE LOS DEVANADOS EN DELTA SON MÁS COSTOSOS QUE AQUELLOS CONECTADOS EN ESTRELLA, REQUIRIENDO SE EMPLEAR CONDUCTORES DE DIÁMETRO MENOR O DEBIENDO EMPLEAR UN MAYOR NÚMERO DE ESPIRAS.

2.4.3. DEFASAMIENTO ENTRE LAS FASES.

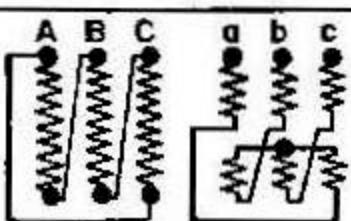
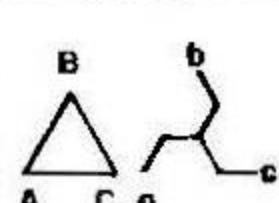
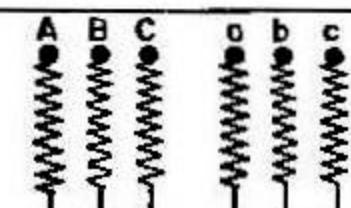
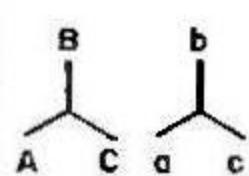
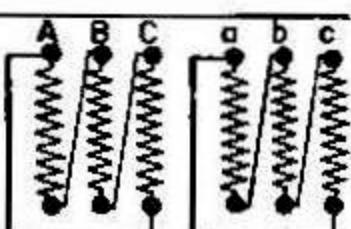
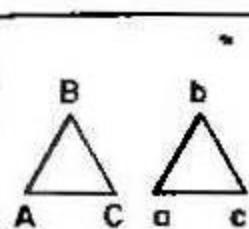
EN LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS, TIENE IMPORTANCIA ENTRE OTRAS COSAS, EL EVENTUAL DEFASAMIENTO DE FASES DE LA TENSIÓN SECUNDARIA RESPECTO A LA TENSIÓN PRIMARIA, QUE PUEDE AFECTAR A LA CONEXIÓN EN PARALELO DE LOS TRANSFORMADORES.

EN LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EN CONEXIÓN TRIFÁSICA O LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS, LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO QUE TIENEN LA MISMA CONEXIÓN (POR EJEMPLO ESTRELLA/ESTRELLA, DELTA/DELTA) LA TENSIÓN SECUNDARIA PUEDE ESTAR SÓLO EN FASE (A 0°) O EN POSICIÓN DE FASE,

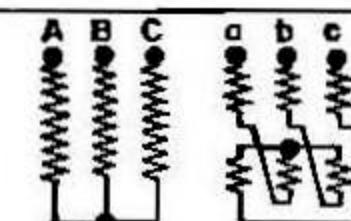
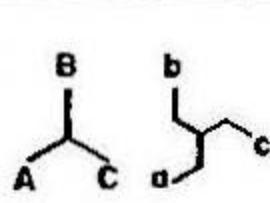
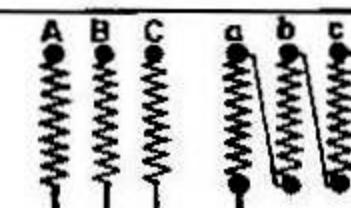
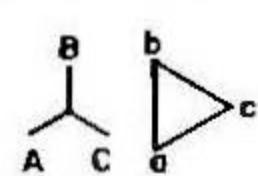
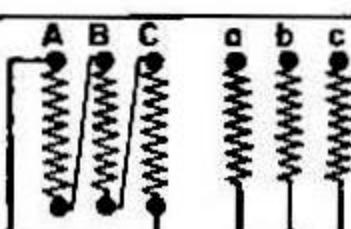
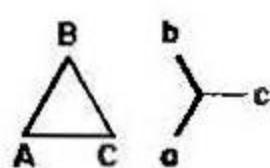
TABLA 2.2

**CONEXIONES EN LOS
TRANSFORMADORES TRIFASICOS**

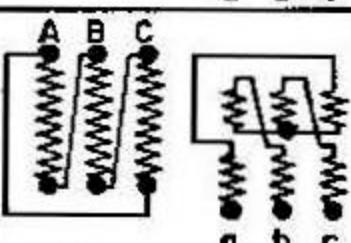
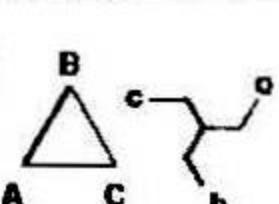
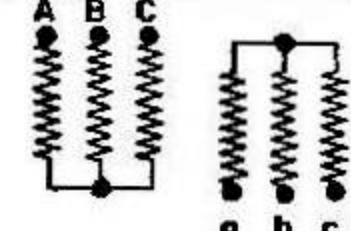
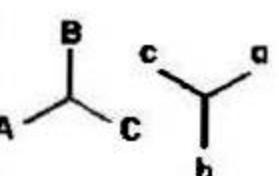
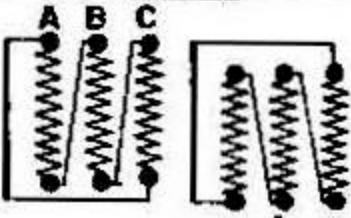
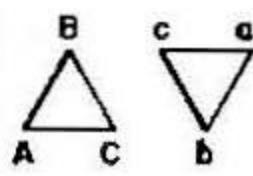
DEFASAMIENTO ANGULAR 0°



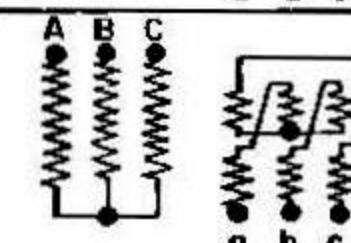
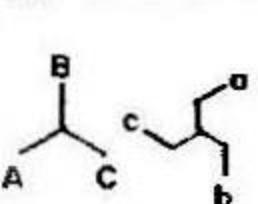
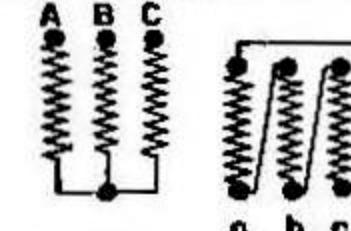
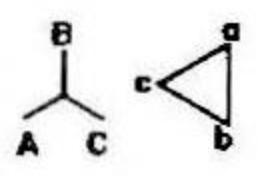
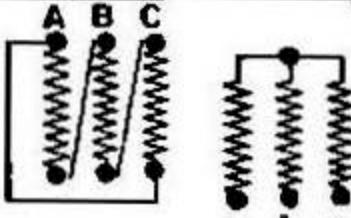
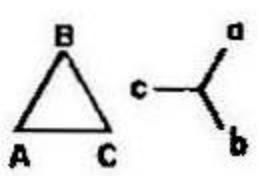
DEFASAMIENTO ANGULAR 330°



DEFASAMIENTO ANGULAR 180°



DEFASAMIENTO ANGULAR 150°



ES DECIR, A 180° .

EN CAMBIO, LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CONEXIÓN MIXTA EN LOS DEVANADOS (POR EJEMPLO ESTRELLA/DELTA, DELTA/ESTRELLA, ESTRELLA/ZIG-ZAG), ESTE DEFASAMIENTO ANGULAR NO PUEDE SER NUNCA 0° O 180° PERO DEBE SER MÚLTIPLO DE 30° .

EXAMINANDO VECTORIALMENTE TODAS LAS COMBINACIONES DE CONEXIONES TRIFÁSICAS, RESULTA QUE INCLUYENDO EL DEFASAMIENTO DE 0° , PUEDEN HABER 12 DISTINTOS VALORES DE DEFASAMIENTO ANGULAR DE 30 GRADOS EN 30 GRADOS. LOS VALORES MÁS USUALES DE DEFASAMIENTO ANGULAR SE DAN EN LA TABLA 2.2.

EJEMPLO 2.5.

SE TIENE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO ENFRIADO POR ACEITE-QUE EN SU DEVANADO PRIMARIO ESTÁ CONECTADO EN DELTA Y TIENE 13 800 VOLTS CON 2 866 ESPIRAS. CALCULAR EL NÚMERO DE ESPIRAS QUE DEBE TENER EL SECUNDARIO CONECTADO EN ESTRELLA, PARA TENER ENTRE TERMINALES UNA TENSIÓN DE 440 VOLTS.

SOLUCIÓN

COMO EL DEVANADO PRIMARIO ESTÁ CONECTADO EN DELTA:

$$V_1 = V'_1 = 13\ 800 \text{ VOLTS.}$$

PARA EL DEVANADO SECUNDARIO CONECTADO EN ESTRELLA:

$$V_{20} = V_2 / \sqrt{3} = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254.04 \text{ VOLTS}$$

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN:

$$A = \frac{V_1}{V_{20}} = \frac{13800}{254.04} = 54.32$$

EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO SECUNDARIO:

$$N_2 = \frac{N_1}{A} = \frac{2866}{54.32} = 53 \text{ ESPIRAS}$$

EJEMPLO 2.6

SE TIENE UN PEQUEÑO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 5 KVA CON TENSIÓN NOMINAL DE 6000/230 VOLTS EN CONEXIÓN DELTA/ESTRELLA.

REVISANDO EL DEVANADO SECUNDARIO, SE ENCUENTRA QUE ESTÁ FORMADO POR 120 ESPIRAS/FASE DE CONDUCTOR DE COBRE DE 2.8 MM DE DIÁMETRO QUE CONSULTANDO TABLAS, TIENE UNA SECCIÓN DE 6.2 MM². SI SE QUIERE OPERAR EL DEVANADO SECUNDARIO A 440 VOLTS, INDICAR QUÉ MODIFICACIONES SE DEBEN HACER.

104 Potencia y rendimiento de los transformadores

SOLUCION

PARA NO VARIAR LA INDUCCIÓN, SE DEBE DEJAR SIN MODIFICAR EL DEVANADO PRIMARIO. EN CAMBIO, ES NECESARIO AUMENTAR EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO SECUNDARIO EN PROPORCIÓN AL AUMENTO DE VOLTAJES POR FASE.

LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO SECUNDARIO SE PUEDE REDUCIR ALREDEDOR DE UNA PROPORCIÓN INVERSA, DEBIDO A QUE EN ESTA PROPORCIÓN DISMINUYE LA CORRIENTE.

EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL SECUNDARIO PARA EL NUEVO DEVANADO ES:

$$N'_2 = N_2 \frac{V'_2}{V_2} = 120 \times \frac{440}{230} = 230 \text{ ESPIRAS}$$

LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR DEL NUEVO DEVANADO ES:

$$S'_2 = S_2 \frac{V'_2}{V_2} = 6.2 \times \frac{230}{440} = 3.24 \text{ MM}^2$$

EJEMPLO 2.7

LOS DATOS DE PRUEBA DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE 75 KVA, 3000/216-125 VOLTS 60 Hz CONEXIÓN DELTA-ESTRELLA SON LOS SIGUIENTES:

PRUEBA DE VACÍO.

$$V_0 = 216 \text{ VOLTS.}$$

$$I_0 = 15.3 \text{ AMPERES.}$$

$$P_0 = 800 \text{ WATTS.}$$

PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.V_{CC} = 65 VOLTS.I_{CC} = 14.6 AMPERES.P_{CC} = 1350 WATTS.

LA RESISTENCIA MEDIDA ENTRE TERMINALES DEL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE A UNA TEMPERATURA AMBIENTE DE 10 °C FUE DE - = 0.0058 OHMS.

CALCULE:

- A) Z_T, R_T, X_T A 20 °C (REFERIDOS AL PRIMARIO)
- B) CORREGIR LOS VALORES OBTENIDOS EN EL INCISO ANTERIOR A 75 °C.
- C) %R, %Z, %X.
- D) EFICIENCIA A 75% DE CARGA Y FP = 1.0
- E) EFICIENCIA A 50% DE CARGA Y FP = 0.8 ATRASADO.
- F) REGULACIÓN A PLENA CARGA Y FP = 1.0
- G) REGULACIÓN A PLENA CARGA Y FP = 0.8 ATRASADO
- H) OBTENER LOS VALORES DE RESISTENCIA POR FASE A 20° C EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO.

SOLUCION

$$A) P_{CC} = I_{CC}^2 R_T \therefore R_T = \frac{P_{CC}}{3I_{CC}^2} = \frac{1350}{3 \times (14.6)^2} = 2.12$$

$$R_T = 2.12 \text{ OHMS}$$

$$B) V_{CC} = I_{CC} Z_T \therefore Z_T = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} = \frac{65}{14.6} = 4.45 \text{ OHMS}$$

106 Potencia y rendimiento de los transformadores

$$Z_{EQ.} = 4.45 \text{ OHMS}$$

$$X_T = \sqrt{(4.45)^2 - (2.12)^2}$$

$$X_T = 3.9 \text{ OHMS}$$

$$R_{T75^\circ} = 1.22 \times 2.12 = 2.58 \text{ OHMS}$$

$$Z_{T75^\circ} = 1.22 \times 4.45 = 5.42 \text{ OHMS}$$

$$I_1 = \frac{75000}{\sqrt{3} \cdot 3000} = 14.4 \text{ AMP.}$$

$$\% R = \frac{2.58 \times 14.4}{3000} \times 100 = 1.24$$

$$\% X = \frac{4.76 \times 14.4}{3000} \times 100 = 2.28$$

$$X = 2.28 \%$$

$$\% Z = \frac{5.42 \times 14.4}{3000} \times 100 = 2.61$$

$$Z = 2.61\%$$

b) $P_{SAL} = 75 \times 0.75 \times 10^3 = 56.200 \text{ W}$

$$P = 800 \text{ W}$$

$$P_{DW} = \left(\frac{3}{4}\right)^2 \times 1350 = 760 \text{ W}$$

$$\text{EFIC } 3/4 = \frac{56200 \times 100}{56200 + 800 + 760} = 98\%$$

$$P_{SAL} = 0.5 \times 75.000 \times 0.8 = 30.000 \text{ W}$$

$$P_0 = 800 \text{ W}$$

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)^2 1350 = 335 \text{ W}$$

$$\text{EFIC } 1/2 = \frac{30,000 \times 100}{30,000 + 800 + 335} = 96.5$$

$$\text{EFIC } 1/2 = 96.5 \%$$

$$RI_1 = 14.44 \times 258 = 37.4 \text{ Volts}$$

$$XI_1 = 14.44 \times 4.76 = 68.6 \text{ Volts}$$

$$\% \text{ REG.} = \frac{E_1 - V_1}{V_1} \times 100$$

$$I_P = \sqrt{(3037)^2 + (68.6)^2} = 3087 \text{ Volts}$$

$$\% \text{ REG.} = \frac{3037 - 3000}{3037} 100 = 1.23$$

$$\text{c) } RI_1 = 14.4 \times 2.58 = 37.4 \text{ V}$$

$$XI_1 = 14.4 \times 4.76 = 68.6 \text{ V}$$

$$\% \text{ REG.} = \frac{E_1 - V_1}{V_1} 100$$

$$E_1 = \sqrt{(3037)^2 + (68.6)^2} = 3037 \text{ V}$$

$$\% \text{ REG.} = \frac{3037 - 3000}{3000} 100 = 1.23$$

$$\text{REG} = 1.23\%$$

108 Potencia y rendimiento de los transformadores

$$E_1 = \sqrt{(3000 \times 0.8 + 37.4)^2 + (3000 \times 0.6 + 68.6)^2} = 3060 \text{ VOLTS}$$

$$E_1 = 3060 \text{ VOLTS.}$$

$$\% \text{ REG} = \frac{3060 - 3000}{3000} 100 = 2$$

$$\text{REG} = 2\%$$

d) $R_T = A^2 R_2 + R_1 \quad \therefore A = \frac{3000}{125} = 24$

$$R_1 = \frac{2}{3} R_{PE} = \frac{2}{3} 0.0058$$

$$R_1 = 0.00386 \text{ OHMS}$$

$$R_2 = \frac{R_T - R_1}{A^2} = \frac{2.12 - 0.00386}{24^2} = 0.00366$$

$$R_2 = 0.00366 \text{ OHMS}$$

EJEMPLO 2.8.

UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIENE UNA POTENCIA ENTREGADA EN EL SECUNDARIO A PLENA CARGA DE 16 KVA, DE DATOS DE PRUEBAS, SE SABE QUE LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO SON DE 140 WATTS Y LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS SON DE 520 WATTS, CALCULAR LA EFICIENCIA A PLENA CARGA Y FP = 1.0 Y A 1/2 CARGA Y FP = 0.7 ATRASADO.

SOLUCION

LA EFICIENCIA A PLENA CARGA Y FP = 1.0

$$\text{EFIC.} = \frac{P_{\text{SALIDA}}}{P_{\text{SALIDA}} + P_0 + P_{\text{CC}}} \times 100$$

$$\text{EFIC.} = \frac{16000}{1600 + 140 + 520} \times 100 = 96.03\%$$

CON 1/2 CARGA Y FP = 0.7 ATRASADO

LA POTENCIA DE SALIDA ES:

$$P'_{\text{SALIDA}} = \frac{P_{\text{SALIDA}}}{2} \times \cos \theta$$

$$P'_{\text{SALIDA}} = \frac{16000}{2} \times 0.7 = 5600 \text{ WATTS}$$

LAS PÉRDIDAS EN VACÍO SON IGUALES CON CUALQUIER CARGA.

$$P'_0 = P_0 = 140 \text{ WATTS}$$

LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS

$$P'_{\text{CC}} = P_{\text{CC}}/2^2 = P_{\text{CC}}/4 = \frac{520}{4} = 130 \text{ WATTS}$$

LA EFICIENCIA:

$$\text{EFIC.} = \frac{5600}{5600 + 140 + 130} \times 100 = 95.4\%$$

EJEMPLO 2.9

SE DEBE ALIMENTAR UN MOTOR EN INDUCCIÓN TRIFÁSICO A 440 - VOLTS, 60 Hz QUE DEMANDARÁ UNA POTENCIA DE 6 kW CON UN FACTOR DE POTENCIA DE 0.85 ATRASADO. SI SE TIENE DISPO-

110 Potencia y rendimiento de los transformadores

NEBLE UNA RED DE ALIMENTACIÓN TRIFÁSICA DE 220 VOLTS. SE DEBE CONECTAR UN TRANSFORMADOR QUE PERMITE EL ARRANQUE DEL MOTOR, INDICAN LAS CARACTERÍSTICAS QUE DEBE TENER EL TRANSFORMADOR.

SOLUCION

SIENDO LA CARGA DE UN MOTOR ELÉCTRICO DE TIPO BALANCEADO SE PUEDE SELECCIONAR UNA CONEXIÓN PARA EL TRANSFORMADOR QUE SEA SIMPLE Y ECONÓMICA COMO ES EL CASO DE LA ESTRELLA/ESTRELLA.

LA CORRIENTE SECUNDARIA ES:

$$I_2 = \frac{P_A}{1.732 \times \cos\theta \times V_2} = \frac{6 \times 1000}{1732 \times 0.85 \times 440}$$

$$I_2 = 9.26A$$

EL VOLTAJE EN EL SECUNDARIO, SUPONIENDO UNA CAÍDA DE TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE DEL 5% ES:

$$V_{20} = \frac{V_2}{1 - E} \quad E = \text{CAÍDA DE TENSIÓN ADMISIBLE}$$

$$V_{20} = \frac{440}{1-0.05} = 463.15 \text{ VOLTS}$$

LA POTENCIA REQUERIDA PARA EL TRANSFORMADOR

$$S = \frac{1.732 \times V_{20} \times I_2}{1000} = \frac{1.732 \times 463.15 \times 9.26}{1000} = 7.43 \text{ KVA}$$

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN:

$$A = \frac{220}{463.15} = 0.475$$

EJEMPLO 2,10.

UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO TIENE UNA POTENCIA NOMINAL - DE 15 KVA, TOMA EN VACIO UNA CORRIENTE DE 0.65A CON UN - FACTOR DE POTENCIA EN VACIO DE 0.25. LA RELACIÓN DE - TRANSFORMACIÓN ES DE 440/220 VOLTS. LA RESISTENCIA DEL- DEVANADO PRIMARIO ES $R_1 = 0.12$ OHMS.

EN LA HIPÓTESIS DE QUE LAS PÉRDIDAS EN LOS DOS DEVANADOS SEAN IGUALES. CALCULAR LA RESISTENCIA DEL DEVANADO SE - CUNDARIO Y EL RENDIMIENTO A PLENA CARGA Y UN FACTOR DE - POTENCIA UNITARIO

SOLUCION

LAS PÉRDIDAS EN VACÍO.

$$P_0 = V_0 I_0 \cos\theta_0 = 440 \times 0.65 \times 0.25 = 71.5 \text{ WATTS}$$

LA CORRIENTE SECUNDARIA

$$I_2 = \frac{15000}{220} = 68.18 \text{ A}$$

LA CORRIENTE PRIMARIA

$$I_1 = \frac{V_2}{V_1} \times I_2, I_1 = \frac{220}{440} \times 68.18 = 34 \text{ A}$$

112 Potencia y rendimiento de los transformadores

LAS PÉRDIDAS EN EL DEVANADO PRIMARIO

$$P_{R1} = R_1 I_1^2 = 0.12 \times (34)^2 = 138.72 \text{ VOLTS.}$$

LAS PÉRDIDAS TOTALES EN LOS DEVANADOS

$$P_{PERD} = P_{R2} + P_{R1}$$

COMO SE PARTE DE LA HIPÓTESIS DE QUE LAS PÉRDIDAS EN AMBOS DEVANADOS SON IGUALES ($P_{R1} = P_{R2}$).

$$P_{PERD.} = 138.72 + 138.72 = 277.44 \text{ WATTS.}$$

LA RESISTENCIA EN EL SECUNDARIO SE CALCULA COMO:

$$P_{R2} = R_2 I_2^2, \quad R_2 = \frac{P_{R2}}{I_2^2} = \frac{138.72}{(68.18)^2} = 0.029 \text{ OHMS}$$

LA EFICIENCIA:

$$\text{EFIC.} = \frac{15000}{15000+277.44+71.5} = 97.7\%$$

C A P I T U L O 3

LA CONSTRUCCION DEL TRANSFORMADOR

CAPITULO 3

LA CONSTRUCCION DEL TRANSFORMADOR

1.1. CONSIDERACIONES GENERALES.

COMO SE HA MENCIONADO ANTERIORMENTE, UN TRANSFORMADOR CONSTA DE DOS PARTES ESENCIALES: EL NÚCLEO MAGNÉTICO Y LOS DEVANADOS. ESTOS ESTÁN RELACIONADOS CON OTROS ELEMENTOS DESTINADOS A LAS CONEXIONES MECÁNICAS Y ELÉCTRICAS ENTRE LAS DISTINTAS PARTES - AL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO, AL MEDIO DE TRANSPORTE Y A LA PROTECCIÓN DE LA MÁQUINA EN GENERAL. EN CUANTO A LAS DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS, EL NÚCLEO DETERMINA CARACTERÍSTICAS RELEVANTES, DE MANERA QUE SE ESTABLECE UNA DIFERENCIA FUNDAMENTAL EN LA CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES, DEPENDIENDO DE LA FORMA -- DEL NÚCLEO, PUDIENDO SER EL LLAMADO NÚCLEO TIPO COLUMNAS Y EL NÚCLEO TIPO ACORAZADO. EXISTEN OTROS ASPECTOS QUE ESTABLECEN DIFERENCIAS ENTRE TIPOS DE TRANSFORMADORES, COMO ES POR EJEMPLO EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO, QUE ESTABLECE LA FORMA DE DISIPACIÓN DEL CALOR PRODUCIDO EN LOS MISMOS, O BIEN EN TÉRMINOS - DE SU POTENCIA Y VOLTAJE PARA APLICACIONES, COMO POR EJEMPLO CLASIFICAR EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA O TIPO DISTRIBUCIÓN.

2. LA CONSTRUCCION DEL NÚCLEO.

EL NÚCLEO MAGNÉTICO ESTÁ FORMADO POR LAMINACIONES DE ACERO QUE TIENEN PEQUEÑOS PORCENTAJES DE SILICIO (ALREDEDOR DEL 4%) Y -- QUE SE DENOMINAN "LAMINACIONES MAGNÉTICAS", ESTAS LAMINACIONES TIENEN LA PROPIEDAD DE TENER PÉRDIDAS RELATIVAMENTE BAJAS POR-EFECTO DE HISTÉRESIS Y DE CORRIENTES CIRCULANTES.

LAS LAMINACIONES SE DISPONEN O COLOCAN EN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO MAGNÉTICO, DE MANERA QUE LOS NÚCLEOS PARA TRANSFORMADORES-

ESTÁN FORMADOS POR UN CONJUNTO DE LAMINACIONES ACOMODADAS EN LA FORMA Y DIMENSIONES REQUERIDAS. LA RAZÓN DE USAR LAMINACIONES DE ACERO AL SILICIO EN LOS NÚCLEOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS, ES QUE EL SILICIO AUMENTA LA RESISTIVIDAD DEL MATERIAL Y ENTONCES HACE DISMINUIR LA MAGNITUD DE LAS CORRIENTES PARÁSTAS O CIRCULANTES Y EN CONSECUENCIA LAS PÉRDIDAS POR ESTE CONCEPTO.

EN GENERAL, LAS LAMINACIONES AL SILICIO SE SATURAN PARA VALORES DE INDUCCIÓN MÁS BAJOS DE AQUELLOS RELATIVOS A LAS LAMINACIONES NORMALES, TALES VALORES VAN DISMINUYENDO AL AUMENTAR EL CONTENIDO DE SILICIO.

EN EL CASO DE TRANSFORMADORES DE GRAN POTENCIA, SE USAN LAS LLAMADAS "LAMINACIONES DE CRISTAL ORIENTADO" CUYO ESPESOR ES DE ALGUNOS MILÍMETROS Y CONTIENEN ENTRE 3% Y 4% DE SILICIO, SE OBTIENEN DE MATERIAL LAMINADO EN CALIENTE, DESPUÉS SE HACE EL LAMINADO EN FRÍO, DANDO UN TRATAMIENTO TÉRMICO FINAL A LA SUPERFICIE DE LAS MISMAS. ESTE TIPO DE LAMINACIÓN CUANDO SE SUJETAN AL FLUJO EN LA DIRECCIÓN DE LAS LAMINACIONES, PRESENTAN PROPIEDADES MAGNÉTICAS MEJORES QUE LA LAMINACIÓN "NORMAL" DE ACERO AL SILICIO USADA PARA OTRO TIPO DE TRANSFORMADORES.

TABLA 3.1

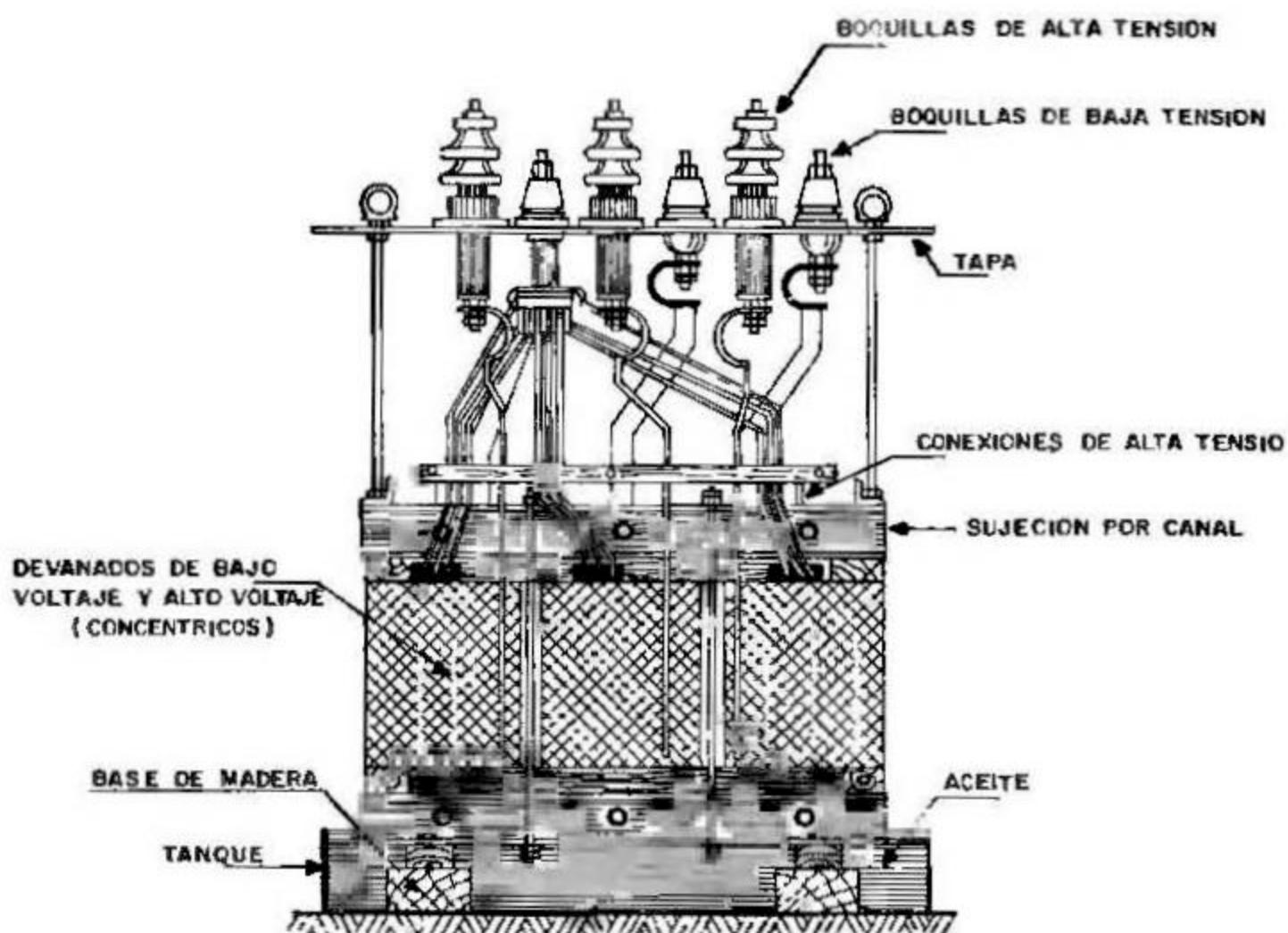
PROPIEDADES DE LAMINA DE ACERO DE SILICIO USADAS EN LOS
NUCLEOS DE TRANSFORMADORES

CONTENIDO DE SILICIO EN - PORCIENTO	ESPESOR EN MM	PERDIDAS EN EN WATTS/ KG	PESO KG/ M ³
3.8-4.0	0.35	1.3	7550
4.0-4.5	0.35	1.1-1.0	7500
4.0-4.5	0.35	1.7-0.6	7500

TABLA 3.2.

COMPORTAMIENTO MAGNETICO DE ALGUNOS TIPOS DE LAMINACIONES

INDUCCION (wb/m ²)	VALORES MEDIOS DE LA FUERZA MAGNETICA EN AMP-ESPIRA/CM		
	LAMINACION AL SILI CIO 0.5 MM 2.5W/kg	LAMINACION AL SILI CIO 0.35 MM. 1.1W/kg	LAMINACION CON CRIS TALES ORIENTADOS -- 0.35 MM 0.6W/kg.
0.8	1.2	1.4	0.4
0.8	1.6	2.0	0.8
1.0	2.4	2.9	1.4
1.1	3.4	4.3	2.3
1.2	5.1	6.8	3.2
1.3	7.8	11.5	4.6
1.4	13.2	19.6	6.3
1.5	23.6	32.4	8.4
1.6	37.2	54.3	11.1
1.7	56.7	71.6	15.6
1.8	84.5	90.0	20.6

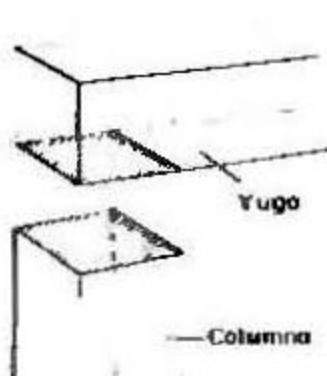


VISTA DE LAS PRINCIPALES COMPONENTES
DE UN TRANSFORMADOR

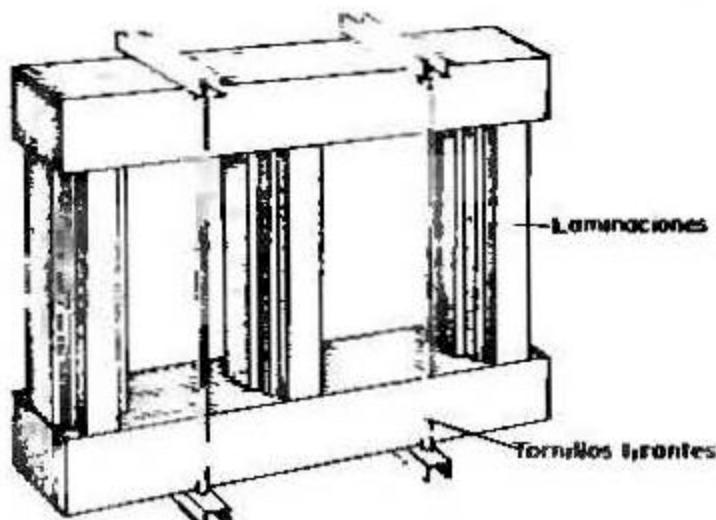
3.1. ELEMENTOS DE LOS NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES.

EN LOS NÚCLEOS MAGNÉTICOS DE LOS TRANSFORMADORES TIPO COLUMNA SE DISTINGUEN DOS PARTES PRINCIPALES: "LAS COLUMNAS" O PIERNAS Y LOS "YUGOS". EN LAS COLUMNAS SE ALOJAN LOS DEVANADOS Y LOS YUGOS UNEN ENTRE SÍ A LAS COLUMNAS PARA CERRAR EL CIRCUITO MAGNÉTICO.

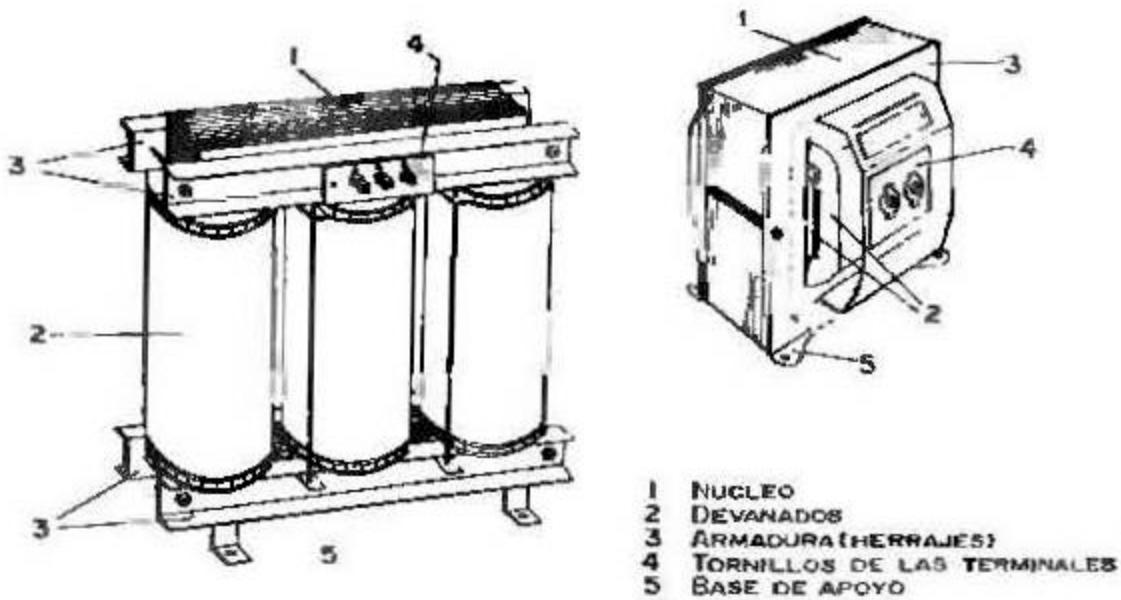
DEBIDO A QUE LAS BOBINAS SE DEBEN MONTAR BAJO UN CIERTO PROCEDIMIENTO Y DESMONTAR CUANDO SEA NECESARIO POR TRABAJOS DE MANTENIMIENTO, LOS NÚCLEOS MAGNÉTICOS SON ARMADOS EN TAL FORMA QUE SON DESMONTABLES, PARA PODER METER Y SACAR LAS BOBINAS DE LAS COLUMNAS. PUDIENDO LOS NÚCLEOS QUE CIERRAN EL CIRCUITO MAGNÉTICO, TERMINAR AL MISMO NIVEL EN LA PARTE QUE ESTÁ EN CONTACTO CON LOS YUGOS, O BIEN CON SALIENTES. EN AMBOS CASOS LOS NÚCLEOS SE ARMAN CON "JUEGOS" DE LAMINACIONES PARA COLUMNAS Y YUGOS QUE SE ARMAN POR CAPAS DE ARREGLOS "PARES" E "IMPARES".



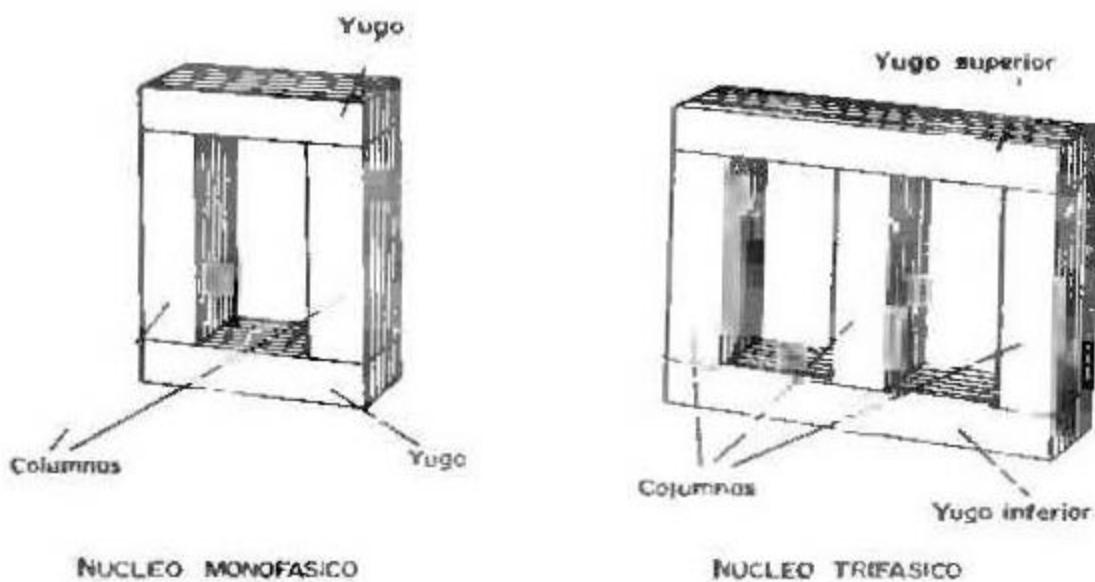
EJEMPLO DE UNION DE YUGO-COLUMNAS



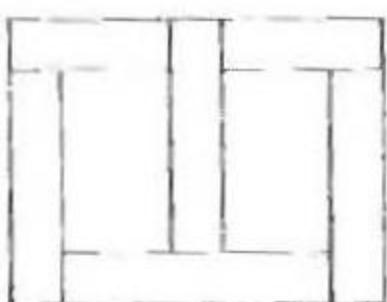
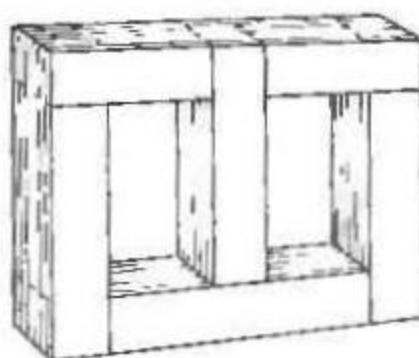
ARMADO DE UN NÚCLEO TIPO COLUMNAS



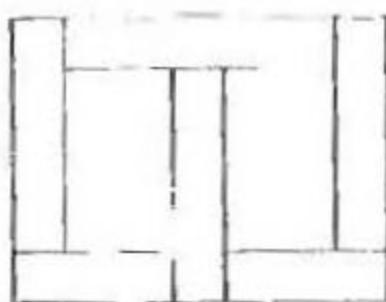
EJEMPLOS DE LA DISPOSICION DE LAS PARTES CONSTITUTIVAS DE LOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS Y TRIFASICOS EN AIRE



NUCLEO FORMADO DE LAMINACIONES
DISPUESTAS EN FORMA ALTERNADA



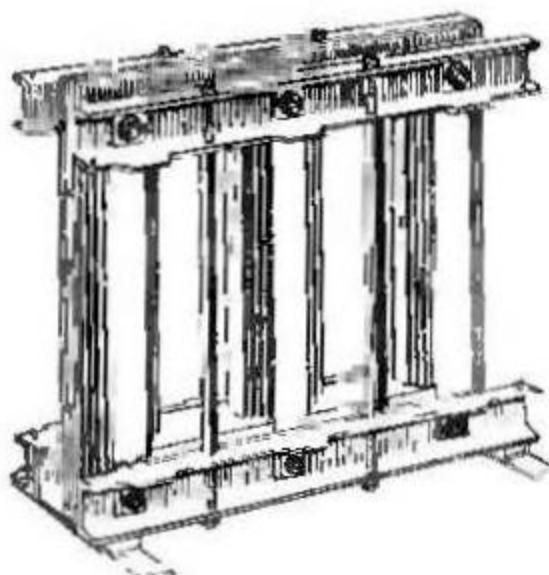
JUEGOS PARES



JUEGOS IMPARES

COMO SE HA MENCIONADO ANTERIORMENTE, CUANDO SE EMPLEAN LAMINACIONES DE CRISTAL ORIENTADO, ES NECESARIO QUE LAS UNIONES ENTRE YUGOS Y COLUMNAS SE REALICEN CON CORTES INCLINADOS PARA EVITAR TRAYECTORIAS TRANSVERSALES DE LAS LÍNEAS DE FLUJO RESPECTO A TALES DIRECCIONES.

CUANDO SE HAN ARMADO LOS NIVELES A BASE DE JUEGOS DE LAMINACIONES COLOCADAS EN "PARES" E "IMPARES" EL NÚCLEO SE SUJETA USANDO TORNILLOS OPRESORES Y SEPARA POR MEDIO DE LOS TORNILLOS TENSORES.

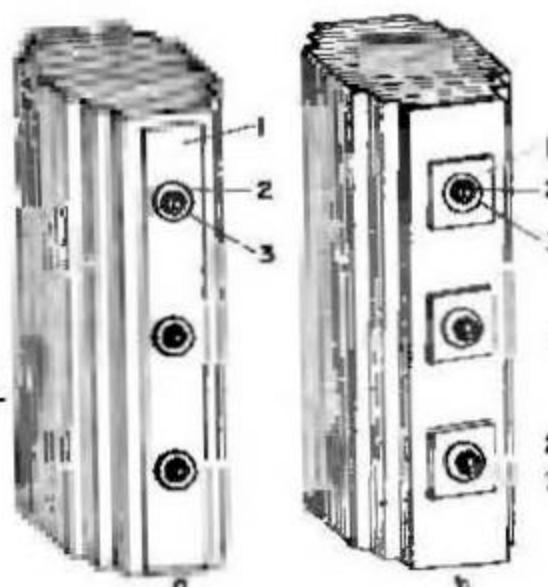


NUCLEO ARMADO DE UN TRANSFORMADOR
TRIFASICO

EL MONTAJE DEL NÚCLEO EN LOS TRANSFORMADORES DE MEDIA POTENCIA (HASTA ALGUNOS CIENTOS DE KVA), SE HACE COMO SE HA MENCIONADO ANTES, FORMANDO PAQUETES DE LAMINACIONES QUE SE SUJETAN EN DISTINTAS FORMAS, PERO USANDO ELEMENTOS QUE NO DAÑEN A LAS LAMINACIONES COMO MADERA O FIBRAS DE PEQUEÑO ESPESOR (2 A 3 MM.) COMO ES EL CASO DE LA FIBRA DE VIDRIO.

EN TRANSFORMADORES DE GRAN POTENCIA, EN LAS LAMINACIONES DESTINADAS A FORMAR LAS COLUMNAS, SE HACEN AGUJEROS EN LOS QUE SE COLOCAN TORNILLOS PASANTES, ESTOS TORNILLOS SE AISLAN CON TUBOS DE PAPEL, CARTÓN O BAQUELITA Y SE SUJETAN A LAS TUERCAS -- CON RONDANAS AISLANTES. ESTOS ELEMENTOS AISLANTES NO REQUIEREN PROPIEDADES DIELÉCTRICAS PARTICULARES, DADO QUE LOS VALORES DE TENSIÓN QUE PUEDEN SER INDUCIDOS EN EL NÚCLEO SON BAJOS. CUANDO SE USAN TORNILLOS NO AISLADOS SE INDUCEN EN ESTAS CORRIENTES QUE PRODUCEN CALENTAMIENTOS QUE SON INADMISIBLES.

- a) — CON UNA PLACA METALICA
- b) — CON VARIAS PLACAS PEQUEÑAS



- 1—PLACA METALICA PARA DISMINUIR UNIFORMEMENTE LA CARGA DE SUJECCION
- 2— AISLAMIENTO
- 3.— TORNILLO DE SUJECCION, SUJETO CON RONDANA Y TUERCA

EJEMPLO DE SUJECCION DE LAS LAMINACIONES DEL NUCLEO

3.2.1. SECCIONES DE LAS COLUMNAS.

LAS SECCIONES DE LAS COLUMNAS DETERMINAN AUTOMÁTICAMENTE LAS SECCIONES DE LOS NÚCLEOS. POR RAZONES DE TIPO-ECONÓMICO Y TAMBIÉN PARA EQUILIBRAR LOS ESFUERZOS ELECTRODINAMICOS QUE SE PUEDEN PRESENTAR ENTRE LOS CONDUCTORES, LOS DEVANADOS SE CONSTRUYEN CASI SIEMPRE EN FORMA CIRCULAR

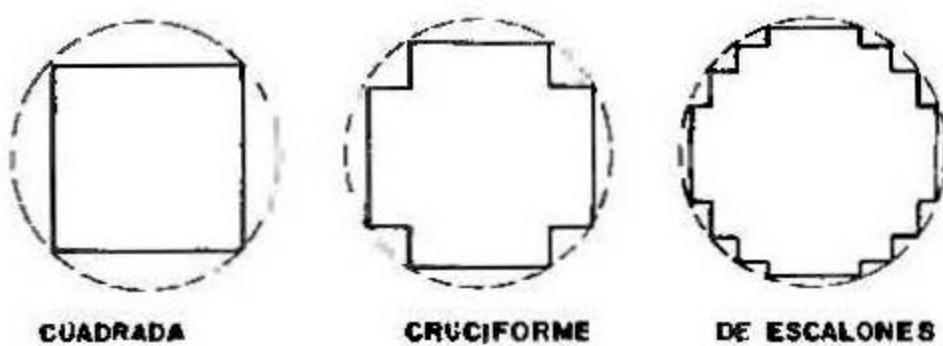
ESTO REQUIERE, AL MENOS TECNICAMENTE, QUE LAS COLUMNAS DEL NÚCLEO DEBAN TENER SECCIÓN CIRCULAR. DEBIDO A QUE ESTA CONDICIÓN NO ES PRÁCTICAMENTE REALIZABLE, SE BUSCA APROXIMARSE HACIENDO LA SECCIÓN DE LA COLUMNA EN ESCALONES. DONDE LUEGO QUE LA CONSTRUCCIÓN ES MÁS COSTOSA, MIENTRAS MAYOR SEA EL NUMERO DE ESCALONES, DEBIDO A QUE CADA ESCALÓN REQUIERE DE DIMENSIONES DISTINTAS - DE LAS LAMINACIONES. PARA TRANSFORMADORES PEQUEÑOS, - SE PUEDEN ACEPTAR EL USO DE SECCIÓN CUADRADA O CRUJIFORME (SECCIÓN EN CRUZ).

EN TRANSFORMADORES GRANDES, SE HACEN LAS COLUMNS CON UN NÚMERO ELEVADO DE ESCALONES CON EL OBJETO DE OBTER UN MAYOR "FACTOR DE UTILIZACIÓN GEOMÉTRICA" DE LA SECCIÓN. A MAYOR CAPACIDAD DEL TRANSFORMADOR, MAYOR ES EL NUMERO DE ESCALONES, PUDIENDO LLEGAR A SER HASTA 10 ó 12 ESCALONES.

EN CUANTO A LOS YUGOS , SE REFIERE, NO ESTANDO VINCUL

124 La construcción del transformador

LADOS ESTOS CON LOS DEVANADOS, PUEDEN SER, ENTONCES, - RECTANGULARES, AÚN CUANDO PUEDEN TENER TAMBIÉN ESCALONES PARA MEJORAR EL ENFRIAMIENTO.



FORMAS DE LAS SECCIONES DE LAS COLUMNAS

3.2.2. TIPOS DE NÚCLEOS.

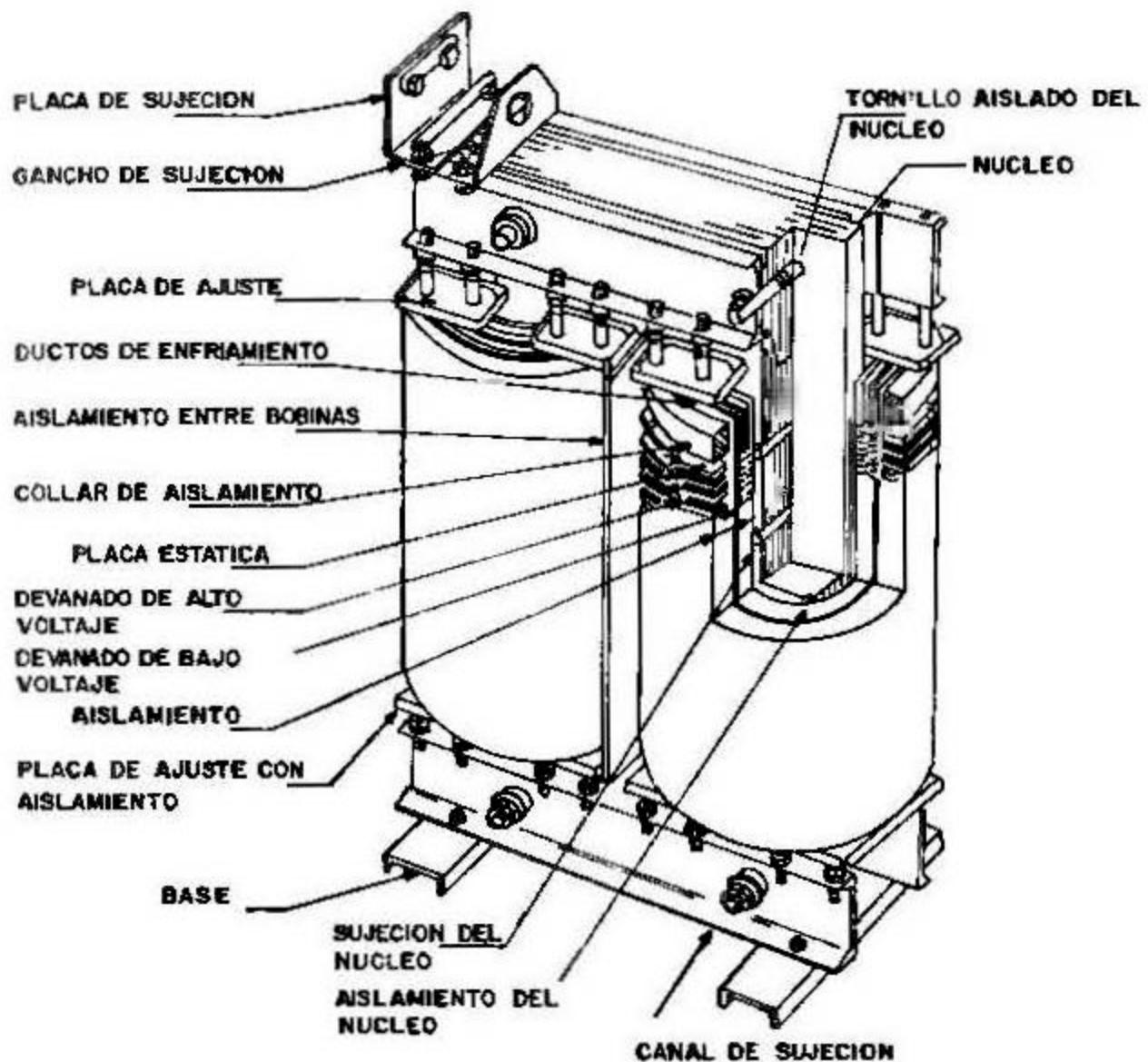
CUANDO SE HA MENCIONADO CON ANTERIORIDAD, LOS NÚCLEOS- PARA TRANSFORMADORES SE AGRUPAN BÁSICAMENTE EN LAS SIGUIENTES CATEGORÍAS:

A) TIPO NÚCLEO O DE COLUMNAS.

B) TIPO ACORAZADO.

A) TIPO NÚCLEO O DE COLUMNAS.

EXISTEN DISTINTOS TIPOS DE NÚCLEOS TIPO COLUMNA, - QUE ESTÁN CARACTERIZADOS POR LA POSICIÓN RELATIVA- DE LAS COLUMNAS Y DE LOS YUGOS.



CONSTRUCCION TIPICA DE UN TRANSFORMADOR
TIPO COLUMNAS

NÚCLEO MONOFASICO.

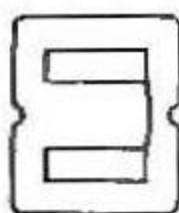
SE TIENEN DOS COLUMNAS UNIDAS EN LAS PARTES INFERIOR Y SUPERIOR POR MEDIO DE UN YUGO, EN CADA UNA DE ESTAS COLUMNAS SE ENCUENTRAN INCROSTADOS LA MITAD DEL DEVANADO PRIMARIO Y LA MITAD DEL DEVANADO SECUNDARIO

NÚCLEO TRIFASICO

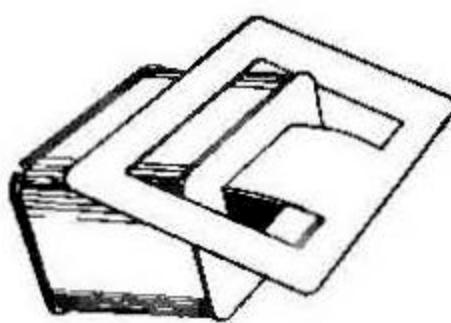
SE TIENEN TRES COLUMNAS DISPUESTAS SOBRE EL MISMO PLANO UNIDAS EN SUS PARTES INFERIOR Y SUPERIOR POR MEDIO DE YUGOS. SOBRE CADA COLUMNAS SE INCROSTAN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DE UNA FASE. LAS CORRIENTES MAGNETIZANTES DE LAS TRES FASES SON DISTINTAS ENTRE SÍ, DEBIDO PRINCIPALMENTE A QUE EL CIRCUITO MAGNÉTICO DE LAS COLUMNAS EXTERNAS ES MÁS LARGO QUE EL CORRESPONDIENTE A LA COLUMNA CENTRAL. ESTE DESEQUILIBRIO, TOMANDO EN CUENTA QUE LA CORRIENTE DE VACÍO ES BASTANTE BAJA, TIENE INFLUENCIA SÓLO PARA LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN VACÍO.

b) TIPO ACORAZADO.

ESTE TIPO DE NÚCLEO ACORAZADO, TIENE LA VENTAJA COMPARATIVA AL LLAMADO TIPO COLUMNA, DE REDUCIR LA DISPERSIÓN MAGNETICA, SU USO ES MÁS COMUN EN LOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS. EN EL NÚCLEO ACORAZADO, LOS DEVANADOS SE LOCALIZAN SOBRE LA COLUMNA CENTRAL, Y CUANDO SE TRATA DE TRANSFORMADORES PEQUEÑOS, LAS LAM



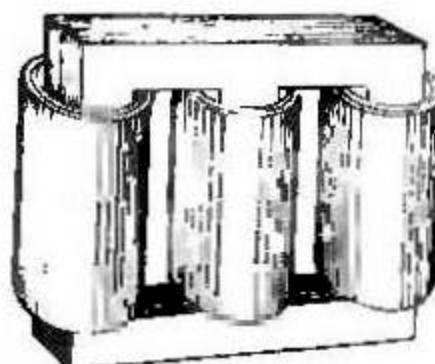
TIPO DE LAMINACIONES
PARA NUCLEOS ACORAZADOS



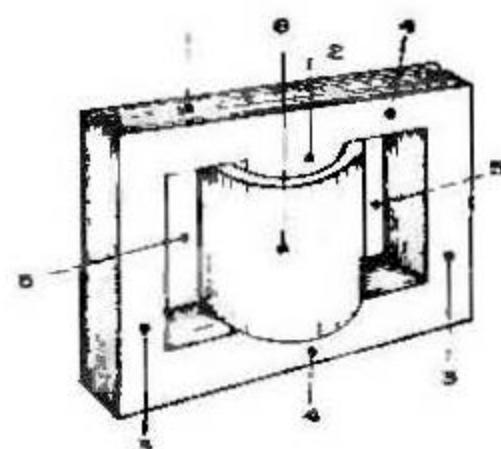
MONTAJE DE LAMINACIONES
PARA NUCLEOS TIPO ACORAZADOS



TIPO COLUMNAS PARA
TRANSFORMADOR
MONOFASICO



TIPO COLUMNAS
PARA TRANSFORMADOR
TRIFASICO



NUCLEO TIPO ACORAZADO.

- 1 - NUCLEO MONTADO
- 2 - COLUMNAS CENTRALES
- 3 - PIERNAS LATERALES
- 4 - YUGOS SUPERIOR E INFERIOR
- 5 - VENTANA
- 6 - DEVANADO

FORMAS Y TIPOS DE NUCLEOS

130 La construcción del transformador

DE LOS DEVANADOS DEBIDO A QUE LOS CRITERIOS CONSTRUCTIVOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN, SON DISTINTOS DE LOS USADOS PARA LOS DEVANADOS DE ALTA TENSIÓN.

PARA LOS FINES CONSTRUCTIVOS, NO TIENE NINGUNA IMPORTANCIA LA-FUNCIÓN DE UN DEVANADO, ES DECIR, QUE SEA PRIMARIO O EL SECUN-DARIO. IMPORTA SOLO LA TENSIÓN PARA LA CUAL DEBE SER PREVISTO.

OTRA CLASIFICACIÓN DE LOS DEVANADOS SE PUEDE HACER CON RELA-CIÓN A LA POTENCIA DEL TRANSFORMADOR, PARA TAL FIN EXISTEN DE-VANADOS PARA TRANSFORMADORES DE BAJA POTENCIA, POR EJEMPLO DE 1000 A 2000 VA Y PARA TRANSFORMADORES DE MEDIA Y GRAN POTEN-CIA. LOS DEVANADOS PARA TRANSFORMADORES DE PEQUEÑA POTEN-CIA SON LOS MÁS FÁCILES DE REALIZAR.

EN ESTE TIPO DE TRANSFORMADORES LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUN-DARIO SON CONCÉNTRICOS Y BOBINADOS SOBRE UN SOPORTE AISLANTE-ÚNICO. POR LO GENERAL, SE USAN CONDUCTORES DE COBRE ESMALTA-DO, DEVANADOS EN ESPÍRAL Y CON CAPAS SOBREPUESTAS. POR LO GE-NERAL, EL DEVANADO DE MENOR TENSIÓN SE INSTALA MÁS CERCA DEL-NÚCLEO INTERPONIENDO UN CILINDRO DE PAPEL AISLANTE Y MEDIANTE SEPARADORES, SE INSTALA EN FORMA CONCÉNTRICA EL DEVANADO DE-TENSIÓN MAYOR. LOS EXTREMOS DE LOS DEVANADOS (DENOMINADOS --TAMBIEN PRINCIPIO Y FINAL DEL DEVANADO) SE PROTEGEN CON AIS-LANTE DE FORMA DE TUBO CONOCIDO COMO "SPAGUETTI".

3.2.2. DEVANADOS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.

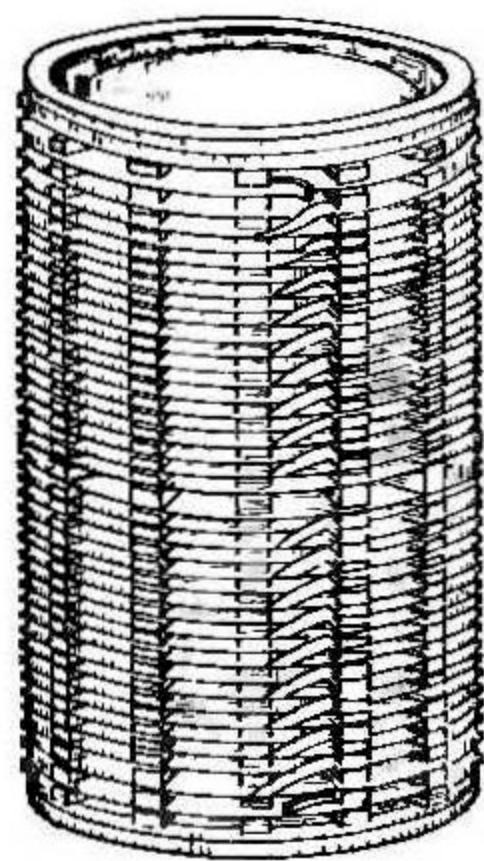
EN ESTOS TRANSFORMADORES, LA DIFERENCIA ENTRE LAS TEN-

SIONES PRIMARIA Y SECUNDARIA ES NOTABLE, POR EJEMPLO, - LOS TRANSFORMADORES PARA REDES DE DISTRIBUCIÓN DE 13200 VOLTS A LAS TENSIONES DE UTILIZACIÓN DE 220/127 VOLTS - DEBIDO A ESTAS DIFERENCIAS, SE EMPLEAN CRITERIOS CONSTRUCTIVOS DISTINTOS A LOS CONSIDERADOS EN LOS TRANSFORMADORES PEQUEÑOS DE BAJA TENSIÓN Y SE DIVIDEN EN DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN Y DE ALTA TENSIÓN.

DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN

ESTÁN CONSTITUIDOS POR LO GENERAL, DE UNA SOLA ESPIRAL (ALGUNAS VECES EN DOS O TRES CAPAS SOBREPUESTAS), CON ALAMBRE RECTANGULAR AISLADO. EL CONDUCTOR SE USA GENERALMENTE PARA POTENCIAS PEQUEÑAS Y TIENE DIÁMETROS NO SUPERIORES A 3 o 3.5 MM. EL AISLAMIENTO DE LOS CONDUCTORES, CUANDO SON CILÍNDRICOS, PUEDE SER DE ALGODÓN O DE PAPEL, MÁS RARAMENTE CONDUCTOR ESMALTADO EN EL CASO - QUE LOS TRANSFORMADORES QUE NO SEAN ENFRIADOS POR ACEITE.

PARA TRANSFORMADORES DE MEDIANA Y GRAN POTENCIA, SE RECURRE AL USO DE PLACA O SOLERA DE COBRE AISLADA, EL AISLAMIENTO ES POR LO GENERAL DE PAPEL. EN EL CASO DE QUE LAS CORRIENTES QUE TRANSPORTE EL DEVANADO SEAN ELEVADAS YA SEA POR FACILIDAD DE MANIPULACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN O BIEN PARA REDUCIR LAS CORRIENTES PARASITAS, SE PUEDE CONSTRUIR EL DEVANADO CON MÁS DE UNA SOLERA O PLACA EN PARALELO.



**BOBINA DE DISCO CONTINUO
(HELICOIDAL)**

DEVANADOS DE ALTA TENSIÓN.

LOS DEVANADOS DE ALTA TENSIÓN, TIENEN EN COMPARACIÓN -- CON LOS DE BAJA TENSIÓN, MUCHAS ESPIRAS, Y LA CORRIENTE QUE CIRCULA POR ELLOS, ES RELATIVAMENTE BAJA, POR LO - QUE SON DE CONDUCTOR DE COBRE DE SECCIÓN CIRCULAR CON - DIÁMETRO DE 2.5 A 3.0 MM.

CON RESPECTO A LAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS, SE -- TIENEN VARIANTES DE FABRICANTE A FABRICANTE, HAY BÁSICA MENTE DOS TIPOS, EL LLAMADO "TIPO BOBINA" FORMADOS DE - VARIAS CAPAS DE CONDUCTORES, ESTAS BOBINAS TIENEN FORMA DISCOIDAL, ESTAS BOBINAS SE CONECTAN, POR LO GENERAL, - EN SERIE PARA DAR EL NÚMERO TOTAL DE ESPIRAS DE UNA FA- SE. EL OTRO TIPO ES EL LLAMADO "DE CAPAS" CONSTITUIDO- POR UNA SOLA BOBINA CON VARIAS CAPAS, ESTA BOBINA ES DE LONGITUD EQUIVALENTE A LAS VARIAS BOBINAS DISCOIDALES - QUE CONSTITUIRÍAN EL DEVANADO EQUIVALENTE, POR LO GENE- RAL, EL NÚMERO DE ESPIRAS POR CAPA EN ESTE TIPO DE DEVA- NADO, ES SUPERIOR AL CONSTITUIDO DE VARIAS BOBINAS DIS- COIDALES.

COMO ASPECTOS GENERALES, SE PUEDE DECIR QUE EL PRIMER - TIPO (BOBINAS DISCOIDALES), DA MAYOR FACILIDAD DE EN- FRIAMIENTO E IMPREGNARSE DE ACEITE, DEBIDO A QUE DISPONE CANALES DE CIRCULACIÓN MÁS NUMEROSOS, TAMBIÉN TIENE LA- VENTAJA DE QUE REQUIERE DE CONDUCTORES DE MENOR DIÁME - TRO EQUIVALENTE AL OTRO TIPO, DA MAYOR FACILIDAD CONS -

STRUCTIVA. TIENE LA DESVENTAJA DE SER MÁS TARDADO EN SU CONSTRUCCIÓN.

LAS BOBINAS DISCOIDALES SE CONOCEN TAMBIÉN COMO "TIPO - GALLETA" EN ALGUNOS CASOS. SE FORMAN CADA UNA, DE UN CIERTO NÚMERO DE CONDUCTORES DISPUESTOS EN CAPAS Y AISLADAS ESTAS CAPAS ENTRE SÍ POR PAPEL AISLANTE. CADA BOBINA AL TERMINAR SE "AMARRA" CON CINTA DE LINO O ALGODÓN PARA DARLE CONSISTENCIA MECÁNICA Y POSTERIORMENTE SE LES DA UN BAÑO DE BARNIZ Y SE HORNEAN A UNA CIERTA TEMPERATURA, CON LO CUAL ADQUIERE LA RIGIDEZ MECÁNICA NECESARIA. CADA BOBINA, ESTÁ DISEÑADA PARA TENER UNA TENSIÓN NO SUPERIOR A 1000-1500 VOLTS, POR LO QUE PARA DAR LA TENSIÓN NECESARIA PARA UNA FASE, SE DEBEN COLOCAR VARIAS BOBINAS EN SERIE.

POSICIÓN DE LOS DEVANADOS.

LA DISPOSICIÓN DE LOS DEVANADOS EN LOS TRANSFORMADORES DEBE SER HECHA DE TAL FORMA, QUE SE CONCILIEN EN LA MEJOR FORMA LAS DOS EXIGENCIAS QUE SON CONTRASTENTES ENTRE SÍ, DEL AISLAMIENTO Y DE LA MENOR DISPERSIÓN DEL FLUJO. LA PRIMERA REQUIERE DE LA MAYOR SEPARACIÓN ENTRE DEVANADOS, EN TANTO QUE LA SEGUNDA, REQUIERE QUE EL PRIMARIO SE ENCUENTRA LO MÁS CERCANO POSIBLE DEL SECUNDARIO. EN LA PRÁCTICA, SE ALCANZA UNA SOLUCIÓN CONVENIENTE DEL PROBLEMA CON LA DISPOSICIÓN DE LOS DEVANADOS DENTRO DE LOS SIGUIENTES TIPOS:

- CONCÉNTRICO.
- CONCÉNTRICO DOBLE
- ALTERNADO.

EN EL TIPO CONCÉNTRICO, CADA UNO DE LOS DEVANADOS ESTÁ-DISTRIBUIDO A LO LARGO DE TODA LA COLUMNA. EL DEVANADO-DE TENSIÓN MÁS BAJA SE ENCUENTRA EN LA PARTE INTERNA -- (MÁS CERCANA AL NÚCLEO) Y AISLADO DEL NÚCLEO, Y DEL DE-TENSIÓN MÁS ELEVADA, POR MEDIO DE TUBOS AISLANTES (CAR-TÓN BAQUELIZADO, BAQUELITA, ETC.)

EN LA DISPOSICIÓN DE CONCÉNTRICO DOBLE, EL DEVANADO DE-TENSIÓN MÁS BAJA SE DIVIDE EN DOS MITADES DISPUESTAS -- RESPECTIVAMENTE AL INTERIOR Y AL EXTERIOR UNO DE OTRO.

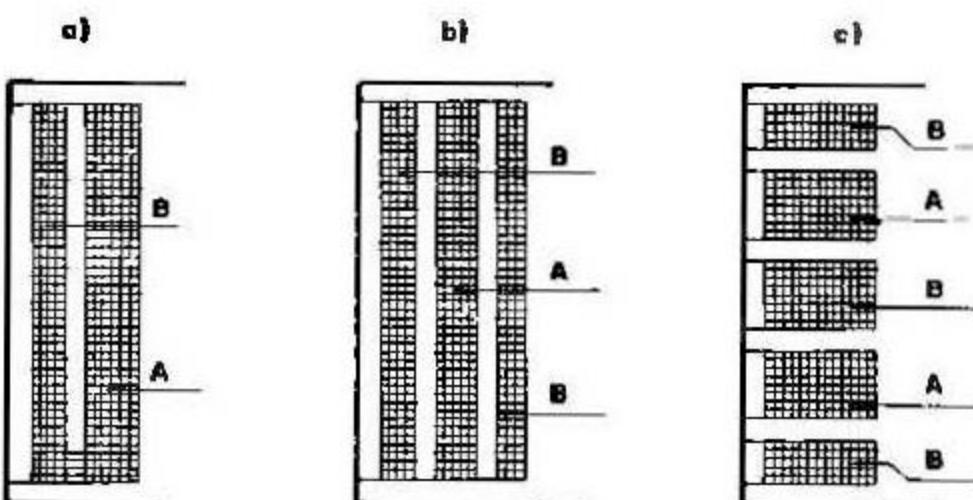
EN EL LLAMADO TIPO ALTERNADO, LOS DOS DEVANADOS ESTÁN - SUBDIVIDIDOS CADA UNO EN UNA CINTA NÚMERO DE BOBINAS -- QUE ESTÁN DISPUESTAS EN LAS COLUMNAS EN FORMA ALTERNADA.

LAS CONSIDERACIONES QUE ORIENTAN DESDE EL PUNTO DE VISTA DE DISEÑO, LA DISPOSICIÓN DE LOS DEVANADOS, SON AQUELLOS REFERENTES AL ENFRIAMIENTO, EL AISLAMIENTO, A LA REACTAN-CIA DE DISPERSIÓN Y A LOS ESFUERZOS MECÁNICOS.

CON RELACIÓN A LOS AISLAMIENTOS, LA SOLUCIÓN MÁS CONVE-NIENTE LA REPRESENTA EL TIPO CONCÉNTRICO SIMPLE, PORQUE-REQUIERE DE UNA SOLA CAPA AISLANTE ENTRE LOS DOS DEVANA-

DOS, POR LO QUE ESTA DISPOSICIÓN ES VENTAJOSA EN EL CASO DE TENSIONES ELEVADAS.

EL LLAMADO CONCÉNTRICO DOBLE TIENE LA PRERROGATIVA DE DAR LUGAR A LA REACTANCIA DE DISPERSIÓN CON VALOR DE ALREDEDOR DE LA MITAD DE AQUEL RELATIVO AL CONCÉNTRICO SIMPLE. EL TIPO ALTERNADO, EN CAMBIO, PERMITE VARIAR TALES REACTANCIAS, REPARTIENDO EN FORMA DISTINTA LAS POSICIONES DE LAS BOBINAS DE LOS DOS DEVANADOS. PARA LOS ESFUERZOS MECÁNICOS SON MEJOR LAS DISPOSICIONES DE TIPO ALTERNADO, PUES PERMITE QUE EL TRANSFORMADOR SOPORTE MEJOR LOS ESFUERZOS MECÁNICOS

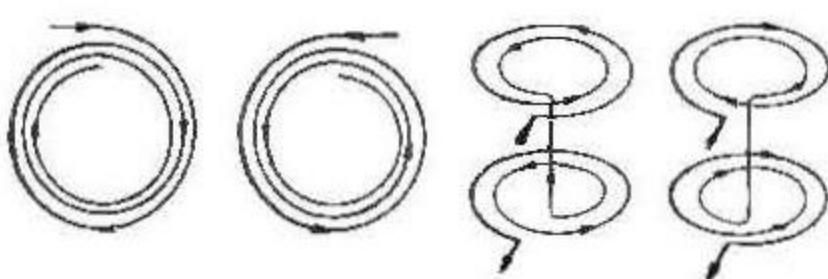
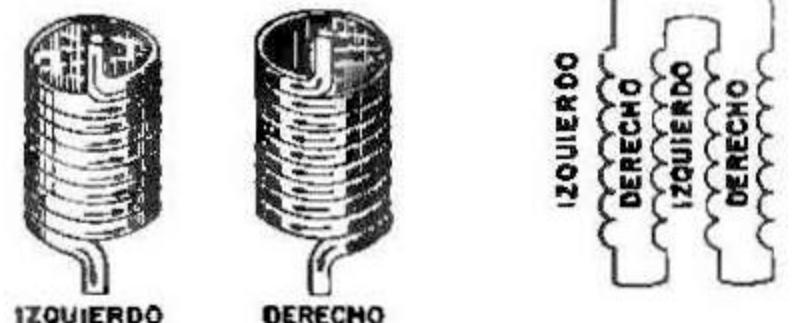


DISPOSICIÓN DE LOS DEVANADOS

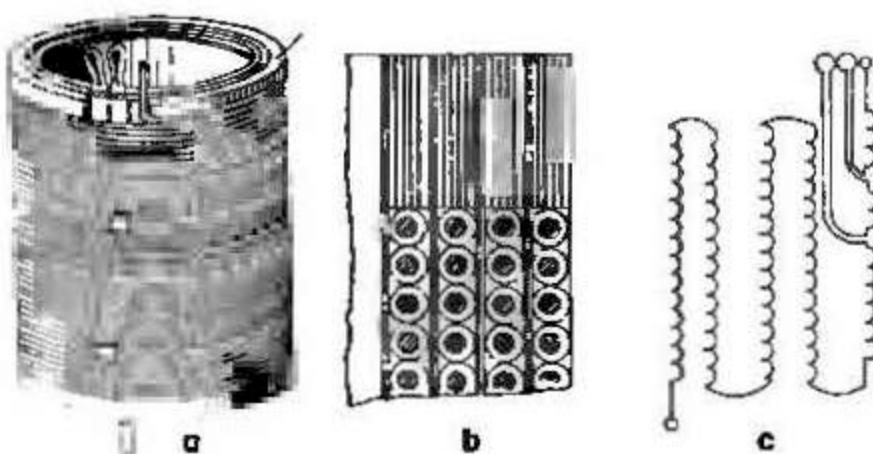
a).- Concéntrico

b).- Doble Concéntrico

c).- Alternado



DEVANADOS **DERECHO** **IZQUIERDO**



DEVANADO CILINDRICO VARIAS CAPAS

- a) VISTA EXTERNA
- b) AISLAMIENTO AL FINAL DE LA BOBINA
- c) DIAGRAMA ELECTRICO CON TAPS

3.3.3. CONSTRUCCIÓN DE LOS DEVANADOS.

COMO SE INDICÓ ANTERIORMENTE, LOS CONDUCTORES USADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS DEVANADOS, PUEDEN SER DE ALAMBRE CIRCULAR (CON UN DIÁMETRO COMPRENDIDO ENTRE 0.2 Y - 0.4 MM) O BIEN SOLERA DE DISTINTAS MEDIDAS.

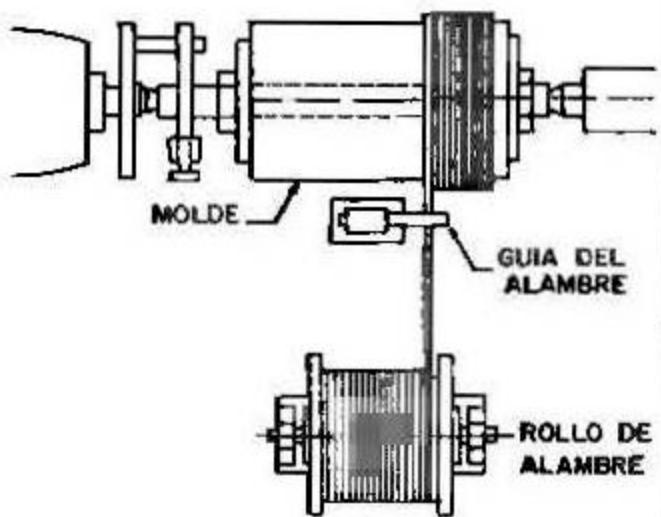
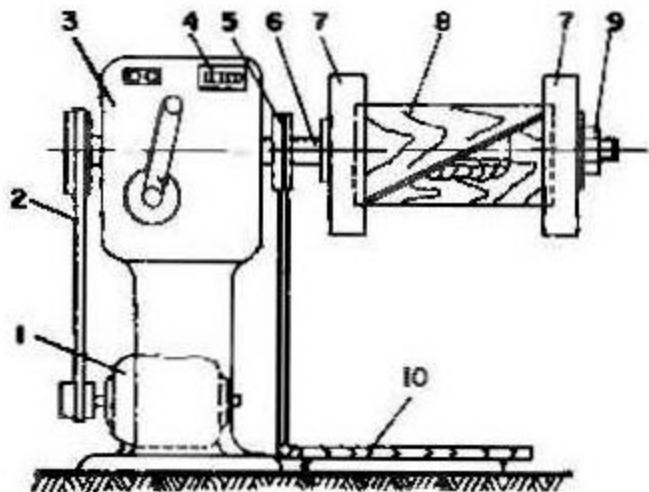
SEGÚN SEA EL TIPO DE LAS ESPIRAS DE LAS BOBINAS, SE PUEDEN CONSTRUIR EN DOS FORMAS:

- HELICOIDAL CONTÍNUA.
- CON BOBINAS SEPARADAS (DISCOIDALES)

LAS BOBINAS HELICOIDALES SE HACEN, POR LO GENERAL, CUANDO EL CONDUCTOR EMPLEADO ES DE SOLERA, LO ÚNICO QUE SE DEBE TENER CUIDADO ES EN LA FORMA DEL AISLAMIENTO CON RESPECTO AL NÚCLEO Y EVENTUALMENTE SU CONSTITUCIÓN MECÁNICA. ESTE TIPO DE CONSTRUCCIÓN TIENE CIERTO TIPO DE LIMITACIONES, EN CUANTO AL AISLAMIENTO SE REFIERE, AUNCUANDO SE PUEDA CONSTRUIR EN VARIAS CAPAS, POR LO QUE SU PRÁCTICA SE LIMITA A LOS DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN.

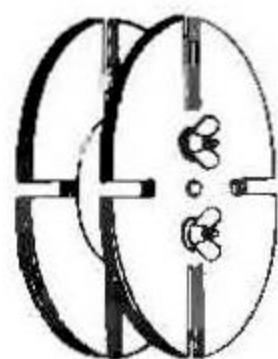
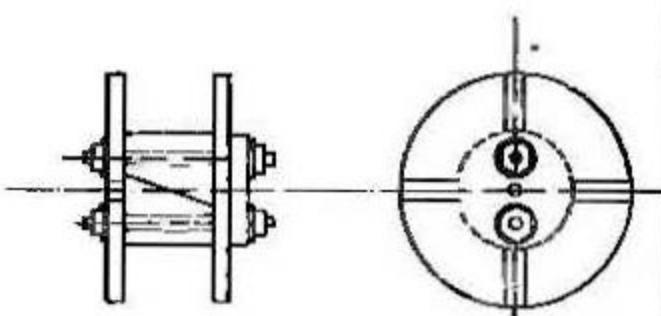
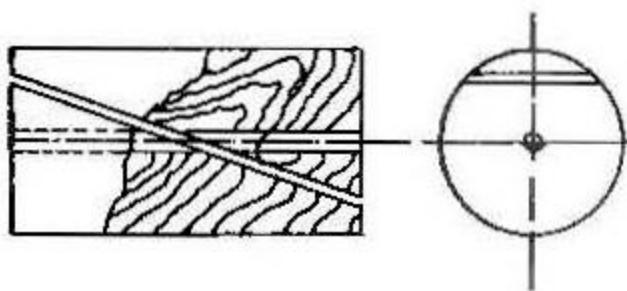
LA CONSTRUCCIÓN DE BOBINAS DISCOIDALES (PARA DEVANADOS CON BOBINAS SEPARADAS), GENERALMENTE SE HACE CON EL MISMO NÚMERO DE ESPIRAS POR BOBINA Y DE CAPAS SE HACE DE MANERA QUE SE LIMITE LA TENSIÓN MÁXIMA ENTRE ESPIRAS DE CAPAS ADYACENTES A UN VALOR ENTRE 200 Y 300 VOLTS, CON ESTO SE ESPERA QUE EN GENERAL, Y SÓLO EN CASOS

VISTA EN PLANTA DE LA BOBINADORA



MAQUINA BOBINADORA

- 1 - MOTOR ELECTRICO
- 2 - BANDA
- 3 - CUBIERTA
- 4 - CONTADOR DE VUELTAS
- 5 - CLUTCH
- 6 - EJE
- 7 - BASE DE PAPEL O CARTON
- 8 - MOLDE DE MADERA
- 9 - TUERCA DE AJUSTE
- 10 - PEDAL DE CONTROL



MOLDE DE LA BOBINA
TIPO DISCOIDAL

EXCEPCIONALES, EL VOLTAJE POR BOBINA SEA CUANDO MUCHO - 1000 VOLTS ENTRE CAPAS SEPARADAS POR PAPEL AISLANTE.

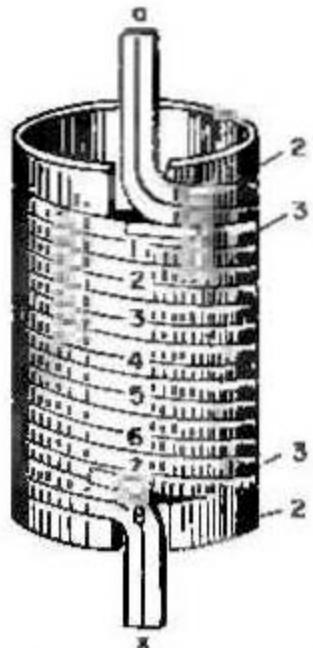
CON RELACIÓN A LA POSICIÓN DE LOS DEVANADOS, LOS TRANSFORMADORES SON DE DOS TIPOS: DE DEVANADOS CONCÉNTRICOS - Y DE DEVANADOS ALTERNADOS.

EN EL CASO DE LOS TRANSFORMADORES CON DEVANADOS CONCÉNTRICOS, ESTOS, LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO, SON COMPLETAMENTE DISTINTOS Y SE ENCUENTRAN MONTADOS UNO -- DENTRO DEL OTRO SOBRE EL NÚCLEO, ESTANDO, POR RAZONES - DE AISLAMIENTO, PRINCIPALMENTE EL DEVANADO DE MENOR VOLTAJE MAS CERCA DEL NÚCLEO.

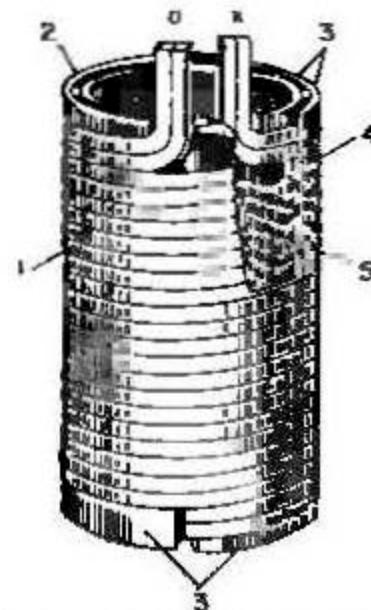
EN TRANSFORMADORES DE MAYOR POTENCIA Y SÓLO EXCEPCIONALMENTE, SE PUEDE DIVIDIR EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE- EN DOS PARTES, DE MANERA QUE UNO QUEDA CERCANO AL NÚCLEO Y LA OTRA SE COLOQUE SOBRE EL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN, ES DECIR, ES UN DOBLE CONCÉNTRICO.

LA DISPOSICIÓN DE LOS DEVANADOS CONCÉNTRICA, ES LA QUE TIENE UN MAYOR CAMPO DE APLICACIÓN.

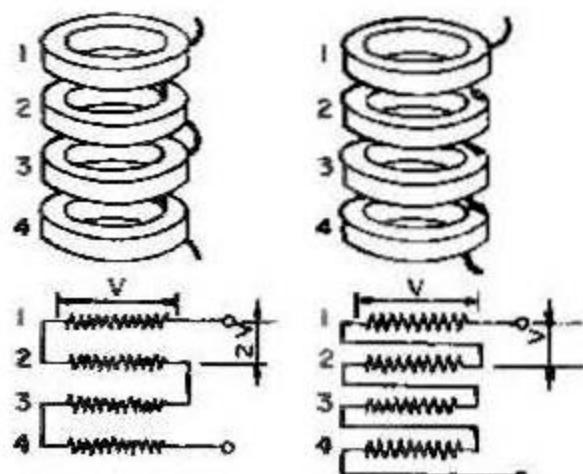
CUALQUIERA QUE SEA EL TIPO DE DEVANADO, LA CONSTRUCCIÓN DE LAS BOBINAS SE HACE NORMALMENTE SOBRE MOLDES DE MADEIRA O METÁLICOS MONTADOS SOBRE BOBINADORAS O DEVANADORAS CUYO TIPO ES DISTINTO, DEPENDIENDO PRINCIPALMENTE DEL -



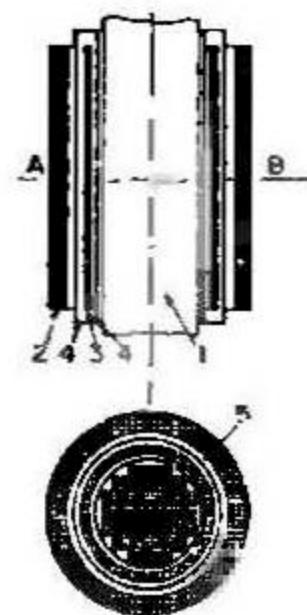
BOBINA CILINDRICA DE CAPA SENCILLA CON DOS CONDUCTORES EN PARALELO



BOBINA CILINDRICA DE CAPA DOBLE CON DOS CONDUCTORES EN PARALELO



METODO DE CONEXION ENTRE BOBINAS
a) CONEXION NORMAL
b) CONEXION INVERTIDA



DISPOSICION CONCENTRICA DE LAS BOBINAS
1.- NUCLEO DE COLUMNAS
2.- DEVANADO DE ALTA TENSION
3.- DEVANADO DE BAJA TENSION
4.- CILINDRO AISLANTE
5.- FIJACION DEL CILINDRO

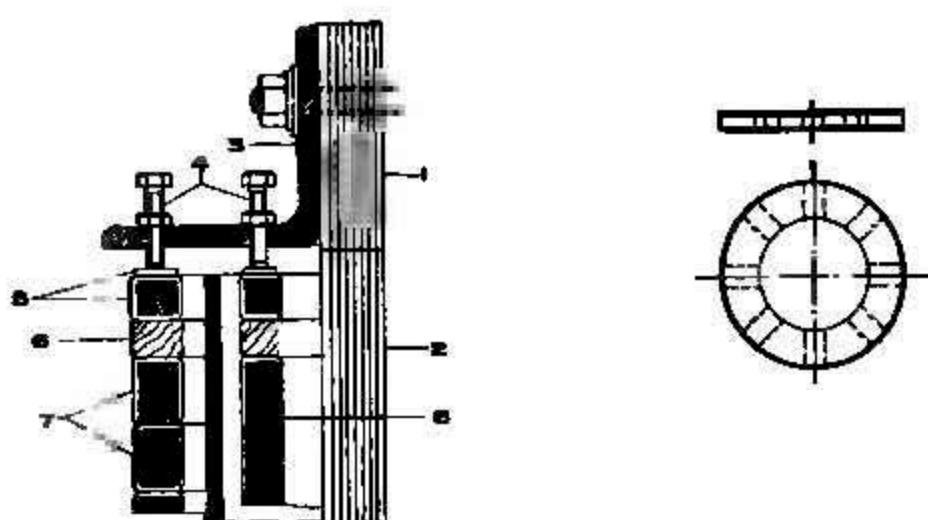
142 La construcción del transformador

TAMAÑO DE BOBINAS POR CONSTRUIR. EN EL CASO DE BOBINAS PARA TRANSFORMADORES PEQUEÑOS, QUE SE PUEDEN HACER EN TALLERES DE BOBINADO, ESTAS BOBINAS SON DE TIPO MANUAL, Y EVENTUALMENTE SE PUEDEN LLEGAR A USAR TORNOS.

CUANDO SE TERMINA DE DEVANAR UNA BOBINA, ANTES DE SU MONTAJE SE LE DEBE DAR UN TRATAMIENTO COMO SECARLA EN VACÍO PARA QUITAR POSIBLES RESTOS DE HUMEDAD, Y TAMBIÉN UN PROCESO DE IMPREGNACIÓN DE BARNIZ AISLANTE Y HORNEADO A UNA TEMPERATURA QUE DEPENDE DEL TIPO DE BARNIZ Y CUYO OBJETIVO ES DAR CONSISTENCIA MECÁNICA.

AISLAMIENTO EXTERNO DE LOS DEVANADOS.

LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO, DEBEN ESTAR AISLADOS ENTRE SÍ, GENERALMENTE ESTE AISLAMIENTO SE HACE POR MEDIO DE SEPARADORES DE MADERA, BAQUELITA O MATERIALES AISLANTES SIMILARES QUE ADEMÁS CUMPLAN CON FUNCIONES REFRIGERANTES.



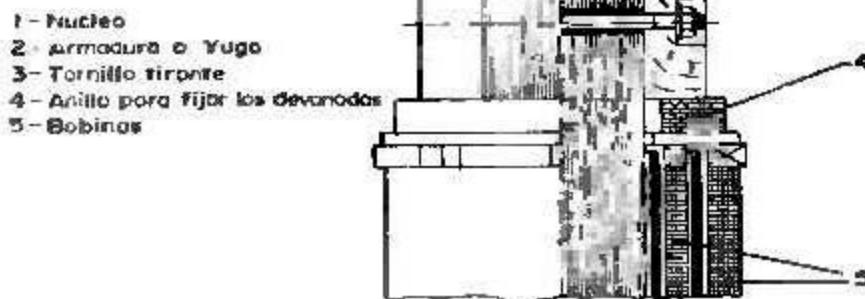
SISTEMA DE ARMADO AXIAL DE LOS DEVANADOS POR MEDIO DE TORNILLOS DE PRESIÓN

ANILLO DE AISLAMIENTO

SISTEMA DE AMARRE AXIAL DE LOS DEVANADOS MEDIANTE TORNILLOS OPUESTOS DE PRESIÓN.

DE LA FIGURA

1. YUGO DEL NÚCLEO.
2. COLUMNAS DEL NÚCLEO.
3. ANGULO (O SOLERA) DE SUJECIÓN (HERRAJE).
4. TORNILLOS DE PRESIÓN.
5. SEPARADORES AISLANTES.
6. ANILLOS DE MATERIAL AISLANTE.
7. DEVANADO DE ALTA TENSIÓN.
8. DEVANADO DE BAJA TENSIÓN.



UNIÓN DEL YUGO A LAS PIERNAS DEL NÚCLEO

EL AISLAMIENTO ENTRE LAS FASES DE LOS TRANSFORMADORES - TRIFÁSICOS SE EFECTUA SEPARANDO CONVENIENTEMENTE LAS COLUMNAS, ENTRE LAS CUALES SE INTERPONEN ALGUNAS VECES SEPARADORES O DIAFRAGMAS DE CARTÓN TRATADO O BIEN DE BAQUELITA.

EL AISLAMIENTO EXTERNO ENTRE LAS FASES, SE LOGRA POR MEDIO DE LAS BOQUILLAS A LAS QUE SE CONECTAN LAS TERMINALES DE LOS DEVANADOS.

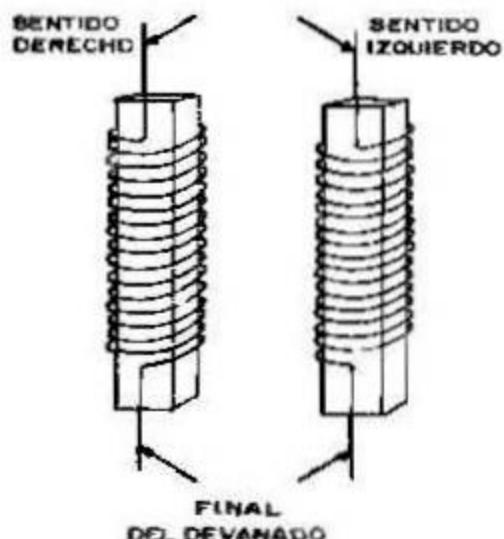
3.3.4. CONEXIONES DE LOS DEVANADOS.

CUANDO SE CONSTRUYE UN DEVANADO, SE PUEDE BOBINAR EN EL SENTIDO A LA DERECHA O A LA IZQUIERDA (CON RESPECTO AL SENTIDO DE LAS MANECILLAS DEL RELOJ). SE HA OBSERVADO QUE UNA CORRIENTE QUE TIENE UN DETERMINADO SENTIDO, PRODUCE UN FLUJO MAGNÉTICO EN SENTIDO OPUESTO, SE TIENE UN DEVANADO CONSTRUIDO HACIA LA IZQUIERDA O UN DEVANADO HACIA LA DERECHA. ESTO SE DEBE TOMAR EN CONSIDERACIÓN, PARA EVITAR QUE CON LAS CONEXIONES QUE SE REALICEN, SE TENGAN FLUJOS OPUESTOS O VOLTAJES INDUCIDOS OPUESTOS. EN GENERAL, CADA FABRICANTE ADOPTA UN SENTIDO ÚNICO DEVANADO PARA TODAS LAS BOBINAS, TANTO SÉCUNDARIAS COMO PRIMARIAS.

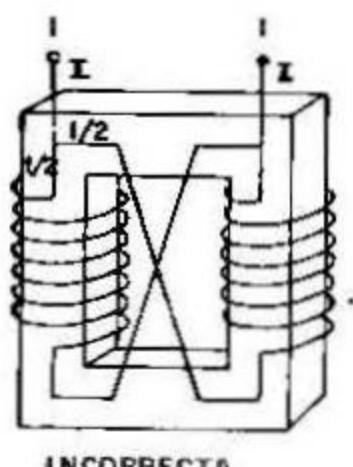
EN LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE DOS COLUMNAS, EL FLUJO ES DIRECTO Y EN SENTIDO OPUESTO EN LAS DOS COLUMNAS, ESTO SIGNIFICA QUE DEBE HABER UNA FORMA DE CONEXIÓN

EN SERIE Y OTRA EN PARALELO PARA LAS BOBINAS.

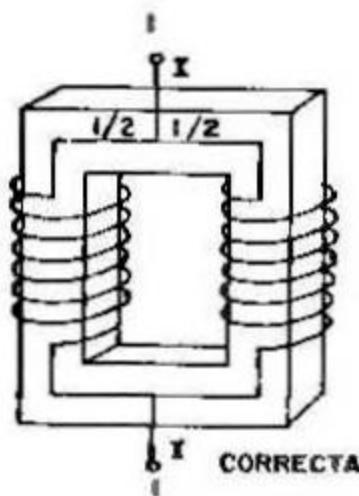
PRINCIPIO DEL DEVANADO



SENTIDO DEL FLUJO EN EL NUCLEO DE UN TRANSFORMADOR MONOFASICO



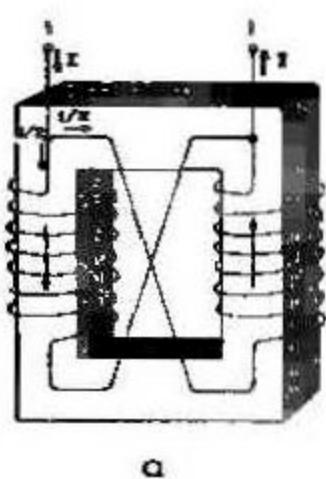
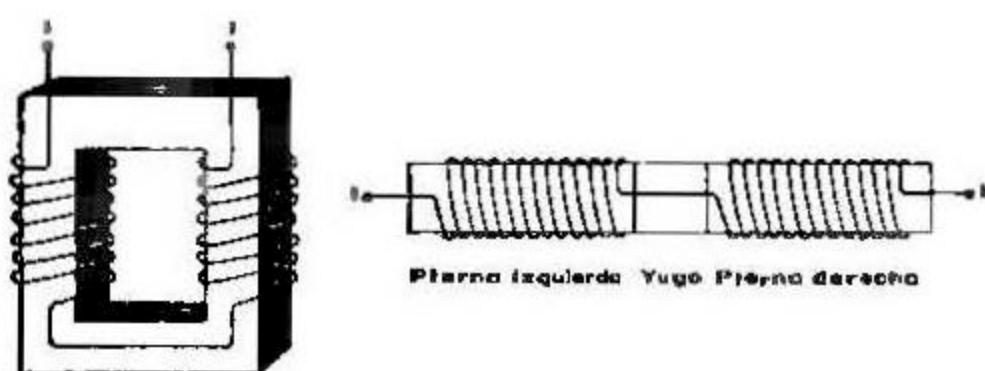
INCORRECTA



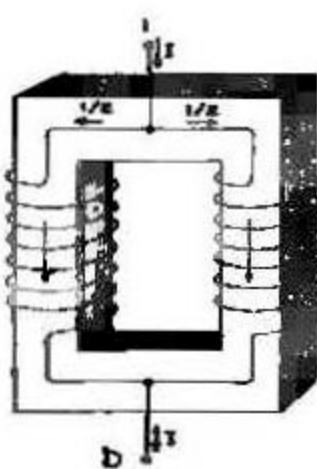
CORRECTA

CONEXION EN PARALELO DE LOS DEVANADOS

CONEXION EN SERIE DE BOBINAS

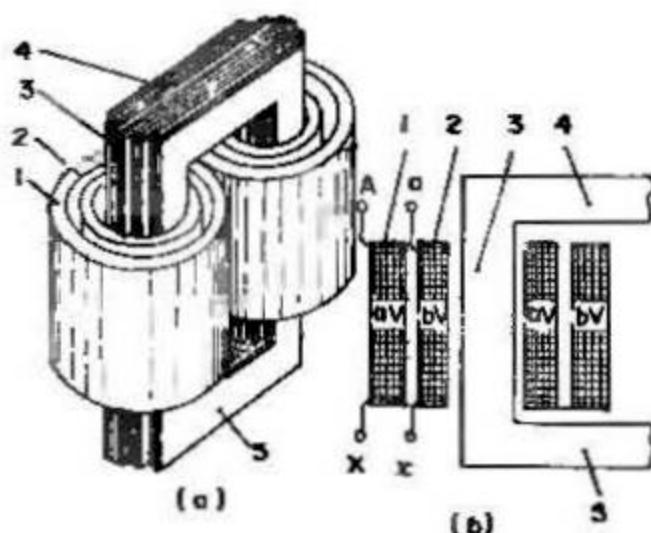


a) Conexión Correcta



b) Conexión Erronea

CONEXION EN PARALELO DE DEVANADOS



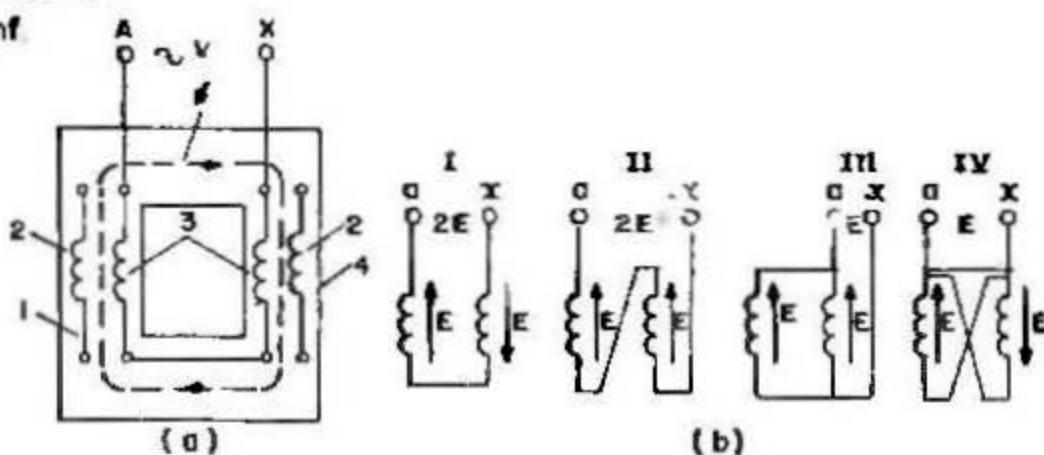
aV = Devanado de alto voltaje
bV = Devanado de bajo voltaje

ARREGLO DE LOS DEVANADOS DE UN TRANSFORMADOR TIPO COLUMNAS

a).—Vista externa

b).—Diagrama esquemático

- 1—Devanado de alto voltaje
- 2—Devanado de bajo voltaje
- 3—Núcleo
- 4—Yugo superior
- 5—Yugo inf.



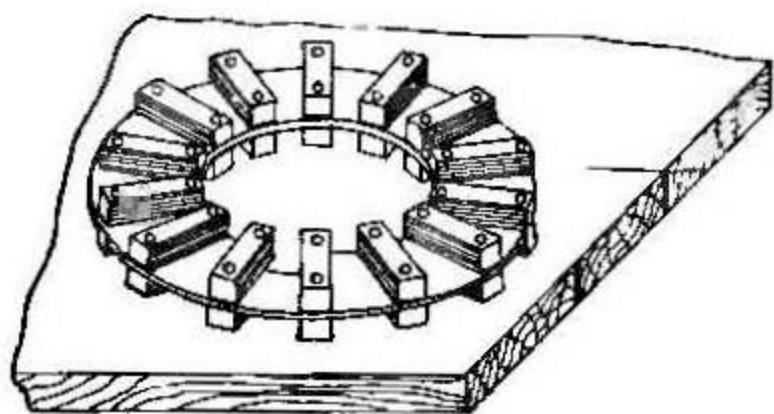
DIAGRAMAS DE CONEXIÓN PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

a).—Diagrama esquemático

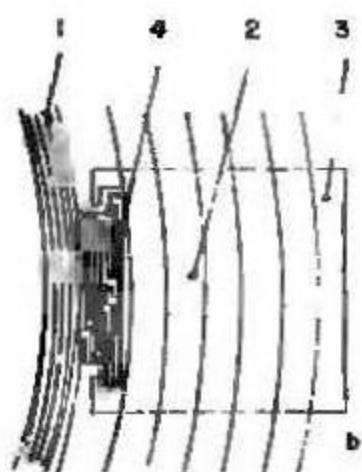
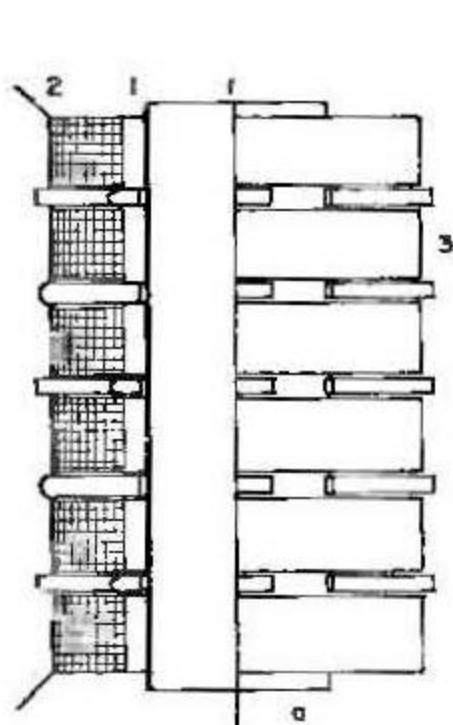
b).—Diagrama de conexiones

- I.— Diagrama
- 2.— Devanado secundario
- 3— Devanado primario
- 4.— Pierno

- I Conexión serie del mismo lado
- II Conexión serie de lados opuestos
- III Conexión paralelo lados opuestos
- IV Conexión paralelo del mismo lado

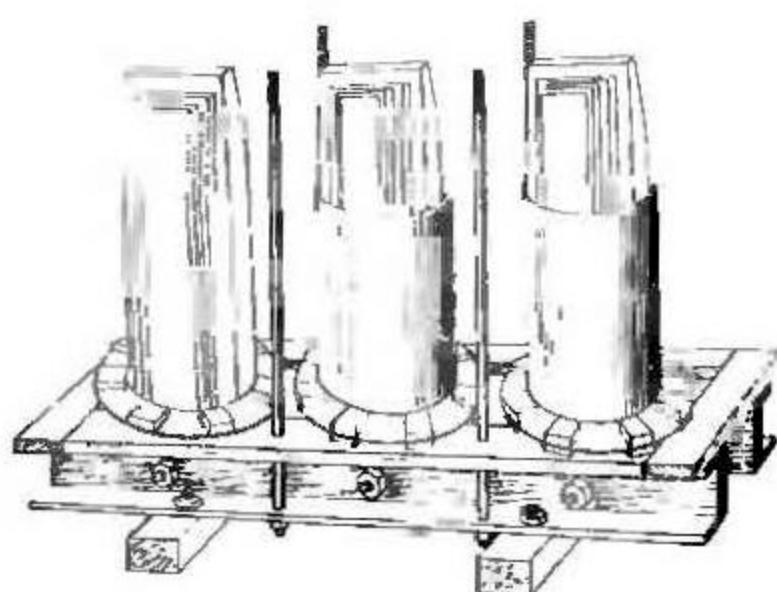


**ARMADO DEL AISLAMIENTO DEL NUCLEO PARA
MONTAJE DE BOBINAS**

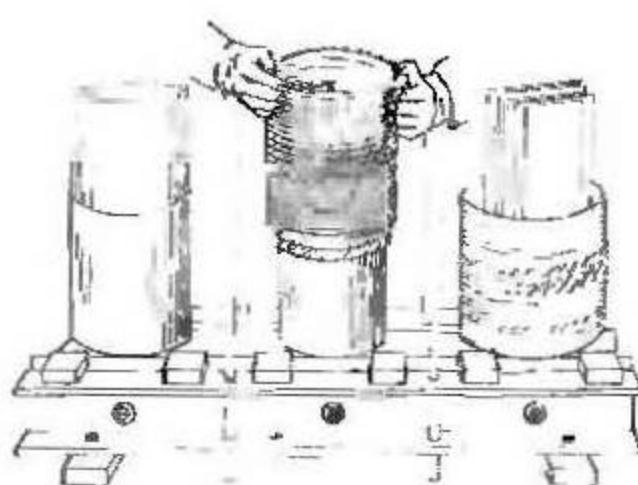


CONEXIONES ENTRE BOBINAS

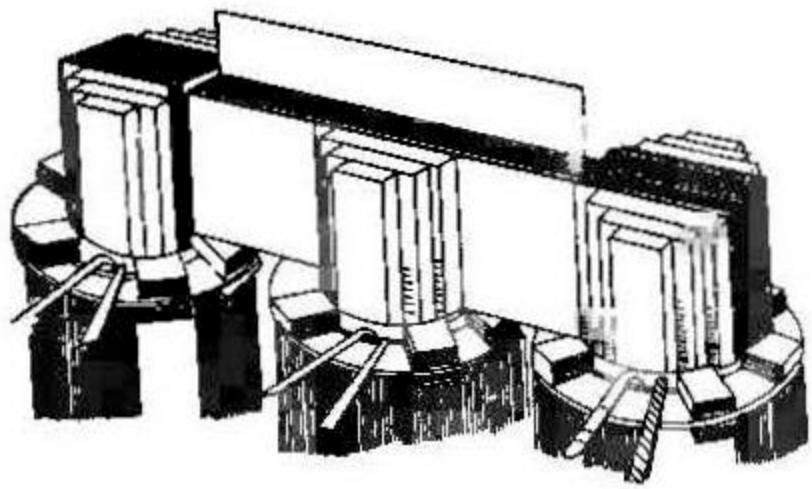
- 1 — TUBO AISLANTE
- 2 — BOBINAS
- 3 — SEPARADORES
- 4 — GUIA DE MONTAJE



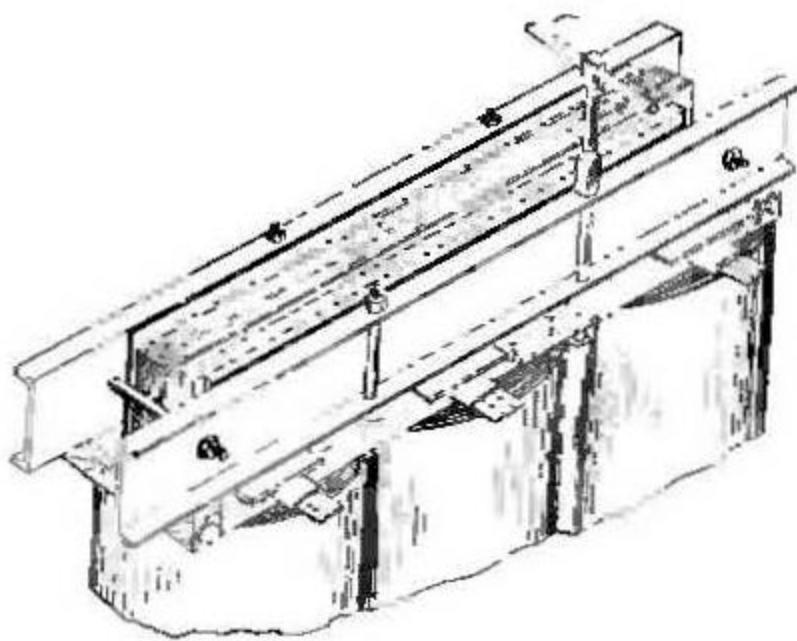
MONTAJE DE LAS BOBINAS Y EL AISLAMIENTO DEL NUCLEO



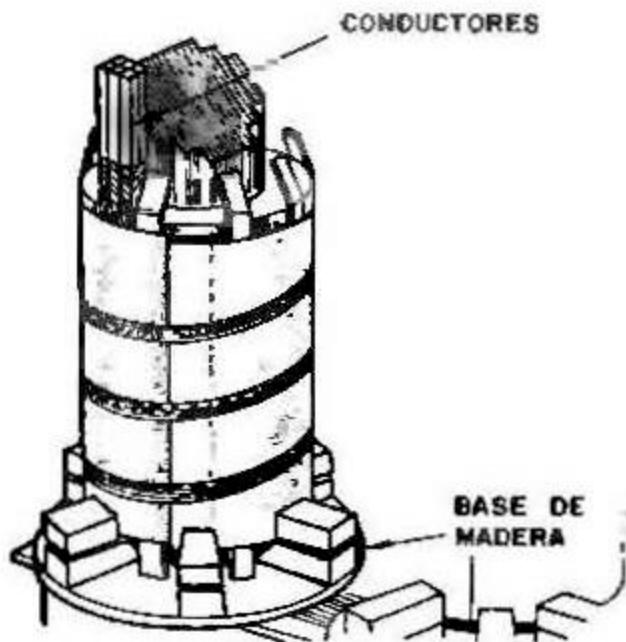
MONTAJE DE LA BOBINA



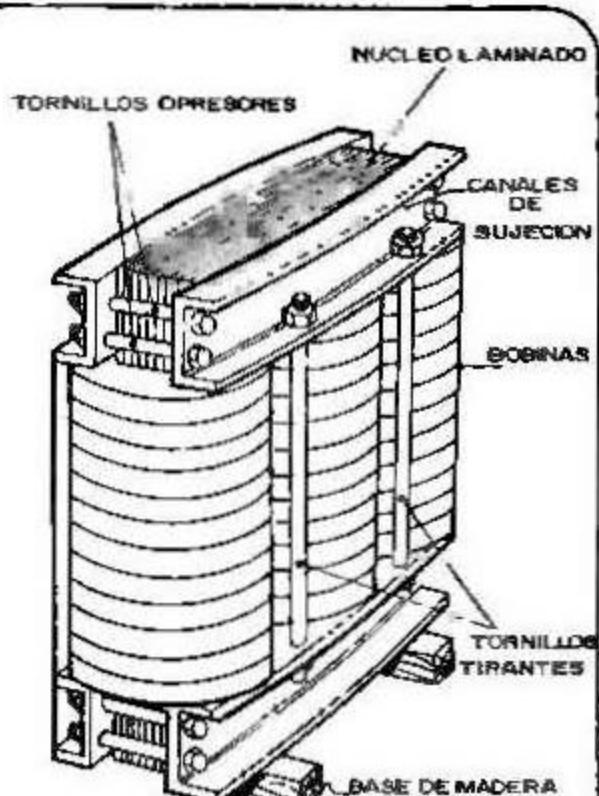
LAMINACION DEL YUGO DESPUES
DEL MONTAJE DE BOBINAS



FIJACION DE LAS BOBINAS Y EL YUGO SUPERIOR



**DETALLE DE MONTAJE DE BOBINAS EN
LAS PIERNAS DEL TRANSFORMADOR**



**VISTA DEL NUCLEO Y BOBINAS
ENSAMBLADAS PARA UN TRANS -
FORMADOR TRIFASICO**

CAMBIO EN LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN.

EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN, LA TENSIÓN NO ES EXACTAMENTE LA MISMA EN TODOS LOS PUNTOS, DEBIDO A QUE LA CAÍDA DE TENSIÓN DEPENDE DE LA DISTANCIA DEL PUNTO DE ALIMENTACIÓN Y DE LA MAGNITUD DE LA CARGA. PARA PODER EMPLEAR LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN EN LOS DISTINTOS PUNTOS DE LA RED Y ADAPTARLOS A LAS VARIACIONES DE TENSIÓN, SE PROVEE UNO DE LOS DEVANADOS DE UN CAMBIADOR DE DERIVACIONES (EL DE ALTA TENSIÓN) - DE TAL FORMA QUE SE PUEDAN AUMENTAR O DISMINUIR EL NÚMERO DE ESPIRAS Y EN CONSECUENCIA, VARIAR LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN DENTRO DE LÍMITES ESTABLECIDOS, ESTOS LÍMITES, NORMALMENTE SON DEL 5%.

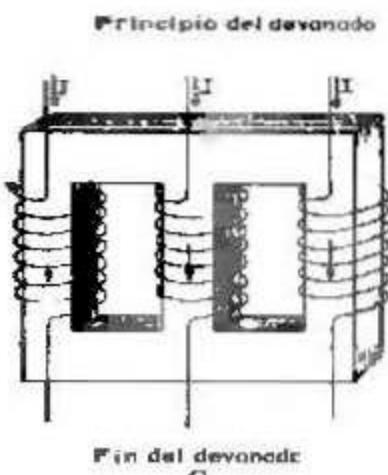
3.4. MATERIALES ELECTRICOS USADOS EN LA CONSTRUCCION DE TRANSFORMADORES.

3.4.1. CONDUCTORES ELECTRICOS.

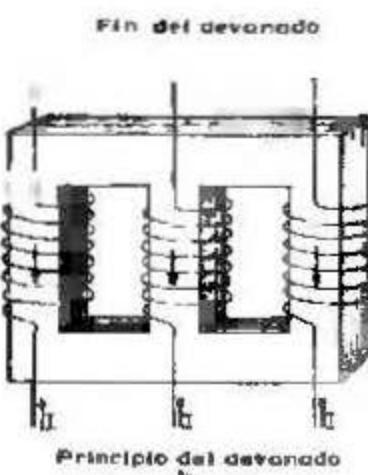
LOS MATERIALES USADOS COMO CONDUCTORES EN LOS TRANSFORMADORES, AL IGUAL QUE LOS USADOS EN OTRAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS, DEBEN SER DE ALTA CONDUCTIVIDAD, YA QUE CON ELLOS SE FABRICAN LAS BOBINAS. LOS REQUISITOS FUNDAMENTALES QUE DEBEN CUMPLIR LOS MATERIALES CONDUCTORES, SON LOS SIGUIENTES:

- I) LA MÁS ALTA CONDUCTIVIDAD POSIBLE.
- II) EL MENOR COEFICIENTE POSIBLE DE TEMPERATURA POR-

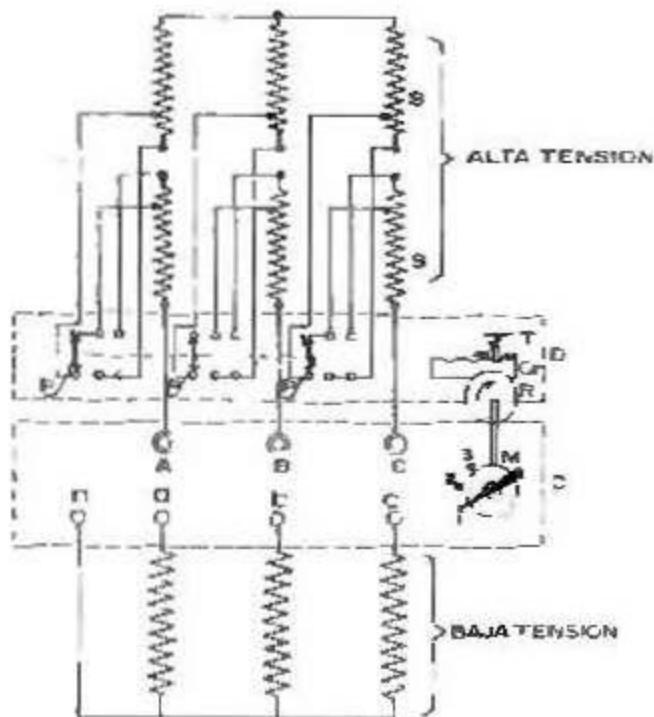
SENTIDO DEL DEVANADO PARA UN TRANSFORMADOR TRIFASICO



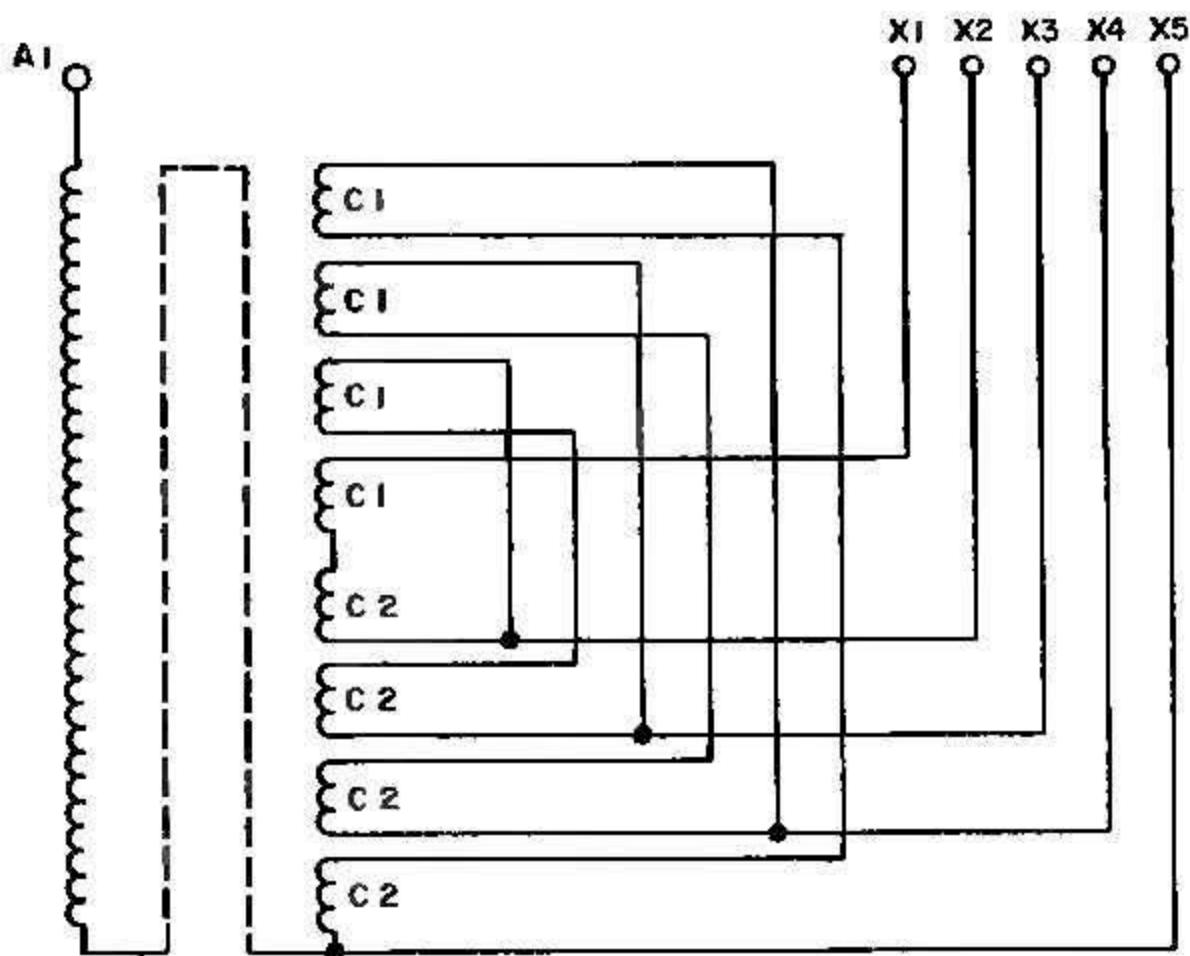
C) Devanado a la Derecha



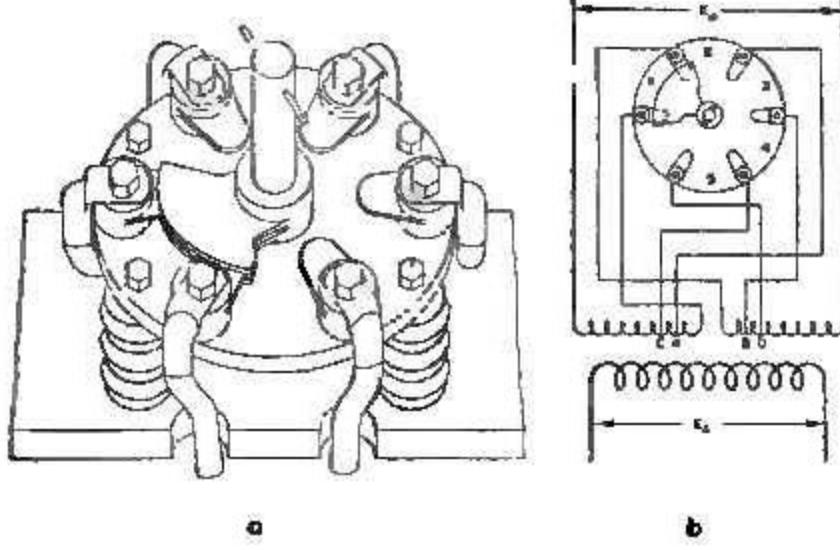
b) Devanado a la Izquierda



ESQUEMA DE PRINCIPIO DEL CAMBIADOR DE DERIVACIONES EN ALTA TENSION

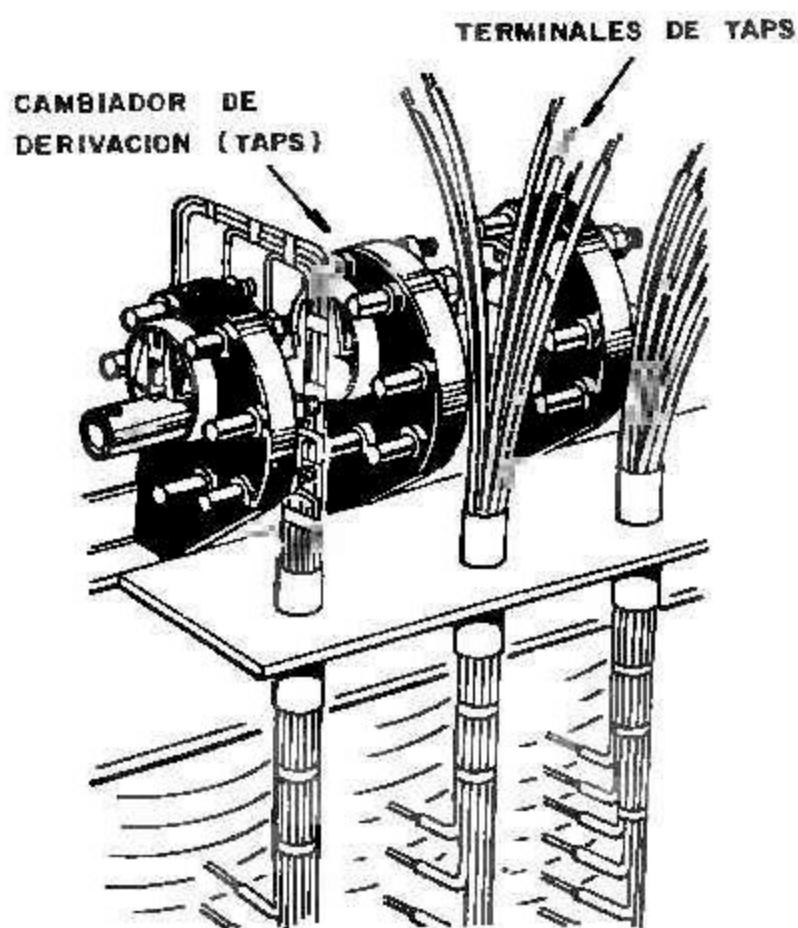


**ARREGLO MAGNETICO DE UNA BOBINA CON CAPAS
MULTIPLES Y 5 TAPS DE VOLTAJE**



a) — Cambiador de derivaciones
(Taps) sin carga, tipo
distribución

b) — Diagrama de conexiones
del cambiador de derivaciones



DETALLE DE SALIDAS DE TAPS A CAMBIADORES DE DERIVACIONES.

156 La construcción del transformador

RESISTENCIA ELÉCTRICA.

- III) UNA ADECUADA RESISTENCIA MECÁNICA
- IV) DEBEN SER DUCTILES Y MALEABLES.
- V) DEBEN SER FÁCILMENTE SOLDABLES.
- VI) TENER UNA ADECUADA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.

LOS MATERIALES MÁS COMÚNMENTE USADOS COMO CONDUCTORES SON:

COBRE.

EL COBRE ES PROBABLEMENTE EL MATERIAL MÁS AMPLIAMENTE USADO COMO CONDUCTOR, YA QUE COMBINA DOS PROPIEDADES IMPORTANTES QUE SON: ALTA CONDUCTIVIDAD CON EXCELENTEZAS -- CONDICIONES MECÁNICAS Y ADEMÁS TIENE UNA RELATIVA INMUNDAD A LA OXIDACIÓN Y CORROSIÓN BAJO CIERTAS CONDICIONES DE OPERACIÓN. EL ALTAMENTE MALEABLE Y DÚCTIL.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS CONDUCTORES DE COBRE Y ALUMINIO

CARACTERISTICAS	COBRE	ALUMINIO
i) Densidad (gramos/cm ³)	8.94	2.7
ii) Punto de fusión °C	1083	657
iii) Conductividad térmica watt/m ³ °C	350	200
iv) Resistividad ohm-m/mm ²	0.01724	0.0287
v) Coeficiente de resistencia por temperatura a 20 °C en ohm/ohm/°C	0.00393	0.035

ALUMINIO.

EN SEGUIDA DEL COBRE, COMO PROPIEDADES DE MATERIAL CONDUCTOR, EL ALUMINIO ESTÁ GANANDO CADA VEZ MÁS TERRENO -

EN EL CAMPO DE LA APLICACIÓN PARA UN GRAN NÚMERO DE -
APLICACIONES A LA INGENIERÍA. OTRA RAZÓN ES LA GRAN -
DEMANDA DE CONDUCTORES QUE NO SE PUEDE SATISFACER SÓ-
LO CON CONDUCTORES DE COBRE Y ASOCIADO A ESTO, SE TIE-
EL PROBLEMA DE LOS COSTOS.

EL ALUMINIO PURO ES MÁS BLANDO QUE EL COBRE Y SE PUE-
DE HACER O FABRICAR EN HOJAS Y ROLLOS LAMINADOS DELGA-
DOS. DEBIDO A SUS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS, EL ALUMI-
NIO NO SE PUEDE FABRICAR SIEMPRE EN FORMA DE ALAMBRE.

EN LA ACTUALIDAD, EL ALUMINIO SE USA CON FRECUENCIA -
EN LA FABRICACIÓN DE BOBINAS PARA TRANSFORMADORES.

3.4.2. MATERIALES AISLANTES

EXISTE UNA GRAN DIVERSIDAD EN ORIGENES Y PROPIEDADES,
MUCHOS SON DE ORIGEN NATURAL COMO POR EJEMPLO EL PA-
PEL, ALGODÓN, PARAFINA, ETC., OTROS NATURALES, PERO
DE ORIGEN INORGÁNICO, COMO POR EJEMPLO EL VIDRIO, LA
PORCELANA Y LAS CERÁMICAS. EXISTEN TAMBÍEN MATERIALES
SINTÉTICOS COMO EL SILICÓN O COMPUESTOS A BASE DE SI-
LICONES.

3.4.3. PROPIEDADES ELECTRICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES

LAS PRINCIPALES PROPIEDADES QUE DETERMINAN LA FACTIBI-
LIDAD DE USO DE UN MATERIAL AISLANTE SON:

LA RESISTIVIDAD O RESISTENCIA ESPECÍFICA, LA TENSIÓN -- DISRUPTIVA, LA PERMITIVIDAD Y LA HISTÉRESIS DIELÉCTRICA EN ADICIÓN A LAS PROPIEDADES DIELÉCTRICAS SE DEBEN CONSIDERAR TAMBIÉN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y SU CAPACIDAD PARA SOPORTAR LA ACCIÓN DE AGENTES QUÍMICOS, EL CALOR Y OTROS ELEMENTOS PRESENTES DURANTE SU OPERACIÓN.

3.4.4. LA TEMPERATURA Y LOS MATERIALES AISLANTES.

UNO DE LOS FACTORES QUE MÁS AFECTAN LA VIDA DE LOS AISLAMIENTOS, ES LA TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS. ESTA TEMPERATURA ESTÁ PROducIDA PRINCIPALMENTE POR LAS PÉRDIDAS Y EN EL CASO ESPECÍFICO DE LOS TRANSFORMADORES, DURANTE SU OPERACIÓN, ESTAS PÉRDIDAS ESTÁN LOCALIZADAS EN LOS SIGUIENTES ELEMENTOS PRINCIPALES:

EL NÚCLEO O CIRCUITO MAGNÉTICO. AQUÍ LAS PÉRDIDAS SON PROducidas POR EL EFECTO DE HISTÉRESIS Y LAS CORRIENTES CIRCULANTES EN LAS LAMINACIONES, SON DEPENDIENTES DE LA INDUCCIÓN, ES DECIR, QUE INFLUYE EL VOLTAJE DE OPERACIÓN.

LOS DEVANADOS, AQUÍ LAS PÉRDIDAS SE DEBEN PRINCIPALMENTE AL EFECTO JOULE Y EN MENOR MEDIDA POR CORRIENTES DEFOUCAULT, ESTAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS SON DEPENDIENTES DE LA CARGA EN EL TRANSFORMADOR.

SE PRESENTAN TAMBIÉN PÉRDIDAS EN LAS UNIONES O CONEXIO-

NES QUE SE CONOCEN TAMBIÉN COMO "PUNTOS CALIENTES", -
ASÍ COMO EN LOS CAMBIADORES DE DERIVACIONES.

TODAS ESTAS PÉRDIDAS PRODUCEN CALENTAMIENTO EN LOS --
TRANSFORMADORES, Y SE DEBE ELIMINAR ESTE CALENTAMIENTO
A VALORES QUE NO RESULTEN PELIGROSOS PARA LOS AISLA
MIENTOS, POR MEDIO DE LA APLICACIÓN DE DISTINTOS MEDIOS
DE ENFRIAMIENTO.

CON EL PROPÓSITO DE MANTENER EN FORMA CONFiable Y SA
TISFACTORIA LA OPERACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS, -
EL CALENTAMIENTO DE CADA UNA DE SUS PARTES, SE DEBE --
CONTROLAR DENTRO DE CIERTOS LÍMITES PREVIAMENTE DEFINI
DOS. LAS PERDIDAS EN UNA MAQUINA ELECTRICA SON IMPOR
TANTES NO TANTO PORQUE CONSTITUYAN UNA FUENTE DE INEFI
CIENCIA, SINO PORQUE PUEDEN REPRESENTAR UNA FUENTE IM
PORTANTE DE ELEVACIÓN DE TEMPERATURA PARA LOS DEVANA
DOS. ESTA ELEVACIÓN DE TEMPERATURA PUEDE PRODUCIR EFEC
TOS EN LOS AISLAMIENTOS DE LOS PROPIOS DEVANADOS, O --
BIEN EN LOS AISLAMIENTOS ENTRE DEVANADOS Y EL NÚCLEO ,
POR ESTA RAZÓN, ES SIEMPRE IMPORTANTE QUE TODOS LOS --
AISLAMIENTOS SE MANTENGAN DENTRO DE LOS LÍMITES DE TEM
PERATURA QUE GARANTICEN SU CORRECTA OPERACIÓN, SIN PER
DER SU EFECTIVIDAD.

COMO LA ELEVACIÓN EN LA TEMPERATURA DEPENDE TAMBIÉN DE
LA CARGA EN LAS MÁQUINAS, SE DEBE TENER CUIDADO DE MAN
TENER TAMBIÉN A LAS MÁQUINAS DENTRO DE SUS LÍMITES

DE CARGA O "CARGABILIDAD" ESTABLECIDOS, PARA ASÍ RESPETAR LOS LÍMITES DE TEMPERATURA DE SUS AISLAMIENTOS.

EN SU REGIMEN NOMINAL DE OPERACIÓN, UN TRANSFORMADOR TIENE ESTRECHAMENTE LIGADOS SU VOLTAJE Y POTENCIA A LOS LÍMITES IMPUESTOS POR LOS AISLAMIENTOS USADOS Y EN MENOR GRADO POR LAS PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE.

3.4.5. CLASIFICACION DE LOS MATERIALES AISLANTES.

LA CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES AISLANTES PARA MÁQUINAS ELÉCTRICAS CON RELACIÓN A SU ESTABILIDAD TÉRMICA, CUBRE BÁSICAMENTE SIETE CLASES DE MATERIALES AISLANTES QUE SE USAN POR LO GENERAL Y QUE SON LOS SIGUIENTES:

CLASE	TEMPERATURA
Y	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
C	Mayor a 180 °C

UNA DESCRIPCIÓN BREVE DE ESTOS MATERIALES SE DAN A CONTINUACIÓN:

CLASE Y.

ESTE AISLAMIENTO CONSISTE DE MATERIALES O COMBINACIONES DE MATERIALES, TALES COMO ALGODÓN, SEDA Y PAPEL SIN IMPREGNAR.

CLASE A.

ESTE AISLAMIENTO CONSISTE DE MATERIALES O COMBINACIONES DE MATERIALES TALES COMO EL ALGODÓN, SEDA Y PAPEL CON ALGUNA IMPREGNACIÓN O RECUBRIMIENTO O CUANDO SE SUMERGEN EN DIELECTRICOS LÍQUIDOS TALES COMO ACEITE. OTROS MATERIALES O COMBINACIÓN DE MATERIALES QUE CAIGAN DENTRO DE ESTOS LÍMITES DE TEMPERATURA, PUEDEN CAER DENTRO DE ESTA CATEGORÍA.

CLASE E.

ESTE AISLAMIENTO CONSISTE DE MATERIALES O COMBINACIONES DE MATERIALES QUE POR EXPERIENCIA O POR PRUEBAS, PUEDEN OPERAR A TEMPERATURAS HASTA DE 5 °C, SOBRE LA TEMPERATURA DE LOS AISLAMIENTOS CLASE A.

CLASE B.

ESTE AISLAMIENTO CONSISTE DE MATERIALES O COMBINACIONES DE MATERIALES TALES COMO LA ÚNICA, FIBRA DE VIDRIO, ASBESTOS, ETC. CON ALGUNAS SUBSTANCIAS AGLUTINANTES, PUEDEN HABER OTROS MATERIALES INORGÁNICOS.

162 La construcción del transformador

CLASE F

ESTE AISLAMIENTO CONSISTE EN MATERIALES O COMBINACIONES DE MATERIALES TALES COMO MICA, FIBRA DE VIDRIO, ASBESTO, ETC., CON SUSTANCIAS AGLUTINABLES, ASÍ COMO OTROS MATERIALES O COMBINACIONES DE MATERIALES NO NECESARIAMENTE INORGÁNICOS.

CLASE H

ESTE AISLAMIENTO CONSISTE DE MATERIALES TALES COMO EL SILICÓN, ELASTÓMEROS Y COMBINACIONES DE MATERIALES TALES COMO LA MICA, LA FIBRA DE VIDRIO, ASBESTOS, ETC., CON SUSTANCIAS AGLUTINABLES COMO SON LAS RESINAS Y SILICONES APROPIADOS.

CLASE C

ESTE AISLAMIENTO CONSISTE DE MATERIALES O COMBINACIONES DE MATERIALES TALES COMO LA MICA, LA PORCELANA, VIDRIO, CUARZO CON O SIN AGLUTINANTES.

3.5. MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

COMO YA SE MENCIONÓ ANTES, EL CALOR PRODUCIDO POR LAS PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES AFECTA LA VIDA DE LOS AISLAMIENTOS.

TOS, POR ESTA RAZÓN ES IMPORTANTE QUE ESTE CALOR PRODUCIDO SE DISIPE DE MANERA QUE SE MANTENGA DENTRO DE LOS LÍMITES TOLERABLES POR LOS DISTINTOS TIPOS DE AISLAMIENTO.

LA TRANSMISIÓN DEL CALOR TIENE LAS ETAPAS SIGUIENTES EN LOS TRANSFORMADORES:

- CONDUCCIÓN A TRAVÉS DEL NÚCLEO, BOBINAS Y DEMÁS ELEMENTOS -- HASTA LA SUPERFICIE.
- TRANSMISIÓN POR CONVECCIÓN EN EL CASO DE LOS TRANSFORMADORES SECOS.
- PARA LOS TRANSFORMADORES EN ACEITE, EL CALOR SE TRANSMITE -- POR CONVECCIÓN A TRAVÉS DE ESTE DIELECTRICO.

LOS LÍMITES DE CALENTAMIENTO PARA LOS TRANSFORMADORES SE DAN A CONTINUACIÓN:

PARTES DEL TRANSFORMADOR	MODO DE ENFRIAMIENTO	CLASE DE AISLAMIENTO (POR TEMPERATURA)	CALENTAMIENTO °C
Devanados	Por aire, natural o con ventilación forzada	A E B F H C	60 75 80 100 125 150
a) Circuitos magnéticos y otras partes. b) Sin estar en contacto con los devanados.			a) Los mismos valores que para los devanados. b) Valores similares a las partes aislantes susceptibles de entrar en contacto con los devanados.

LÍMITES DE CALENTAMIENTO PARA TRANSFORMADORES ENFRIADOS POR ACEITE

P A R T E	MODO DE ENFRIAMIENTO	CIRCULACIÓN DE ACEITE	CALENTAMIENTO (°C)
DEVANADOS CLASE DE AISLAMIENTO A	<ul style="list-style-type: none"> - NATURAL - POR CIRCULACIÓN FORZADA - POR CIRCULACIÓN INTERNA DE AGUA 	NATURAL	65
	<ul style="list-style-type: none"> - POR VENTILACIÓN FORZADA - POR REFRIGERACIÓN EXTERNA DE AGUA 	FORZADA FORZADA Y DIRIGIDA A LOS DEVANADOS	65
ACEITE EN LA PARTE SUPERIOR		<p>60, AÚN EN EL CASO DE TRANSFORMADORES CON TANQUE CONSERVADOR</p> <p>55, PARA TRANSFORMADORES SIN TANQUE CONSERVADOR</p>	
CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y OTRAS PARTES			<p>LA TEMPERATURA NO ALCANZA EN NINGÚN CASO UN VALOR ELEVADO SUSCEPTIBLE DE DAÑAR -</p> <p>LOS AISLAMIENTOS</p>

3.5.1. LÍQUIDOS REFRIGERANTES Y AISLANTES

EL CALOR PRODUCIDO POR LAS PÉRDIDAS SE TRANSMITE A TRAVÉS DE UN MEDIO AL EXTERIOR, ESTE MEDIO PUEDE SER AIRE O BIEN LÍQUIDO

LA TRANSMISIÓN DEL CALOR SE HACE POR UN MEDIO EN FORMA MÁS O MENOS EFICIENTE, DEPENDIENDO DE LOS SIGUIENTES FACTORES:

- LA MASA VOLUMÉTRICA
- EL COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA.
- LA VISCOSIDAD
- EL CALOR ESPECÍFICO
- LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

EN CONDICIONES GEOMÉTRICAS Y TÉRMICAS IDÉNTICAS, EL ACEITE -
ES MEJOR CONDUCTOR TÉRMICO QUE EL AIRE, ES DECIR RESULTA MÁS
EFICIENTE PARA LA DISIPACIÓN DEL CALOR.

DESIGNACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO

LOS TRANSFORMADORES ESTÁN POR LO GENERAL ENFRIADOS POR AIRE
O ACEITE Y CUALQUIER MÉTODO DE ENFRIAMIENTO EMPLEADO DEBE -
SER CAPAZ DE MANTENER UNA TEMPERATURA DE OPERACIÓN SUFICIENTEMENTE BAJA Y PREVENIR "PUNTOS CALIENTES" EN CUALQUIER PARTE DEL TRANSFORMADOR. EL ACEITE SE CONSIDERA UNO DE LOS MEJORES MEDIOS DE REFRIGERACIÓN QUE TIENE ADÉMÁS BUENAS PROPIEDADES DIELECTRICAS Y QUE CUMPLE CON LAS SIGUIENTES FUNCIONES:

166 La construcción del transformador

- ACTUA COMO AISLANTE ELECTRICO
- ACTUA COMO REFRIGERANTE
- PROTEGE A LOS AISLAMIENTOS SOLIDOS CONTRA LA HUMEDAD Y EL AIRE

CON RELACIÓN A LA TRANSFERENCIA DEL CALOR ESPECÍFICAMENTE, LAS FORMAS EN QUE SE PUEDE TRANSFERIR POR UN TRANSFORMADOR SON LAS SIGUIENTES:

- CONVECCIÓN
- RADIACIÓN
- CONDUCCIÓN

CONVECCIÓN

LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN SE PUEDE HACER EN DOS FORMAS:

- POR CONVECCIÓN NATURAL
- POR CONVECCIÓN FORZADA

CONDUCCIÓN

LA CONDUCCIÓN ES NORMALMENTE UN PROCESO LENTO POR EL CUAL SE TRANSMITE EL CALOR A TRAVÉS DE UNA SUBSTANCIA POR ACTIVIDAD MOLECULAR. LA CAPACIDAD QUE TIENE UNA SUBSTANCIA PARA CONDUCIR CALOR SE MIDE POR SU "CONDUCTIVIDAD TÉRMICA". ESTA FORMA DE TRANSFERENCIA DEL CALOR SE PRESENTA EN EL TRANSFORMADOR

EN MAYOR O MENOR GRADO EN ALGUNAS PARTES DEL TRANSFORMADOR, COMO POR EJEMPLO, DEL PAPEL AISLANTE AL ACEITE AISLANTE ES - POR CONVECCIÓN NATURAL.

RADIACIÓN

ES LA EMISIÓN O ABSORCIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS QUE SE DESPLAZAN A LA VELOCIDAD DE LA LUZ Y REPRESENTA EN TEMPERATURAS ELEVADAS UN MECANISMO DE PÉRDIDA DE CALOR. EN EL CASO DE LOS TRANSFORMADORES, LA TRANSFERENCIA DEL CALOR A TRAVÉS DEL TANQUE Y LOS TUBOS RADIADORES HACIA LA ATMÓSFERA ES POR RADIAción.

LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE ENFRIAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ES MUY IMPORTANTE, YA QUE LA DISIPACIÓN DEL CALOR, COMO YA SE MENCIONÓ ANTES, INFUYE MUCHO EN SU TIEMPO DE VIDA Y CAPACIDAD DE CARGA, ASÍ COMO EN EL ÁREA DE SU INSTALACIÓN Y SU COSTO. DE ACUERDO A LAS NORMAS AMERICANAS (ASA C57-1948) - SE HAN NORMALIZADO O DEFINIDO ALGUNOS MÉTODOS BÁSICOS DE ENFRIAMIENTO, MISMOs QUE SE USAN CON LA MISMA DESIGNACIÓN EN MÉXICO Y SON LOS SIGUIENTES:

1. TIPO AA

TRANSFORMADORES TIPO SECO CON ENFRIAMIENTO PROPIO, ESTOS TRANSFORMADORES NO CONTIENEN ACEITE NI OTROS LÍQUIDOS PARA ENFRIAMIENTO, EL AIRE ES TAMBIÉN EL MEDIO AISLANTE QUE RODEA EL NÚCLEO Y LAS BOBINAS, POR LO GENERAL SE FABRICAN

CON CAPACIDADES INFERIORES A 2000 KVA Y VOLTAJES MENORES DE 15 KV.

2. TIPO AFA

TRANSFORMADORES TIPO SECO CON ENFRIAMIENTO POR AIRE FORZADO, SE EMPLEA PARA AUMENTAR LA POTENCIA DISPONIBLE DE LOS TIPO AA Y SU CAPACIDAD SE BASA EN LA POSIBILIDAD DE DISIPACIÓN DE CALOR POR MEDIO DE VENTILADORES O SOPLADORES.

3. TIPO AA/FA

TRANSFORMADOR TIPO SECO CON ENFRIAMIENTO NATURAL Y CON ENFRIAMIENTO POR AIRE FORZADO, ES BÁSICAMENTE UN TRANSFORMADOR TIPO AA AL QUE SE LE ADICIONAN VENTILADORES PARA AUMENTAR SU CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE CALOR.

4. TIPO OA

TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN ACEITE CON ENFRIAMIENTO NATURAL, EN ESTOS TRANSFORMADORES EL ACEITE AISLANTE CIRCULA POR CONVECCIÓN NATURAL DENTRO DE UN TANQUE QUE TIENE PAREDES LISAS O CORRUGADAS O BIEN PROVISTOS CON TUBOS RADIADORES. ESTA SOLUCIÓN SE ADOPTA PARA TRANSFORMADORES DE MÁS DE 50 KVA CON VOLTAJES SUPERIORES A 15 KV.

5. TIPO OA/FA

TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN LÍQUIDO AISLANTE CON ENFRIAMIENTO PROPIO Y CON ENFRIAMIENTO POR AIRE FORZADO, ES BÁSICAMENTE UN TRANSFORMADOR OA CON LA ADICIÓN DE VENTILADORES PARA AUMENTAR LA CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE CALOR EN LAS SUPERFICIES DE ENFRIAMIENTO.

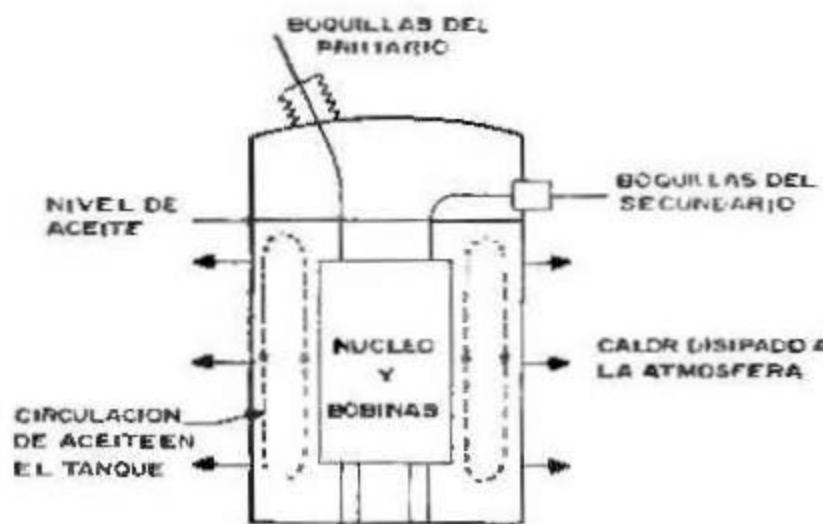
6. TIPO OA/FOA/FOA

TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN LÍQUIDO AISLANTE CON ENFRIAMIENTO PROPIO/CON ACEITE FORZADO - AIRE FORZADO/CON ACEITE FORZADO/AIRE FORZADO.

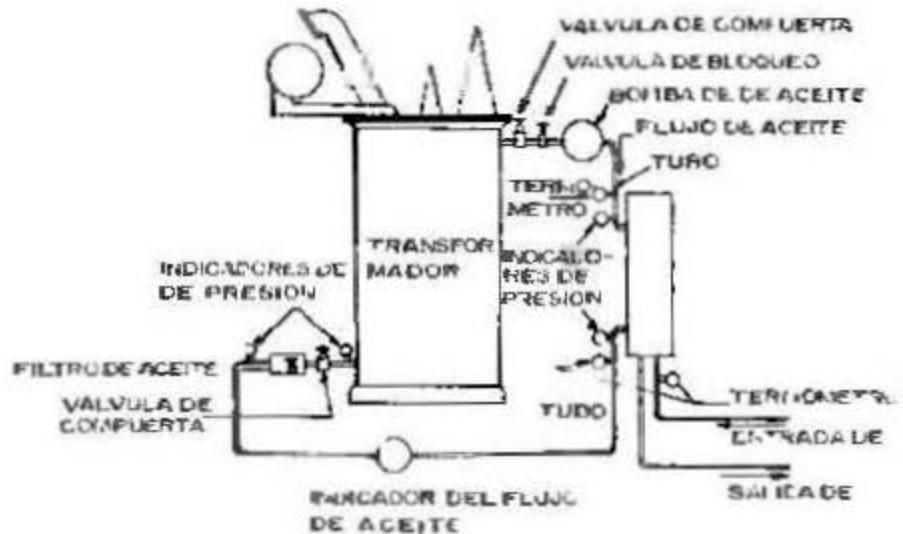
CON ESTE TIPO DE ENFRIAMIENTO SE TRATA DE INCREMENTAR EL RÉGIMEN DE OPERACIÓN (CARGA) DE TRANSFORMADOR TIPO OA POR MEDIO DEL EMPLEO COMBINADO DE BOMBAS Y VENTILADORES. EL AUMENTO DE LA CAPACIDAD SE HACE EN DOS PASOS: EN EL -- PRIMERO SE USAN LA MITAD DE LOS RADIADORES Y LA MITAD DE LAS BOMBAS CON LO QUE SE LOGRA AUMENTAR EN 1.33 VECES LA CAPACIDAD DEL TIPO OA, CON EL SEGUNDO PASO SE HACE TRABAJAR LA TOTALIDAD DE LOS RADIADORES Y BOMBAS CON LO QUE SE LOGRA UN AUMENTO DE 1.667 VECES LA CAPACIDAD DEL OA. SE FABRICAN EN CAPACIDADES DE 10000 KVA MONOFÁSICOS O 15000 KVA TRIFÁSICOS.

7. TIPO FOA

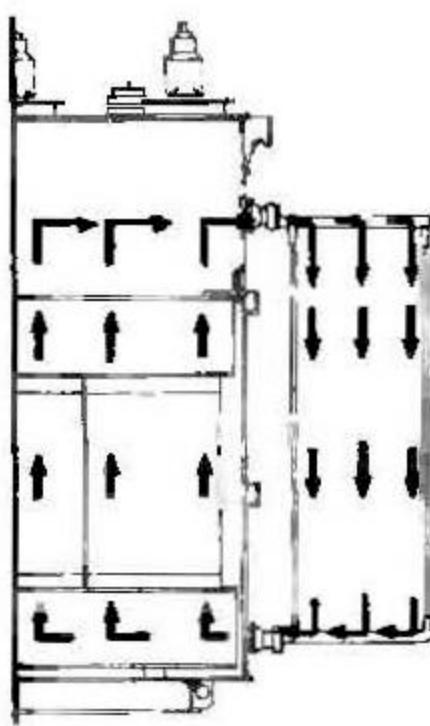
SUMERGIDO EN LÍQUIDO AISLANTE CON ENFRIAMIENTO POR ACEITE FORZADO Y DE AIRE FORZADO. ESTOS TRANSFORMADORES PUEDEN -



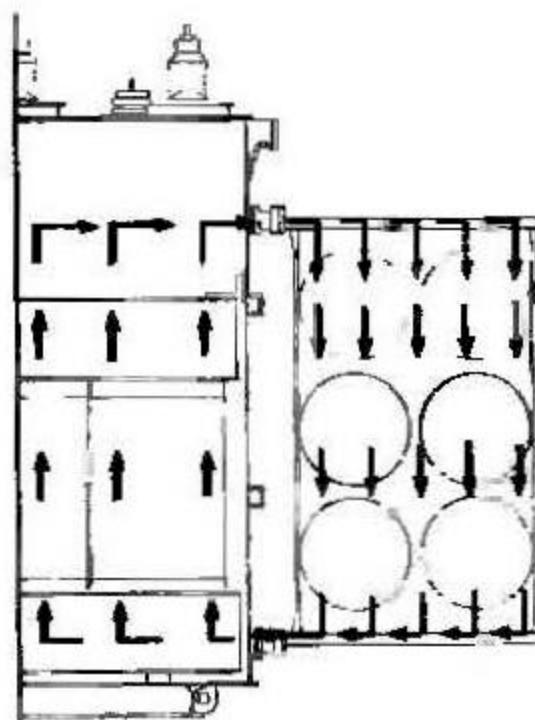
ENFRIAMIENTO DEL NUCLEO Y BOBINAS
POR CIRCULACION DE ACEITE



TRANSFORMADOR ENFRIADO POR
CIRCULACION FORZADA DE ACEITE
(FOA)



TRANSFORMADOR ENFRIADO POR ACEITE
(TIPO OA) LAS FLECHAS INDICAN LA —
CIRCULACION DEL ACEITE CALIENTE —



TRANSFORMADOR ENFRIADO POR ACEITE CON
CIRCULACION DE AIRE FORZADO(TIPO OA/FA)

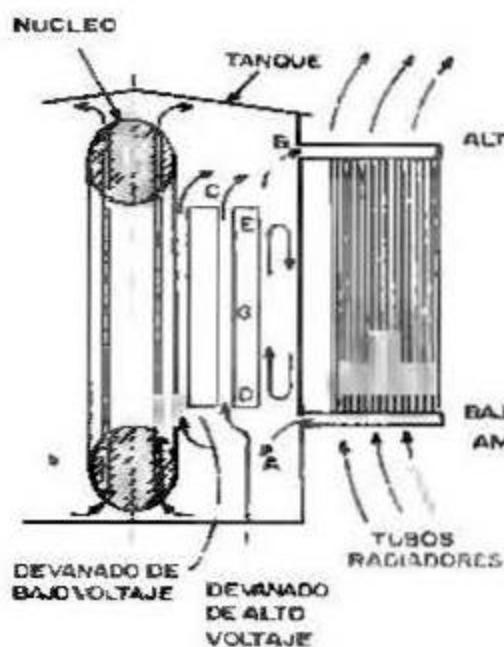
ABSORBER CUALQUIER CARGA DE PICO A PLENA CAPACIDAD YA QUE SE USA CON LOS VENTILADORES Y LAS BOMBAS DE ACEITE TRABAJANDO AL MISMO TIEMPO.

8. TIPO OW

SUMERGIDO EN LÍQUIDO AISLANTE CON ENFRIAMIENTO POR AGUA. EN ESTOS TRANSFORMADORES EL AGUA DE ENFRIAMIENTO ES CONDUCIDA POR SERPENTINES, LOS CUALES ESTÁN EN CONTACTO CON EL ACEITE AISLANTE DEL TRANSFORMADOR Y SE DRENA POR GRAVEDAD O POR MEDIO DE UNA BOMBA INDEPENDIENTE. EL ACEITE CIRCULA ALREDEDOR DE LOS SERPENTINES POR CONVECCIÓN NATURAL.

9. TIPO FOW

TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN LÍQUIDO AISLANTE CON ENFRIAMIENTO DE ACEITE FORZADO Y CON ENFRIADORES DE AGUA FORZADA. ESTE TIPO DE TRANSFORMADORES ES PRÁCTICAMENTE IGUAL QUE EL FOA, SÓLO QUE EL CAMBIADOR DE CALOR ES DEL TIPO - AGUA - ACEITE Y SE HACE EL ENFRIAMIENTO POR AGUA SIN TENER VENTILADORES.



CIRCULACION NATURAL DEL ACEITE Y DEL AIRE (OA)

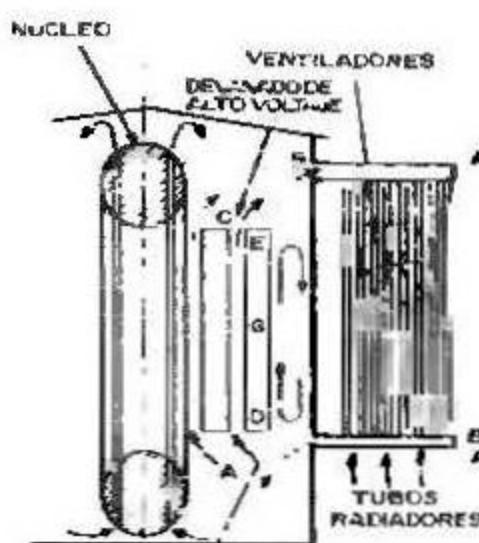
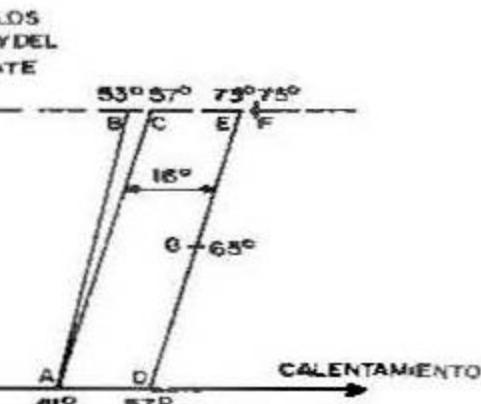


DIAGRAMA DE TEMPERATURAS

CIRCULACION NATURAL DEL ACEITE CON CIRCULACION FORZADA DE AIRE

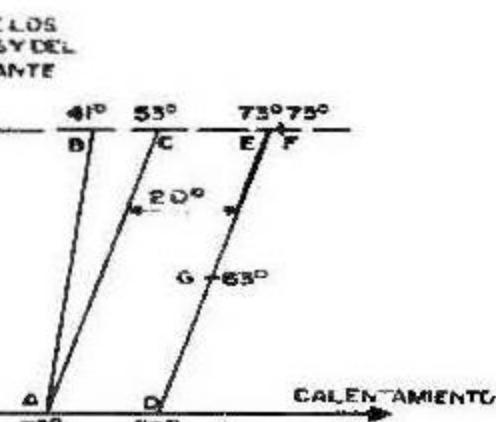
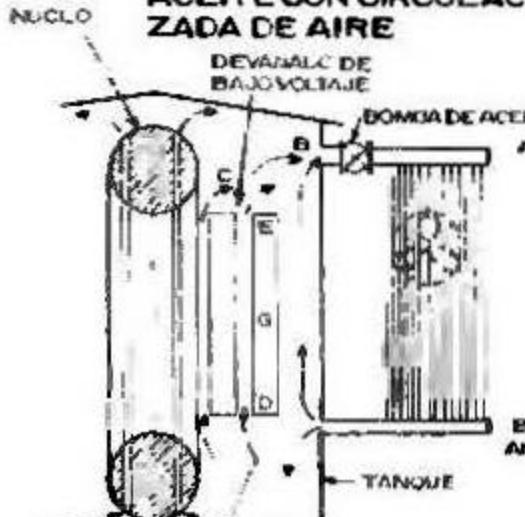
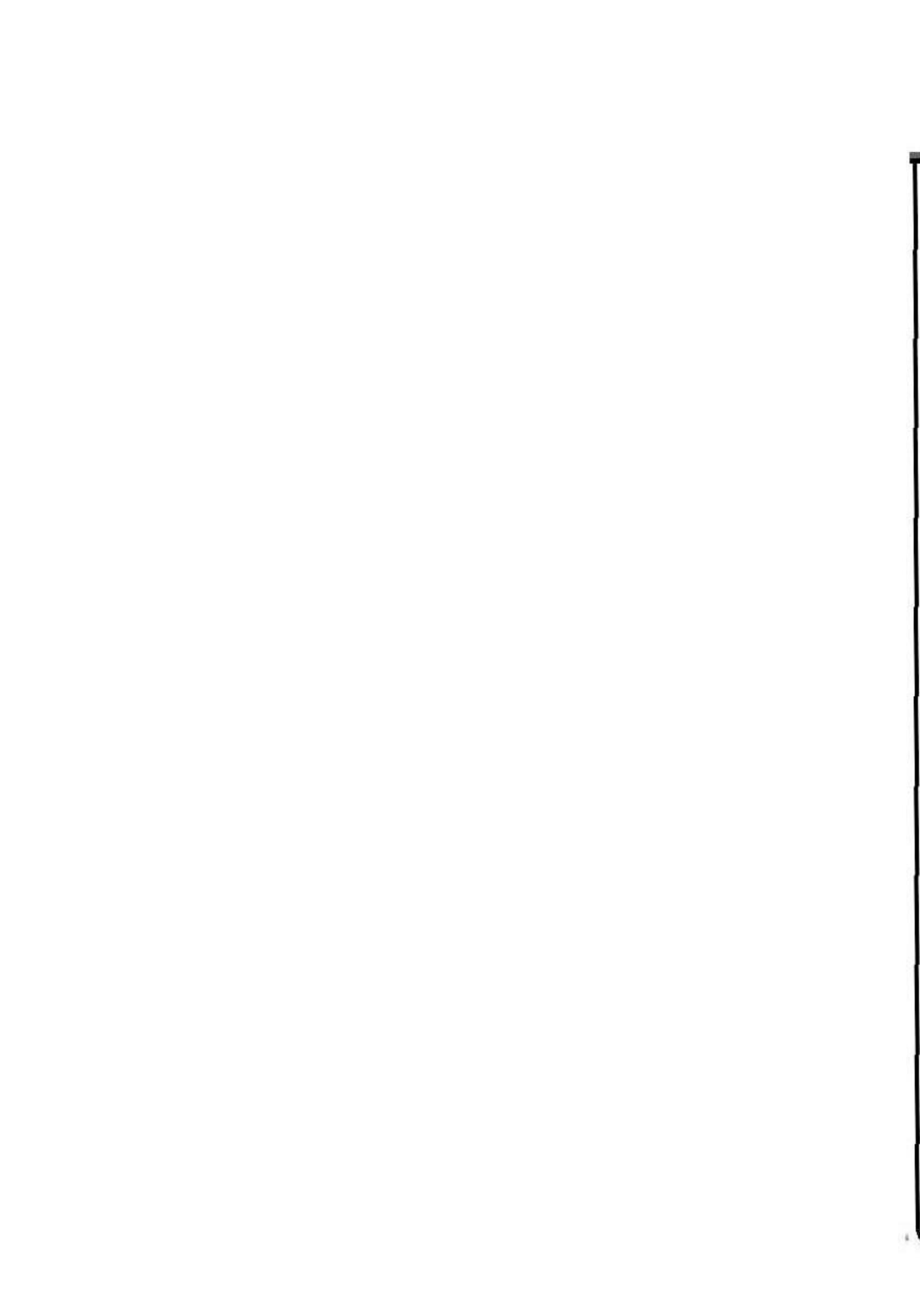


DIAGRAMA DE TEMPERATURAS

CIRCULACION FORZADA DE ACEITE Y DEL AIRE



C A P I T U L O 4

FUNDAMENTOS DE CALCULO DE TRANSFORMADORES

CAPITULO 4

FUNDAMENTOS DE CALCULO DE TRANSFORMADORES

4.1. INTRODUCCION

EL CÁLCULO O DISEÑO DE TRANSFORMADORES SE PUEDE DECIR QUE ES UN ASPECTO SUFICIENTEMENTE TRATADO, EN EL QUE INTERVIENEN ALGUNAS VARIANTES - DEPENDIENDO DEL TIPO DE TRANSFORMADOR Y DE LOS MATERIALES EMPLEADOS. EN LA ACTUALIDAD LOS FABRICANTES DE TRANSFORMADORES A GRAN ESCALA, - DISPONEN POR LO GENERAL DE PROGRAMAS PARA COMPUTADORA PARA DISEÑO Y - DE LABORATORIOS APROPIADOS DE PRUEBA Y DESARROLLO.

NO OBSTANTE, LOS CONCEPTOS BÁSICOS DEL CÁLCULO DE TRANSFORMADORES SE DEBEN CONOCER POR LAS PERSONAS RELACIONADAS CON LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS, YA QUE ESTO NO SOLO PERMITE UNA MEJOR COMPRENSIÓN DE SU FUNCIONAMIENTO, SINO TAMBIÉN SE ESTÁ EN POSIBILIDAD DE ENTENDER MEJOR LAS POSIBLES FALLAS QUE TIENEN Y SU REPARACIÓN.

4.2. DIMENSIONAMIENTO DE LAS PARTES ACTIVAS DEL TRANSFORMADOR

COMO SE SABE, LOS TRANSFORMADORES ESTÁN CONSTITUIDOS PRINCIPALMENTE - POR EL NÚCLEO Y LOS DEVANADOS (BOBINAS), EN PRINCIPIO EL TRATAMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL NÚCLEO CORRESPONDE AL - QUE SE DA PARA EL CÁLCULO DE UN CIRCUITO MAGNÉTICO, ES DECIR SE PARTEN DE LOS MISMOS CONCEPTOS Y BASES PARA EL CÁLCULO DE UN REACTOR, Y EN PARTE, UN ELECTROIMÁN. LOS CONCEPTOS BÁSICOS DE CÁLCULO ESTÁN DADOS POR "LA DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO" (B_m) EXPRESADA EN WEBER/M² Y EL FLUJO MAGNÉTICO (Φ_m) EXPRESADO EN WEBER, DE MANERA QUE LA SECCIÓN DE UN NÚCLEO MAGNÉTICO SE PUEDE CALCULAR COMO:

$$S = \frac{\Phi_m}{B_m}$$

PARTIENDO DEL HECHO QUE SE HA FIJADO LA DENSIDAD DE FLUJO B_m CON UN -

CIERTO CRITERIO DE CONVENIENCIA QUE TOMA EN CONSIDERACIÓN LA POTENCIA DEL TRANSFORMADOR, LAS PÉRDIDAS EN LOS MATERIALES Y EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO EMPLEADO COMO MEDIDA DE ORIENTACIÓN, SE DA LA TABLA SIGUIENTE EN DONDE SE DA EL VALOR MEDIO DE LA INDUCCIÓN EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA.

TABLA 4.1

DENSIDAD DE FLUJO MEDIO EN FUNCION DE LA POTENCIA EN TRANSFORMADORES

POTENCIA DEL TRANSFORMADOR EN kVA	DENSIDAD DE FLUJO Bm (WEBER/M ²)
5 - 10	1.10 - 1.20
10 - 20	1.15 - 1.25
20 - 50	1.20 - 1.30
50 - 200	1.25 - 1.35
200 - 500	1.30 - 1.40
MAS DE 500	1.35 - 1.50

CUANDO SE USA LAMINACIÓN DE CRISTAL ORIENTADO SE PUEDE TENER UNA INDUCCIÓN HASTA DE 1.6 WEBER/M².

4.2.1. DETERMINACIÓN DEL FLUJO

SI SE DESPRECIA LA CAÍDA DE TENSIÓN EN EL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR SE PUEDE ESCRIBIR QUE:

$$V_s = E_s = 4.44 f N_s \Phi_m$$

DONDE:

N_s = NÚMERO DE ESPIRAS DEL DEVANADO SECUNDARIO

SI SE MULTIPLICA AMBOS MIEMBROS DE LA EXPRESIÓN ANTERIOR POR I_s (LA CORRIENTE NOMINAL SECUNDARIA) SE OBTIENE LA POTENCIA NOMINAL



a



b



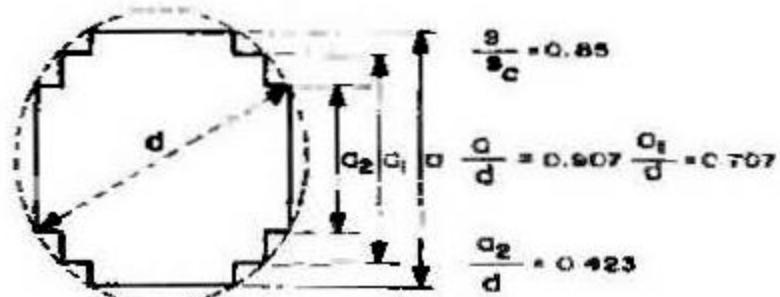
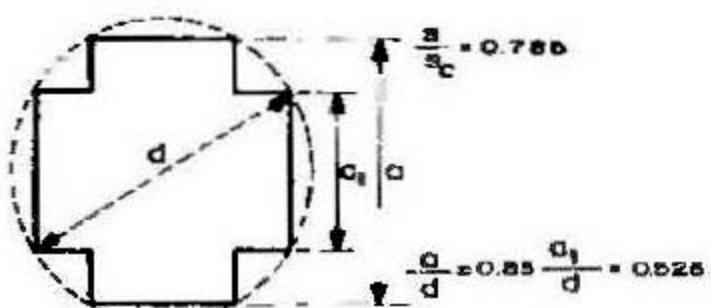
c

a) CUADRADA

b) CRUCIFORME

c) DE ESCALONES

FORMAS DE LAS SECCIONES DE LAS COLUMNAS



TIPO DE SECCIONES DE LAS COLUMNAS

180 Fundamentos de cálculo de transformadores

$$P_N = V_S I_S = 4,44 f N_S I_S \phi_M$$

EN LA EXPRESIÓN ANTERIOR AL PRODUCTO $N_S I_S$ SE LE PUEDE SUSTITUIR POR LA RELACIÓN ϕ_M/K , DONDE $K = \phi_M/N_S I_S$ QUE SE CONOCE COMO "EL FACTOR - DE FLUJO" Y QUE DEPENDE DEL TIPO, LA POTENCIA Y TIPO DE ENFRIAMIENTO DEL TRANSFORMADOR. CON ESTA SUSTITUCIÓN SE TIENE:

$$P_N = 4,44 f \frac{\phi_M^2}{K}$$

SI SE EXPRESA LA POTENCIA EN KVA, DESARROLLANDO SE OBTIENE LA SIGUIENTE EXPRESIÓN:

$$\phi_M = \frac{K_F}{\sqrt{f}} \sqrt{P_N}$$

DONDE LA CONSTANTE K_F ES:

$$K_F = \frac{1000 K}{4,44}$$

PARA UNA FRECUENCIA DE 60HZ SE PUEDE ESCRIBIR:

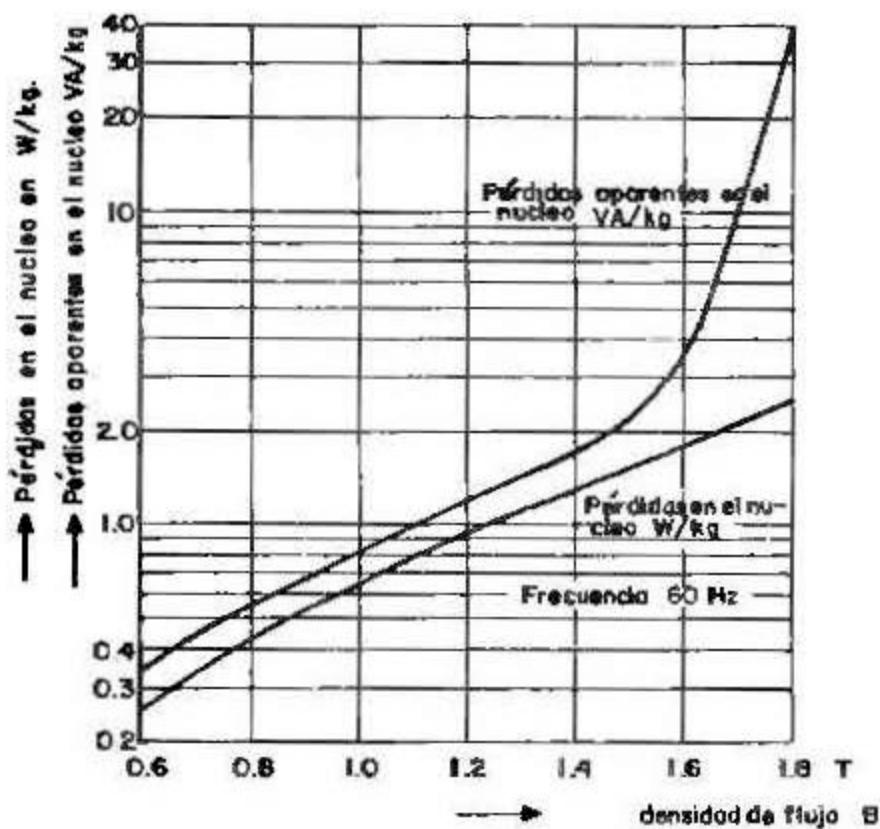
$$\phi_M = 10^{-2} C \sqrt{P_N}$$

PARA LA CONSTANTE C SE PUEDEN ADOPTAR LOS VALORES DADOS EN LA TABLA - SIGUIENTE:

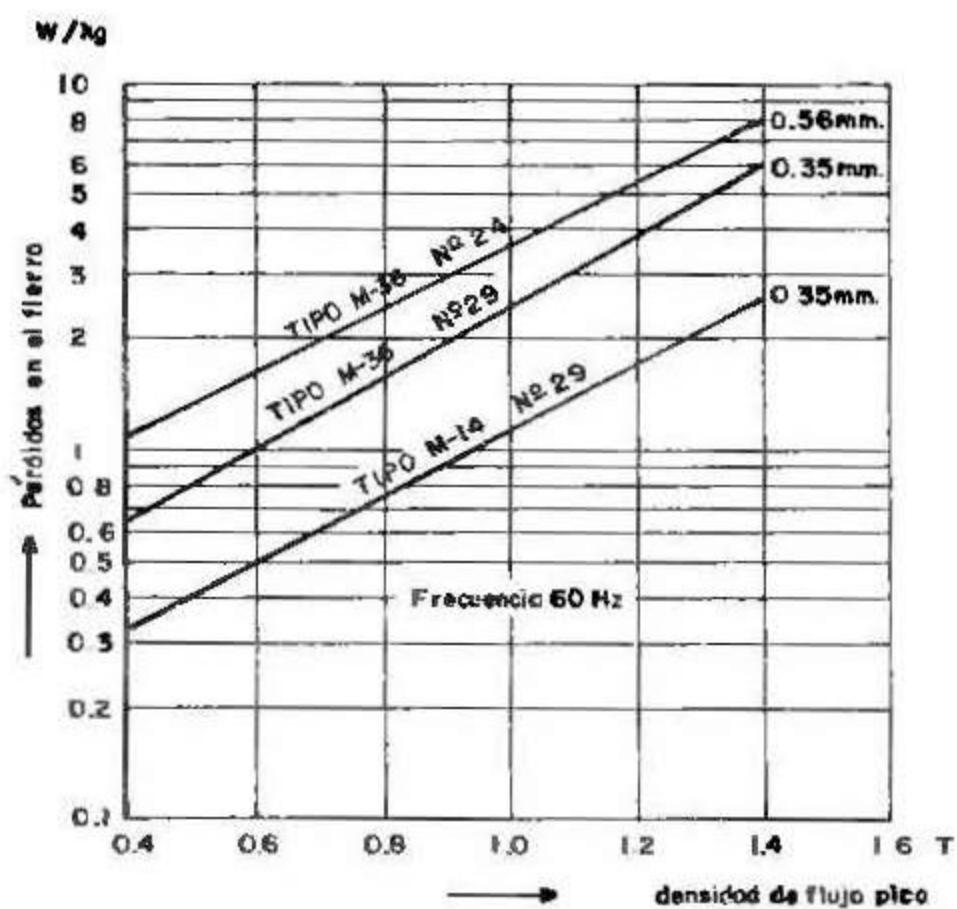
TABLA 4.2

VALORES DE LA CONSTANTE C PARA EL CALCULO DEL FLUJO

		ϕ_M
TIPO DE TRANSFORMADOR		CONSTANTE C
MONOFASICO	TIPO COLUMNAS	0.13 - 0.20
	ACORAZADO	0.26 - 0.39
TRIFASICO	TIPO COLUMNAS	0.16 - 0.23
	ACORAZADO	0.39 - 0.52



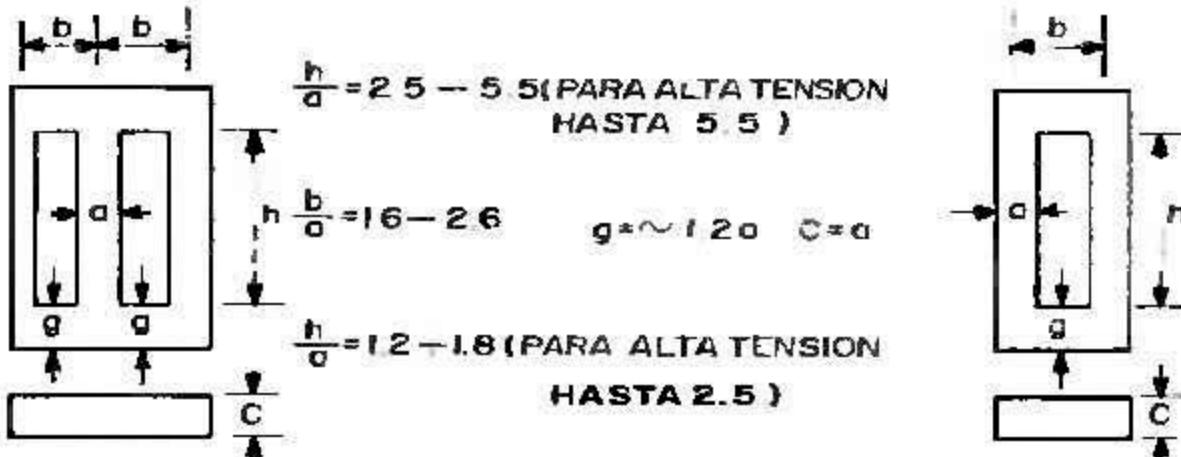
Pérdidas y pérdidas aparentes en el fierro para lámina de acero al silicio de 0.35 IT= Tesla = 10,000 Gauss



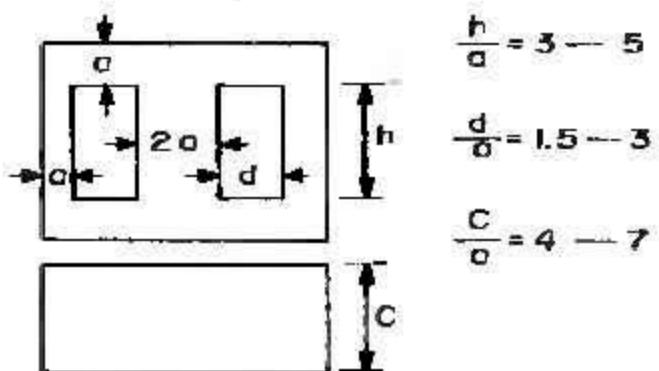
Curva típica de pérdidas en el fierro (Laminaciones) a 60 Hz

FIGURA 6.1

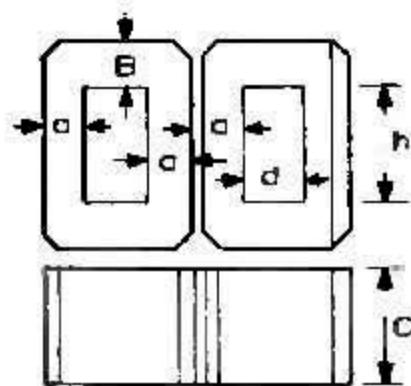
a)



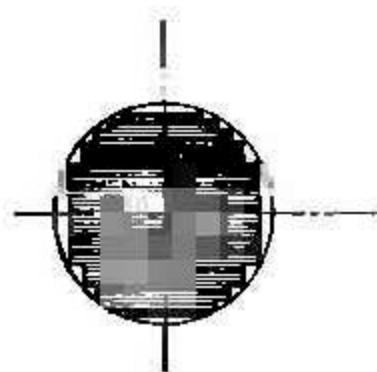
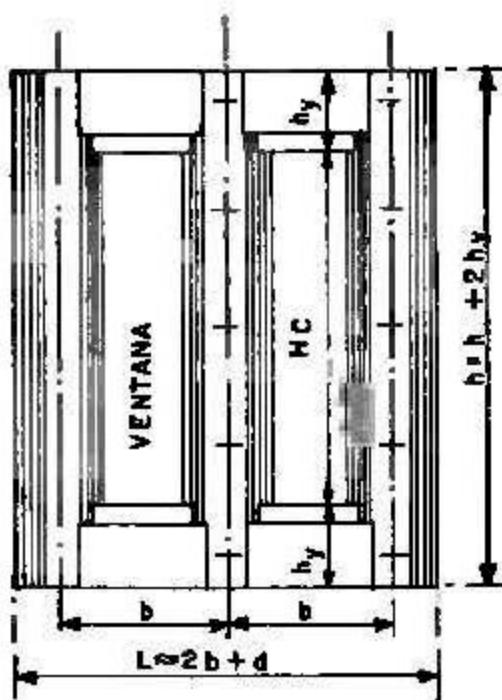
b)



c)

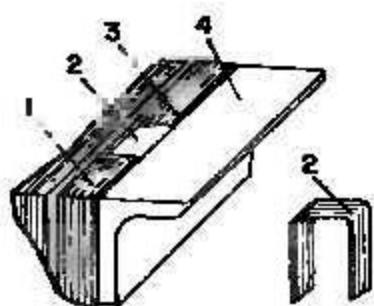


RELACIONES DE DIMENSIONES PARA
NUCLEOS DE TRANSFORMADORES



L=Longitud del nucleo
 CD=Distancia entre centros de piernas
 h=Altura del nucleo
 d=Diametro del nucleo
 hy=Ancho del yugo
 NC=Altura de la ventana

DIMENSIONES BASICAS DEL NUCLEO



1—Nucleo
 2—Lamina de puesto a tierra
 3—Placa distante
 4—Sujeción del nucleo

CONEXION A TIERRA DEL NUCLEO

184 Fundamentos de cálculo de transformadores

A LOS VALORES MÁS BAJOS DE C CORRESPONDEN A LOS VALORES MAYORES DEL NÚMERO DE ESPIRAS DE LOS DEVANADOS. UN DIMENSIONAMIENTO BIEN HECHO DEBE CONCILIAR NECESARIAMENTE LOS FACTORES TÉCNICO - ECONÓMICOS.

DESPUÉS DE HABER DETERMINADO EL VALOR DE LA SECCIÓN Y ESTABLECIDA LA FORMA (SEGÚN SEA EL CASO, CRUCIFORME O DE CRUZ O DE ESCALONES) SE OBTIENE EL RADIO DE LA CIRCUNFERENCIA CIRCUNSCRITA, TOMANDO EN CONSIDERACIÓN EL FACTOR DE EMPAQUETAMIENTO (AL ATORNILLAR EL NÚCLEO CON HERRAJES O TORNILLOS) Y CUYOS VALORES SON:

- 0.86 - 0.90 PARA LAMINACIONES AISLADAS CON PAPEL
- 0.90 - 0.92 PARA LAMINACIONES AISLADAS EN BARNIZ
- 0.85 - 0.90 PARA NÚCLEOS CON ESCALONES

PARA TRANSFORMADORES DE NÚCLEO ACORAZADO, LA SECCIÓN DEL NÚCLEO ES NORMALMENTE RECTANGULAR.

4.2.2. CÁLCULO DEL NÚMERO DE ESPIRAS

SE PARTE DE LA FÓRMULA $V = 4.44 f N \Phi_m$, PARA EL DEVANADO PRIMARIO SE CONSIDERA EL VOLTaje INDUCIDO O FUERZA ELECTROMOTRIZ IGUAL A LA TENSIÓN APlicADA, DESPRECIANDO ASÍ LA CAIDA DE TENSIÓN. EN LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS LA TENSIÓN A CONSIDERAR ES LA DE FASE. EN LA FÓRMULA ANTERIOR, CONVIENE RECORDAR QUE N REPRESENTA "EL NÚMERO TOTAL DE ESPIRAS POR FASE". POR LO TANTO CUANDO HAY ESPIRAS FORMADAS POR CONDUCTORES EN PARALELO, SE CONSIDERAN COMO UNA SOLA VUELTA.

SI SE DIVIDE LA TENSIÓN POR FASE ENTRE EL NÚMERO DE ESPIRAS EN SERIE POR FASE SE OBTIENE EL NÚMERO DE VOLT/ESPIRA, ESTE VALOR PARA UN MISMO TIPO DE TRANSFORMADOR VA AUMENTANDO CON LA POTENCIA. POR EJEMPLO, PARA UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DEL TIPO COLUMNA ENFRIADO POR AIRE, PARA UNA POTENCIA DE 1 kVA SE PUEDE TENER DE 0.25 - 0.5 VOLT/ESPIRA, EN TANTO QUE PARA UNA POTENCIA DE 100 kVA, TALES VALORES PUEDEN ESTAR ENTRE 3.2 Y 5.5 VOLTS/ESPIRA.

DESDE EL PUNTO DE VISTA DE DISEÑO, UNA VEZ QUE SE DETERMINA EL NÚMERO

DE ESPIRAS, SE CALCULAN LOS VOLTS/ESPIRA, QUE DEBEN ESTAR DENTRO DE LOS LÍMITES ESTABLECIDOS POR LOS FABRICANTES. LOS VALORES MEDIOS A CONSIDERAR PARA TRANSFORMADORES DE PEQUEÑA Y MEDIA POTENCIA SE INDICAN EN LA TABLA SIGUIENTE:

TABLA 4.3

VALORES MEDIOS DE VOLTS/ESPIRA EN FUNCION DE LA POTENCIA

POTENCIA EN kVA	VOLTS/ESPIRA
1	0.3 - 0.6
5	0.7 - 1.1
10	1.0 - 1.6
25	1.6 - 2.5
50	2.3 - 3.5
75	2.7 - 4.5
100	3.2 - 5.5

PARA OTRO TIPO DE TRANSFORMADORES LOS VALORES ANTERIORES SE MODIFICAN POR COEFICIENTES PARA CADA CASO. TALES COEFICIENTES SON:

- PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EN AIRE DEL TIPO COLUMNAS 1.2
- PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EN ACEITE DEL TIPO COLUMNAS 1.35
- PARA TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS TIPO NÚCLEO ACORAZADO 2.5 - 3.0
- PARA TRANSFORMADORES EN AIRE TIPO COLUMNAS 0.85
- PARA TRANSFORMADORES EN AIRE ACORAZADO 1.3 - 1.6

OTRO ELEMENTO IMPORTANTE A CONSIDERAR ESTA DADO POR LA LIMITACIÓN DE

186 Fundamentos de cálculo de transformadores

LA DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE LA PRIMERA ESPIRA DE UNA CAPA DE UNA BOBINA Y LA CAPA ADYACENTE, CONSTITUIDA POR LA ÚLTIMA ESPIRA DE LA CA-
PA ANTERIOR O LA SIGUIENTE. ESTA DIFERENCIA DE POTENCIAL SE DEBE MANTE-
NER ENTRE 200 Y 300 VOLTS.

4.2.3. DENSIDAD DE CORRIENTE

LA DENSIDAD DE CORRIENTE (EXPRESADA EN AMPERES/MM²) EN LOS CONDUCTO-
RES USADOS EN LA FABRICACIÓN DE TRANSFORMADORES DEPENDE DESDE LUEGO DE
LA SECCIÓN O ÁREA DE LOS CONDUCTORES, PERO PARA UN CIERTO CONDUCTOR DA-
DO, ESENCIALMENTE DEPENDE DEL TIPO DE ENFRIAMIENTO USADO. LOS VALORES
DE ORDEN DE MAGNITUD QUE SE RECOMIENDA USAR SON LOS QUE SE INDICAN A
CONTINUACIÓN:

TRANSFORMADORES ENFRIADOS
POR AIRE

CON ENFRIAMIENTO NATURAL 1.1 - 1.6
A/MM²

TRANSFORMADORES ENFRIADOS
POR ACEITE

CON ENFRIAMIENTO NATURAL 2.5 - 2.8
A/MM²
CON ENFRIAMIENTO FORZADO 2.8 - 4.0
A/MM²

4.2.4. RELACIÓN ENTRE LAS PÉRDIDAS EN EL FIERRO Y LAS PÉRDIDAS EN EL - COBRE (DEVANADOS)

LA CONDICIÓN DE RENDIMIENTO MÁXIMO EN UN TRANSFORMADOR SE TIENE CUANDO
LAS LLAMADAS PÉRDIDAS EN VACÍO EN EL FIERRO Y LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVA-
NADOS (EN EL COBRE) SON IGUALES. COMO EN LA PRÁCTICA LOS TRANSFORMA-
DORES ES MUY RARO QUE TRABAJEN CON CARGA CONSTANTE, POR LO GENERAL ES
MAYOR EL TIEMPO QUE OPERAN CON CARGA DEBAJO DE SU VALOR NOMINAL, QUE -
AQUEL QUE OPERA A PLENA CARGA, ENTONCES LA RELACIÓN PvACIO/P_{COBRE} ES -
MENOR QUE LA UNIDAD, Y ES TANTO MAS PEQUEÑA RESPECTO A LA UNIDAD, MIEN-
TRAS SEA MAYOR EL TIEMPO DE FUNCIONAMIENTO A CARGA REDUCIDA. PARA TO-
MAR EN CONSIDERACIÓN EL EFECTO DE VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA POR TEM-
PERATURA, PARA CORREGIR LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS SE PUEDE CONSID-
RAR UN COEFICIENTE K_M IGUAL A 1.1.

4.2.5. LOS AMPERE - ESPIRA POR UNIDAD DE LONGITUD EN LA COLUMNA

PARA DETERMINAR LA ALTURA h DE LAS COLUMNAS O BIEN PARA VERIFICAR EL VALOR OBTENIDO EN BASE AL DIAMETRO DE LA CIRCUNFERENCIA CIRCUNSCRITA A LA SECCIÓN DE ÉSTE, SIRVE EL PARAMETRO DE LOS AMPERE - ESPIRA

$$\text{AMPERE - ESPIRA/cm} = \frac{N_1 I_1}{h} = \frac{N_1^2 I_1^2}{h}$$

DE DONDE:

$$h (\text{ cm }) = \frac{\text{AMP - ESPIRA}}{\text{AMP - ESPIRA/cm}}$$

N_1 Y N_2 SON LAS ESPIRAS EN SERIE POR FASE DEL PRIMARIO Y SECUNDARIO - RESPECTIVAMENTE, Y LAS CORRIENTES PRIMARIO Y SECUNDARIA SON I_1 E I_2 - RESPECTIVAMENTE. PARA QUE EL DIMENSIONAMIENTO DEL NÚCLEO SEA BIEN REALIZADO, ES NECESARIO QUE EL VALOR DE TAL PARÁMETRO SE ENCUENTRE DENTRO DE LOS LÍMITES DE LA PRACTICA CONSTRUCTIVA QUE INDICA LAS CONVENIENCIAS PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE TRANSFORMADORES EN FUNCIÓN DE LA POTENCIA. TALES LÍMITES DE VALORES MEDIOS SE DAN EN LA TABLA SIGUIENTE:

TABLA 4.4

VALORES MEDIOS DE AMPERE - ESPIRA/CENTIMETRO EN FUNCION DE LA POTENCIA Y TIPO DE TRANSFORMADORES

POTENCIA (kVA)	AMPERE - ESPIRA/CENTIMETROS			
	TRIFASICOS		MONOFASICOS	
	TIPO COLUMNA	ACORAZADOS	TIPO COLUMNA	ACORAZADOS
1	50 - 66	65 - 83	60 - 80	100 - 130
5	85 - 100	110 - 130	100 - 120	170 - 200
10	95 - 120	124 - 156	115 - 140	190 - 240
50	150 - 200	196 - 260	180 - 240	300 - 400
100	170 - 250	220 - 320	200 - 240	340 - 500
500	230 - 300	300 - 390	270 - 360	460 - 600
1 000	280 - 370	360 - 480	430 - 570	560 - 740
5 000	420 - 500	550 - 650	500 - 600	840 - 1000
10 000	550 - 650	720 - 850	660 - 780	1100 - 1300

4.2.6. AISLAMIENTO ENTRE DEVANADOS Y ENTRE DEVANADOS Y EL NÚCLEO

EL AISLAMIENTO ENTRE LOS DEVANADOS Y ENTRE ESTOS Y EL FIERRO DEL NÚCLEO SOBRE EL CUAL SE ENCUENTRAN DEVANADOS, SE PUEDE HACER DE DISTINTAS FORMAS, SEGÚN SEA EL TIPO DE TRANSFORMADOR.

SALVO EN LOS CASOS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA MUY PEQUEÑA Y DEL TIPO NÚCLEO ACORAZADO, EL AISLAMIENTO SE LOGRA SIEMPRE POR MEDIO DE TUBOS AISLANTES (DE PAPEL BAQUELIZADO, CELONITA Y SIMILARES) POR OTRA PARTE, LA LIMITADA RIGIDEZ DIELECTRICA DEL AIRE, LA PRESENCIA DE POLVOS Y LA HUMEDAD, HACEN QUE SEA PREFERENTE EL USO DE TRANSFORMADO-

RES EN ACEITE CUANDO LA TENSIÓN SOBREPASA LOS 4 A 6 KV.

NATURALMENTE QUE CON EL AUMENTO DE TENSIÓN, EL ESPESOR DE LOS AISLAMIENTOS AUMENTE, POR LO TANTO, CONSIDERANDO QUE EL USO DE ESPESORES NO TABLES PARA LOS TUBOS AISLANTES, ENCUENTRA CIERTAS LIMITACIONES YA SEA PARA LA FABRICACIÓN COMO PARA EL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL A LAS SOLICITACIONES DIELECTRICAS, PARA TENSIONES DE 30 A 40 KV, EN LUGAR DE UN TUBO SE TIENEN DOS O MAS CONCÉNTRICOS, ENTRE LOS CUALES SE DEJA UNA DISTANCIA DE AL MENOS 10 O 15 MM PARA PERMITIR LA CIRCULACIÓN DEL ACEITE INTERPUESTO Y POR LO TANTO EL ENFRIAMIENTO. EN ESTE CASO EL ESPESOR DE LOS TUBOS SE HACE DE 3 A 5 MM. PARA TENSIONES DE OPERACIÓN HASTA 40 KV, LOS ESPESORES DE LOS TUBOS SE ADOPTAN COMO LOS ANTES INDICADOS. EN LA TABLA SIGUIENTE SE DA COMO UNA MEDIDA DE ORIENTACIÓN LA RELACIÓN ENTRE EL ESPESOR DEL TUBO (EN MM) Y LA TENSIÓN DE OPERACIÓN (EN KV).

TABLA 4.5

ESPESOR DE TUBOS AISLANTES CONTRA TENSIÓN DE OPERACIÓN EN TRANSFORMADORES

ESPESOR DEL TUBO (MM)	TENSIÓN DE OPERACIÓN (KV)
4	10
5	15
6	20
7	25
8	30
10	40

CUANDO LOS TUBOS SE SUBDIVIDEN, EL ESPESOR DEL CONJUNTO AISLANTE (TUBO - ACEITE) SE PUEDE CALCULAR PRÁCTICAMENTE CON LA EXPRESIÓN:

$$d = 0.06V \text{ (CM)}$$

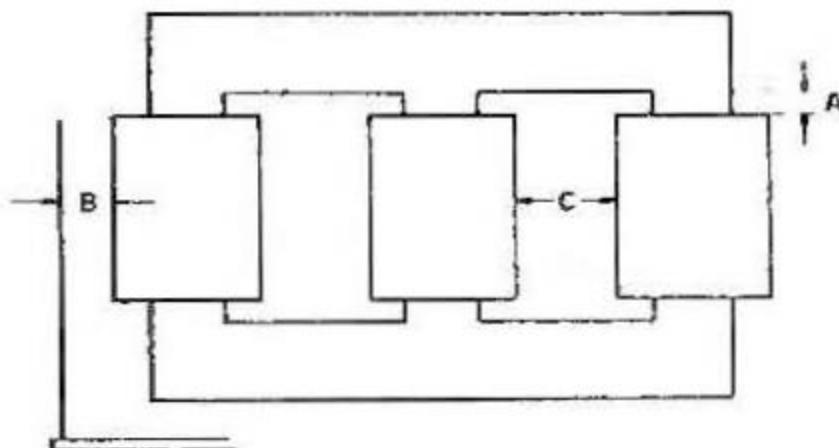
DONDE:

V = MÁXIMA TENSIÓN DE LOS DEVANADOS, EXPRESADA EN KV

TODO LO MENCIONADO ANTERIORMENTE ES APLICABLE TANTO AL AISLAMIENTO ENTRE DEVANADOS, COMO AL AISLAMIENTO CON RESPECTO AL NÚCLEO.

4.2.7. DISTANCIAS ENTRE DEVANADOS Y EL YUGO Y ENTRE LOS DEVANADOS Y EL TANQUE

ESTAS DISTANCIAS MÍNIMAS NO SÓLO ESTÁN RELACIONADAS A LAS TENSIONES DE OPERACIÓN, TAMBIÉN LO ESTÁN A LA DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LOS PUNTOS CONSIDERADOS. CON TAL PROPÓSITO, CUALQUIER REDUCCIÓN PARA MEJORAR LAS DISTRIBUCIONES DEL CAMPO ELÉCTRICO, DEBE SER UN PROPÓSITO DEL DISEÑO. EN LA SIGUIENTE FIGURA SE INDICAN CUALES SON LAS DISTANCIAS CONSIDERADAS.



CON RELACIÓN A LA FIGURA ANTERIOR Y A TÍTULO DE ORIENTACIÓN, SE DAN LOS SIGUIENTES VALORES DE DISTANCIAS MÍNIMAS EN LA TABLA SIGUIENTE:

TENSION DE OPERACION	3	5	10	20	30	40	50	60	70	100
EN AIRE A MIN. (MM)	35	50	-	-	-	-	-	-	-	-
EN ACEITE A MIN. (MM)		25	35	55	80	90	100	120	130	160
B MIN. (MM)							120	130	160	200
	50	60	75	85	100	120	140	150	180	

POR RAZONES PRÁCTICAS, SE RECOMIENDA NO USAR VALORES INFERIORES A LOS SIGUIENTES:

PARA A: EN AIRE 35 MM
EN ACEITE 20 MM

PARA B: 40 MM

ENTRE LOS DEVANADOS DE COLUMNAS ADYACENTES SE DEBEN RESPETAR TAMBÍEN CIERTOS VALORES MÍNIMOS, INDICADOS POR LA DISTANCIA C EN LA FIGURA ANTERIOR, ESTA DISTANCIA SE PUEDE OBTENER DE LA RELACION:

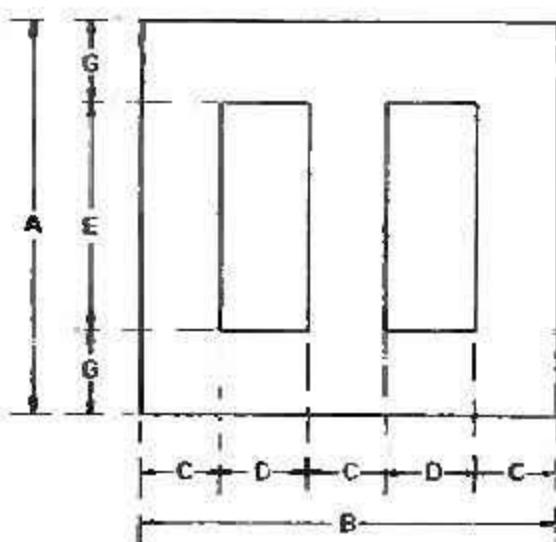
$$C = 0.8 \text{ KV}$$

$$C = 0.9 \text{ KV}$$

CUANDO SE USA DIAFRAGMA AISLANTE, ESTA DISTANCIA PUEDE DESCENDER HASTA 10 o 50 MM

4.3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN AIRE

ESTOS TRANSFORMADORES SON POR LO GENERAL DE PEQUEÑA POTENCIA Y NO EXISTE NORMALMENTE UN CRITERIO UNIFICADO EN CUANTO AL DISEÑO DE LAS LAMINACIONES, DE MANERA QUE A TÍTULO DE ORIENTACIÓN SE PUEDEN CONSIDERAR LOS VALORES SIGUIENTES REFERIDOS A LA FIGURA INDICADA.



$$A = B = 50 \quad E = 30$$

$$C = D = 6$$

SE DAN TAMBIÉN LAS SIGUIENTES RELACIONES:

$$A = B = \sqrt{A \times B}$$

$$C = \frac{A}{5} = \frac{B}{5}$$

$$E = 30$$

TAMBIÉN ES ESTE CASO EL PUNTO DE PARTIDA ES LA DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL NÚCLEO (CONSIDERADO DE SECCIÓN RECTANGULAR)

$$A \times B = 35 \sqrt{P_n/3} \quad (\text{cm}^2)$$

DONDE P_n ES LA POTENCIA APARENTE DEL TRANSFORMADOR. LA SECCIÓN DEL NÚ-

CLEO (S), subdividiendo la potencia de la máquina en las tres columnas y fijando un valor de la constante K que se selecciona entre 1.0 y 1.6

$$S = K \sqrt{P_n}$$

TOMANDO: $K = 1.15$

$$S = 1.15 \sqrt{S/3}$$

EL CÁLCULO DEL NÚMERO DE ESPIRAS Y DE LA SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES PARA LA FABRICACIÓN DE LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO SE HACE TOMANDO COMO BASE "LAS TENSIONES Y CORRIENTES DE FASE", DE ESTA MANERA, POR EJEMPLO, SI LOS DEVANADOS ESTÁN CONECTADOS EN ESTRELLA Y LA TENSIÓN ENTRE FASES ES DE 440 VOLTS, LOS DEVANADOS SE CALCULAN PARA UNA TENSIÓN DE $440/\sqrt{3} = 254$ V TRATÁNDOSE DE TRANSFORMADORES PEQUEÑOS ENTRE 3 Y 10 KVA, EL RENDIMIENTO O EFICIENCIA SE PUEDE TOMAR ENTRE 0.85 Y 0.95.

4.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE DISTRIBUCIÓN ENFRIADOS POR ACEITE

DENTRO DE ESTA CATEGORÍA SE PUEDEN UBICAR LOS TRANSFORMADORES QUE COMPRENDEN POTENCIAS QUE VAN DESDE ALGUNAS DECENAS HASTA ALGUNAS CENTENAS DE KVA Y CON TENSIONES PRIMARIAS HASTA DE 34.5 KV O VALORES ALREDEDOR DE ÉSTE. LAS TENSIONES SECUNDARIAS NORMALIZADAS DEPENDEN EN CIERTA MEDIDA DE LA APLICACIÓN ESPECÍFICA Y PUEDEN SER POR EJEMPLO 4 160 VOLTS, 440 VOLTS O 220 VOLTS ENTRE FASES, CON UNA FRECUENCIA NORMALIZADA QUE EN EL CASO DE MÉXICO ES DE 60 Hz. POR ÉSTE Y ALGUNOS OTROS PROBLEMAS - COMO SON LAS PÉRDIDAS, EL CALENTAMIENTO QUE ES COMÚN A TODAS LAS MÁQUINAS, ADQUIERE IMPORTANCIA EL PROBLEMA DEL AISLAMIENTO.

POR LO GENERAL EN LOS PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE LOS TRANSFORMADORES SE HACE USO DE FÓRMULAS Y EXPRESIONES QUE ALGUNAS VECES NO TIENEN DEDUCCIÓN MATEMÁTICA ALGUNA, MÁS BIEN SON RESULTADO DEL PRODUCTO DE LA EXPERIENCIA, DEL TIPO DE MATERIALES USADOS Y SU CALIDAD, ETC., Y QUE -

194 Fundamentos de cálculo de transformadores

ADEMÁS NO SON APLICABLES A TODOS LOS CASOS, POR LO QUE NO EXISTE UN PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO ÚNICO Y GENERAL, ESTO HACE NECESARIO QUE EL LECTOR TENGA UN POCO DE CAUTELA EN CUANTO A LAS METODOLOGÍAS DEL DISEÑO DE TRANSFORMADORES SE REFIERE.

4.4.1. DATOS DE PARTIDA PARA EL CÁLCULO

LOS ELEMENTOS DE PARTIDA NECESARIOS PARA LA INICIACIÓN DE UN CÁLCULO SON: LA POTENCIA NOMINAL EN KVA, LAS TENSIONES DE VACIO PRIMARIA Y SECUNDARIA, LOS TAPS PARA REGULACIÓN DE LA TENSIÓN PRIMARIA, LA CONEXIÓN ENTRE LAS FESES. EL PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO SE PUEDE ILUSTRAR A TRAVÉS DE UN EJEMPLO.

EJEMPLO 4.1.

DATOS PARA UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

POTENCIA NOMINAL	25 kVA
FRECUENCIA	60 Hz
TENSIÓN NOMINAL PRIMARIA	13 800 VOLTS CON REGULACIÓN - DE $\pm 5\%$
TENSIÓN NOMINAL SECUNDARIA	440 VOLTS

LAS CARACTERÍSTICAS NOMINALES DE LOS AISLAMIENTOS SON LOS SIGUIENTES:

TENSIÓN MÁXIMA DE DISEÑO	15 kV
NIVEL BÁSICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO POR RAYO EN ALTA TENSIÓN (CON ONDA DE 1.2/50 MICROSEG.)	95 kV
CONEXIÓN DEL DEVANADO PRIMARIO	DELTA
CONEXIÓN DEL DEVANADO SECUNDARIO	ESTRELLA CON NEUTRO ATERRIZADO

SE FIJAN COMO DATOS LÍMITE DE DISEÑO LOS SIGUIENTES:

PÉRDIDAS EN VACÍO A 60 Hz Y TENSIÓN NOMINAL	150 VOLTS
PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS A 75° C Y 60 Hz	600 WATTS
IMPEDANCIA	5%
TEMPERATURA MEDIA DE LOS DEVANADOS (65°C) Y MÁXIMA DEL ACEITE	60° C

SOLUCIÓN

A) DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE TENSIONES Y CORRIENTES

EL PRIMER PASO PARA EL CÁLCULO Y LA DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE TENSIONES Y CORRIENTES DE FASE ES TOMAR EN CONSIDERACIÓN LA CONEXIÓN - PREVISTA. EN ESTE EJEMPLO EL DEVANADO PRIMARIO ESTÁ EN CONEXIÓN DELTA Y EL SECUNDARIO EN ESTRELLA, POR LO QUE:

$$V_p \text{ FASE} = 13\ 800 \text{ VOLTS} \quad V_s \text{ FASE} = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254 \text{ VOLTS}$$

LAS CORRIENTES:

$$I_p \text{ FASE} = \frac{25\ 000}{13\ 800 \times 3} = 0.60 \text{ A}$$

$$I_s \text{ FASE} = \frac{25\ 000}{440 \times \sqrt{3}} = 32.80 \text{ A}$$

SIENDO:

V_p FASE, I_p FASE, LA TENSIÓN Y CORRIENTE DE FASE DEL DEVANADO PRIMARIO

V_s FASE, I_s FASE, LA TENSIÓN Y CORRIENTE DE FASE DEL DEVANADO SECUNDARIO

196 Fundamentos de cálculo de transformadores

B) FLUJO POR COLUMNAS Y SECCIÓN DE LA COLUMNA

DE LA EXPRESIÓN:

$$\Phi_M = 10^{-2} C \sqrt{P_n}$$

SELECCIONANDO $C = 0.18$ SE OBTIENE

$$\Phi_M = 10^{-2} \times 0.18 \times \sqrt{25} = 0.009 \text{ WEBER}$$

LA SECCIÓN DE LA COLUMNA, SI SE SELECCIONA DE LA TABLA DE DENSIDAD DE FLUJO EN VALOR

$B_m = 1.2 \text{ WEBER/M}^2$, SE TIENE QUE:

$$S_n = \frac{\Phi_M}{B_m} = \frac{0.009}{1.2} = 0.0075 \text{ M}^2$$

SI PARA LA FORMA DE LA SECCIÓN DEL NÚCLEO SE SELECCIONAN 2 PASOS O ESCALONES Y SE USA LÁMINA DE ACERO AL SILICIO DE 0.35 MM DE ESPESOR AISLADA CON BARNIZ, Y CONSIDERANDO UN COEFICIENTE DE EMPAQUETAMIENTO DE 0.9, LA SECCIÓN GEOMÉTRICA DE LA COLUMNA ES:

$$S_G = \frac{0.0075}{0.9} = 0.00833 \text{ M}^2$$

PARA UNA SECCIÓN DE DOS ESCALONES SE TIENE UNA RELACIÓN ENTRE SECCIONES DE 0.850, POR LO QUE EL ÁREA ES AHORA

$$S_C = \frac{0.00833}{0.850} = 0.0098 \text{ M}^2$$

EL DIÁMETRO CORRESPONDIENTE ES:

$$d = \sqrt{\frac{0.0098 \times 4}{3.14}} = 0.111 \text{ M} = 11.1 \text{ CM}$$

LAS DISTINTAS DIMENSIONES DE LOS ESCALONES SE CALCULAN COMO EN LA SIGUIENTE FIGURA:



$$\begin{aligned}
 S_C &= 0.855 \\
 &= 0.0098 = 98 \text{ CM}^2 \\
 d &= 11.1 \text{ CM} \\
 a &= 0.907 d = 10.067 \text{ CM} \\
 a_1 &= 0.707 d = 7.848 \text{ CM} \\
 a_2 &= 0.423 d = 4.69 \text{ CM}
 \end{aligned}$$

c) SECCIÓN DE LOS YUGOS

COMUNMENTE TAL SECCIÓN SE HACE TANTO MAYOR COMO SE PUEDA DE AQUELLA DE LA COLUMNA. SI SE CONSIDERA UNA AMPLIFICACIÓN DEL 20% Y CONSIDERANDO UN COEFICIENTE DE EMPAQUETAMIENTO IGUAL AL USADO PARA LA COLUMNA, SE TIENE LA SECCIÓN GEOMÉTRICA

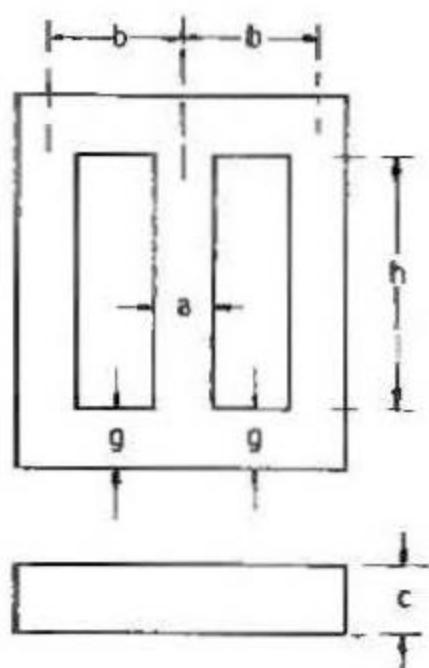
$$S_Y = 1.2 \times 0.00833 = 0.009996 \text{ M}^2 = 99.96 \text{ CM}^2$$

TAL SECCIÓN SERÁ RECTANGULAR Y SU ANCHO SIMILAR A AQUEL DE LAS COLUMNAS, ES DECIR

$$\frac{S_Y}{a} = \frac{99.96}{10.067} = 9.93 \text{ CM}$$

d) ALTURA DE LA COLUMNA Y ANCHO DE LA VENTANA

TOMANDO EN CONSIDERACIÓN LAS RELACIONES DE LA FIGURA SIGUIENTE COMO MEDIDA DE ORIENTACIÓN



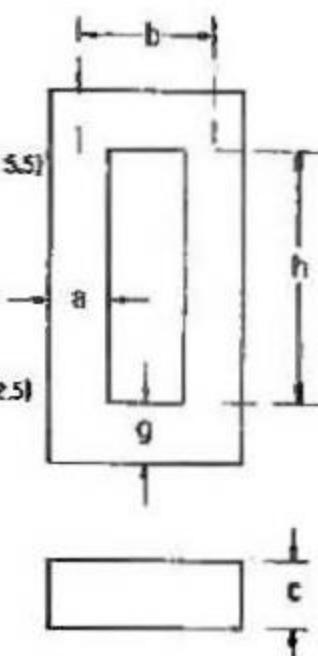
$$\frac{h}{a} = 2.5 \div 5.5 \text{ (para muy alta tensión se toma hasta 5.5)}$$

$$\frac{b}{a} = 1.6 \div 2.6$$

$$g \approx 1.28$$

$$c = a$$

$$\frac{h}{b} = 1.2 \div 1.8 \text{ (para muy alta tensión se toma hasta 2.5)}$$



TOMANDO LOS RANGOS INDICADOS EN LA FIGURA ANTERIOR, LA ALTURA DE LA COLUMNA SE PUEDE TOMAR COMO:

$$h = 3.5 \quad a = 3.5 \times 10.067 = 35.24 \text{ CM}$$

HABIENDO SELECCIONADO LA RELACIÓN:

$$\frac{h}{a} = 3.5$$

EN FORMA SIMILAR, SI SE SELECCIONA EL ANCHO DE LA VENTANA ALREDEDOR DE $1.5a$, SE OBTIENE:

$$b = 1.5 \times 10.067 = 15.10 \text{ CM}$$

ESTOS VALORES PUEDEN SUFRIR ALGUNA MODIFICACIÓN AL VERIFICARSE EN BASE A LOS VALORES DE LOS AMPERE - ESPIRA/CM Y DEL ESPESOR RADIAL DE LOS DE VANADOS

E) NÚMERO DE ESPIRAS

DEVANADO PRIMARIO

EN VIRTUD DE QUE ESTE DEVANADO ESTÉ CONECTADO EN DELTA, LA TENSIÓN DE FASE V_{pf} ES LA MISMA QUE LA NOMINAL DE LÍNEA, DE MANERA QUE DE LA ECUACIÓN GENERAL:

$$E = 4,44 \cdot \phi M \cdot N_{pf} \quad \text{SE OBTIENE:}$$

$$N = \frac{13\,800}{4,44 \times 0,009 \times 60} = 5\,756 \text{ ESPIRAS}$$

DE ESTA FORMA EL NÚMERO DE VOLTS/ESPIRA RESULTA COMO:
 $13\,800/5\,756 = 2,40$, QUE ES UN VALOR ACEPTABLE.

DEVANADO SECUNDARIO

DEBIDO A QUE EL DEVANADO SECUNDARIO SE ENCUENTRA CONECTADO EN ESTRELLA, EL VALOR DEL VOLTAJE DE FASE ES:

$$V_{sf} = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254 \text{ VOLTS}$$

EL NÚMERO DE ESPIRAS EN ESTE DEVANADO RESULTA ENTONCES:

$$N_S = \frac{254}{4,44 \times 0,009 \times 60} = 106 \text{ ESPIRAS}$$

F) VALORES DE LAS CORRIENTES Y SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES PRIMARIO Y SECUNDARIO

DEL INCISO (A) SE DETERMINÓ QUE LAS CORRIENTES PRIMARIA Y SECUNDARIA DE FASE SON:

200 Fundamentos de cálculo de transformadores

$$I_p \text{ FASE} = 0.60 \text{ A}$$

$$I_s \text{ FASE} = 32.80 \text{ A}$$

SI SE CONSIDERA PARA ESTA CAPACIDAD QUE SE PUEDE CONSIDERAR UN TRANSFORMADOR CON ENFRIAMIENTO NATURAL POR AIRE, SE PUEDE TOMAR UNA DENSIDAD DE CORRIENTE DE 1.5 A/mm^2 CON LO QUE LAS SECCIONES DE LOS DEVANADOS RESULTAN:

PARA EL PRIMARIO:

$$0.6/1.5 = 0.4 \text{ mm}^2$$

PARA EL SECUNDARIO:

$$32.8/1.5 = 21.9 \text{ mm}^2$$

SI SE USA ALAMBRE COMERCIAL CORRESPONDE AL DEVANADO PRIMARIO UN N°. - 21AWG (REDONDO) Y PARA EL SECUNDARIO UN CONDUCTOR DE SECCIÓN RECTANGULAR DE $5 \times 44 \text{ mm}$.

G) AMPERE - ESPIRA/CM Y VERIFICACIÓN DE LA ALTURA DE LA COLUMNA

LOS AMPERE - ESPIRA DE UNA COLUMNA RESULTAN:

$$0.6 \times 5736 = 3442 \text{ AMPERE - ESPIRA}$$

Y LA RELACIÓN CON RESPECTO A LA ALTURA DE LA COLUMNA QUE YA SE HA FIJADO ES:

$$3442/35.24 = 97.7 \text{ AMPERE - ESPIRA/CM}$$

QUE RESULTA UN VALOR ACEPTABLE CONSIDERANDO LA POTENCIA Y EL TIPO DE TRANSFORMADOR.

H) DIMENSIONES DE LOS DEVANADOS

ALTO VOLTAJE

SE REQUIERE ESTABLECER AHORA LA ALTURA (LONGITUD AXIAL) DE LA BOBINA DE ALTA TENSIÓN, ESTE VALOR DEPENDE PRINCIPALMENTE DE LA TENSIÓN DE CORTO CIRCUITO (IMPEDANCIA PORCENTUAL DEL TRANSFORMADOR) Y TIENE LA LIMITANTE DE LA ALTURA DEL NÚCLEO. PARA FINES DE CÁLCULO PRELIMINAR, SE PUEDE PARTIR DE UNA ALTURA DE BOBINA DE ALREDEDOR DE 3 A 4 VECES EL DIÁMETRO DEL NÚCLEO, EL VALOR MÁS EXACTO SE TOMA DE LOS RESULTADOS DEL CÁLCULO FINALES. LA ALTURA DE LA VENTANA SE CÁLCULO EN EL INCISO (D) COMO $d = 35.24$ CM, Y EL DIÁMETRO DEL NÚCLEO RESULTÓ SER $d = 11.1$ CM

SI SE TOMA UN VALOR DE 3.0, LA LONGITUD AXIAL DE LA BOBINA DE ALTA TENSIÓN RESULTA SER:

$$h_{AT} = 3.0 \times 11.1 = 33.3 \text{ CM}$$

EL AISLAMIENTO DE LOS CONDUCTORES DEPENDE DE LA CLASE DE TENSIÓN DE LOS DEVANADOS Y POR CONSIDERACIONES DE RESISTENCIA MECÁNICA, DE LAS DIMENSIONES DEL CONDUCTOR MISMO. PARA EL CASO DEL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE EN DONDE SE USA ALAMBRE, NORMALMENTE SE EMPLEA CONDUCTOR ESMALTADO (CON ESMALTADO SENCILLO, DOBLE O TRIPLE SEGÚN SEA EL CASO) O EVENTUALMENTE CON AISLAMIENTO DE PAPEL.

PARA EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE, EN DONDE SE EMPLEA CONDUCTOR DE SECCIÓN RECTANGULAR, EL AISLAMIENTO NORMALMENTE ES DE PAPEL APLICADO EN TRES O CUATRO CAPAS.

PARA NUESTRO EJEMPLO EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE TIENE UN CONDUCTOR CALIBRE No. 21 AWG, CON UN DIÁMETRO DE 0.7229 MM.

CON ESTOS DATOS, SE ESTÁ EN POSIBILIDAD DE ESTABLECER EL NÚMERO DE ESPIRAS POR CAPA, EL NÚMERO DE CAPAS Y LAS DIMENSIONES DE LA BOBINA DE ALTA TENSIÓN.

202 Fundamentos de cálculo de transformadores

CONVIENE POR OTRA LADO, TENER PRESENTE QUE ES CONVENIENTE QUE LAS DOS ÚLTIMAS CAPAS DE LA BOBINA SEAN DE UN NÚMERO DE ESPIRAS SIMILARES A LOS DE LAS ESPIRAS DE REGULACIÓN, DE ESTA MANERA LAS BOBINAS SUPERIORES O BIEN LA PARTE SUPERIOR DE LA BOBINA (CUANDO ES HELICOIDAL) SE PUEDE SOBRE AISLAR INTERCALANDO EN EL BOBINADO ALAMBRE CON HILO DE ALGODÓN, CON ESTO SE SOPORTAN MEJOR LAS SOBRETENSIONES POR RAYO.

SI SE CONSIDERAN LAS ESPIRAS PARA LA REGULACIÓN DE VOLTAJE (TAPS) - QUE REPRESENTAN DE LOS DATOS DE PARTIDA EL 5% DE LAS ESPIRAS A TENSIÓN NOMINAL, SE TIENE UN NÚMERO DE ESPIRAS ADICIONAL DE:

$$\frac{5 \times 5756}{100} = 288 \text{ ESPIRAS}$$

CON ESTO EL DEVANADO PRIMARIO TIENE UN TOTAL DE $5756 + 288 = 6044$ ESPIRAS.

SI SE ESTABLECE (A CRITERIO) TENER 5 CAPAS (DOS AL INTERIOR Y 3 AL EXTERIOR) DE 288 ESPIRAS CON AISLAMIENTO DE PAPEL ENTRE CAPA DE 0.4 MM Y SUPONIENDO UN COEFICIENTE DE DEVANADO DEL 5% (ESTE COEFICIENTE SIGNIFICA UN SOBREDIMENSIONAMIENTO) ESTAS CAPAS TIENEN UNA LONGITUD AXIAL DE:

$$1.2 \times 288 \times 1.05 = 362.88 \text{ MM}$$

FALTAN DE DEVANAR AHORA:

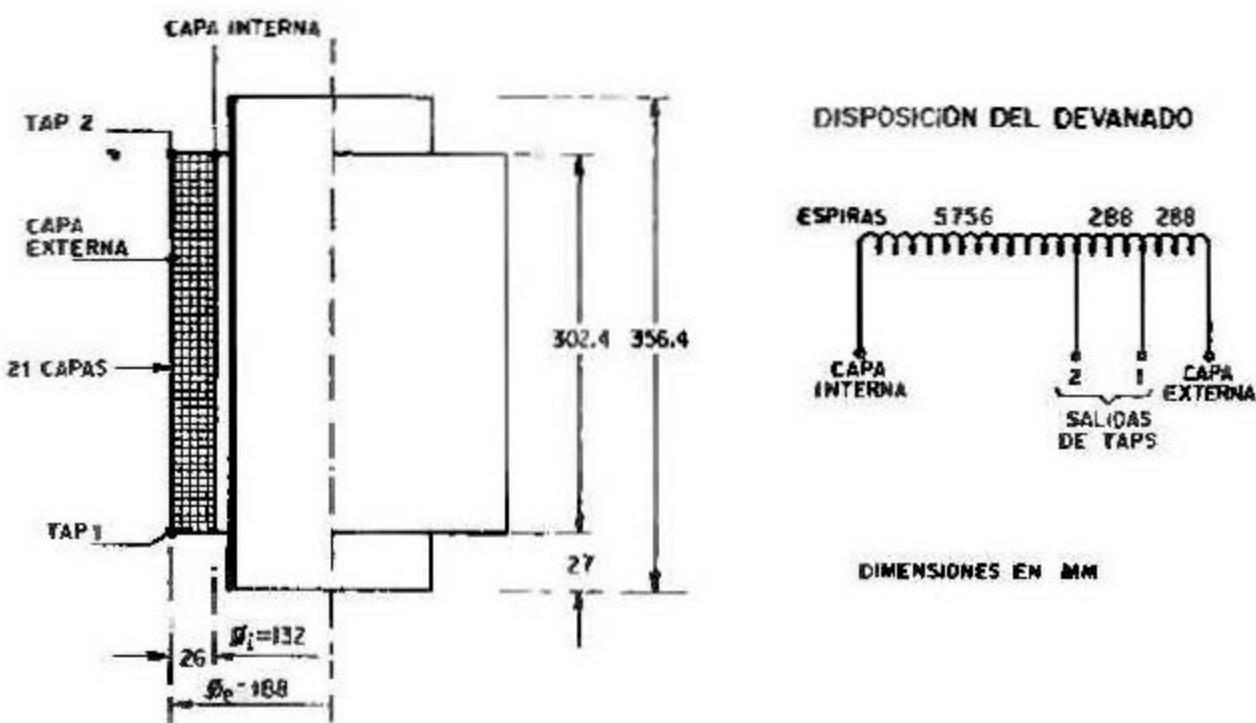
$$6044 \text{ ESPIRAS} - (5 \times 288) = 4604 \text{ ESPIRAS}$$

QUE SIGNIFICAN 16 CAPAS DE 288 ESPIRAS (EN REALIDAD 11 CAPAS DE 288 ESPIRAS Y 5 CAPAS DE 287 ESPIRAS).

PARA LOS EFECTOS DE LAS DIMENSIONES SE CONSIDERAN LAS CAPAS DE 288 ESPIRAS. LA LONGITUD AXIAL DE ÉSTAS RESULTA DE:

$$H = 1.0 \times 288 \times 1.05 = 302.4 \text{ MM}$$

ESTA CANTIDAD REPRESENTA LA ALTURA DEFINITIVA DE LA BOBINA DE ALTA TENSIÓN



PARA EL ESPESOR RADIAL ES CONVENIENTE TOMAR EN CONSIDERACIÓN UN AISLAMIENTO (ES DECIR UN AISLAMIENTO ENTRE CAPAS SUCESTIVAS), ESTO NATURALMENTE INCREMENTA LAS DIMENSIONES QUE SE OBTIENEN SOLO CON LOS CONDUCTORES. SI SE INTERCALAN CUATRO VUELTAS DE PAPEL DE 0.05 MM DE ESPESOR, - SE TIENE UN TOTAL DE 0.2 MM, DE MODO QUE EL ESPESOR RADIAL RESULTA:

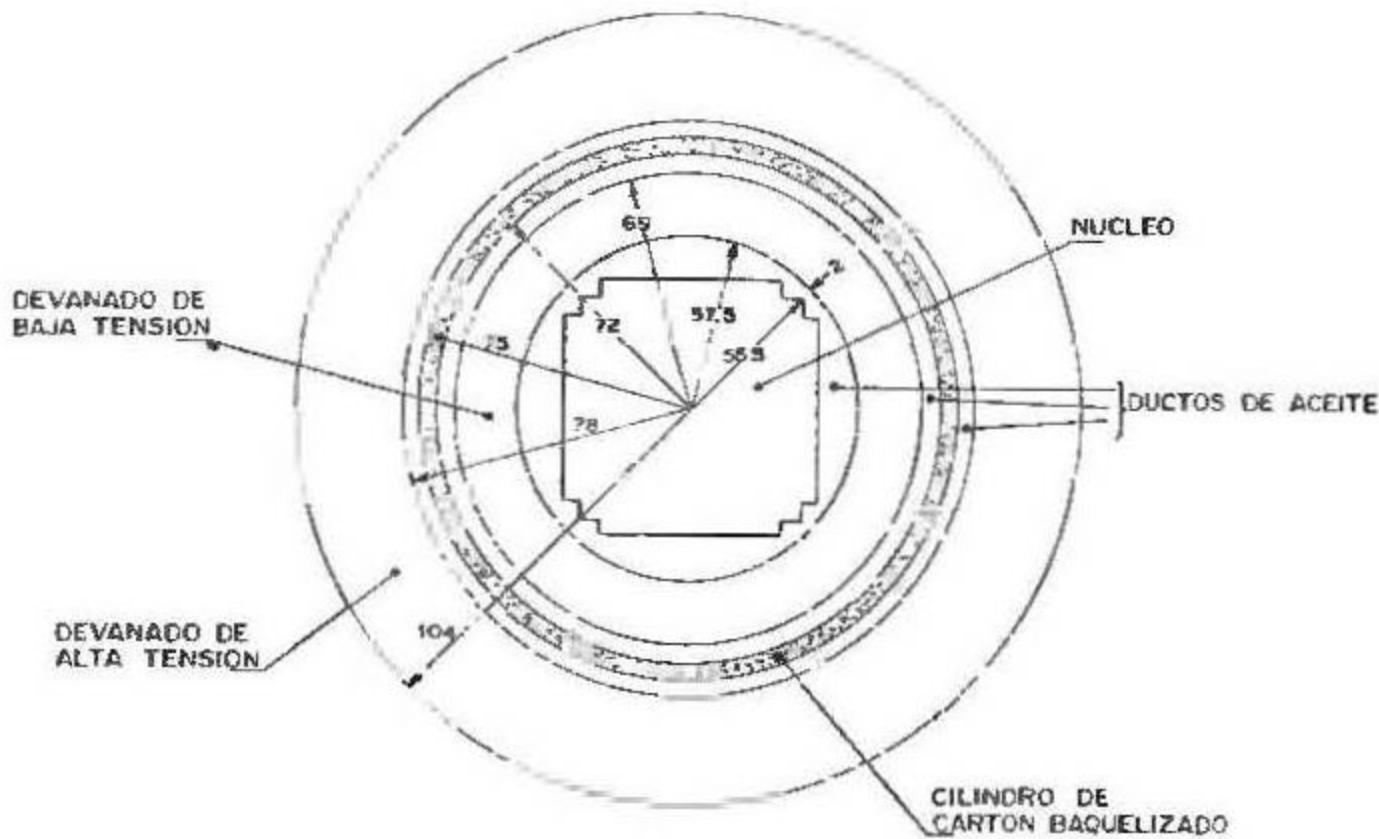
$$5 \times 1.2 + 16 \times 1.0 + (16 + 5 - 1) \times 0.2 = 26 \text{ MM}$$

BAJO VOLTAJE

LAS DIMENSIONES AXIALES DE LA BOBINA DE BAJA TENSIÓN SERÁN DE HECHO - IGUALES A LAS DE LA BOBINA DE ALTA. LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR SE DETERMINÓ QUE ERA DE 21.9 MM² CON SECCIÓN RECTANGULAR DE 2.032 X 10.16 MM.

DIÁMETRO MEDIO:

RADIO DEL NÚCLEO =	111/2 = 55,5	
+ DUCTO DE ACEITE CON SECCIONES AISLANTES DE CARTÓN	<u>2,0</u>	
	57,5	
+ DEVANADO DE BAJA TENSIÓN	<u>11,5</u>	
	69,0	(DIÁMETRO MEDIO - DEL DUCTO ENTRE DE VANADOS)
+ DUCTOS DE ACEITE CON TIRAS DE CARTÓN	<u>3,0</u>	69 x 2 + 3 =
	72,0	= 141 MM
+ CILINDROS DE CARTÓN BAQUELIZADO	<u>3,0</u>	
	75,0	
+ DUCTO DE ACEITE CON TIRAS DE CARTÓN	<u>3,0</u>	
	78,0	
+ DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	<u>26,0</u>	
	104,0	
X RADIO EXTERNO DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN	<u>X . 2</u>	
	208,0	DIÁMETRO EXTERNO DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN

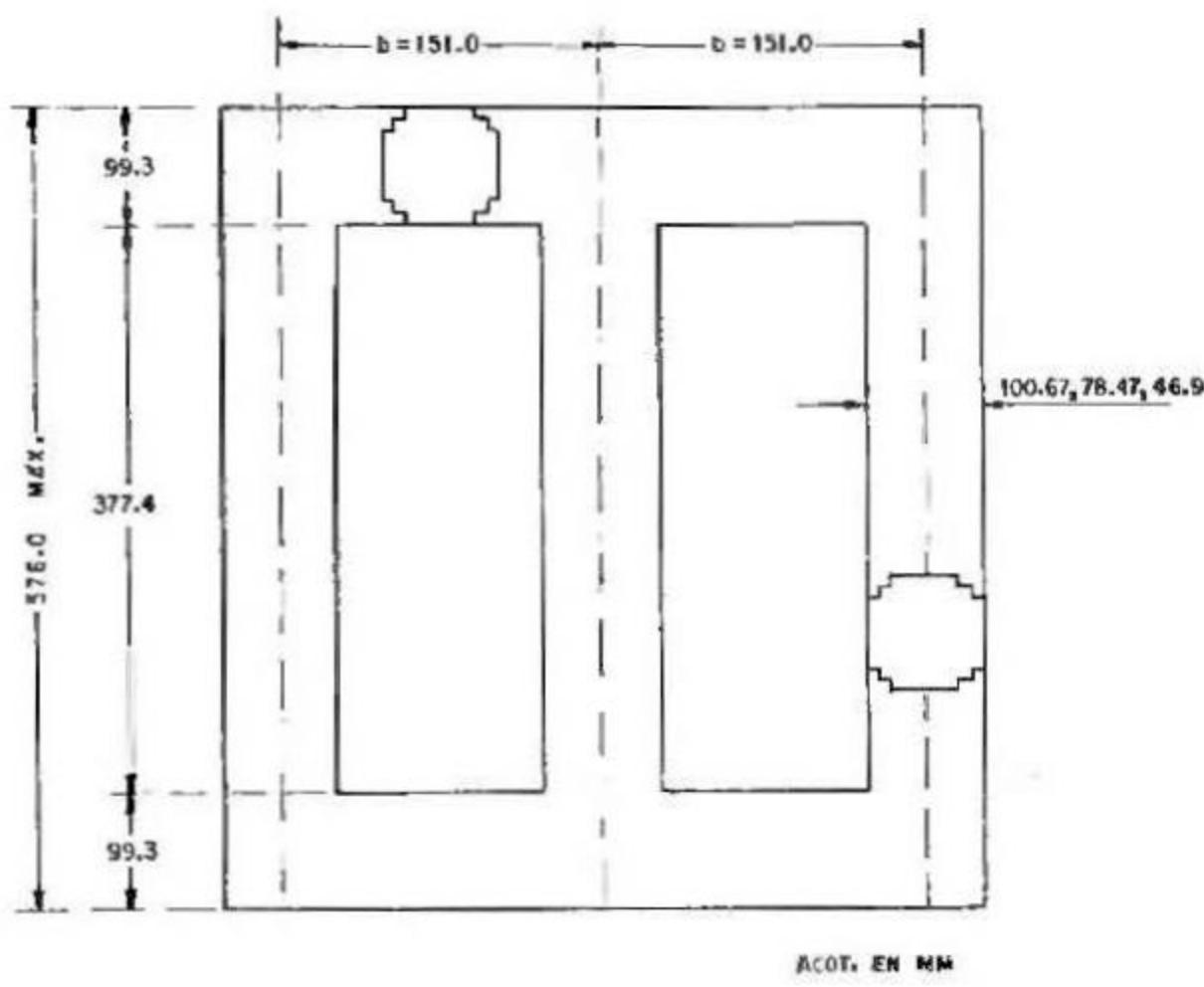


SECCION DE LOS NUCLEOS Y DE LOS DEVANADOS

LA DISTANCIA ENTRE LAS FASES SE PUEDE TOMAR COMO 12 MM

LA ALTURA DE LA COLUMNA DEL NÚCLEO H_c DEBE SER CASI IGUAL A LA ALTURA DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN, CONSIDERANDO LAS DOS DISTANCIAS DE AISLAMIENTO CON RESPECTO A LOS YUGOS. ESTAS DISTANCIAS SE FIJAN EN FUNCIÓN DE LAS TENSIONES DE PRUEBA, PERO COMO REGLA SIMPLIFICADA SE PUEDE CONSIDERAR 1 MM POR CADA KV DE PRUEBA A LA FRECUENCIA INDUSTRIAL (PRUEBA DE POTENCIAL APLICADO). EN ESTE CASO PARA UNA TENSIÓN DE PRUEBA DE - 38 KV (VALOR DE NORMA) ES SUFICIENTE CONSIDERAR DOS DISTANCIAS (SUPERIOR E INFERIOR) DE 35 MM CADA UNA.

LA ALTURA DEL NÚCLEO ES ENTONCES $302.4 + 2 \times 35 = 377.4$ MM. EN LA FIGURA SIGUIENTE SE MUESTRAN LAS DIMENSIONES PRINCIPALES DEL NÚCLEO.



DIMENSIONES GENERALES DEL NUCLEO

j) PESO DEL NÚCLEO

EL PESO DE LAS LAMINACIONES SE PUEDE OBTENER EN BASE A LAS DIMENSIONES PRINCIPALES: ALTURA DE LA COLUMNA, DISTANCIA ENTRE EJES, DIÁMETRO, SECCIONES DE LA COLUMNA Y DEL YUGO CON ALGUNAS IMPRECISIONES EN LAS ZONAS DE INTERSECCIÓN. CONSIDERANDO QUE EL NÚCLEO SE HACE CON LAMINACIÓN DE CRISTALES ORIENTADOS SE TIENE:

$$G_{fe} = (3, H_c + 4 b + 2,05 d), S_c \times 7,65 \times 10^{-6}$$

EN ESTE CASO:

$$H_C = 302.4 \text{ (MM)}$$

LA CONSTANTE 7.65×10^{-3} SE EXPRESA EN KG/DM³ Y REPRESENTA EL PESO ESPECÍFICO DE LA LAMINACIÓN

$$b = 151.0 \text{ (MM)}$$

$$d = 111 \text{ (MM)}$$

$$S_C = 98 \text{ (CM}^2\text{)}$$

$$G_{fe} = (3 \times 302.4 + 4 \times 151 + 2.05 \times 111) \times 98 \times 7.65 \times 10^{-3}$$

$$G_{fe} = 130.35 \text{ KG}$$

DESDE LUEGO QUE ESTE VALOR ES APROXIMADO, EL PESO EXACTO SE PUEDE DETERMINAR A PARTIR DEL NÚMERO Y DIMENSIONES EXACTAS DE LAS LAMINACIONES.

K) PÉRDIDAS EN VACÍO

PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN VACÍO SON IMPORTANTES EL TIPO Y LA CALIDAD DE LAS HOJAS DE LA LAMINACIÓN, LA PRECISIÓN DEL MONTAJE, LA PRECISIÓN DEL CORTE, EL TRATAMIENTO QUE SE DA A LA LAMINACIÓN DURANTE EL ARMADO DEL NÚCLEO Y NATURALMENTE LA CALIDAD DE LA LAMINACIÓN. EL PUNTO DE REFERENCIA SON LAS CURVAS DE LAS PÉRDIDAS EN FUNCIÓN DE LA INDUCCIÓN. DEPENDIENDO DE LA CALIDAD DEL MATERIAL CON EL DISEÑO DEL TRANSFORMADOR SE DEBEN TENER VALORES DE PÉRDIDAS EN VACÍO TAN BAJAS COMO SEA POSIBLE.

POR EJEMPLO EN ESTE EJEMPLO, SI SE USA LAMINACIÓN DE CRISTAL ORIENTADO A 60 Hz, CON UNA DENSIDAD DE 1.2 TESLA (WEBER/M²) (FIG. 4.1) Y 0.35 MM DE ESPESOR, SE TIENE 1.0 WATTS/KG, DE MANERA QUE LAS PÉRDIDAS EN VACÍO TOTALES SON DE:

$$P_0 = G_{fe} \times p = 130.35 \times 1.0 = 130.35 \text{ WATTS}$$

L) PESO DE LOS DEVANADOS Y PÉRDIDAS EN LOS MISMOS

210 Fundamentos de cálculo de transformadores

EL CÁLCULO DEL PESO Y DE LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS SE DETERMINA DE LAS DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LOS MISMOS. SI SE CONSIDERA QUE LOS DEVANADOS SON DE COBRE, QUE TIENE UN PESO ESPECÍFICO DE $8.9 \text{ KG}/\text{DM}^3$; EL PESO SE DETERMINA COMO:

$$G_{CU} = \pi D_m \cdot S_C \cdot N \times 3 \times 8.9 \times 10^{-6}$$

DONDE:

D_m = DIÁMETRO MEDIO (MM)

S_C = SECCIÓN DEL CONDUCTOR EN MM^2

N = NÚMERO DE ESPIRAS TOTALES EN EL DEVANADO

DE LOS DATOS PARA LAS DIMENSIONES GENERALES DEL NÚCLEO EN EL PÁRRAGO (I) SE OBTIENE EL VALOR DEL DIÁMETRO MEDIO COMO:

$D_m = 2 (\text{DIÁMETRO DEL NÚCLEO} + \text{DUCTO DE ACEITE CON SECCIONES AISLANTES DE CARTÓN}) + \text{DEVANADO DE BAJA TENSIÓN}$

$$D_m = 2 (55.5 + 2) + 11.5 = 126.5 \text{ MM}$$

DE MANERA QUE PARA EL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN CON UN CONDUCTOR RECTANGULAR DE $5.48 \times 4.71 = 25.81 \text{ MM}^2$ DE SECCIÓN, $N_S = 106$ ESPIRAS

$$G_{CUBT} = 3.1416 \times 126.5 \times 25.81 \times 106 \times 3 \times 8.9 \times 10^{-6}$$

$$G_{CUBT} = 29.02 \text{ KG}$$

PARA EL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN CON UN CONDUCTOR NO. 21 AWG DE SECCIÓN 0.4 MM^2 Y UN NÚMERO TOTAL DE ESPIRAS (INCLUYENDO LOS TAPS) DE:

$$N_P = 6044$$

EL DIÁMETRO MEDIO SE OBTIENE TAMBIÉN DEL PÁRRAGO (I) PARA LAS DIMENSIONES GENERALES DEL NÚCLEO COMO:

$$D_{\text{fi}} = 2 \times 78 + 26 = 182 \text{ MM}$$

DE MANERA QUE EL PESO DE ESTE DEVANADO ES:

$$G_{\text{CUAT}} = 3.1416 \times 182 \times 0.4 \times 6.044 \times 3 \times 8.9 \times 10^{-6}$$

$$G_{\text{CUAT}} = 36.9 \text{ KG}$$

LAS PÉRDIDAS EN EL COBRE PARA CADA DEVANADO SE DETERMINAN CON LA RELACIÓN:

$$P_{\text{CU}} = 2.4 \cdot \delta^2 \cdot G_{\text{CU}}$$

DONDE:

$$\delta = \frac{I_{bT}}{S_{CbT}}$$

$$P_{\text{CUBT}} = 2.4 \times \left(\frac{32.8}{21.9} \right)^2 \times 29.02$$

$$P_{\text{CUBT}} = 156.23 \text{ WATTS}$$

PARA ALTA TENSIÓN SE TOMAN EN CONSIDERACIÓN LAS ESPIRAS ACTIVAS PARA - LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN NOMINAL (SIN TOMAR EN CONSIDERACIÓN LOS TAPS) Y QUE SON: 5756; EN ESTE CASO:

$$\delta = \frac{I_{AT}}{S_{CAT}}$$

$$P_{\text{CU}} = 2.4 \times \left(\frac{0.60}{0.4} \right)^2 \times 36.9 = 199.26 \text{ WATTS}$$

LAS PÉRDIDAS TOTALES SON:

$$P_{\text{CU}} = P_{\text{CUBT}} + P_{\text{CUAT}} = 156.23 + 199.26 = 355.49 \text{ W}$$

212 Fundamentos de cálculo de transformadores

M) IMPEDANCIA DE CORTO CIRCUITO

COMO SE SABE LA IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR EXPRESADA EN PORCIENTO, - REPRESENTA LA CAIDA DE TENSIÓN EN PORCIENTO Y SE CONOCE COMO LA IMPEDANCIA DE CORTO CIRCUITO. ESTA IMPEDANCIA TIENE DOS COMPONENTES, UNA - RESISTIVA Y OTRA INDUCTIVA Y SU VALOR SE CALCULA COMO SIGUE:

COMPONENTE RESISTIVA DE LA IMPEDANCIA PORCENTUAL

ESTE VALOR SE CALCULA COMO:

$$R\% = \frac{P_{CU}}{10 P_n}$$

DONDE:

P_{CU} = PÉRDIDAS EN CORTO CIRCUITO

P_n = POTENCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR EN KVA

SUSTITUYENDO VALORES SE TIENE:

$$R\% = \frac{355,49}{10 \times 25} = 142\%$$

LA COMPONENTE REACTIVA DE LA IMPEDANCIA SE DETERMINA COMO:

$$X\% = 0,124 \frac{2f}{100} \cdot \frac{N}{H_c} \left(\frac{S_A D_{MA}}{3} + \frac{S_B D_{MB}}{3} \frac{S_C D_{MC}}{3} \right) \frac{K}{V} \times 10^{-4}$$

DONDE:

f = FRECUENCIA EN HERTZ

N = NÚMERO DE ESPIRAS DEL DEVANADO CONSIDERADO

I = CORRIENTE (EN AMPERES) DEL DEVANADO CONSIDERADO

$S_A D_{MA}$ = ESPESOR RADIAL Y DIÁMETRO MEDIO DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN (EXPRESADO EN MM)

$S_B D_{MB}$ = ESPESOR RADIAL Y DIÁMETRO MEDIO DEL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN (EXPRESADO EN MM)

K = COEFICIENTE DE REDUCCIÓN QUE TIENE EN CONSIDERACIÓN LA FORMA - NO EXACTAMENTE AXIAL DE LAS LÍNEAS DEL FLUJO DE DISPERSIÓN, PARA ESTE TIPO DE TRANSFORMADORES SE PUEDE TOMAR COMO (0.95)

H = ALTURA AXIAL DE LOS DEVANADOS (MM)

V = VOLTS/ESPIRA DEL TRANSFORMADOR

EN LA FIGURA ANTERIOR SE PUEDEN INTRODUCIR INDISTINTAMENTE LAS ESPIRAS Y LA CORRIENTE DE CUALQUIERA DE LOS DEVANADOS DEBIDO A QUE SIEMPRE SE CUMPLE LA RELACIÓN:

$$N_P I_P = N_S I_S$$

PARA EL CASO DE ESTE EJEMPLO, SI SE SUSTITUYEN LOS DATOS SE TIENE QUE LA REACTANCIA INDUCTIVA ES:

$$X\% = 0.124 \times \frac{2 \times 60}{100} \times \frac{106 \times 32.80}{302.4} \cdot \left(\frac{126.5 \times 11.5}{3} + \frac{182 \times 26}{3} + \right. \\ \left. + 9 \times 141 \right) \times \frac{0.95}{1.5} \times 10^{-4} = 3.61\%$$

LA IMPEDANCIA DE CORTO CIRCUITO ES ENTONCES:

$$Z\% = \sqrt{(R\%)^2 + (X\%)^2} = \sqrt{(1.42)^2 + (3.61)^2} = 3.88\%$$

EJEMPLO 4.2

CALCULAR LAS DIMENSIONES TOTALES APROXIMADAS PARA UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TIPO NÚCLEO (DE COLUMNAS) DE 200 KVA, 6 600/440 VOLTS, 60 Hz, SUPONIENDO QUE SE ADOPTAN LOS SIGUIENTES DATOS DE DISEÑO

214 Fundamentos de cálculo de transformadores

$e = 10$ VOLTS/ESPIRA (VOLTAJE POR ESPIRA)

$B_m = 1.3$ WEBER/M² (DENSIDAD DE FLUJO)

$\delta = 2.5$ AMPERES/MM² (DENSIDAD DE CORRIENTE)

FACTOR DE ESPACIO DE VENTANA = 0.3

ALTURA TOTAL = ANCHO TOTAL

FACTOR DE EMPAQUETAMIENTO PARA EL NÚCLEO = 0.9

SE PUEDE SUPONER QUE SE USA UN NÚCLEO ESCALONADO DE 3 PASOS O ESCALONES

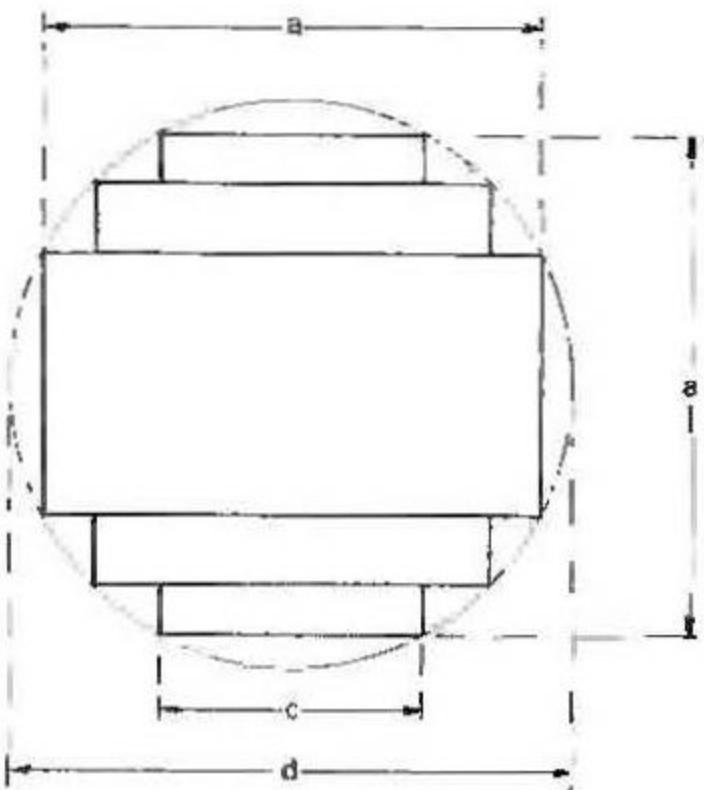
SOLUCION

EL ÁREA NETA DEL NÚCLEO SE PUEDE CALCULAR COMO:

$$S_N = \frac{e}{4.44 f B_m} = \frac{10}{4.44 \times 50 \times 1.3} = 0.02887 \text{ M}^2$$

$$S_N = 288.7 \text{ CM}^2$$

SUPONIENDO UN NÚCLEO ESCALONADO DE 3 ESCALONES



PARA UN NÚCLEO DE 3 ESCALONES

$$S_N = 0.6 d^2 \quad ; \quad a = 0.9 d$$

EL DIÁMETRO DEL CÍRCULO QUE CIRCUNSCRIBE AL NÚCLEO ES:

$$d = \sqrt{\frac{288.7}{0.6}} = 19.52 \text{ CM}$$

EL ANCHO DEL PAQUETE MAYOR DE LAMINACIÓN DE ACUERDO CON LA FIGURA ANTERIOR ES:

$$a = 0.9 d = 17.568 \text{ CM}$$

LA ALTURA DEL YUGO SE PUEDE TOMAR COMO:

216 Fundamentos de cálculo de transformadores

$$hy = b = 17.568 \text{ CM}$$

EL ANCHO O PROFUNDIDAD DEL YUGO ES AHORA

$$D = 17.568 \text{ CM}$$

POR OTRO LADO, LA POTENCIA DE UN TRANSFORMADOR EN FUNCIÓN DE LAS DIMENSIONES DE VENTANA ESTÁ EXPRESADA (CONSIDERANDO LA DENSIDAD DE CORRIENTE) COMO:

$$P = 3.33 f B_m K_w \delta A_w S_N \times 10^{-3} (\text{kVA})$$

DONDE:

P = POTENCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR EXPRESADA EN kVA

f = FRECUENCIA EN HERTZ

B_m = DENSIDAD DE FLUJO EN WEBER/m²

K_w = FACTOR DE ESPACIO PARA LA VENTANA

A_w = ÁREA DE LA VENTANA EN m²

S_N = SECCIÓN NETA DEL NÚCLEO EN m²

δ = DENSIDAD DE CORRIENTE EN AMP/mm²

DESPEJANDO EL ÁREA DE LA VENTANA

$$A_w = \frac{P \times 10^3}{3.33 f B_m K_w \delta S_N}$$

SUSTITUYENDO VALORES

$$A_w = \frac{200 \times 10^3}{3.33 \times 60 \times 1.3 \times 0.3 \times 2.5 \times 10^6 \times 0.0283}$$

$$A_W = 0.0356 \text{ m}^2$$

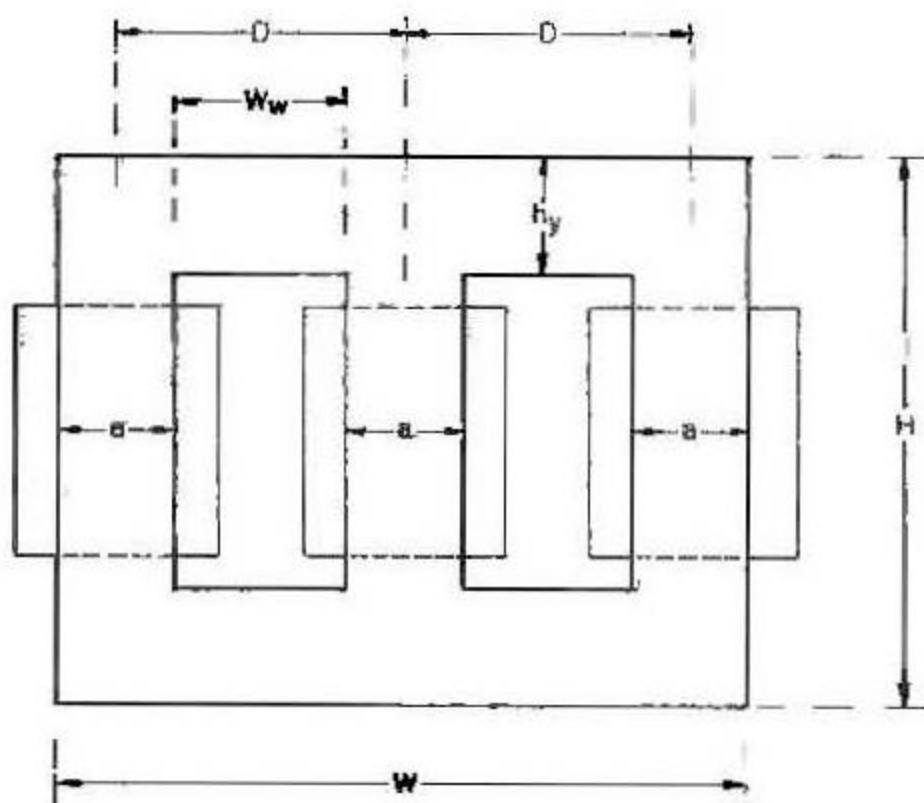
$$A_W = 356 \text{ cm}^2$$

$$H_W \times W_W = 356 \text{ cm}^2$$

LA CONDICIÓN DADA ES QUE: ALTURA TOTAL = ANCHO TOTAL

$$H = W$$

LAS DIMENSIONES GENERALES SE MUESTRAN EN LA FIGURA SIGUIENTE:



218 Fundamentos de cálculo de transformadores

DE ACUERDO CON LA FIGURA ANTERIOR

$$H = H_w + 2 h_y = H_w + 2 \times 17.568 = H_w + 35.13$$

$$W = 2D + a = 2 (W_w + d) + a = 2W_w + 2 \times 19.52 + 17.568$$

$$W = 2W_w + 56.61$$

COMO $H = W$ SE TIENE:

$$H_w + 2 a = 2W_w + 56.61$$

$$H_w + 2 \times 17.568 = 2W_w + 56.61$$

$$H_w + 35.14 = 2W_w + 56.61$$

$$H_w = 2W_w + 21.47$$

SE DEBE CUMPLIR TAMBIÉN QUE: $H_w W_w = A_w$

$$(2W_w + 21.47) W_w = 356$$

$$2W_w^2 + 21.47 W_w - 356 = 0$$

$$W_w^2 + 10.73 W_w - 178 = 0$$

RESOLVIENDO LA ECUACIÓN DE 2º. GRADO:

$$W_w = 9.01 \text{ CM}$$

LA ALTURA DE LA VENTANA ES:

$$H_w = \frac{A_w}{W_w} = \frac{356}{9.01} = 39.51 \text{ CM}$$

LAS DIMENSIONES DEL NÚCLEO SON ENTONCES:

DISTANCIA ENTRE CENTROS ADYACENTES DEL NÚCLEO

$$D = H_w + d = 9.01 + 19.52 = 28.53 \text{ CM}$$

ALTURA TOTAL:

$$H = H_w + 2 b = 39.51 + 2 \times 17.568 = 74.646 \text{ CM}$$

ANCHO TOTAL:

$$W = 2 D + a = 2 \times 28.53 + 17.568 = 74.628 \text{ CM}$$

EJEMPLO 4.3

DETERMINAR LAS PRINCIPALES DIMENSIONES DEL NÚCLEO, EL NÚMERO DE ESPRAS Y LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LOS CONDUCTORES DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO DE 5 KVA, 11 000/400 VOLTS, 60 Hz, CON NÚCLEO TIPO COLUMNAS, PARA USO EN DISTRIBUCIÓN. COMO DATOS RELATIVOS AL DISEÑO SE SABE QUE EL ÁREA NETA DEL COBRE EN LA VENTANA ES 0.6 VECES LA SECCIÓN NETA DEL FIERRO EN EL NÚCLEO. SI SE SUPONE QUE EL NÚCLEO TIENE UNA SECCIÓN CUADRADA, LA DENSIDAD DE FLUJO ES DE 1 WEBER/M², LA DENSIDAD DE CORRIENTE ES 1.4 AMP/MM² Y EL FACTOR DE ESPACIO EN LA VENTANA DE 0.2.

LA ALTURA DE LA VENTANA SE CONSIDERA COMO TRES VECES SU ANCHO.

SOLUCION

A PARTIR DE LAS RELACIONES DADAS PARA LAS ÁREAS DEL COBRE Y EL FIERRO.

ÁREA NETA DEL COBRE= 0.6 ÁREA NETA DEL FIERRO

$$K_w A_w = 0.6 S_n$$

$$S_n = \text{ÁREA NETA DEL NÚCLEO}$$

220 Fundamentos de cálculo de transformadores

A_W = ÁREA NETA DE LA VENTANA

K_W = FACTOR DE ESPACIO DE LA VENTANA

$$A_W = \frac{0.6 S_N}{K_W} = \frac{0.6 S_N}{0.2} = 3 S_N$$

PARA UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO LA POTENCIA SE PUEDE EXPRESAR COMO:

$$P = 2.22 f B_m \delta K_W A_W S_N \times 10^{-3} \text{ (kVA)}$$

DE DONDE LA SECCIÓN NETA DEL NÚCLEO ES:

$$S_N = \frac{P}{2.22 f B_m \delta K_W A_W \times 10^{-3}}$$

COMO:

$$A_W = 3 S_N$$

$$S_N = \frac{P}{2.22 f B_m \delta K_W \cdot 3 S_N \times 10^{-3}}$$

$$S_N^2 = \frac{P}{2.22 f B_m \delta K_W \cdot 3 \times 10^{-3}}$$

$$S_N = \sqrt{\frac{5 \times 10^3}{2.22 \times 60 \times 1.0 \times 1.4 \times 0.2 \times 3 \times 10^6}}$$

$$S_N = 66.84 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 66.84 \text{ cm}^2$$

EL ÁREA TOTAL DEL NÚCLEO ES:

$$S_N = \frac{66.84}{0.9} = 74.26 \text{ cm}^2$$

COMO SE SUPONE QUE EL NÚCLEO TIENE UNA SECCIÓN CUADRADA, EL ANCHO ES:

$$a = \sqrt{S_N} = \sqrt{74.26} = 8.61 \text{ cm}$$

EL ÁREA DE LA VENTANA ES:

$$A_W = 3 \times 74.26 = 222.78 \text{ CM}^2$$

LA ALTURA DE LA VENTANA ES:

$$H_W = 3 W_W$$

PERO:

$$3 W_W^2 = 222.78 ; \quad W_W = \sqrt{\frac{222.78}{3}} = 8.617 \text{ CM}$$

COMO:

$$H_W W_W = A_W$$

$$H_W = \frac{A_W}{W_W} = \frac{222.78}{8.617} = 25.85 \text{ CM}$$

EL YUGO TIENE LA MISMA ÁREA TOTAL QUE EL NÚCLEO O SEA

$$A_Y = S_N = 74.26 \text{ CM}^2$$

EL ANCHO DEL YUGO ES:

$$D_Y = a = 8.61 \text{ CM}$$

LA ALTURA DEL YUGO ES:

$$H_Y = \frac{A_Y}{D_Y}$$

$$H_Y = \frac{74.26}{8.61} = 8.61 \text{ CM}$$

EL FLUJO ES:

222 Fundamentos de cálculo de transformadores

$$\phi_m = B_m S N = 1.0 \times 74.26 \times 10^{-4} = 7.426 \times 10^{-3} \text{ WEBER}$$

EL VOLTAJE POR ESP1RA ES:

$$E_t = 4.44 f \phi_m = 4.44 \times 60 \times 7.426 \times 10^{-3}$$

$$E_t = 1.978 \text{ VOLTS}$$

EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO PRIMARIO ES:

$$N_p = \frac{V_p}{E_t} = \frac{11000}{1.978} = 5562$$

EL NÚMERO DE ESPIRAS EN EL DEVANADO SECUNDARIO

$$N_s = \frac{V_s}{E_t} = \frac{400}{1.978} = 203$$

LA CORRIENTE EN EL DEVANADO PRIMARIO

$$I_p = \frac{5000}{11000} = 0.455 \text{ A}$$

LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR DEL DEVANADO PRIMARIO

$$a_p = \frac{I_p}{6} = \frac{0.455}{1.4} = 0.384 \text{ MM}^2$$

EL DIÁMETRO DEL CONDUCTOR PRIMARIO:

$$d = \sqrt{\frac{0.324 \times 4}{3.1416}} = 0.642 \text{ MM}$$

LA CORRIENTE EN EL DEVANADO SECUNDARIO

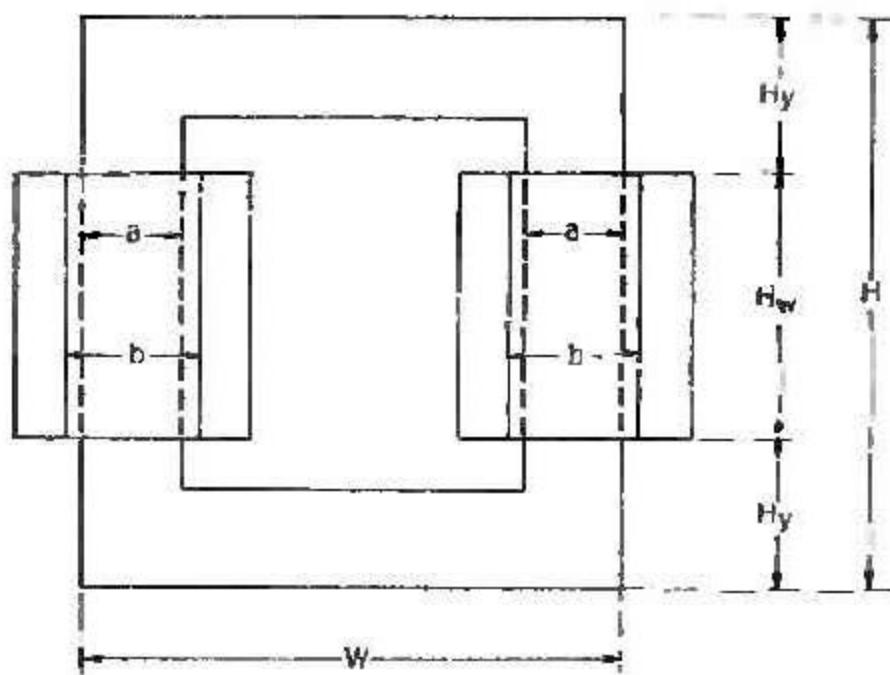
$$I_s = \frac{5000}{400} = 12.5 \text{ A}$$

LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR SECUNDARIO

$$a_S = \frac{I_S}{\delta} = \frac{12.5}{1.4} = 8.93 \text{ MM}^2$$

SE PUEDE USAR CONDUCTOR DE SECCIÓN CUADRADA DE $3 \times 3 \text{ MM}^2$

LAS DIMENSIONES GENERALES DEL NÚCLEO SE DETERMINAN DE LA FIGURA SIGUIENTE:



LA DISTANCIA ENTRE CENTROS DEL NÚCLEO

$$D = a + W_w = 8.61 + 8.61 = 17.22 \text{ CM}$$

LA LONGITUD DEL MARCO (NÚCLEO)

$$W = D + a = 17.22 + 8.61 = 25.83 \text{ CM}$$

224 Fundamentos de cálculo de transformadores

ALTURA DEL MARCO (NÚCLEO)

$$H = H_W + 2 \cdot H_Y = 25.85 + 2 \times 8.61 = 43.07 \text{ CM}$$

TABLA 4.6

ALAMBRE MAGNETO REDONDO ESMALTADO (CALIBRES ENFEROS)

Calibre awg	ALAMBRE DE NUDO		ESMALTADO SENCILLO			ESMALTADO DOBLE			ESMALTADO TRIPLE		
	DIAMETRO EN mm.		Resistencia 0.20°C Ohms/km	Peso Táctico kg/km	Minimo Incremento en Diámetro mm	Peso Táctico kg/km	Minimo Incremento en Diámetro mm	Peso Táctico kg/km	Maximo Diametro Total mm	Peso Teórico kg/km	
	Minima	Nominal									
8	3.231	3.264	3.282	2.061	74.38	3.783	75.033	3.020	17.78	18.900	
9	2.878	2.906	2.921	2.600	58.95	3.020	59.526	2.895	16.93	16.015	
10	2.563	2.589	2.601	2.316	52.77	2.895	47.279	2.408	16.22	11.905	
11	2.281	2.304	2.311	4.17	37.05	2.408	37.487	2.151	15.93	9.494	
12	2.032	2.052	2.062	3.31	5.21	2.151	23.662	1.923	17.72	7.530	
13	1.811	1.829	1.839	2.63	6.56	2.151	18.795	1.732	17.78	5.902	
14	1.613	1.628	1.636	2.08	8.28	18.662	14.925	0.078	1.547	1.421	
15	1.436	1.450	1.458	1.66	10.4	18.662	14.925	0.071	1.240	1.280	
16	1.278	1.290	1.298	1.31	13.2	11.733	10.074	1.384	11.846	11.905	
17	1.128	1.151	1.156	1.04	16.6	9.335	9.071	1.240	9.435	9.494	
18	1.013	1.024	1.029	0.823	21.0	7.392	0.066	1.110	7.471	7.530	
19	0.902	0.912	0.917	0.963	26.4	5.874	0.064	0.893	5.938	5.902	
20	0.806	0.813	0.818	0.519	33.2	4.61	0.030	0.861	4.732	4.762	
21	0.716	0.724	0.726	0.412	41.9	3.66	0.028	0.788	3.785	3.795	
22	0.635	0.643	0.645	0.324	53.2	2.88	0.026	0.686	2.981	3.000	
23	0.569	0.574	0.577	0.259	66.6	2.30	0.025	0.617	2.338	2.402	
24	0.506	0.511	0.513	0.205	84.2	1.82	0.025	0.551	1.850	1.908	
25	0.450	0.455	0.457	0.162	106	1.44	0.023	0.493	1.470	1.619	
26	0.399	0.404	0.406	0.128	135	1.14	0.023	0.439	1.161	1.203	
27	0.358	0.361	0.363	0.102	169	0.908	0.020	0.396	0.943	0.981	
28	0.318	0.320	0.323	0.084	214	0.716	0.020	0.356	0.731	0.761	
29	0.284	0.287	0.290	0.057	266	0.576	0.018	0.320	0.589	0.615	
30	0.251	0.254	0.257	0.050	340	0.450	0.018	0.294	0.461	0.484	
31	0.224	0.226	0.229	0.041	430	0.357	0.015	0.264	0.389	0.375	
32	0.201	0.203	0.206	0.034	532	0.298	0.015	0.211	0.296	0.304	
33	0.178	0.180	0.183	0.025	676	0.227	0.013	0.205	0.224	0.241	
34	0.157	0.160	0.163	0.020	857	0.179	0.013	0.183	0.188	0.189	
35	0.140	0.142	0.145	0.019	1090	0.141	0.010	0.163	0.146	0.150	
36	0.124	0.127	0.130	0.017	1360	0.113	0.010	0.147	0.118	0.119	
37	0.112	0.114	0.117	0.013	1680	0.0912	0.008	0.132	0.095	0.097	
38	0.099	0.102	0.104	0.008	2130	0.0721	0.008	0.113	0.074	0.077	
39	0.086	0.088	0.091	0.004	2780	0.0652	0.006	0.104	0.068	0.069	
40	0.076	0.079	0.081	0.004	3540	0.0433	0.006	0.046	0.016	0.048	
41	0.069	0.071	0.074	0.00397	4340	0.0363	0.004	0.0372	0.013	0.0372	
42	0.061	0.064	0.068	0.00317	5440	0.0282	0.006	0.0298	0.010	0.0287	
43	0.053	0.055	0.058	0.00245	7030	0.0218	0.005	0.0226	0.010	0.0238	
44	0.046	0.051	0.053	0.00203	8610	0.0187	0.010	0.0187	0.009	0.0193	

UNIDADES MÉTRICAS

ESMALTADO SENCILLO

ESMALTADO DOBLE

ESMALTADO TRIPLE

TABLA 4.7

ALAMBRE MAGNETICO REDONDO PUNTO DE PAPEL

Cant. de AWG	ALAMBRE DE REJUNDO				CAPA SENCILLA DE PAPEL				DOBLE CAPA DE PAPEL				
	DIÁMETRO EN MM.		A. esp.	Resistencia	Peso Teórico	ALAMBRE EN ESMALTE		ESENLADO DOBLE	Número	ALAMBRE SIN ESMALTE		ESENLADO SENCILLO	ESENLADO DOBLE
	Minimo	Máximo	Nominal	C. Esp. C. Chorro/mm	Kg./km.	Minimo	Maximo	Peso Teórico Kg./km	Número	Peso Teórico Kg./km	Peso Teórico Kg./km	Peso Teórico Kg./km	
8	3.231	3.264	3.237	8.387	2.061	74.36	0.0967	1.409	25.10	59.58	54.47	76.14	
9	2.876	3.000	2.971	6.651	2.600	58.95	0.0767	1.046	2.147	60.19	59.91	60.52	
10	2.563	2.598	2.601	3.261	3.277	46.77	0.0767	2.326	47.25	2.822	47.65	48.19	
11	2.261	2.504	2.316	4.117	4.114	27.05	0.0810	2.416	37.42	29.75	27.85	38.11	
12	2.032	2.032	2.062	3.31	3.21	29.46	0.0810	2.164	2.164	2.353	20.25	29.98	
13	1.811	1.826	1.839	2.63	6.56	23.36	0.0810	1.941	23.64	23.96	23.83	24.17	
14	1.613	1.613	1.634	2.08	2.08	18.45	0.0810	1.737	18.20	18.97	18.86	19.34	
15	1.435	1.435	1.456	1.63	10.4	14.69	0.0810	1.560	14.91	15.04	15.07	15.53	
16	1.276	1.290	1.298	1.31	1.32	11.62	0.0810	1.403	11.83	11.93	11.90	12.07	
17	1.138	1.151	1.156	1.04	1.66	9.24	0.0810	1.257	9.47	1.309	9.52	9.58	
18	1.013	1.024	1.029	0.823	7.0	7.37	0.0810	1.130	7.48	7.56	7.57	7.78	
19	0.897	0.917	0.917	0.651	0.651	5.81	0.0810	1.019	5.95	6.04	6.05	6.13	
20	0.803	0.813	0.818	0.516	0.516	4.61	0.0810	0.919	4.75	0.963	4.81	4.97	
21	0.716	0.724	0.726	0.412	4.19	3.69	0.0810	0.828	3.78	0.871	0.872	3.27	
22	0.635	0.643	0.645	0.324	53.2	2.89	0.0810	0.747	2.95	0.787	3.04	3.19	
23	0.569	0.574	0.577	0.256	66.5	2.30	0.0810	0.678	2.40	0.744	2.43	2.54	
24	0.505	0.511	0.512	0.205	84.2	1.87	0.0810	0.613	1.85	0.678	0.7137	2.07	
25	0.450	0.455	0.457	0.162	1.06	1.44	0.0810	0.533	1.49	0.592	1.55	1.59	
26	0.390	0.404	0.406	0.128	1.35	1.14	0.0810	0.483	1.18	0.539	1.23	1.27	
27	0.356	0.361	0.363	0.107	1.09	0.988	0.0810	0.457	0.949	0.972	0.982	1.03	
28	0.314	0.320	0.323	0.075	0.714	0.715	0.0810	0.459	0.753	0.812	0.811	0.815	
29	0.284	0.287	0.290	0.0647	2.66	0.575	0.0810	0.487	0.564	0.614	0.625	0.662	
30	0.251	0.254	0.257	0.0507	3.40	0.490	0.0810	0.457	0.533	0.581	0.584	0.528	

UNIDADES METRICAS

TABLA 4.8

ALAMBRE MAGNETO RECTANGULAR UNA CAPA DE ALGODON

TABLA 4.9 UNIDADES MÉTRICAS

ANCHO DEL ALAMBRE DESNUDO EN MILÍMETROS								
5.050	5.715	6.350	7.112	8.007	9.017	10.16	11.43	12.70
DEBIDO A LA ADICIÓN DE UNA CAPA DE ALGODÓN								
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.229	0.229	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279
0.254	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279	0.279
0.254	0.254	0.254	0.254	0.279	0.279	0.279	0.279	0.279
0.279	0.279	0.279	0.279	0.305	0.305	0.305	0.305	0.305
0.279	0.279	0.279	0.279	0.305	0.330	0.330	0.330	0.330
0.279	0.279	0.305	0.305	0.305	0.330	0.330	0.330	0.330
0.279	0.279	0.305	0.330	0.330	0.330	0.330	0.356	0.356
				0.330	0.330	0.330	0.356	0.356

UNIDADES INGLÉSAS

ANCHO DEL ALAMBRE DESNUDO EN PULGADAS								
0.200	0.225	0.250	0.280	0.315	0.355	0.400	0.450	0.500
DEBIDO A LA ADICIÓN DE UNA CAPA DE ALGODÓN								
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011
0.010	0.010	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012
0.010	0.010	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.013	0.013	0.013	0.013
0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.013	0.013	0.013	0.013
0.011	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
0.011	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013	0.013	0.014	0.014
				0.013	0.013	0.013	0.014	0.014

C A P I T U L O 5

PRINCIPALES CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES

CAPITULO 5

PRINCIPALES CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES

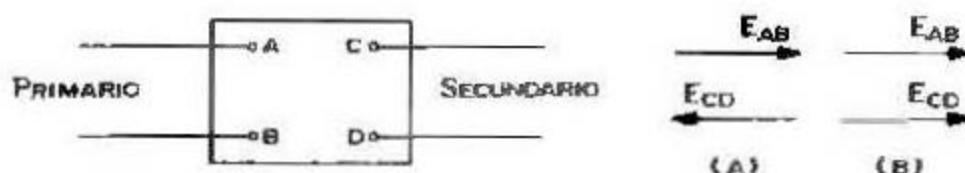
5.1. INTRODUCCION.

DEPENDIENDO DEL PROPÓSITO DE LA INSTALACIÓN, UN TRANSFORMADOR SE PUEDE CONECTAR DE DISTINTAS FORMAS. EN EL CASO DE LOS -- TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS, HAY DISTINTAS FORMAS DE CONECTARLOS A LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN Y A LA CARGA. DOS O MÁS TRANSFORMADORES SE PUEDEN CONECTAR EN DISTINTAS FORMAS PARA CUMPLIR -- CON DISTINTOS REQUERIMIENTOS.

5.1.1. EL CONCEPTO DE POLARIDAD.

A DIFERENCIA DE LA CORRIENTE DIRECTA, NO HAY POLARIDAD- POSITIVA O NEGATIVA FIJA EN LA CORRIENTE ALTERNA, DE -- AQUÍ QUE LOS TRANSFORMADORES NO PUEDEN TENER POLARIDAD- FIJA EN SUS TERMINALES.

LA DIRECCIÓN RELATIVA EN LA CUAL LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DE UN TRANSFORMADOR. SE DEVANAN ALREDEDOR DEL NUCLEO, DETERMINA LA DIRECCIÓN RELATIVA DEL VOLTAJE A TRAVÉS DE LOS DEVANADOS. POR EJEMPLO, SI EN LA FIGURA SIGUIENTE, SE SUPONE QUE EL VOLTAJE APLICADO EN CUALQUIER INSTANTE TIENE DIRECCIÓN DE A A B, LA DIRECCIÓN DEL VOLTAJE EN EL SECUNDARIO SERÁ DE C A D Ó DE D A C, DEPEN -- DIENDO DE LA DIRECCIÓN RELATIVA DE LOS DEVANADOS.



POLARIDAD EN UN TRANSFORMADOR MONOFASICO

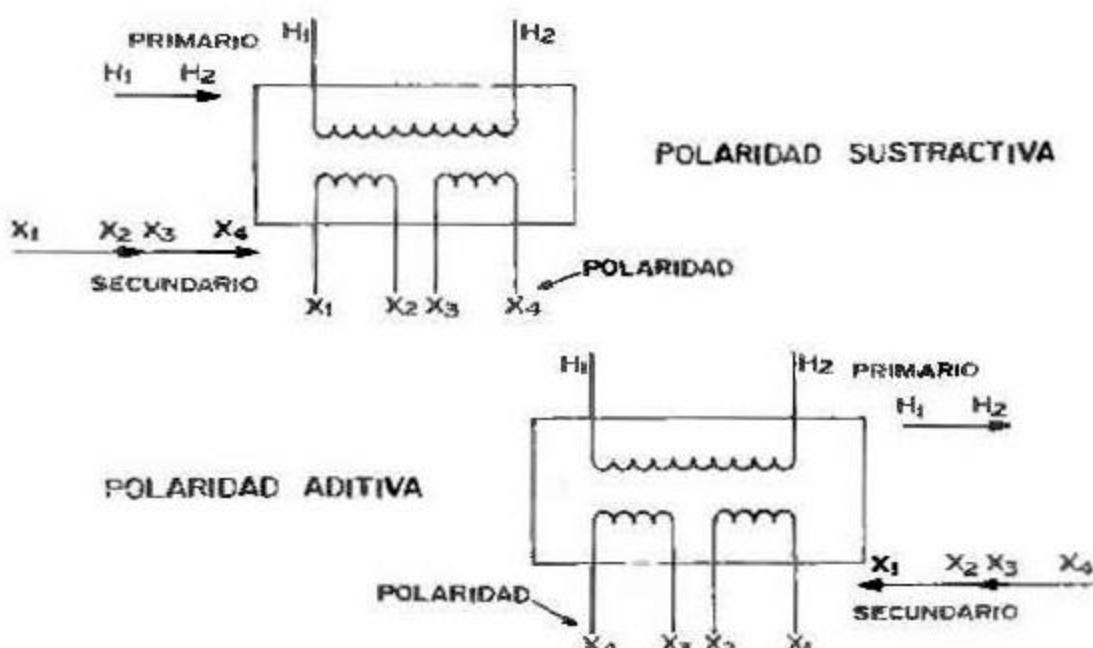
- A) POLARIDAD ADITIVA.
- B) POLARIDAD SUSTRACTIVA.

DADO QUE ES IMPORTANTE, CUANDO DOS O MÁS TRANSFORMADORES SE CONECTAN JUNTOS, CONOCER LA DIRECCIÓN RELATIVA DEL VOLTAJE DE CADA TRANSFORMADOR, SE HAN ESTABLECIDO CIERTAS CONVENCIONES PARA DESIGNAR LA LLAMADA POLARIDAD DE UN TRANSFORMADOR. ESTA DESIGNACIÓN DE POLARIDAD SE PUEDE OBTENER DE LA FIGURA ANTERIOR.

SI UNA DE LAS TERMINALES DEL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE SE CONECTA AL LADO ADYACENTE OPUESTO DEL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE (POR EJEMPLO DE A A C), EL VOLTAJE EN LAS TERMINALES RESTANTES (B Y D) ES, O LA SUMA O LA DIFERENCIA DE LOS VOLTAJES PRIMARIO Y SECUNDARIO, DEPENDIENDO DE LAS DIRECCIONES RELATIVAS DE LOS DEVANADOS. SI EL VOLTAJE DE B A D ES LA SUMA, SE DICE QUE EL TRANSFORMADOR TIENE POLARIDAD ADITIVA Y SI ES LA DIFERENCIA, EN -

ENTONCES SE DICE QUE TIENE POLARIDAD SUSTRACTIVA.

PARA INDICAR CUANDO UN TRANSFORMADOR TIENE POLARIDAD -- ADITIVA O SUSTRACTIVA, SE MARCAN LOS CONDUCTORES COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA SIGUIENTE:



SI LOS DEVANADOS DE LOS LADOS DE ALTO Y BAJO VOLTAJE ESTÁN EN DIRECCIONES OPUESTAS, LOS VOLTAJES APLICADO E INDUCIDO TENDRÁN DIRECCIONES OPUESTAS Y SE DICE QUE EL -- TRANSFORMADOR TIENE "POLARIDAD SUSTRACTIVA". LAS TERMINALES H_1 Y X_1 ESTARÁN DEL LADO IZQUIERDO CUANDO SE "VE" AL TRANSFORMADOR DEL LADO DE BAJO VOLTAJE HACIA EL LADO DE ALTO VOLTAJE.

SI LOS DEVANADOS DE LOS LADOS DE ALTO Y BAJO VOLTAJE ESTÁN EN LA MISMA DIRECCIÓN, LOS VOLTAJES APLICADO E INDUCIDO TENDRÁN LA MISMA DIRECCIÓN Y SE DICE ENTonces QUE EL TRANSFORMADOR TIENE "POLARIDAD ADITIVA", LA TERMINAL

X₁ SE ENCONTRARÁ DEL LADO DERECHO CUANDO SE "VE" AL -- TRANSFORMADOR DEL LADO DE BAJO VOLTAJE HACIA EL LADO DE ALTO VOLTAJE.

CUANDO SE DESEA CONECTAR EN PARALELO LOS SECUNDARIOS DE DOS (O MÁS) TRANSFORMADORES, SE CONECTAN EN FORMA SIMILAR, LAS TERMINALES QUE TIENE LA MISMA MARCA DE POLARIDAD.

5.1.2. LA PRUEBA DE POLARIDAD.

CUANDO EN UN TRANSFORMADOR NO ESTÁ ESPECIFICADA LA POLARIDAD O SE DESCONOCE, SE PUEDE DETERMINAR POR UNA SIMPLE MEDICIÓN DE VOLTAJE COMO SE INDICA A CONTINUACIÓN.

1. HACER UNA CONEXIÓN ENTRE LAS TERMINALES DE ALTO VOLTAJE Y BAJO VOLTAJE DEL LADO DERECHO CUANDO SE VE AL TRANSFORMADOR DESDE EL LADO DE LAS BOQUILLAS Y DE BAJO VOLTAJE.
2. APLICAR UN VOLTAJE BAJO, POR EJEMPLO 120 VOLTS A LAS TERMINALES DE ALTO VOLTAJE Y MEDIR ESTE VOLTAJE CON UN VÓLTIMETRO.
3. MEDIR EL VOLTAJE DE LA TERMINAL DEL LADO IZQUIERDO - DEL LADO DE ALTO VOLTAJE A LA TERMINAL DEL LADO IZQUIERDO DE BAJO VOLTAJE..

SI EL VOLTAJE ANTERIOR ES MENOR QUE EL VOLTAJE A TRAVÉS DE LAS TERMINALES DE ALTO VOLTAJE, EL TRANSFORMADOR TIENE POLARIDAD SUSTRACTIVA. SI ESTE VOLTAJE ES MAYOR, ENTONCES LA POLARIDAD ES ADITIVA.

5.2. CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

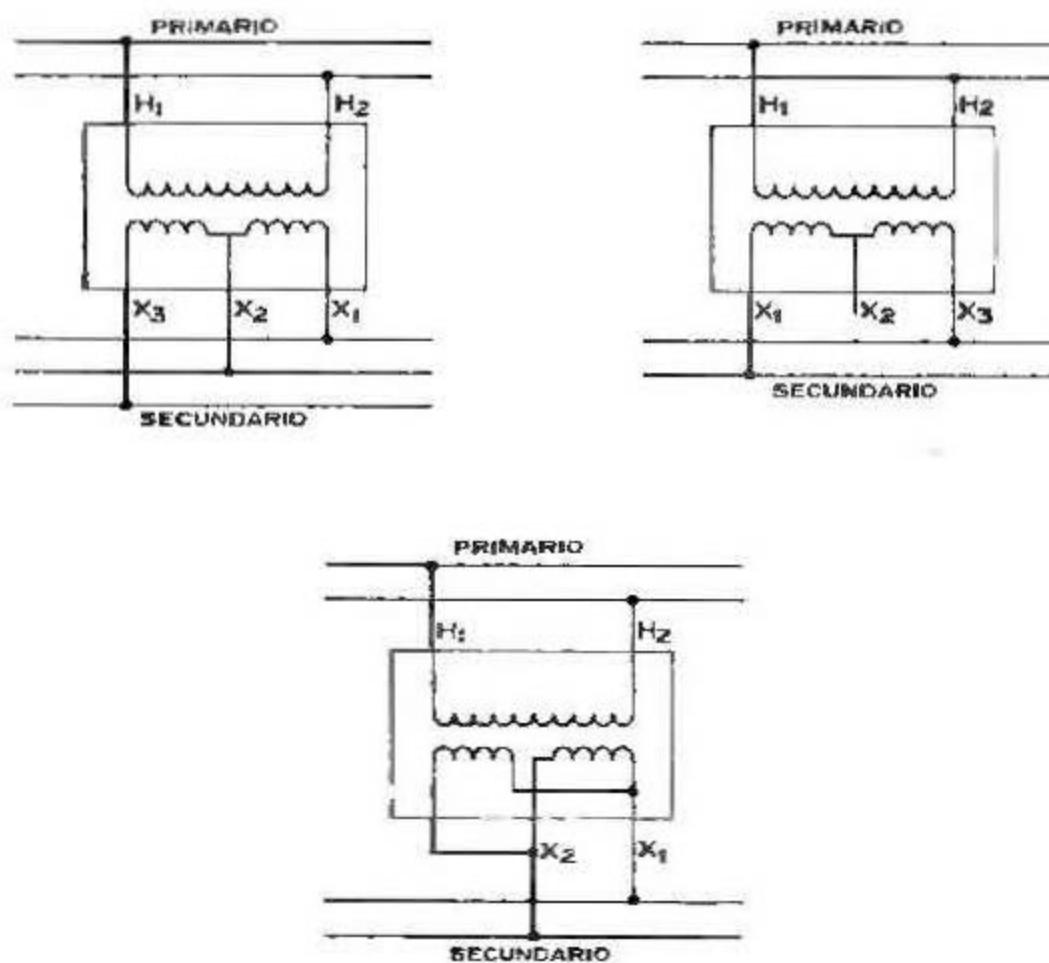
LA CONEXIÓN MÁS SIMPLE DE LAS CONEXIONES DE LOS TRANSFORMADORES ES LA CONEXIÓN MONOFÁSICA.

UN MÉTODO SENCILLO DE LLEVAR LAS TERMINALES DE LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO A LAS BOQUILLAS QUE LLEVAN AL EXTERIOR DEL TANQUE DEL TRANSFORMADOR SE INDICÓ EN LA FIGURA ANTERIOR. PARA PROPORCIONAR FLEXIBILIDAD EN LAS CONEXIONES, LAS BOBINAS DE LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO, SE ARREGLAN EN DOS SECCIONES, CADA SECCIÓN DE UNA BOBINA TIENE EL MISMO NÚMERO DE ESPRAS, Y POR LO TANTO, GENERA EL MISMO VOLTAJE. LAS DOS PRIMERAS SECCIONES SE CONECTAN POR LO GENERAL JUNTAS, DENTRO DEL TANQUE Y ÚNICAMENTE DOS SON LLEVADAS AL EXTERIOR DEL TANQUE ATRAVÉS DE LAS BOQUILLAS, LAS CUALAS LAS AISLAN DE LA TAPA.

SE PUEDEN SACAR CUATRO CONDUCTORES SECUNDARIOS DE CADA BOBINA DEL SECUNDARIO, CON LOS DOS CONDUCTORES O TERMINALES TRANSPUESTOS DEL INTERIOR, ANTES DE SER LLEVADOS AL EXTERIOR. EN TRANSFORMADORES NUEVOS DEL TIPO DISTRIBUCIÓN, ES PRÁCTICA COMÚN ESTAS DOS TERMINALES TRANSPUESTAS, SE CONECTAN DENTRO DEL TANQUE Y SÓLO UN CONDUCTOR COMÚN SE LLEVA AL EXTERIOR.

236 Principales conexiones de los transformadores

LA BOQUILLA SECUNDARIA CENTRAL SE LE DENOMINA POR LO GENERAL - "BOQUILLA DEL NEUTRO" Y EN MUCHOS CASOS ES UNA TUERCA QUE CONECTA TAMBIÉN A LA PARED DEL TANQUE PROPORCIONANDO UN MEDIO DE CONEXIÓN A TIERRA AL TANQUE DEL TRANSFORMADOR. TRES DISTINTAS FORMAS DE CONEXIÓN SE MUESTRAN EN LA SIGUIENTE FIGURA:



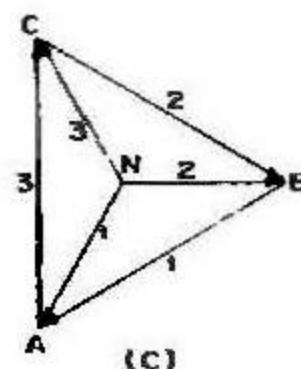
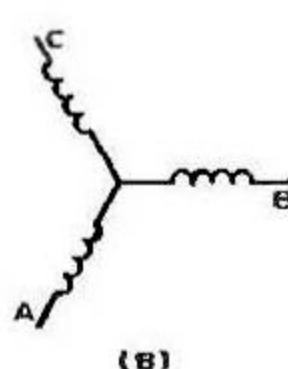
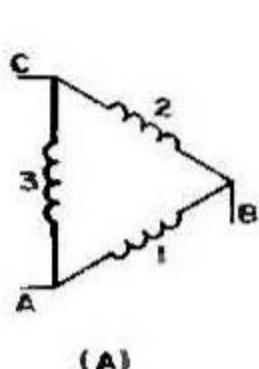
5.2.1. SISTEMAS POLIFÁSICOS.

COMO SE SABE, EN CORRIENTE ALTERNA HAY DOS TIPOS DE CIRCUITOS: LOS DENOMINADOS CIRCUITOS MONOFÁSICOS Y -- LOS CIRCUITOS POLIFÁSICOS (LOS MÁS COMUNES SON LOS -- TRIFÁSICOS). EN LOS CIRCUITOS MONOFÁSICOS SÓLO UNA FASE O CONJUNTO DE VOLTAJES DE ONDA DE FORMA SENOIDAL SE APLICAN A LOS CIRCUITOS Y ÚNICAMENTE EN UNA FASE CIRCULA CORRIENTE SENOIDAL.

EN UN SISTEMA POLIFÁSICO SE APLICAN DOS O MÁS VOLTAJES SENOIDALES A LAS DIFERENTES PARTES DEL CIRCUITO Y CIRCULAN EN LAS MISMAS PARTES LAS CORRESPONDIENTES CORRIENTES SENOIDALES.

CADA PARTE DEL SISTEMA POLIFÁSICO SE CONOCE COMO "FASE" Y PRÁCTICAMENTE SE DENOMINAN FASE A, FASE B Y FASE C Y EN LA MISMA FORMA SE DESIGNAN LOS VOLTAJES INDICANDO "VOLTAJES DE LA FASE A", "VOLTAJE DE LA FASE-B", ETC. Y LAS CORRIENTES, CORRIENTE DE LA FASE A, - CORRIENTE DE LA FASE B, ETC.

LOS VOLTAJES APLICADOS A UN SISTEMA POLIFÁSICO SE OBTIENEN DE UNA FUENTE DE SUMINISTRO POLIFÁSICA, TAMBÉN, DE MANERA QUE CADA FASE ESTÁ SIEMPRE SEPARADA. POR EJEMPLO, EN UN SISTEMA TRIFÁSICO SE TIENEN TRES FASES SEPARADAS. LOS MÉTODOS MÁS COMUNES DE CONECTAR LOS DEVANADOS DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA TRIFÁSICA SON EN DELTA Y EN ESTRELLA, COMO SE MUESTRA A CONTINUACIÓN:



CONEXIONES TRIFÁSICAS

238 Principales conexiones de los transformadores

- A) CONEXIÓN DELTA.
- B) CONEXIÓN ESTRELLA.
- C) VECTORES DE VOLTAJE.

SE PUEDE OBSERVAR QUE EN TANTO LOS VOLTAJES EN LAS -- TERMINALES A, B Y C, SON LOS MISMOS PARA LAS CONEXIONES DELTA Y ESTRELLA.

LOS VOLTAJES A TRAVÉS DE LOS DEVANADOS 1, 2 Y 3 EN LOS DOS SISTEMAS, NO SÓLO SON DE DIFERENTE MAGNITUD, TAMBIÉN SE OBSERVA QUE SUS DIRECCIONES NO COINCIDEN. ESTE HECHO ES IMPORTANTE EN LA CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES, YA QUE PUEDE PROVOCAR DIFICULTADES EN LA CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES CUANDO NO SE TIENE CUIDADO EN ESTO.

5.2.2. CONEXIÓN TRIFÁSICA DE TRANSFORMADORES.

LA TRANSFORMACIÓN TRIFÁSICA SE PUEDE REALIZAR POR MEDIO DE TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EN CONEXIÓN TRIFÁSICA O POR MEDIO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. LOS MÉTODOS DE CONEXIÓN DE LOS DEVANADOS PARA LA CONEXIÓN TRIFÁSICA SON LOS MISMOS, YA SEA QUE SE USEN TRES DEVANADOS EN UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO, O BIEN TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS POR SEPARADO, EN CONEXIÓN TRIFÁSICA. LAS CONEXIONES TRIFÁSICAS MÁS COMUNES SON LAS DENOMINADAS DELTA Y ESTRELLA;

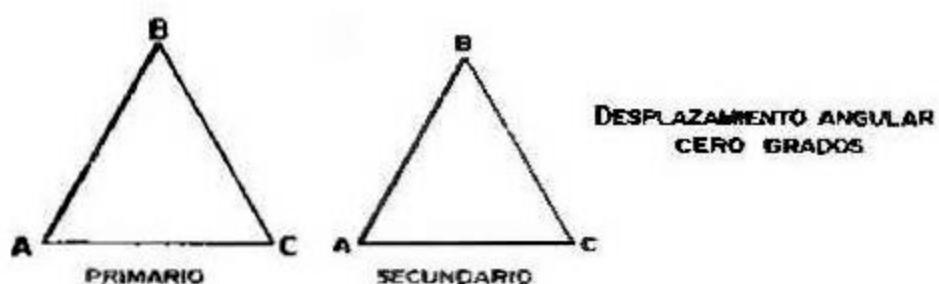
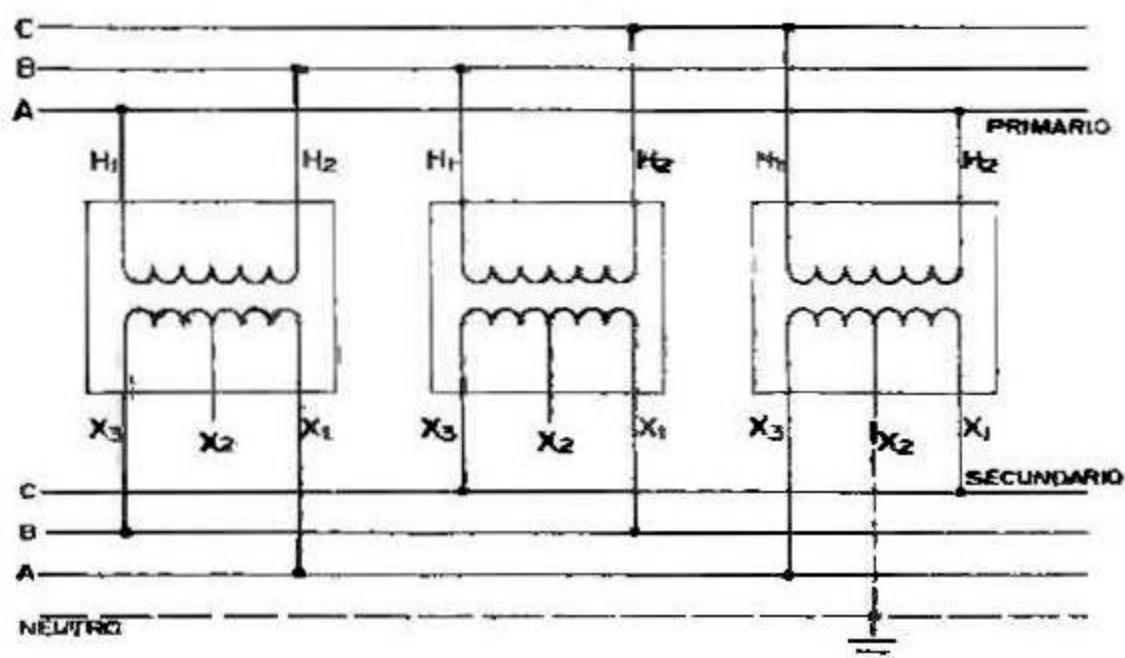
CONEXIÓN DELTA-DELTA.

ESTA CONEXIÓN SE USA CON FRECUENCIA PARA ALIMENTAR CARGAS DE ALUMBRADO PEQUEÑAS Y CARGAS TRIFÁSICAS SIMULTÁNEAMENTE. PARA ESTO SE PUEDE LOCALIZAR UNA DERIVACIÓN O TAP EN EL PUNTO MEDIO DEL DEVANADO SECUNDARIO DE UNO DE LOS TRANSFORMADORES, CONECTÁNDOSE A TIERRA Y SE CONECTA TAMBIÉN AL NEUTRO DEL SECUNDARIO. DE ESTA MANERA, LAS CARGAS MONOFÁSICAS SE CONECTAN ENTRE LOS CONDUCTORES DE FASE Y NEUTRO. POR LO TANTO, EL TRANSFORMADOR CON LA DERIVACIÓN EN EL PUNTO MEDIO TOMA DOS TERCERAS PARTES DE LA CARGA MONOFÁSICA Y UNA TERCERA PARTE DE LA CARGA TRIFÁSICA. LOS OTROS DOS TRANSFORMADORES CADA UNO TOMA UN TERCIO DE LAS CARGAS MONOFÁSICAS Y TRIFÁSICA.

PARA PODER CARGAR AL BANCO TRIFÁSICO EN FORMA BALANCEADA, SE DEBEN CUMPLIR CON LAS SIGUIENTES CONDICIONES:

1. TODOS LOS TRANSFORMADORES DEBEN TENER IDÉNTICA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN.
2. TODOS LOS TRANSFORMADORES DEBEN TENER EL MISMO VALOR DE IMPEDANCIA.
3. TODOS LOS TRANSFORMADORES DEBEN CONECTAR EN EL MISMO TAP O DERIVACIÓN.

240 Principales conexiones de los transformadores



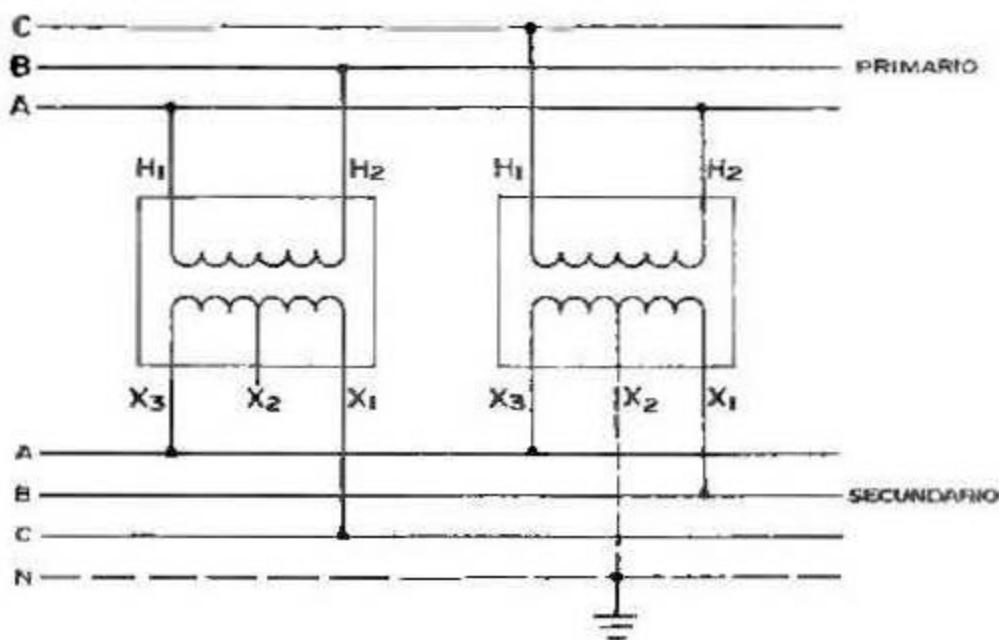
**TRES TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN CONEXIÓN
TRIFASICA, POLARIDAD ADITIVA, CONEXIÓN DELTA-DELTA.**

CONEXIÓN DELTA ABIERTA-DELTA ABIERTA.

LA CONEXIÓN DELTA-DELTA REPRESENTA EN CIERTO MODO LA-MÁS FLEXIBLE DE LAS CONEXIONES TRIFÁSICAS. UNA DE — LAS VENTAJAS DE ESTA CONEXIÓN, ES QUE SI UNO DE LOS — TRANSFORMADORES SE DAÑA O SE RETIRA DE SERVICIO, LOS-OTROS DOS PUEDEN CONTINUAR OPERANDO EN LA LLAMADA CO-
NEXIÓN "DELTA-ABIERTA" O "V". CON ESTA CONEXIÓN SE — SUMINISTRA APROXIMADAMENTE EL 58% DE LA POTENCIA QUE-
ENTREGA UN BANCO EN CONEXIÓN DELTA-DELTA.

EN LA CONEXIÓN DELTA ABIERTA, LAS IMPEDANCIAS DE LOS-TRANSFORMADORES NO NECESITAN SER IGUALES NECESARIAMEN-TE, AUNQUE ESTA SITUACIÓN ES PREFERIBLE CUANDO ES NE-
CESARIO CERRAR LA DELTA CON UN TERCER TRANSFORMADOR.

LA CONEXIÓN DELTA ABIERTA, SE USA NORMALMENTE PARA -- CONDICIONES DE EMERGENCIA, CUANDO EN UNA CONEXIÓN DEL-
TA-DELTA UNO DE LOS TRANSFORMADORES DEL BANCO SE DES-
CONECTA POR ALGUNA RAZÓN. EN FORMA SIMILAR A LA CO-
NEXIÓN DELTA-DELTA, DEL PUNTO MEDIO DEL SECUNDARIO DE
UNO DE LOS TRANSFORMADORES SE PUEDE TOMAR UNA DERIVA-
CIÓN PARA ALIMENTAR PEQUEÑAS CARGAS DE ALUMBRADO O --
BIEN OTROS TIPOS DE CARGAS



DOS TRANSFORMADORES MONOFASICOS EN CONEXION DELTA ABIERTA

EJEMPLO 5.1

SE TIENEN TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS EN CONEXIÓN DELTA-DELTA PARA REDUCIR UN VOLTAJE DE 115 KV A 4160 VOLTS. LA CARGA QUE ALIMENTAN DEMANDA UNA POTENCIA DE 20 MW A UN FACTOR DE POTENCIA DE 0.9 ATRASADO

CALCULAR.

- LA POTENCIA APARENTE QUE DEMANDA LA CARGA.
- LA POTENCIA APARENTE QUE SE SUMINISTRA AL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN.
- LA CORRIENTE EN LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN DE ALTA TENSIÓN.

- d) LA CORRIENTE EN LAS LÍNEAS DE BAJA TENSIÓN A LA CARGA.
- e) LAS CORRIENTES EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR.
- f) LA CARGA QUE TOMA CADA TRANSFORMADOR.

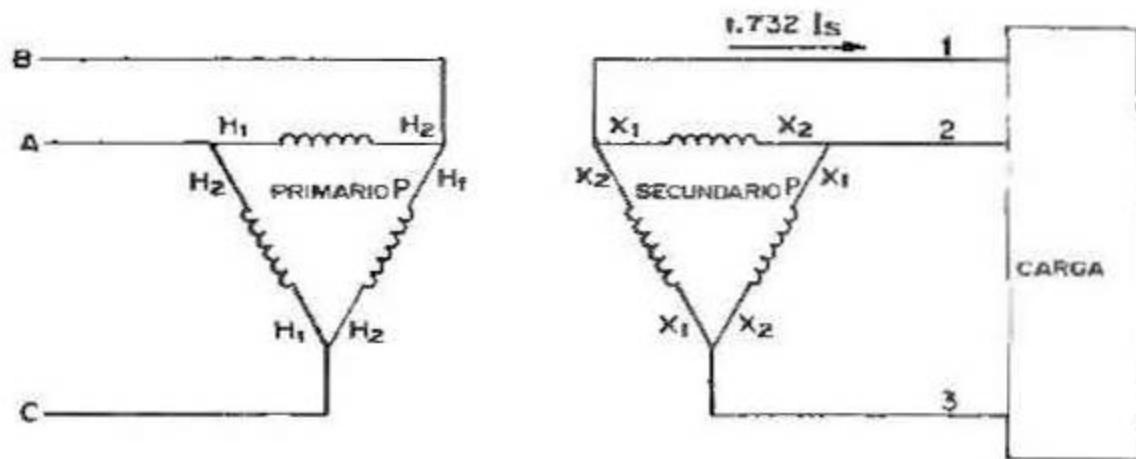
SOLUCIÓN

- a) LA POTENCIA APARENTE QUE DEMANDA LA CARGA ES:

$$S = \frac{P}{\cos\theta} = \frac{20}{0.9} = 22.22 \text{ MVA.}$$

- b) LA POTENCIA APARENTE QUE SE SUMINISTRA AL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE ES PRÁCTICAMENTE LA MISMA QUE DEMANDA AL TRANSFORMADOR, SI SE CONSIDERAN DESPRECIAZABLES LAS PÉRDIDAS Rj^2 Y LAS PÉRDIDAS DE VACÍO. POR LO TANTO, LA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN TRANSPORTA UNA POTENCIA DE 22.22 MVA:
- c) LA CORRIENTE EN CADA LÍNEA DEL LADO DE ALTA TENSIÓN SE CALCULA COMO SIGUE:

244 Principales conexiones de los transformadores



$$I_1 = S / \sqrt{3} E_P$$

$$I_1 = 22.22 \times 10^6 / \sqrt{3} \times 115000 = 111.55 \text{ A}$$

- d) LA CORRIENTE EN LAS LÍNEAS DEL LADO DE BAJA TENSIÓN ES INVERSAMENTE PROPORCIONAL A LOS VOLTAJES-
ES DECIR:

$$I_2 = \frac{I_1 E_1}{E_2} = \frac{111.55 \times 115000}{4160} = 3083.8 \text{ A}$$

- e) LAS CORRIENTES EN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR

$$I_P = \frac{111.55}{\sqrt{3}} = 64.37 \text{ A}$$

$$I_S = \frac{3083.8}{\sqrt{3}} = 1780.43 \text{ A}$$

DEBIDO A QUE LA CARGA ES BALANCEADA, CADA TRANSFORMADOR TOMA UNA TERCERA PARTE DE LA CARGA, ES DECIR:

$$22.22 / 3 = 7.406 \text{ MVA}$$

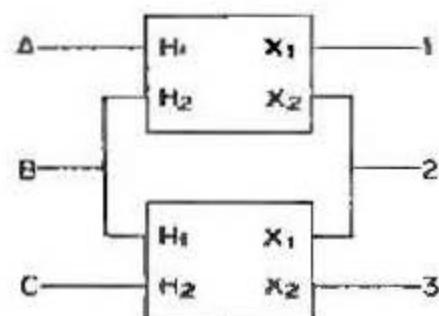
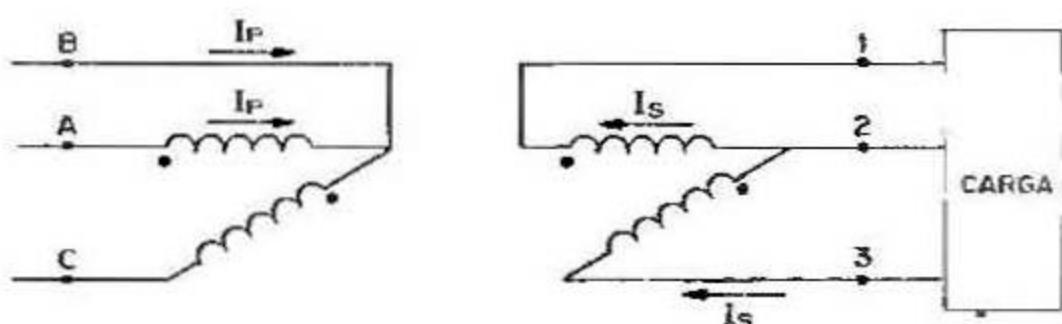
LA CARGA DEL TRANSFORMADOR SE PUEDE OBTENER TAMBIÉN COMO EL PRODUCTO DEL VOLTAJE PRIMARIO Y LA CORRIENTE-PRIMARIA.

$$S = E_p I_p = 115000 \times 64.37 = 7.402 \text{ MVA}$$

EJEMPLO 5.2.

DOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE 150 kVA, 7200/440V SE CONECTAN EN DELTA ABIERTA. CALCULAR LA MÁXIMA POTENCIA QUE PUEDEN ENTREGAR.

SOLUCIÓN



246 Principales conexiones de los transformadores

AÚN CUANDO LOS DOS TRANSFORMADORES TIENEN UNA POTENCIA DE 150 KVA CADA UNO, LOS DOS JUNTOS NO PUEDEN ENTREGAR UNA CARGA DE 300 KVA, POR LO SIGUIENTE:

LA CORRIENTE NOMINAL SECUNDARIA DE CADA TRANSFORMADOR ES:

$$I_s = 150/440 = 150000/440 = 340.9 \text{ A}$$

LA CORRIENTE EN LAS LINEAS 1, 2 Y 3 NO PUEDE POR LO TANTO EXCEDER A 340.9 A, POR LO QUE LA MÁXIMA CARGA ES:

$$S = 1.73 EI = 1.73 \times 440 \times 340.9 = 259493 \text{ VA}$$

$$S = 259.49 \text{ KVA}$$

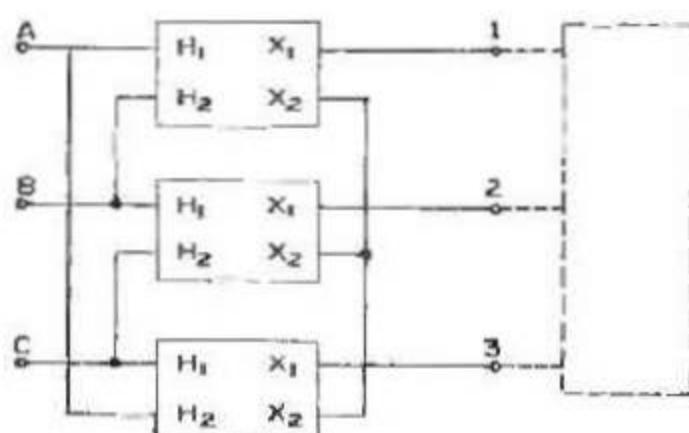
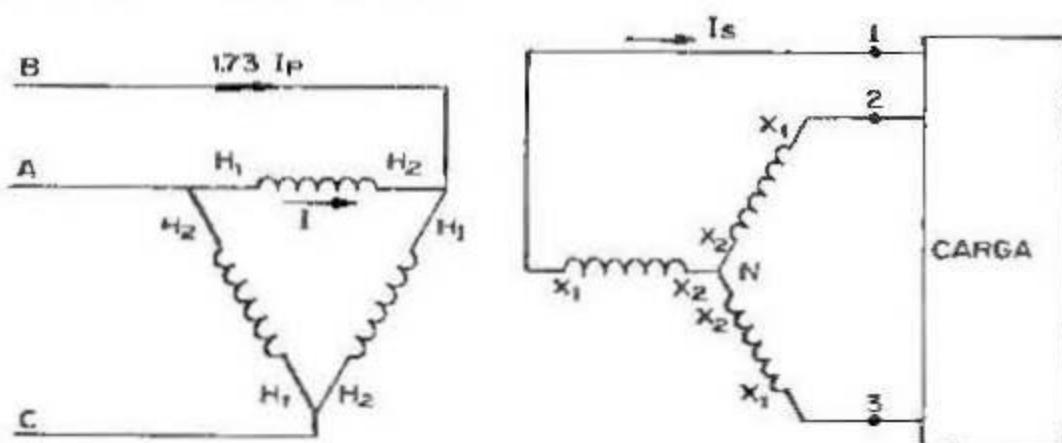
QUE REPRESENTA: MÁXIMA CARGA
CAPACIDAD INSTALADA DE TRANSFORMADOR

$$= \frac{259.49}{300} = 86.49\%$$

CONEXIÓN DELTA-ESTRELLA.

ESTE TIPO DE CONEXIÓN SE HACE FRECUENTEMENTE PARA ALIMENTAR EN FORMA COMBINADA, CARGAS TRIFÁSICAS Y CARGAS MONOFÁSICAS EN DONDE LAS CARGAS MONOFÁSICAS PUEDEN SER COMPARATIVAMENTE GRANDES. LOS DEVANADOS SECUNDARIOS PUEDEN TENER UNA DERIVACIÓN O TAP, PARA OBTENER VALORES DE VOLTAJE DISTINTOS.

EN TRANSFORMADORES DE GRAN POTENCIA, LA CONEXIÓN DELTA-ESTRELLA, SE USA FRECUENTEMENTE PARA ELEVAR VOLTAJE, COMO ES EL CASO DE LAS CENTRALES ELÉCTRICAS. LA CONEXIÓN EN ESTRELLA PERMITE LA FACILIDAD DE DISPONER DE UN NEUTRO PARA CONEXIÓN A TIERRA. TIENE EL INCONVENIENTE DE QUE CUANDO SE CONECTAN EN PARALELO TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS EN CONEXIÓN DELTA-ESTRELLA, SE DEBE TOMAR EN CONSIDERACIÓN EL DESPLAZAMIENTO ANGULAR ENTRE LA DELTA Y LA ESTRELLA



CONEXION DELTA-ESTRELLA DE TRES TRANSFORMADORES MONOFASICOS

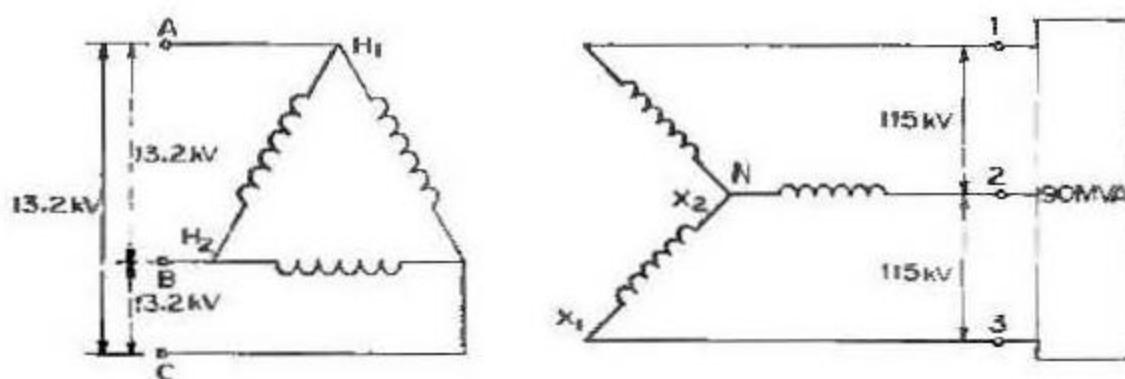
EJEMPLO 5.3

SE TIENEN TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS DE 40,000 KVA QUE SE USAN COMO ELEVADORES EN CONEXIÓN DELTA/ESTRELLA Y CON RELACIÓN DE 13.2/66.4 KV SI ALIMENTAN UNA CARGA DE 90 MVA CALCULAR:

- EL VOLTAJE DE LÍNEA SECUNDARIO.
- LA CORRIENTE EN LOS DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES.
- LAS CORRIENTES EN LOS CONDUCTORES DE ENTRADA Y SALIDA A LOS TRANSFORMADORES.

SOLUCION

LA FORMA SIMPLE DE RESOLVER ESTE PROBLEMA ES CONSIDERAR SÓLO UNA FASE A LA VEZ



A.1. EL VOLTAJE A TRAVÉS DE CADA DEVANADO PRIMARIO ES-
13.2 kV.

A.2. EL VOLTAJE EN EL DEVANADO SECUNDARIO DE CADA --
TRANSFORMADOR ES 66.4 kV.

A.3. EL VOLTAJE SECUNDARIO ENTRE FASES O ENTRE LÍNEAS
1-2, 2-3, 1-3 ES ENTONCES:

$$E_s = \sqrt{3} \times 66.4 = 115 \text{ kV.}$$

b) LA POTENCIA QUE TRANSPORTA CADA TRANSFORMADOR ES:

$$90/3 = 30 \text{ MVA}$$

LA CORRIENTE EN CADA DEVANADO PRIMARIO ES:

$$I_p = 30000/13.2 = 2272.7 \text{ A}$$

LA CORRIENTE EN CADA DEVANADO SECUNDARIO ES:

$$I_s = 30000/66.4 = 451.8 \text{ A}$$

c.1 LA CORRIENTE EN CADA LÍNEA DE ALIMENTACIÓN DEL LADO
DE 13.2 kV

$$I_A = I_B = I_C = \sqrt{3} \times 2272.7 = 3936.4 \text{ A}$$

c.2 LA CORRIENTE EN CADA LÍNEA DE SALIDA A LA CARGA-
EN EL LADO DE 115 kV.

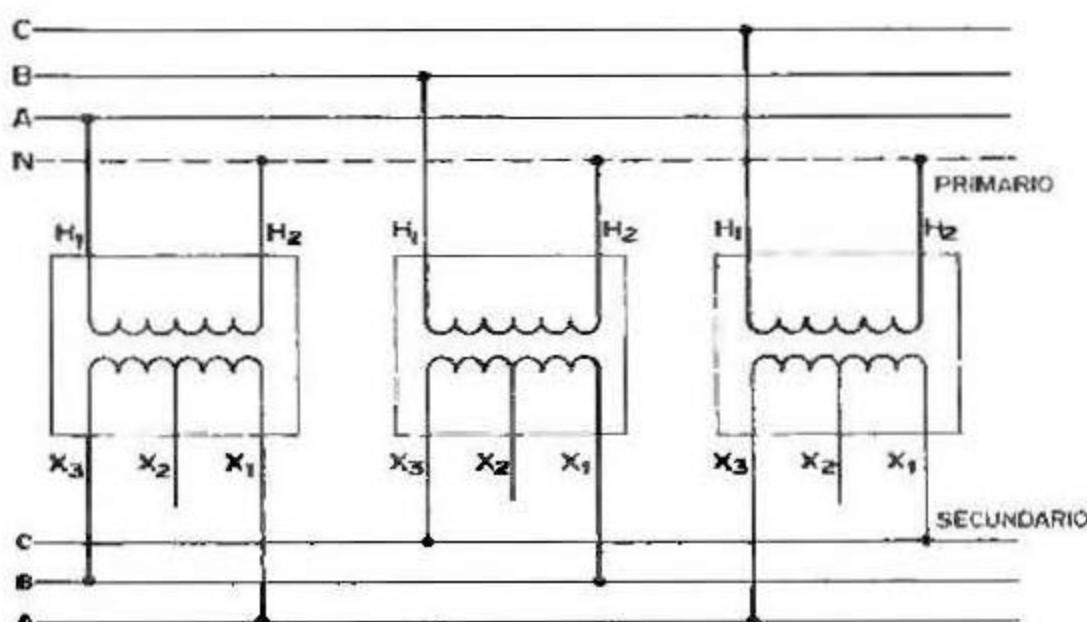
$$I_1 = I_2 = I_3 = 451.8 \text{ A}$$

CONEXIÓN ESTRELLA-DELTA.

ESTA CONEXIÓN SE USA CON FRECUENCIA PARA ALIMENTAR CARGAS TRIFÁSICAS GRANDES DE UN SISTEMA TRIFÁSICO DE ALIMENTACIÓN CONECTADO EN ESTRELLA. TIENE LA LIMITANTE DE QUE PARA ALIMENTAR CARGAS MONOFÁSICAS Y TRIFÁSICAS EN FORMA SIMULTÁNEA, NO DISPONE DEL NEUTRO.

POR OTRA PARTE, TIENE LA VENTAJA RELATIVA DE QUE LA IMPEDANCIA DE LOS TRES TRANSFORMADORES NO NECESITA SER LA MISMA EN ESTA CONEXIÓN.

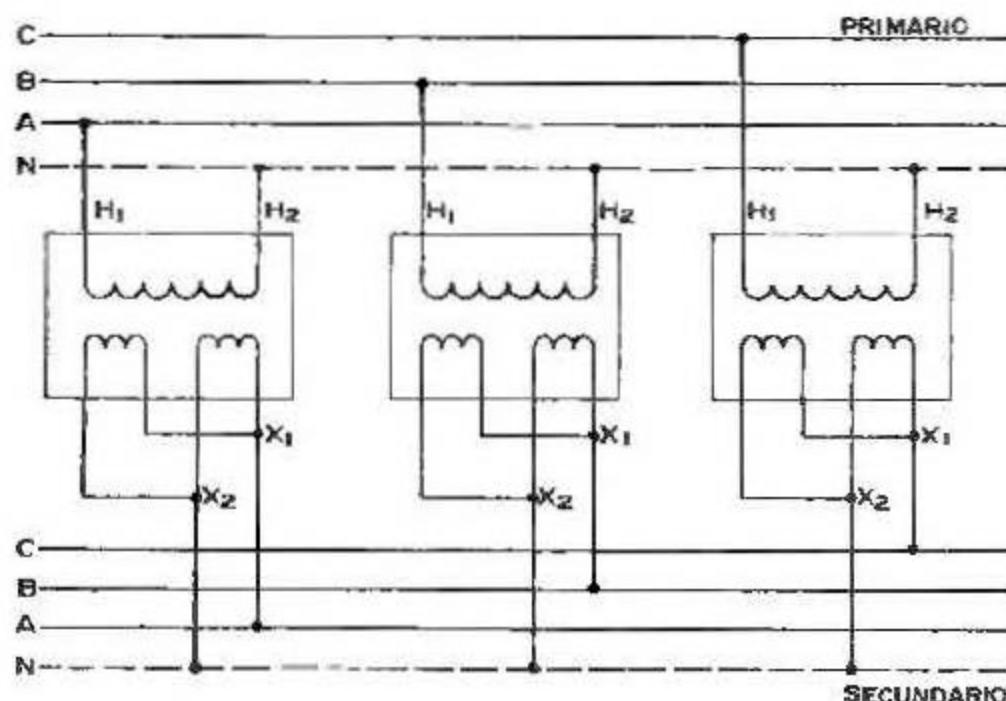
LAS RELACIONES ENTRE CORRIENTES Y VOLTAJES DE FASE DE LÍNEA A LÍNEA PARA LA CONEXIÓN ESTRELLA DELTA, SON LAS MISMAS QUE SE TIENEN EN LA CONEXIÓN DELTA/ESTRELLA ESTUDIADA EN EL PÁRRAFO ANTERIOR.



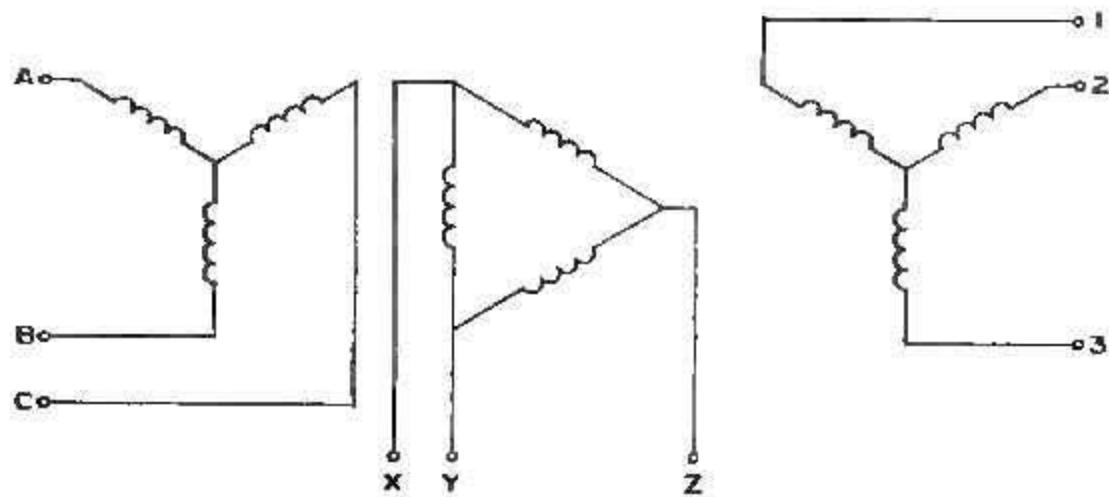
CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA

ESTA CONEXIÓN SE USA CUANDO SE REQUIERE ALIMENTAR GRANDES CARGAS MONOFÁSICAS EN FORMA SIMULTÁNEA CON CARGAS TRIFÁSICAS. TAMBIÉN SE USA SÓLO SI EL NEUTRO DEL PRIMARIO SE PUEDE CONECTAR SÓLIDAMENTE AL NEUTRO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN YA SEA CON UN NEUTRO COMÚN O A TRAVÉS DE TIERRA. CUANDO LOS NEUTROS DE AMBOS LADOS DEL BANCO DE TRANSFORMADORES NO SE UNEN, EL VOLTAJE DE LÍNEA A NEUTRO TIENDE A DISTORSIONARSE (NO ES SENOIDAL). LA CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA, SE PUEDE USAR TAMBIÉN SIN UNIR LOS NEUTROS, A CONDICIÓN DE QUE CADA TRANSFORMADOR TENGA UN TERCER DEVANADO QUE SE CONOCE COMO "DEVANADO TERCIARIO." ESTE DEVANADO TERCIARIO ESTÁ SIEMPRE CONECTADO EN DELTA.

CON FRECUENCIA, EL DEVANADO TERCIARIO SE USA PARA ALIMENTAR LOS SERVICIOS DE LA SUBESTACIÓN.



CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA



CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA
CON DEVANADO TERCIARIO

TRANSFORMADORES DE UNA SOLA BOQUILLA.

EN LA CONEXIÓN ESTRELLA-ESTRELLA, LOS TRANSFORMADORES QUE TIENEN SÓLO LA BOQUILLA DE ALTA TENSIÓN O PRIMA - RIA. ESTA BOQUILLA SE CONECTA A LA LÍNEA DE ALIMENTA - CIÓN. LA CONEXIÓN ESPECIAL EN LA PARTE EXTERNA DEL - TANQUE DEL TRANSFORMADOR, TOMA EL LUGAR DE LA SEGUNDA BOQUILLA DE ALTA TENSIÓN Y SE DEBE CONECTAR ENTRE LOS TRES TRANSFORMADORES Y AL HILO DE NEUTRO O TIERRA.

LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN TIENEN UNA CONE - XIÓN INSTALADA ENTRE LA BOQUILLA DE BAJO VOLTAJE DEL - NEUTRO Y EL TANQUE.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

EN TÉRMINOS GENERALES, UN BANCO FORMADO POR TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS, SE PUEDE REEMPLAZAR POR UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO. ESTOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS, COMO SE HA DESCRITO EN CAPÍTULOS ANTERIORES, TIENEN UN NÚCLEO MAGNÉTICO CON TRES PIERNAS, EN DONDE SE ALOJAN LOS DEVANADOS PRIMARIO Y SECUNDARIO DE CADA UNA DE LAS FASES. LOS DEVANADOS SE CONECTAN INTERNA-
MENTE, EN FORMA SIMILAR A LOS BANCOS DE TRANSFORMADO-
RES MONOFÁSICOS, EN CUALQUIERA DE LAS CONEXIONES TRI-
FÁSICAS, ES DECIR, ESTRELLA-DELTA, DELTA ABIERTA, ETC.

PARA UNA CAPACIDAD DADA, UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO-
ES SIEMPRE DE MENOR TAMAÑO Y MÁS BARATO QUE UN BANCO
FORMADO POR TRES TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS CON LA-
MISMA CAPACIDAD. EN ALGUNAS OCASIONES, AÚN CON LO
MENTIONADO ANTES, SE PREFIERE EL USO DE BANCOS DE --
TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS, ESPECIALMENTE CUANDO --
POR MANTENIMIENTO Y CONFIABILIDAD RESULTA IMPORTANTE
LA FACILIDAD PARA REEMPLAZAR A UNA DE LAS UNIDADES.

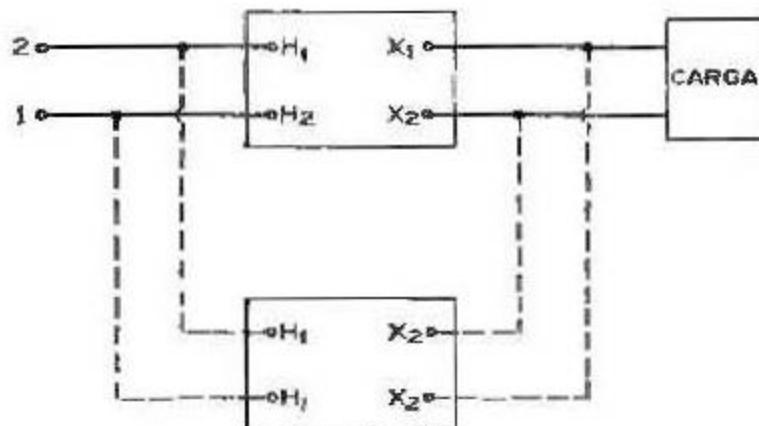
5.3. CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES EN PARALELO.

LOS TRANSFORMADORES SE PUEDEN CONECTAR EN PARALELO POR DISTIN-
TAS RAZONES, LAS PRINCIPALES ESTÁN RELACIONADAS CON PROBLEMAS
DE CONFIABILIDAD Y DE INCREMENTO EN LA DEMANDA, CUANDO SE --
EXcede o se está a punto de exceder la capacidad de un trans-
formador ya en operación.

254 Principales conexiones de los transformadores

PARA CONECTAR LOS TRANSFORMADORES EN PARALELO Y GARANTIZAR SU-CORRECTA OPERACIÓN, SE DEBEN CUMPLIR CIERTAS CONDICIONES COMO-SON:

- DEBEN TENER LOS MISMOS VOLTAJES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS.
- DEBEN TENER EL MISMO VALOR DE IMPEDANCIA EXPRESADO EN POR-CIENTO O EN POR UNIDAD.
- SE DEBE VERIFICAR QUE LA POLARIDAD DE LOS TRANSFORMADORES SEA LA MISMA.



CONEXIÓN EN PARALELO DE TRANSFORMADORES
PARA ALIMENTAR A UNA CARGA

EJEMPLO 5.4.

SE TIENE UN TRANSFORMADOR DE 250 KVA, 7200/220 VOLTS CON UNA IMPEDANCIA DEL 6%, QUE DEBE ALIMENTAR A UNA CARGA DE 330 KVA-Y PARA LO CUAL SE CONECTA EN PARALELO UN TRANSFORMADOR DE -- 100 KVA, 7200/220 VOLTS CON UNA IMPEDANCIA DEL 4%. SE DESEA-CALCULAR:

- A) LA CORRIENTE NOMINAL PRIMARIA DE CADA TRANSFORMADOR.
- B) LA IMPEDANCIA EQUIVALENTE A LA CARGA REFERIDA AL LADO PRIMARIO.
- C) LA IMPEDANCIA INTERNA DE CADA TRANSFORMADOR REFERIDAS AL LADO PRIMARIO.
- D) LA CORRIENTE REAL EN EL PRIMARIO DE CADA TRANSFORMADOR

SOLUCION

A.1. LA CORRIENTE NOMINAL EN EL PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR DE 250 KVA ES:

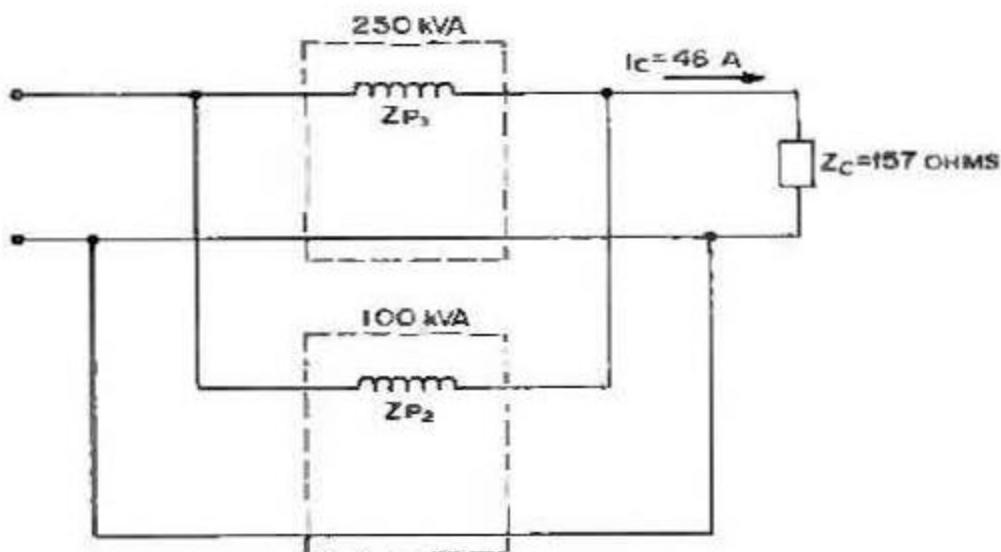
$$I_{N_1} = 250,000/7200 = 34.7 \text{ A}$$

A.2 LA CORRIENTE NOMINAL EN EL PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR DE 100 KVA ES:

$$I_{N_2} = 100,000/7200 = 13.9 \text{ A}$$

B) PARA OBTENER EL VALOR DE LA IMPEDANCIA EQUIVALENTE DE LA CARGA REFERIDA AL LADO PRIMARIO, SE PUEDE RECURRIR AL CIRCUITO EQUIVALENTE DE LOS DOS TRANSFORMADORES CON LA CARGA.

256 Principales conexiones de los transformadores



LA IMPEDANCIA DE LA CARGA REFERIDA AL LADO PRIMARIO
ES:

$$Z_C = E_p^2 / P_{CARGA} = (7200)^2 / 330.000 = 157 \text{ OHMS}$$

LA CORRIENTE EN LA CARGA (AL PRIMARIO)

$$I_C = P_{CARGA} / E_p = 330.000 / 7200 = 46A$$

c) LA IMPEDANCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR DE 250 KVA REFERIDA AL PRIMARIO ES:

$$Z_P^1 = E_p^2 / KVA_1 = (7200)^2 / 250.000 = 207 \text{ OHMS}$$

LA IMPEDANCIA INTERNA REFERIDA AL LADO PRIMARIO ES:

$$Z_P^1 = 0.06 \times 207 = 12.4 \text{ OHMS}$$

LA IMPEDANCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR DE 100 KVA SE

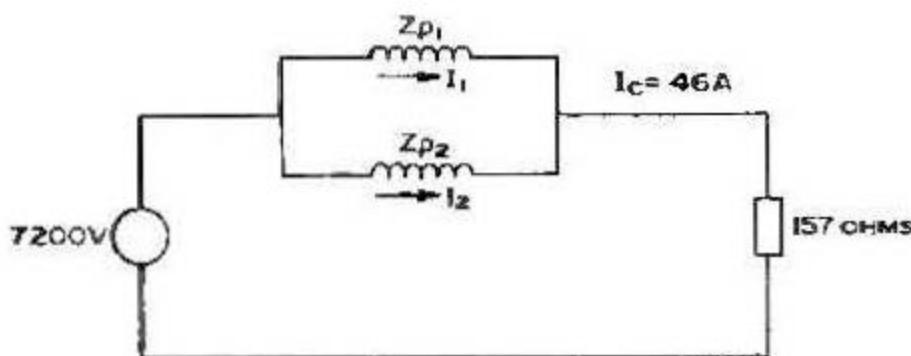
CALCULA EN FORMA ANÁLOGA COMO:

$$Z_p^2 = E_p^2 / \text{KVA} \quad 2 = 7200^2 / 100,000 = 518 \text{ OHMS}$$

LA IMPEDANCIA INTERNA REFERIDA AL LADO PRIMARIO ES ENTONCES:

$$Z_p2 = 0.04 \times 518 = 20.7 \text{ OHMS}$$

EL CIRCUITO CORRESPONDIENTE A ESTAS CONDICIONES ES EL SIGUIENTE:



LAS CORRIENTES SE DISTRIBUYEN COMO SIGUE:

$$I_1 = I_c \times Z_p2 / (Z_p1 + Z_p2)$$

$$I_1 = 46 \times 20.7 / (12.4 + 20.7) = 28.8A$$

$$I_2 = I_c - I_1 = 46.0 - 28.8 = 17.2A$$

SE OBSERVA QUE EL TRANSFORMADOR 2 ESTÁ SOBRECARGADO YA QUE LA CORRIENTE QUE CIRCULARÁ A TRAVÉS DEL MISMO ES — $I_2 = 17.2A$ QUE ES SUPERIOR A SU CORRIENTE NOMINAL — —

$I_{n2} = 13.9A.$, ESTO SE DEBE A QUE TIENE MENOR IMPEDANCIA QUE EL TRANSFORMADOR 1 Y LA CORRIENTE TIENDE A CIRCULAR POR LA RAMA DE MENOR IMPEDANCIA.

EJEMPLO 5.5.

DOS TRANSFORMADORES DE LAS SIGUIENTES CARACTERÍSTICAS SE CONECTAN EN PARALELO

TRANSFORMADOR 1

10 KVA, 4600/230 VOLTS

$Z_E = 0.16$ EN TÉRMINOS
DEL SECUNDARIO

TRANSFORMADOR 2

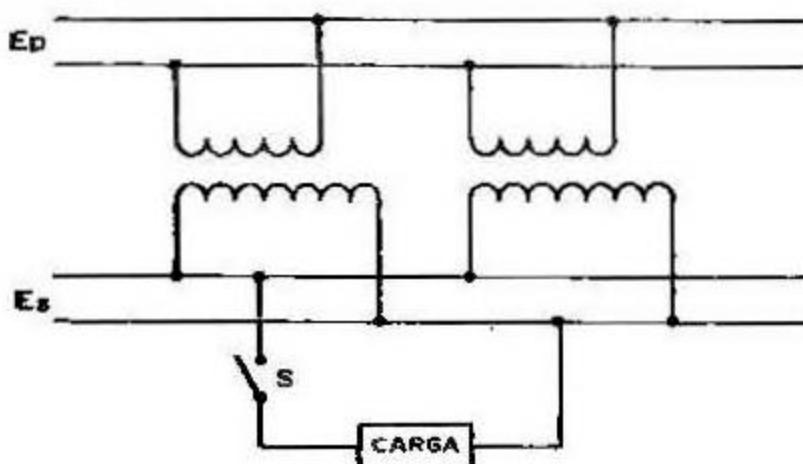
7.5 KVA 4485/230 VOLTS

$Z_E = 0.22$ EN TÉRMINOS
DEL SECUNDARIO

CALCULAR LA CORRIENTE DE CIRCULACIÓN EN EL SECUNDARIO, DEBIDO A QUE NO TIENEN LA MISMA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN CONSIDERANDO QUE OPERAN EN VACÍO.

SOLUCIÓN

EL DIAGRAMA CORRESPONDIENTE



COMO SE TIENE DIFERENTE VOLTAJE EN EL PRIMARIO, DA COMO RESULTADO UNA CORRIENTE CIRCULANTE, CUYO VALOR ES:

$$I_c = \frac{E_{PT1} - E_{PT2}}{Z_{EP_{T1}} + Z_{EP_{T2}}}$$

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN DE CADA TRANSFORMADOR ES:

$$A_1 = \frac{4600}{230} = 20$$

$$A_2 = \frac{4485}{230} = 19.5$$

LA IMPEDANCIA DE CADA TRANSFORMADOR, REFERIDA AL PRIMARIO VIENE DADA POR LA EXPRESIÓN

$$Z_{EP} = A^2 Z_{ES}$$

$$\therefore Z_{EP_1} = 20^2 \times 0.16 = 64 \text{ OHMS}$$

$$Z_{EP_2} = 19.5^2 \times 0.22 = 83.66 \text{ OHMS}$$

POR LO TANTO:

$$I_c = \frac{4600 - 4485}{64 + 83.65} = 0.782 \text{ AMPERES.}$$

CUANDO ESTÁ OPERANDO EN VACÍO, LA ÚNICA CORRIENTE QUE CIRCULA ES LA CIRCULANTE (PARA ESTE CASO).

260 Principales conexiones de los transformadores

EJEMPLO 5.6

DOS TRANSFORMADORES CON LAS CARACTERÍSTICAS SIGUIENTES:

TRANSFORMADOR 1

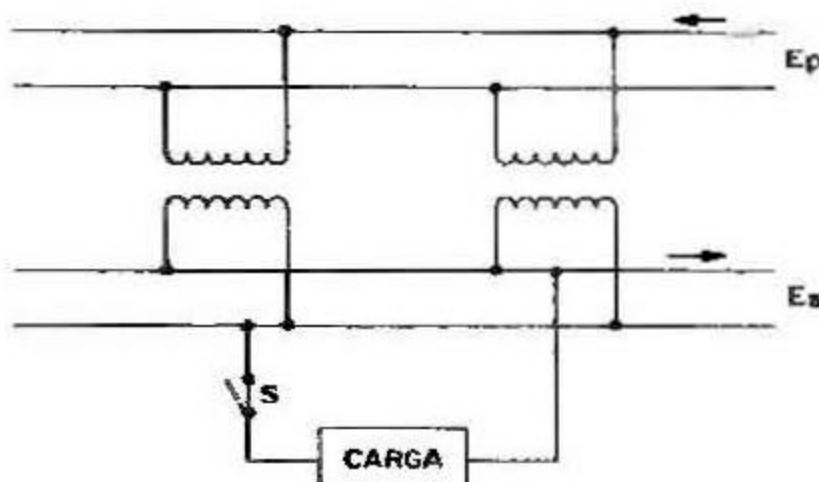
75 KVA, 2400/240 VOLTS
 $Z_E = 2.22$ EN TÉRMINOS
DEL SECUNDARIO

TRANSFORMADOR 2

50 KVA, 2400/240 VOLTS
 $Z_E = 4.15$ EN TÉRMINOS
DEL SECUNDARIO

OPERAN EN PARALELO Y SE DESEA CALCULAR LOS KVA QUE ENTREGA CADA TRANSFORMADOR CUANDO ALIMENTAN A UNA CARGA DE 125 KVA.

SOLUCION



LA CORRIENTE EN LA CARGA ES:

$$I_C = \frac{KVA_c}{KV} = \frac{125}{0.24} = 521 \text{ AMPERES}$$

LA CORRIENTE DE TRANSFORMACIÓN ES:

$$A = \frac{E_p}{E_s} = \frac{2400}{240} = 10$$

LA CORRIENTE DE CADA TRANSFORMADOR ES:

$$I_1 = \frac{A Z_1}{A Z_1 + A Z_2} = I_C \frac{10 \times 4.15 \times 521}{10 \times 2.22 + 10 \times 4.15} = 339A$$

$$I_2 = I_C - I_1 = 521 - 339.4 = (181.6A)$$

LOS KVA CON QUE CADA TRANSFORMADOR CONTRIBUYE SON:

$$KVA_1 = I_1 KV_1 = 339.4 \times 0.24 = 81.46$$

$$KVA_2 = I_2 KV_2 = 181.6 \times 0.24 = 43.57$$

EJEMPLO 5.7

SE DAN LOS SIGUIENTES DATOS PARA DOS TRANSFORMADORES-MONOFÁSICOS DE 11000/2300 VOLTS, 60 C.P.S.

<u>TRANSFORMADOR</u>	<u>CAPACIDAD</u>	<u>Vcc</u>	<u>Icc</u>	<u>Pcc</u>
1	100 KVA	265 VOLTS	9.1 AMP.	1000 WATTS
2	500 KVA	345 VOLTS	45.5 "	3370 WATTS

262 Principales conexiones de los transformadores

- A) CUÁL ES LA MÁXIMA CARGA EN KVA QUE PUEDEN SUMINISTRAR EL BANCO DE TRANSFORMADORES SIN CAUSAR CAÍDAS DE VOLTAJE EN EL SECUNDARIO MAYORES DE 50 -- VOLTS.
- B) A ESTA CARGA TOTAL, CUÁNTOS KVA ENTREGARÁ CADA -- TRANSFORMADOR.

SOLUCION

- A) LA IMPEDANCIA DE CADA TRANSFORMADOR SE CALCULA CON LOS DATOS DE CORTO CIRCUITO.

$$Z_1 = \frac{V_{CC1}}{I_{CC1}} = \frac{265}{9.1} = 29.12 \text{ OHMS}$$

$$Z_2 = \frac{V_{CC2}}{I_{CC2}} = \frac{345}{45.5} = 7.58 \text{ OHMS}$$

LA IMPEDANCIA EQUIVALENTE EN PARALELO ES:

$$Z_E = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{29.12 \times 7.58}{29.12 + 7.58} = 6 \text{ OHMS}$$

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ES:

$$A = \frac{V_P}{V_S} = \frac{11000}{2300} = 4.78$$

LA IMPEDANCIA TOTAL REFERIDA AL SECUNDARIO ES:

$$Z_s = \frac{Z_E}{A^2} = \frac{6}{(4.78)^2} = 0.26 \text{ OHMS}$$

COMO LA MÁXIMA CAÍDA DE VOLTAJE PERMISIBLE ES DE 50 VOLTS, LA CORRIENTE QUE PROVOCARÁ DICHA CAÍDA ES:

$$I_c = \frac{V}{Z_s} = \frac{50}{0.26} = 192.5 \text{ AMPERES}$$

POR TANTO, LA CARGA MÁXIMA QUE SE PUEDE ALIMENTAR, SIN EXCEDERSE DE LOS 50 VOLTS DE CAÍDA ES:

$$P = VI \cos \theta = 2300 \times 192.50 \times 0.8 = 351 \text{ kW.}$$

LA CORRIENTE DE LA CARGA REFERIDA AL PRIMARIO ES:

$$I_{c_p} = \frac{I_{c_s}}{A} = \frac{192.5}{4.78} = 40.4 \text{ AMPERES}$$

EN ESTA FORMA, LA CORRIENTE CON QUE CADA TRANSFORMADOR CONTRIBUYE, ES:

$$I_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} I_c = \frac{7.58}{7.58+29.12} \times 40.4 = 8.1 \text{ AMP.}$$

$$\therefore \text{KVA}_1 = I_1 V_1 = 8.1 \times 11 = 91.3$$

$$I_2 = I_c - I_1 = 40.4 - 8.1 = 32.1 \text{ AMPERES}$$

264 Principales conexiones de los transformadores

$$\therefore \text{KVA}_2 = I_2 \text{KV}_2 = 32.1 \times 11 = 353.1$$

C A P I T U L O 6

PRUEBAS A TRANSFORMADORES

CAPITULO 6

PRUEBAS A TRANSFORMADORES

6.1. INTRODUCCION

LAS PRUEBAS SE HACEN EN LOS TRANSFORMADORES Y SUS ACCESORIOS POR DISTINTAS RAZONES, DURANTE SU FABRICACIÓN, PARA VERIFICAR LA CONDICIÓN DE SUS COMPONENTES, DURANTE LA ENTREGA, DURANTE SU OPERACIÓN COMO PARTE DEL MANTENIMIENTO, DESPUÉS DE SU REPARACIÓN, ETC.

ALGUNAS DE LAS PRUEBAS QUE SE HACEN EN LOS TRANSFORMADORES SE CONSIDERAN COMO BÁSICAS Y ALGUNAS OTRAS VARIAN DE ACUERDO A LA CONDICIÓN INDIVIDUAL DE LOS TRANSFORMADORES Y PUEDEN CAMBIAR DE ACUERDO AL TIPO DE TRANSFORMADOR, POR LO QUE EXISTEN DISTINTAS FORMAS DE CLASIFICACIÓN DE LAS PRUEBAS A TRANSFORMADORES, POR EJEMPLO ALGUNOS LAS CLASIFICAN EN PRUEBAS DE BAJA TENSIÓN Y PRUEBAS DE ALTA TENSIÓN. TAMBÍEN SE PUEDEN AGRUPAR COMO PRUEBAS PRELIMINARES, INTERMEDIAS Y DE VERIFICACIÓN (FINALES).

LAS PRUEBAS PRELIMINARES SE REALIZAN CUANDO UN TRANSFORMADOR SE HA PUESTO FUERA DE SERVICIO PARA MANTENIMIENTO PROGRAMADO O PARA REVISIÓN PROGRAMADA O BIEN HA TENIDO ALGUNA FALLA. LAS PRUEBAS SE REALIZAN ANTES DE "ABRIR" EL TRANSFORMADOR Y TIENEN EL PROPÓSITO GENERAL DE ENCONTRAR EL TIPO Y NATURALEZA DE LA FALLA. LAS LLAMADAS PRUEBAS PRELIMINARES INCLUYEN:

- 1) PRUEBA AL ACEITE DEL TRANSFORMADOR
- 2) MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE LOS DEVANADOS
- 3) MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA OHMICA DE LOS DEVANADOS
- 4) DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO

268 Pruebas a transformadores

LAS LLAMADAS PRUEBAS INTERMEDIAS, COMO SU NOMBRE LO INDICAN SE REALIZAN DURANTE EL TRANSCURSO DE UNA REPARACIÓN O BIEN EN LAS ETAPAS INTERMEDIAS DE LA FABRICACIÓN, CUANDO EL TRANSFORMADOR ESTÁ EN PROCESO DE ARMADO O BIEN DESARMADO (SEGÚN SEA EL CASO) Y EL TIPO DE PRUEBAS DEPENDE DEL PROPÓSITO DE LA REPARACIÓN O LA ETAPA DE FABRICACIÓN, POR LO GENERAL SE HACEN CUANDO LAS BOBINAS NO HAN SIDO MONTADAS O DESMONTADAS (SEGÚN SEA EL CASO) Y SON PRINCIPALMENTE LAS SIGUIENTES:

- 1) MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE TORNILLOS Y HERRAJES CONTRA EL NÚCLEO
- 2) PRUEBA DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE TORNILLOS Y HERRAJES POR VOLTAJE APLICADO
- 3) PRUEBA DE LAS BOQUILLAS POR MEDIO DE VOLTAJE APLICADO

CUANDO SE HAN DESMONTADO LAS BOBINAS DURANTE UN TRABAJO DE REPARACIÓN, ENTONCES LAS PRUEBAS SE INCREMENTAN.

LAS PRUEBAS FINALES SE HACEN SOBRE TRANSFORMADORES TERMINADOS DE FABRICACIÓN O ARMADOS TOTALMENTE DESPUÉS DE UNA REPARACIÓN E INCLUYEN LAS SIGUIENTES:

- 1) PRUEBA AL ACEITE DEL TRANSFORMADOR
- 2) MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO
- 3) PRUEBA DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN
- 4) DETERMINACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO DE FASE DE LOS GRUPOS DE BOBINAS
- 5) DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO
- 6) PRUEBA DEL AISLAMIENTO POR VOLTAJE APLICADO

- 7) PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN VACÍO Y EN CORTO CIRCUITO (DETERMINACIÓN DE IMPEDANCIA)
- 8) PRUEBA DEL AISLAMIENTO ENTRE ESPIRAS POR VOLTAJE INDUCIDO
- 9) MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE VACÍO Y LA CORRIENTE DE EXCITACIÓN

EL ORDEN DE LAS PRUEBAS NO ES NECESARIAMENTE EL MENCIONADO ANTERIORMENTE, Y DE HECHO EXISTEN NORMAS NACIONALES E INTERNACIONALES QUE RECOMIENDAN QUE PRUEBAS Y EN QUE ORDEN SE DEBEN REALIZAR, ASÍ COMO CUANDO SE DEBEN EFECTUAR.

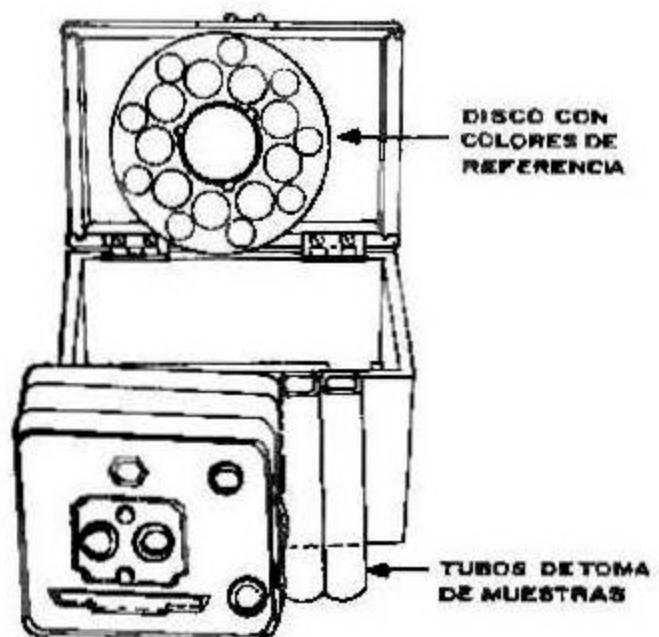
6.2. PRUEBAS AL ACEITE DEL TRANSFORMADOR

EL ACEITE DE LOS TRANSFORMADORES SE SOMETE POR LO GENERAL A PRUEBAS DE RIGIDEZ DIELECTRICA, PRUEBA DE PÉRDIDAS DIELECTRICAS Y EVENTUALMENTE - ANÁLISIS QUÍMICO.

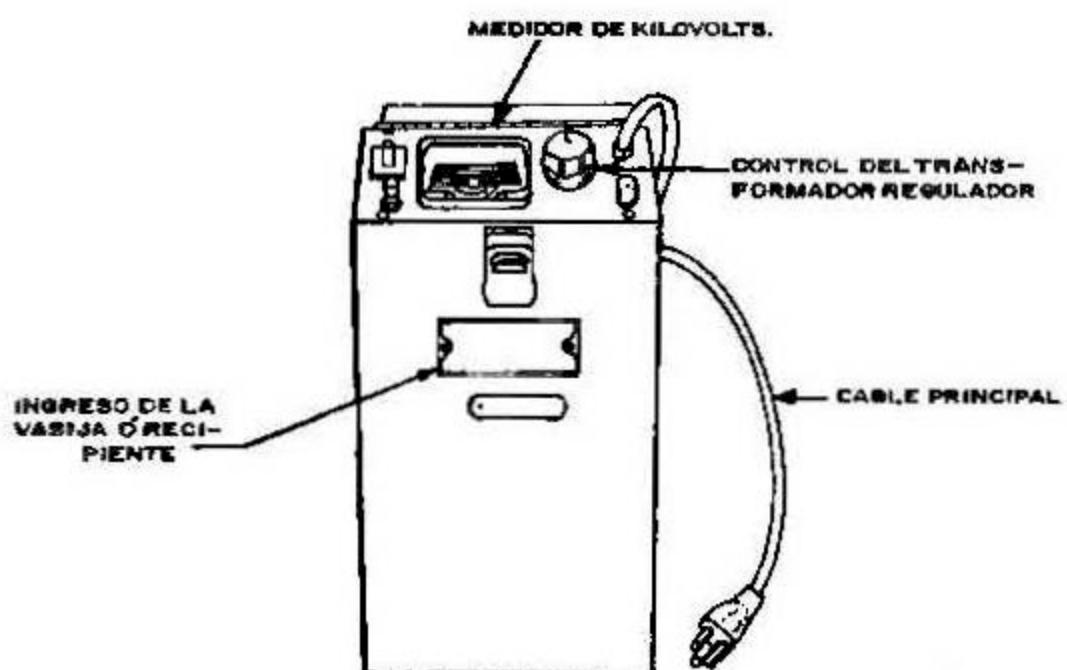
CUANDO SE TRATA DE PRUEBAS DE CAMPO, LA CONDICIÓN DEL ACEITE SE PUEDE DETERMINAR POR DOS PRUEBAS RELATIVAMENTE SIMPLES. UNA QUE COMPARA EL COLOR DE UNA MUESTRA DE ACEITE DEL TRANSFORMADOR BAJO PRUEBA, CON UN CONJUNTO O PANEL DE COLORES DE REFERENCIA QUE DAN UNA INDICACIÓN DE LA EMULSIFICACIÓN QUE PUEDE TENER LUGAR. EL RECIPIENTE EN QUE SE TOMA LA MUESTRA DEBE ENJUAGAR PRIMERO CON EL PROPIO ACEITE DE LA MUESTRA Y DEBE SER TOMADO DE LA PARTE INFERIOR DEL TRANSFORMADOR DE LA VÁLVULA DE DRENAJE.

CUANDO SE USA UN PROBADOR DE COLOR, LA MUESTRA DE ACEITE SE DEBE COLOCAR EN TUBO DE VIDRIO TRANSPARENTE QUE SE INTRODUCE EN UNA PARTE DEL PROBADOR DISEÑADA PARA TAL FIN. SE TIENE UN PEQUEÑO DISCO QUE GIRA Y QUE TIENE DISTINTOS COLORES DE REFERENCIA, CUANDO EL COLOR DEL DISCO ES SIMILAR AL DE LA MUESTRA, APARECE LA DESIGNACIÓN NUMÉRICA DEL COLOR DE LA MUESTRA DE ACEITE. DE HECHO ESTA PRUEBA SIRVE PARA VERIFICAR EL

EN EL RANGO DE COLOR
AMARILLO, NARANJA Y
ROJO INDICA QUE EL
TRANSFORMADOR PUEDE
TENER DAÑOS SEVEROS



PROBADOR DE COLOR DEL ACEITE



VISTA DE UN PROBADOR DE
DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL
ACEITE

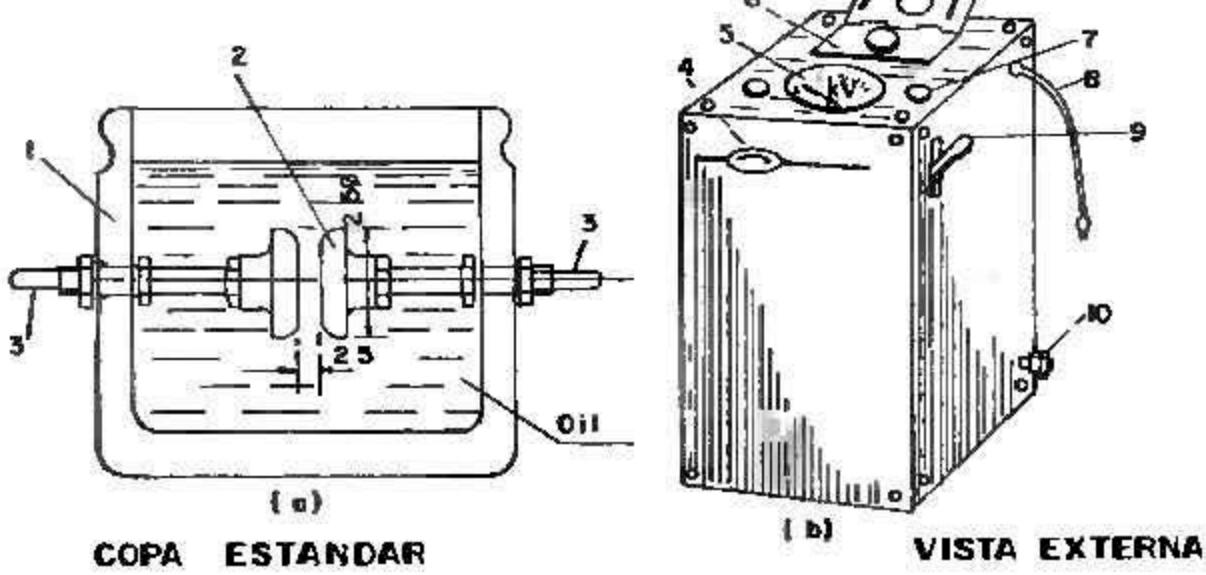
GRADO DE OXIDACIÓN DEL ACEITE Y DEBE MARCAR 0.5 PARA ACEITES NUEVOS Y 5 MÁXIMO PARA ACEITES USADOS

EN EL RANGO DE COLOR AMARILLO, NARANJA Y ROJO INDICAN QUE EL TRANSFORMADOR PUEDE TENER DAÑOS SEVEROS.

6.2.1. PRUEBA DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE

ESTA PRUEBA SE HACE EN UN PROBADOR ESPECIAL DENOMINADO "PROBADOR DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE". EN ESTE CASO, LA MUESTRA DE ACEITE TAMBIÉN SE TOMA DE LA PARTE INFERIOR DEL TRANSFORMADOR, POR MEDIO DE LA LLAMADA VÁLVULA DE DRENAJE Y SE VACIA EN UN RECIPIENTE DENOMINADO "COPA ESTANDAR" QUE PUEDE SER DE PORCELANA O DE VIDRIO Y QUE TIENE UNA CAPACIDAD DEL ORDEN DE $\frac{1}{2}$ LITRO. EN OCASIONES EL ACEITE SE TOMA EN UN RECIPIENTE DE VIDRIO Y DESPUÉS SE VACIA A LA COPA ESTANDAR QUE TIENE DOS ELECTRODOS QUE PUEDEN SER PLANOS O ESFÉRICOS Y CUYO DIÁMETRO Y SEPARACIÓN ESTÁ NORMALIZADO DE ACUERDO AL TIPO DE PRUEBA. EL VOLTaje APLICA DO ENTRE ELECTRODOS SE HACE POR MEDIO DE UN TRANSFORMADOR REGULADOR INTEGRADO AL PROPIO APARATO PROBADOR. DESPUÉS DE LLENADA LA COPA ESTANDAR SE DEBE ESPERAR ALREDEDOR DE 20 MINUTOS PARA PERMITIR QUE SE ELIMINEN LAS BURBUJAS DE AIRE DEL ACEITE ANTES DE APLICAR EL VOLTaje; EL VOLTaje SE APLICA ENERGIZANDO EL APARATO POR MEDIO DE UN SWITCH QUE PREVIAMENTE SE HA CONECTADO A UN CONTACTO O FUENTE DE ALIMENTACIÓN COMÚN Y CORRIENTE. EL VOLTaje SE ELEVA GRADUALMENTE POR MEDIO DE LA PERILLA O MANIJA DEL REGULADOR DE VOLTaje, LA TENSIÓN o VOLTaje SE RUPTURA SE MIDE POR MEDIO DE UN VOLTMETRO GRADUADO EN KILOVOLTS.

EXISTEN DE ACUERDO DISTINTOS CRITERIOS DE PRUEBA, PERO EN GENERAL SE PUEDE AFIRMAR QUE SE PUEDEN APLICAR SEIS RUPTURAS DIELECTRICAS CON INTERVALOS DE 10 MINUTOS, LA PRIMERO NO SE TOMA EN CUENTA, Y EL PROMEDIO DE LAS OTRAS CINCO SE TOMA COMO LA TENSIÓN DE RUPTURA o RIGIDEZ DIELECTRICA. NORMALMENTE LA RIGIDEZ DIELECTRICA EN LOS ACEITES AISLANTES SE DEBE COMPORTAR EN LA FORMA SIGUIENTE:

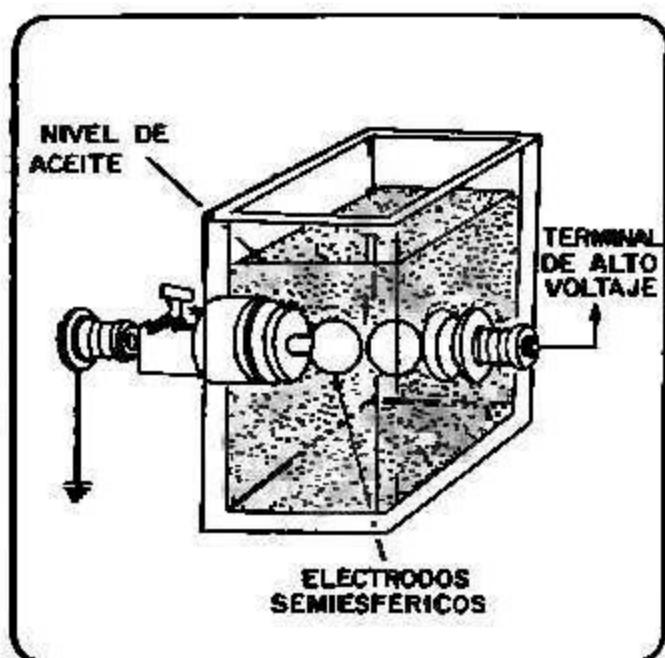


PROBADOR DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE

- 1—VASIJA O RECIPIENTE
- 2—ELECTRODOS
- 3—CONDUCTOR
- 4—CONTROL DEL TRANSFORMADOR REGULADOR
- 5—MEDIDOR DE KILOVOLTIS
- 6.—CLAVIJA
- 7.—LAMPARA DE CONTROL
- 8.—CABLE PRINCIPAL
- 9.—PALANCA DEL INTERRUPTOR
- 10—TERMINAL DE TIERRA

VALORES MINIMOS

CON ELECTRODOS SEMI –
ESFERICOS Y SEPARACION
DE 1.016mm.
20KV PARA ACEITES USADOS
30KV PARA ACEITES NUEVOS



VALORES MINIMOS DE RIGIDEZ DIELECTRICA

25 KV PARA ACEITES USADOS
35 KV PARA ACEITES NUEVOS
CON ELECTRODOS DE 25.4 mm
DE DIAMETRO
Y 2.54 DE SEPARACION

COPA ESTANDAR PARA PRUEBA DE RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE

274 Pruebas a transformadores

ACEITES DEGRADADOS Y CONTAMINADOS	DE 10 A 28 KV
ACEITES CARBONIZADOS NO DEGRADADOS	DE 28 A 33 KV
ACEITE NUEVO SIN DESGASIFICAR	DE 33 A 40 KV
ACEITE NUEVO DESGASIFICADO	DE 40 A 50 KV
ACEITE REGENERADO	DE 50 A 60 KV

LOS VALORES ANTERIORES SE REFIEREN A NORMAS DE PRUEBAS DE ACUERDO A LOS ELECTRODOS. SI SE USAN ELECTRODOS DE 25.4 MM DE DIÁMETRO CON UNA SEPARACIÓN DE 2.54 MM LA TENSIÓN DE RUPTURA DEBE SER CUANDO MENOS 25 KV EN ACEITES USADOS Y 35 KV EN ACEITES NUEVOS

CUANDO SE USAN ELECTRODOS DE DISCOS SEMIESFÉRICOS CON SEPARACIÓN DE 1.016 MM LA TENSIÓN DE RUPTURA MÍNIMA EN ACEITES USADOS ES DE 20 KV Y DE 30 KV MÍNIMO EN ACEITES NUEVOS

6.2.2. PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA DEL ACEITE

ESTA PRUEBA PERMITE OBTENER INFORMACIÓN RELACIONADA CON LA CONTAMINACIÓN O DETERIORO DEL ACEITE. EL CONCEPTO DE FACTOR DE POTENCIA ES EL MISMO EMPLEADO PARA LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN GENERAL, ES DECIR ES EL COSENO DEL ÁNGULO FORMADO ENTRE LA POTENCIA APARENTE EXPRESADA EN kVA Y LA POTENCIA REAL EXPRESADA EN kW. ESTO DA LA MEDICIÓN DE LA CORRIENTE DE FUGA A TRAVÉS DEL ACEITE, LA CUAL A SU VEZ SE INTERPRETA COMO UNA MEDICIÓN DE CONTAMINACIÓN O DETERIORO DEL ACEITE.

NORMALMENTE UN ACEITE NUEVO, SECO Y DESGASIFICADO ALCANZA VALORES TAN BAJOS COMO 0.05% REFERIDOS A 20°C, YA QUE COMO SE SABE UN VALOR ALTO DE FACTOR DE POTENCIA INDICA DETERIORO O CONTAMINACIÓN CON HUMEDAD, CARBÓN MATERIAS CONDUCTORAS, BARNIZ O COMPUESTOS ASFÁLTICOS. TAMBÍEN

PUEDE INDICAR DETERIORO DE COMPUESTOS AISLANTES.

PARA LOS FINES DE DECISIÓN SOBRE CONDICIONES DE UN ACEITE, UN VALOR DE FACTOR DE POTENCIA DE 0.5% ES CONSIDERADO SATISFACTORIO PARA OPERACIÓN. CUANDO EL FACTOR DE POTENCIA SE ENCUENTRA ENTRE 0.6 Y 2%, EL ACEITE SE DEBE CONSIDERAR COMO RIESGOSO, POR LO QUE SE RECOMIENDA QUE SEA REACONDICIONADO O REEMPLAZADO.

EN FORMA GENERAL SE PUEDE DECIR QUE LOS VALORES MÁXIMOS ACEPTABLES SON:

0.5 PORCIENTO DE FACTOR DE POTENCIA REFERIDOS A 20°C PARA TRANSFORMADORES NUEVOS

1 (UNO) PORCIENTO DE FACTOR DE POTENCIA REFERIDOS A 20°C PARA TRANSFORMADORES USADOS

6.2.3. ANÁLISIS QUÍMICO DEL ACEITE

ESTE ANÁLISIS TIENE COMO PROPÓSITO OBSERVAR SI LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL ACEITE DE UN TRANSFORMADOR CUMPLE CON LAS ESPECIFICACIONES DE NORMA. EL ANÁLISIS ES ESENCIAL DEBIDO A QUE CUALQUIER CAMBIO EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE PUEDE DEBILITAR LA CONDICIÓN DEL TRANSFORMADOR. POR EJEMPLO, UN INCREMENTO EN EL NÚMERO ACIDO DEL ACEITE, DENOMINADO TAMBién ACIDEZ O NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN DEL ACEITE O UN DECREMTO EN SU PUNTO DE FLAMEO INDICA QUE EL ACEITE SE HA DESCOMPUESTO COMO RESULTADO DE UN SOBRECALENTAMIENTO LOCAL EN EL TRANSFORMADOR.

CUANDO SE TRATA DE REPARACIÓN DE TRANSFORMADORES, EL ANÁLISIS QUÍMICO DEL ACEITE PUEDE SER HECHO EN FORMA BREVE, ES DECIR NO COMO CUANDO SE TRATA DE GRANDES VOLÚMENES PARA LLENADO DE TRANSFORMADORES NUEVOS. ESTE ANÁLISIS BREVE DESDE LUEGO INCLUYEN LA DETERMINACIÓN DE LA ACIDEZ, PUNTO DE ESCURRIMIENTO, CONTENIDO DE AGUA, CONTENIDO DE PARTÍCULAS DE CARBÓN, IMPUREZAS MECÁNICAS Y TRANSPARENCIA. LOS CONTENIDOS ADMISI-

276 Pruebas a transformadores

BLES DE ALGUNOS DE ESTOS ELEMENTOS SE DAN EN LAS NORMAS CORRESPONDIENTES.

LA ACIDEZ INDICA CUANTOS MILIGRAMOS DE HIDROXIDO DE POTASIO (KOH) SE REQUIEREN PARA NEUTRALIZAR LOS ÁCIDOS CONTENIDOS EN UN GRAMO DE ACEITE. LA TEMPERATURA DEL PUNTO DE ESCURRIMIENTO PARA UN ACEITE NUEVO Y SECO NO DEBE SER INFERIOR A 135°C Y PUEDE PERMITIRSE QUE BAJE DURANTE LA OPERACIÓN NO MÁS DE 5°C. ADICIONALMENTE SE DEBEN HACER PRUEBAS AL ACEITE DE TRANSFORMADORES DE VISCOSIDAD, ESTABILIDAD, DENSIDAD, PUNTO DE CONGELACIÓN, ETC.

6.2.4. REHABILITACIÓN DE ACEITES

LAS PRUEBAS A LOS ACEITES DE LOS TRANSFORMADORES TIENEN COMO PROPÓSITO DETERMINAR SU ESTADO PARA SU UTILIZACIÓN EN TRANSFORMADORES NUEVOS O CUANDO SE HAN REPARADO DURANTE LAS ETAPAS DE MANTENIMIENTO O FALLAS QUE PUEDAN TENER.

CUANDO LAS CARACTERÍSTICAS DEL ACEITE NO CUMPLEN CON LAS ESPECIFICACIONES DE NORMAS, ENTONCES ES NECESARIO QUE SE SOMETAN A PROCESOS DE REHABILITACIÓN, PARA TRATAR DE OBTENER LAS CARACTERÍSTICAS DESEADAS.

6.2.4.1. LIMPIEZA DE MEZCLAS E IMPUREZAS MECÁNICAS EN LOS ACEITES

SEPARACIÓN POR CENTRIFUGADO

EXISTEN BÁSICAMENTE DOS MÉTODOS PARA REMOVER MEZCLAS E IMPUREZAS EN LOS ACEITES DE TRANSFORMADORES, ESTOS MÉTODOS SON: SEPARACIÓN POR CENTRIFUGADO Y POR FILTRADO

POR EL MÉTODO DE CENTRIFUGADO SE LIMPIA EL ACEITE DE AGUA E IMPUREZAS, AGITÁNDOLO A ALTA VELOCIDAD EN UN APARATO DENOMINADO CENTRIFUGADOR DE

ACEITE O PURIFICADOR. ESTE APARATO CONSISTE PRINCIPALMENTE DE UN TAMBOR PURIFICADOR O SEPARADOR (1) QUE EN SU INTERIOR TIENE UN CIERTO NÚMERO DE PLACAS EN FORMA DE CONOS CON PERFORACIONES. LAS PLACAS SE COLOCAN EN FORMA DE PAQUETES, UNA JUNTO A OTRA EN PARALELO SOBRE UN EJE COMÚN (LA SEPARACIÓN ES DEL ORDEN DE MILÍMETROS O FRACCIONES DE MILÍMETROS). EL PROPÓSITO DE LAS PLACAS ES SEPARAR EL ACEITE DE MANERA QUE SE INTENSIFIQUE LA PURIFICACIÓN.

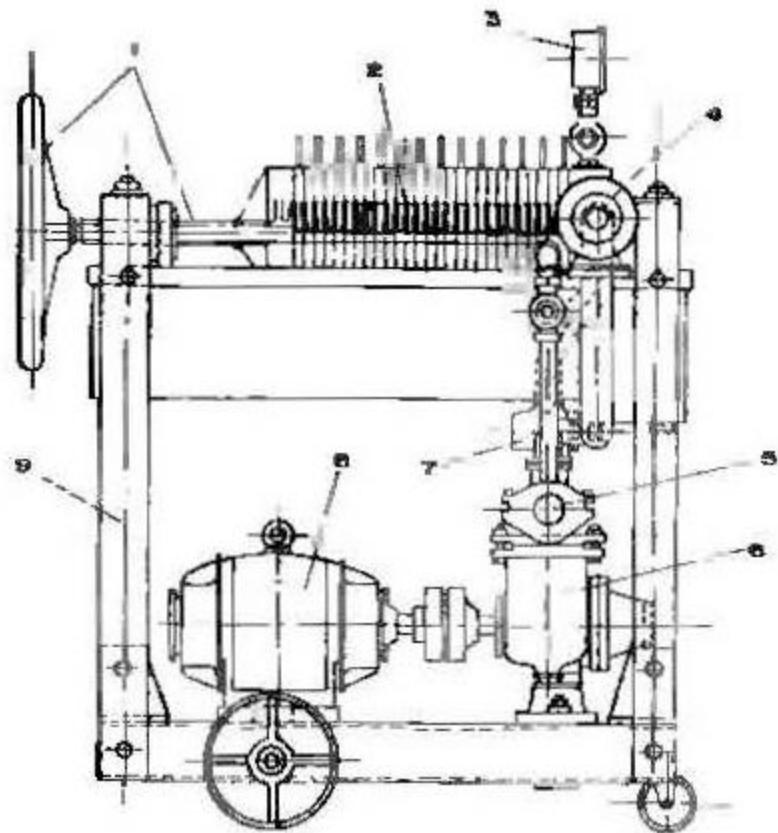
EL ACEITE ENTRA AL SEPARADOR A TRAVÉS DE UN INGRESO CENTRAL. EL ACEITE A SER PURIFICADO SE BOMBEA AL INTERIOR DEL SEPARADOR Y SE EXTRAЕ POR MEDIO DE DOS BOMBAS (2). LAS IMPUREZAS SE REMUEVEN DEL ACEITE EN FORMA INTENSIVA A UNA TEMPERATURA DE 50°C A 55°C, EL SEPARADOR DE ACEITE ESTÁ EQUIPADO CON UN CALENTADOR ELÉCTRICO (4). SE TIENE UN FILTRO MÉTALICO DE MALLA MUY FINA (5) QUE ESTÁ CONECTADO EN LA TUBERÍA DE ENTRADA DEL ACEITE Y SIRVE PARA CAPTURAR PARTÍCULAS Y PREVENIR SU ENTRADA AL APARATO. EL TAMBOR SEPARADOR ESTÁ ACCIONADO POR UN MOTOR ELÉCTRICO (3) POR MEDIO DE BANDAS O ENGRANES. POR EJEMPLO, SI EL TAMBOR SE ACCIONA A 6800 RPM, SE ENTREGAN DEL ORDEN DE 1500 LITROS POR HORA.

SI EL ACEITE CONTIENE DEMASIADAS IMPUREZAS EL PURIFICADOR DEL ACEITE SE REAJUSTA PARA SEPARAR EL AGUA EN FORMA PRELIMINAR, SE HACE ESTO REAJUSTANDO LAS PLACAS DEL TAMBOR SEPARADOR. SI EL CONTENIDO DE IMPUREZAS NO ES MUY ALTO, EL APARATO SE DEBE AJUSTAR NORMALMENTE, ES DECIR, PARA SEPARAR SIMULTÁNEAMENTE EL AGUA Y LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN.

FILTRADO

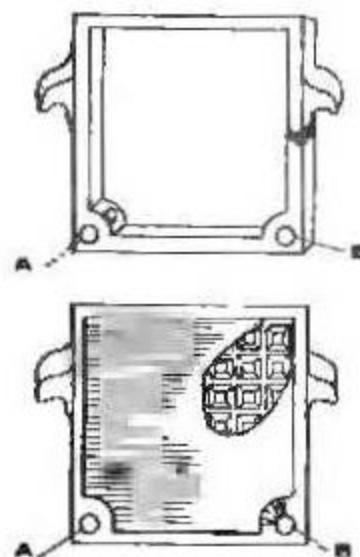
POR MEDIO DE ESTE MÉTODO, EL ACEITE SE LIMPIA FORZÁNDOLO A CIRCULAR A TRAVÉS DE UN MEDIO POROSO CON UN ELEVADO NÚMERO DE PEQUEÑAS PERFORACIONES EN LAS CUALES SE ATRAPAN EL AGUA EN SUSPENSIÓN Y LAS IMPUREZAS, - TAL MEDIO PUEDE SER CARTÓN PRENSADO O TELA.

EL APARATO PARA FILTRAR EL ACEITE SE LE CONOCE COMO "FILTRO - PRENSA"



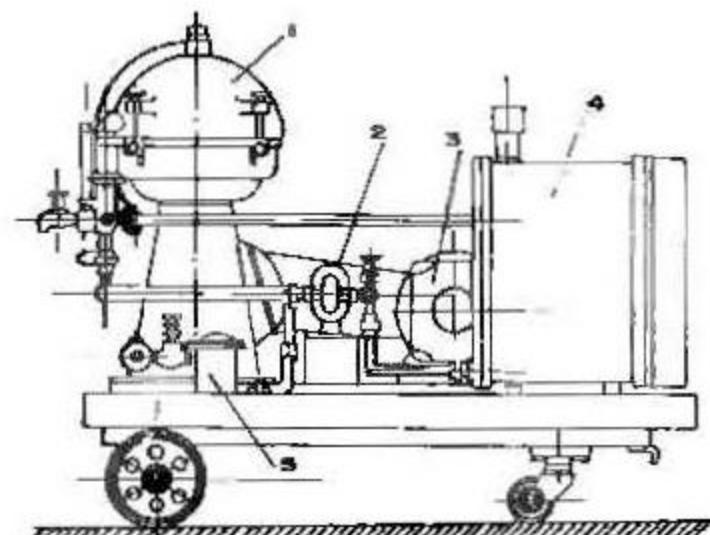
PRENSA FILTRO

- 1.- MANIVELA Y TORNILLO SIN FIN DE AJUSTE
- 2.- GRUPO DE PLACAS Y MATERIAL DE FILTRADO
- 3.- MEDIDOR DE PRESION
- 4.- SALIDA DE ACEITE
- 5.- ENTRADA DE ACEITE
- 6.- BOMBA
- 7.- FILTRO DE AIRE
- 8.- MOTOR ELECTRICO DE LA BOMBA
- 9.- MARCO O SOPORTE



COMPONENTES DEL FILTRO

- a) - MARCO
- b) - PLACA
- A - ENTRADA DE ACEITE SUCIO
- B - SALIDA DE ACEITE LIMPIO



VISTA EXTERNA DE UN PURIFICADOR CENTRIFUGO DE ACEITE

- 1 - TAMBOR SEPARADOR
- 2 - BOMBAS
- 3 - MOTOR DE ACCIONAMIENTO DE LA BOMBA
- 4 - FILTRO
- 5 - FILTRO DE MALLA METALICA

Y CONSISTE DE UN CONJUNTO DE MARCOS METÁLICOS Y PLACAS CON PAPEL FILTRO COLOCADO ENTRE ELLOS, LOS MARCOS Y PLACAS SE COLOCAN EN FORMA ALTERNADA, AL GRUPO TOTAL DE PLACAS Y MARCOS SE LE SUJETA POR MEDIO DE DOS PLACAS Y UN TORNILLO SIN-FIN DE AJUSTE.

LOS MARCOS, PLACAS Y FILTROS DE PAPEL TIENEN CADA UNO DOS AGUJEROS EN LAS ESQUINAS INFERIORES, UNO SIRVE PARA EL INGRESO DEL ACEITE QUE VA A SER LIMPIADO Y EL OTRO PARA LA SALIDA DEL ACEITE LIMPIO. EL ACEITE A LIMPIAR SE BOMBEA AL "FILTRO PRENSA" A UNA PRESIÓN DE $4 \text{ a } 6 \times 10^5 \text{ Pa}$ Y UN INCREMENTO EN LA PRESIÓN DURANTE EL PROCESO DE FILTRADO, INDICA QUE LOS FILTROS (PAPEL FILTRO) DEBEN SER REEMPLAZADOS.

6.3 PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

LA PRUEBA DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN TRANSFORMADORES SIRVE NO SOLO PARA VERIFICAR LA CALIDAD DEL AISLAMIENTO EN TRANSFORMADORES, TAMBIÉN PERMITE VERIFICAR EL GRADO DE HUMEDAD Y EN OCASIONES DEFECTOS SEVEROS EN EL AISLAMIENTO.

LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO SE MIDE POR MEDIO DE UN APARATO CONOCIDO COMO "MEGGER". EL MEGGER CONSISTE DE UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN EN CORRIENTE DIRECTA Y UN SISTEMA DE MEDICIÓN. LA FUENTE ES UN PEQUEÑO GENERADOR QUE SE PUEDE ACCIONAR EN FORMA MANUAL O ELÉCTRICAMENTE. EL VOLTAJE EN TERMINALES DE UN MEGGER VARIA DE ACUERDO AL FABRICANTE Y A SI SE TRATA DE ACCIONAMIENTO MANUAL O ELÉCTRICO, PERO EN GENERAL SE PUEDEN ENCONTRAR EN FORMA COMERCIAL MEGGER DE 250 VOLTS, 1000 VOLTS Y 2500 VOLTS. LA ESCALA DEL INSTRUMENTO ESTÁ GRADUADA PARA LEER RESISTENCIAS DE AISLAMIENTO EN EL RANGO DE 0 A 10,000 MEGOHMS.

LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DE UN TRAFORMADOR SE MIDE ENTRE LOS DEVANADOS CONECTADOS TODOS ENTRE SI, CONTRA EL TANQUE CONECTADO A TIERRA Y ENTRE CADA DEVANADO Y EL TANQUE, CON EL RESTO DE LOS DEVANADOS CONECTADOS A TIERRA.

280 Pruebas a transformadores

PARA UN TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS SE DEBEN TOMAR LAS SIGUIENTES - MEDIDAS:

- ENTRE EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE Y EL TANQUE CON EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE CONECTADO A TIERRA
- ENTRE LOS DEVANADOS DE ALTO VOLTAJE Y BAJO VOLTAJE CONECTADOS ENTRE SI, CONTRA EL TANQUE

ESTAS MEDICIONES SE PUEDEN EXPRESAR EN FORMA SINTETIZADA COMO:

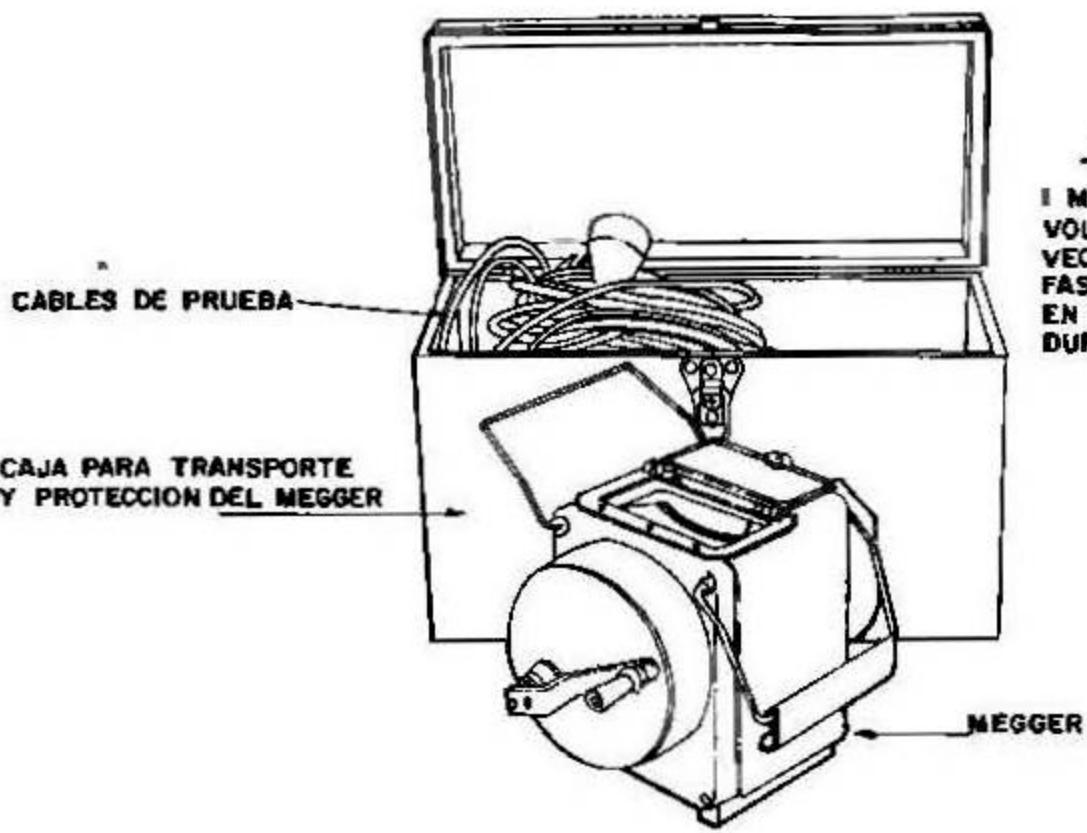
ALTO VOLTAJE Vs. TANQUE + BAJO VOLTAJE A TIERRA

BAJO VOLTAJE Vs. TANQUE + ALTO VOLTAJE A TIERRA

ALTO VOLTAJE + BAJO VOLTAJE Vs. TANQUE A TIERRA

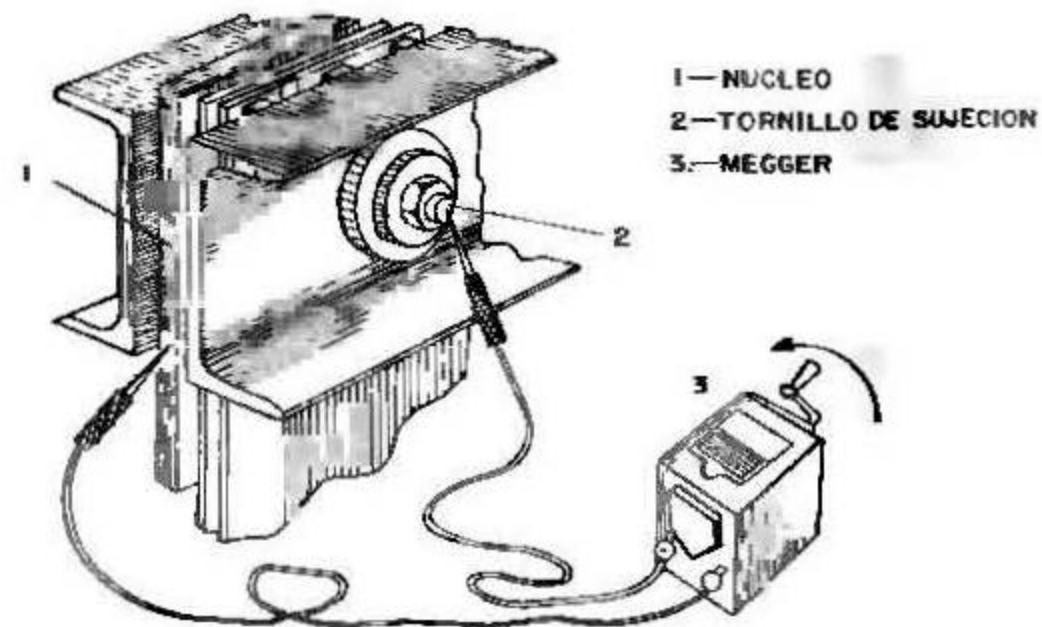
CUANDO SE TRATA DE TRANSFORMADORES CON TRES DEVANADOS LAS MEDICIONES - QUE SE DEBEN EFECTUAR SON LAS SIGUIENTES:

- ALTO VOLTAJE (PRIMARIO) Vs. TANQUE CON LOS DEVANADOS DE BAJO VOLTAJE (SECUNDARIO) Y MEDIO VOLTAJE (TERCIARIO) A TIERRA
- MEDIO VOLTAJE (TERCIARIO) Vs. TANQUE CON LOS DEVANADOS DE ALTO VOLTAJE Y BAJO VOLTAJE A TIERRA
- BAJO VOLTAJE (SECUNDARIO) Vs. TANQUE, CON LOS DEVANADOS DE ALTO VOLTAJE Y MEDIO VOLTAJE A TIERRA
- ALTO VOLTAJE Y MEDIO VOLTAJE JUNTOS Vs. TANQUE, CON EL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE A TIERRA
- ALTO VOLTAJE + MEDIO VOLTAJE + BAJO VOLTAJE Vs. TANQUE

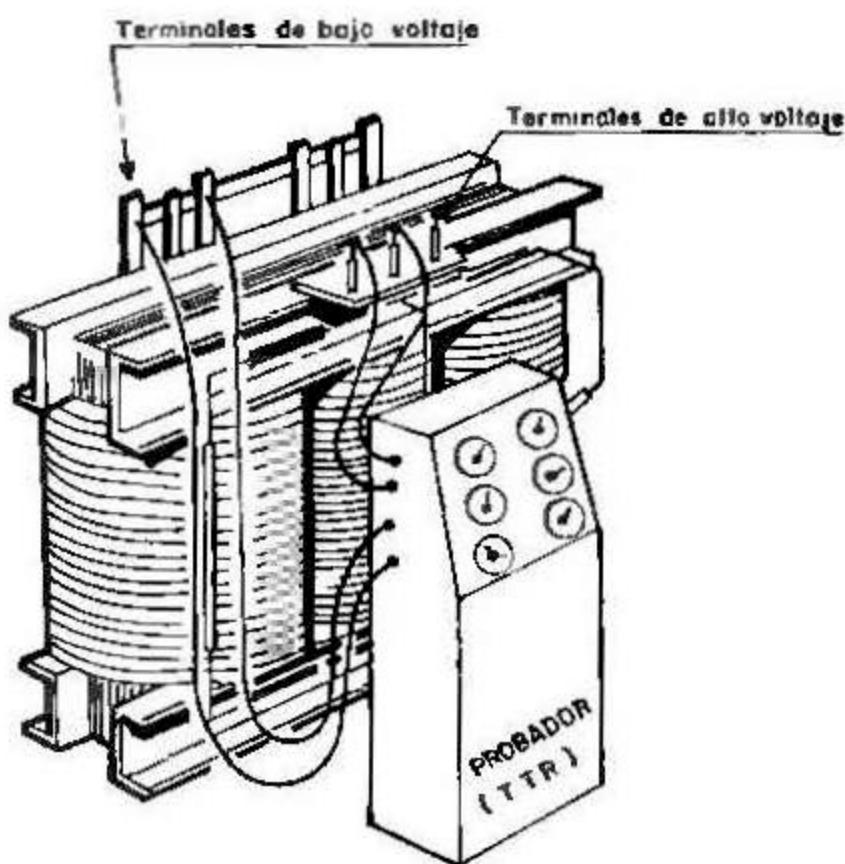


LECTURA MINIMA
1 MEGOHM POR CADA 1000 VOLTS DE PRUEBA O 25 VECES EL VOLTAJE DE FASE A FASE EXPRESADO EN KV- APLICADOS DURANTE 1 MINUTO

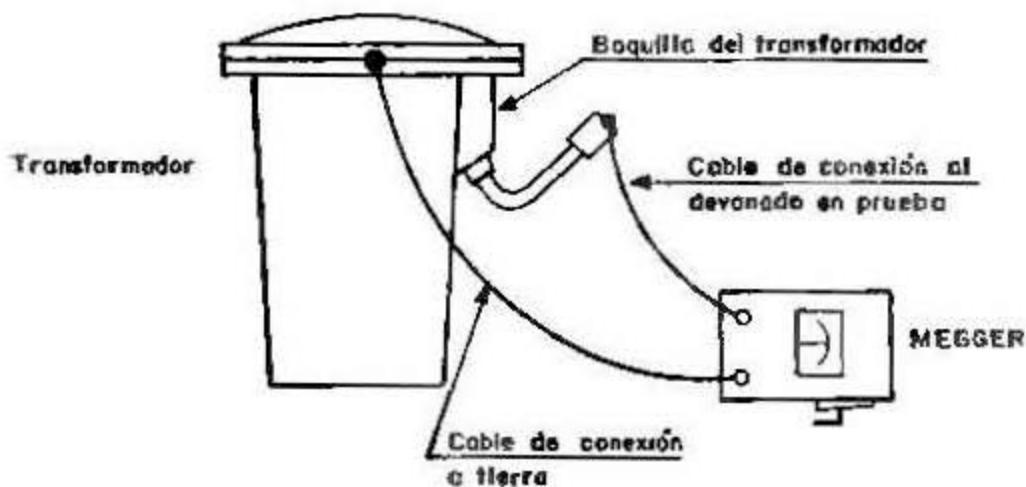
VISTA DE UN MEGGER CON ACCIONAMIENTO MANUAL
PARA PROBAR RESISTENCIA DE AISLAMIENTO



MEDICION DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO ENTRE
HERRAJE Y NUCLEO DE UN TRANSFORMADOR



Prueba de relación de transformación a un transformador
 Promedio del TTR (Transformer—Test—Turn—Ratio)
 Los corchetes del instrumento corresponden a distintos ajustes



Prueba de resistencia de aislamiento del devanado de un transformador por medio de un megger

PARA DETERMINAR EL VALOR MÍNIMO A ACEPTAR DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO CONSISTE EN MULTIPLICAR LOS kV DE FASE A FASE POR 25 PARA SABER EL VALOR MÍNIMO DE 20°C O BIEN SE PUEDE ACEPTAR 1000 MEGOHMS A 20°C PARA VOLTAJES SUPERIORES A 69 kV APLICADOS DURANTE 1 MINUTO (60 SEGUNDOS) LA OTRA REGLA ESTABLECE QUE EL VALOR MÍNIMO DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO DEBE SER DE 1 MEGOHM POR CADA 1000 VOLTS DE PRUEBA.

6.4. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS

ESTA PRUEBA SE HACE PARA MEDIR LA RESISTENCIA DE CADA DEVANADO Y DE ESTA MANERA VERIFICAR EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE DONDE (R_{12}) ASÍ COMO LA COMPONENTE DE CAÍDA DE VOLTAJE POR RESISTENCIA Y LA ELEVACIÓN DE TEMPERATURA BAJO CARGA. OTRO ASPECTO QUE REVELA A ESTA PRUEBA, ES LA VERIFICACIÓN DE QUE LAS CONEXIONES INTERNAS ESTÁN HECHAS CORRECTAMENTE.

PARA EFECTUAR ESTAS MEDICIONES, SE HACE USO DE UNA FUENTE DE CORRIENTE DIRECTA CON VÓLTMETROS Y AMPÉRMETROS DE RANGOS APROPIADOS. DURANTE LA PRUEBA SE DEBE TOMAR LA MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA POR MEDIO DE TERMÓMETRO O TERMOPARES. COMO MEDIDA DE PRECAUCIÓN PARA EVITAR RIESGOS POR VOLTAJES INDUCIDOS, SE DEBE PONER EN CORTO CIRCUITO EL DEVANADO AL QUE NO SE EFECTUA LA MEDICIÓN.

LA RESISTENCIA DE CADA DEVANADO SE OBTIENE POR SIMPLE APLICACIÓN DE LA LEY DE OHM $R = E/I$, ES DECIR, DIVIDIENDO EL VOLTAJE APLICADO ENTRE LA CORRIENTE QUE CIRCULA.

34 Pruebas a transformadores



LAS MEDICIONES OBTENIDAS PARA TODAS LAS FASES Y PASOS DE CONTROL ADOP-
TADOS NO DEBEN DIFERIR ENTRE SI MAS DEL 2%. SE DEBEN TOMAR EN CONSIDE-
RACIÓN LAS CORRECCIONES POR TEMPERATURA.

6.5. PRUEBA DE POLARIDAD

ESTAS PRUEBAS SE REALIZAN PARA DETERMINAR (CUANDO ES NECESARIO) COMO SE ENCUENTRAN DEVANADAS UNAS CON RESPECTO A OTRAS LAS BOBINAS DE UN -- TRANSFORMADOR DE MODO QUE LA "DIRECCIÓN" DEL VOLTAJE SECUNDARIO SE PUEDE CONOCER CUANDO SE CONECTEN EN PARALELO LOS TRANSFORMADORES O BIEN FORMANDO BANCOS POLIFÁSICOS. EN GENERAL LAS TERMINALES SE MARCAN DEL LADO DE ALTO VOLTAJE COMO H_1 , H_2 , H_3 LEYENDO DEL LADO DERECHO HACIA -

EL IZQUIERDO. EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE CON LAS LETRAS X_1 , X_2 , ETC., LEYENDO DEL LADO IZQUIERDO HACIA EL LADO DERECHO PARA POLARIDAD SUS-TRACTIVA Y DE DERECHA A IZQUIERDA PARA POLARIDAD ADITIVA.

PARA DETERMINAR CUANDO UN TRANSFORMADOR POSEE POLARIDAD ADITIVA O SUS-TRACTIVA, SE CONECTA AL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE UNA FUENTE DE CORRIEN-TE ALTERNA E_g Y ENTRE LOS DEVANADOS ADYACENTES DE ALTO VOLTAJE Y BAJO VOLTAJE SE CONECTA UN PUENTE P . SE CONECTA UN VOLTMETRO E_x ENTRE LAS - OTRAS DOS TERMINALES ADYACENTES Y OTRO VOLTMETRO E_p SE CONECTA A TRA-VÉS DEL DEVANADO DE ALTA TENSIÓN.

SI LA LECTURA DE E_x DA UN VALOR SUPERIOR A LA DEL VOLTMETRO E_p SE DICE QUE LA POLARIDAD ES ADITIVA, LO QUE SIGNIFICA QUE LAS TERMINALES H_1 Y X_1 SE ENCUENTRAN OPUESTAS DIAGONALMENTE.

POR OTRA PARTE, SI LA LECTURA E_x DA UN VALOR INFERIOR A E_p , SE DICE - QUE LA POLARIDAD ES SUSTRACTIVA Y LAS TERMINALES H_1 Y X_1 ESTÁN ADYACEN-TES.

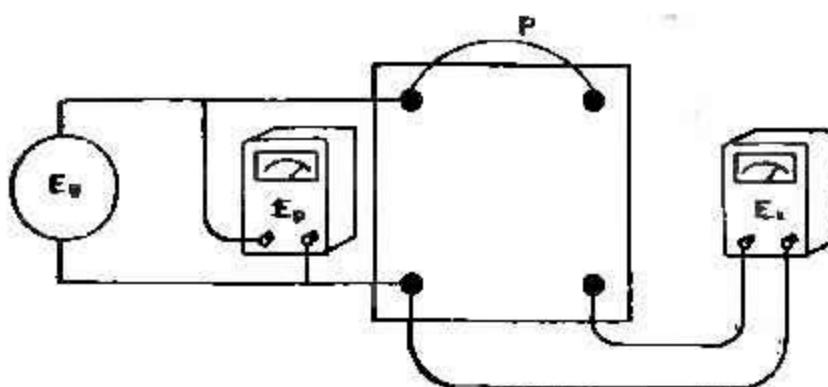
EN ESTA PRUEBA DE POLARIDAD, EL PUENTE P CONECTA EFECTIVAMENTE AL VOL-TAJE SECUNDARIO E_s EN SERIE CON EL VOLTAJE PRIMARIO E_p , EN CONSECUEN-CIA E_s O SE SUMA O SE RESTA A E_p . EN OTRAS PALABRAS:

$$E_x = E_p + E_s \text{ PARA POLARIDAD ADITIVA}$$

$$E_x = E_p - E_s \text{ PARA POLARIDAD SUSTRACTIVA}$$

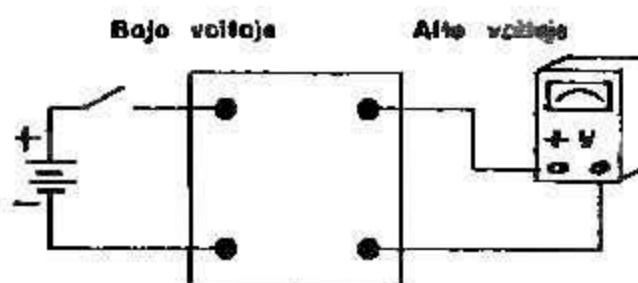
OTRA FORMA DE DETERMINAR LA POLARIDAD DE UN TRANSFORMADOR ES POR MEDIO DEL USO DE UNA FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA Y POR MEDIO DEL LLAMADO - "GOLPE INDUCTIVO". SE CONECTA UNA BATERÍA O FUENTE DE CORRIENTE CONTI-NUA EN SERIE CON UN SWITCH ABIERTO AL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE DEL -- TRANSFORMADOR LA TERMINAL CONECTADA AL LADO POSITIVO DE LA FUENTE SE

Si E_x es mayor que E_p la polaridad es aditiva



Si E_x es menor que E_p la polaridad es sustractiva

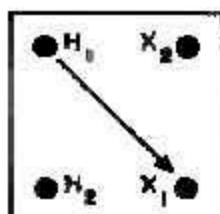
Determinación de la polaridad de un transformador usando una fuente de C.A



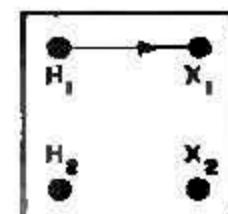
Si la aguja del voltímetro deflexiona hacia la escala al cerrar el switch, las marcas de polaridad de los devanados coinciden

Determinación de la polaridad de un transformador monofásico usando una fuente de Corriente Continua

Polaridad aditiva



Polaridad sustractiva



Indicación de las marcas de polaridad en un transformador monofásico

MARCA CON X_1 . UN VOLTMETRO DE CORRIENTE CONTINUA SE CONECTA A TRAVÉS - DE LAS TERMINALES DE ALTO VOLTAJE, CUANDO EL SWITCH SE CIERRA SE INDUCE MOMENTANEAMENTE UN VOLTAJE EN EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE. SI EN ESTE MOMENTO, LA AGUJA DEL VOLTMETRO SE MUEVE AL INTERIOR DE LA ESCALA, LA TERMINAL DEL TRANSFORMADOR CONECTADA AL LADO POSITIVO DEL VOLTMETRO SE MARCA CON H_1 Y LA OTRA CON H_2 .

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

LA DETERMINACIÓN DE LA POLARIDAD EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS ES DE - ALGUNA MANERA MAS COMPLICADA QUE EN LOS TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS. - EN ADICIÓN A LA DIRECCIÓN DE LOS DEVANADOS, PUEDE EXISTIR UN DESPLAZAMIENTO ANGULAR ENTRE LOS VOLTAJES SECUNDARIOS, DEPENDIENDO DE COMO LOS DEVANADOS DE ALTO VOLTAJE ESTÉN CONECTADOS A LA ALIMENTACIÓN TRIFÁSICA PRIMARIA.

PARA SIMPLIFICAR LA CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS, LA TERMINAL H_1 SE LLEVA FUERA O AL EXTERIOR DEL LADO DERECHO VIENDO AL LADO DE ALTO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR. LA TERMINAL X_1 SE COLOCA HACIA EL LADO IZQUIERDO VIENDO EL LADO DE BAJO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR, EL RESTO DE TERMINALES H Y X SE NUMERAN DE ACUERDO A LO INDICADO EN LA TABLA 6.1.

6.6. PRUEBA DE DESPLAZAMIENTO DE FASE

COMO SE HA MENCIONADO ANTES, PARA LOS TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS ES NECESARIO CONOCER LA POLARIDAD DE CADA GRUPO DE DEVANADOS DE FASE, ASÍ - CONO EL DESPLAZAMIENTO ANGULAR QUE PUEDE EXISTIR ENTRE LOS CORRESPONDIENTES DEVANADOS SECUNDARIOS ANTES DE QUE LAS UNIDADES SE CONECTEN EN PARALELO O FORMANDO BANCOS.

UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO TÍPICO, TIENE UNA PLACA DE DATOS O CARACTERÍSTICAS QUE INCLUYE UN DIAGRAMA (LLAMADO DIAGRAMA DE VECTOR DE VOLTAJE)

JE_S) QUE MUESTRA LAS RELACIONES ENTRE LOS VOLTAJES DE LAS TRES FASES DE ACUERDO A LO MOSTRADO EN LA TABLA 6.1. EL DESPLAZAMIENTO ANGULAR ENTRE LOS DEVANADOS DE ALTO VOLTAJE Y BAJO VOLTAJE, ES EL ÁNGULO ENTRE LAS LÍNEAS QUE PASAN DEL PUNTO NEUTRO DEL DIAGRAMA DE VECTOR DE VOLTAJES, A TRAVÉS DE H₁ Y X₁ RESPECTIVAMENTE.

PARA VERIFICAR EL DESPLAZAMIENTO DE FASES UNA DE LAS TERMINALES H SE CONECTA A UNA DE LAS TERMINALES X COMO SE MUESTRA EN LA TABLA 6.1. EL PRIHARIO DEL TRANSFORMADOR SE CONECTA A UNA FUENTE DE VOLTAJE TRIFÁSICA A BAJO VOLTAJE (PREFERENTEMENTE MUCHO MÁS BAJA QUE EL VOLTAJE NOMINAL DEL SECUNDARIO DEL TRANSFORMADOR, COMO MEDIDA DE SEGURIDAD PRECAUTORIA) Y EL VOLTAJE SE MIDE ENTRE TERMINALES COMO SE MUESTRA EN LA FIGURA 6.1. LAS RELACIONES DE VOLTAJE DEBEN ESTAR DE ACUERDO CON LAS COMPARACIONES INDICADAS.

6.7. PRUEBA DE RELACION DE TRANSFORMACION

LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN DE UN TRANSFORMADOR ES LA RELACIÓN DE VOLTAJES DEL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE AL DEVANADO DE BAJO VOLTAJE PARA TRANSFORMADORES DE DOS DEVANADOS. CUANDO HAY MAS DE DOS DEVANADOS, EXISTEN VARIAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN, TODAS MEDIDAS CON RESPECTO AL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE, LOS DISTINTOS VOLTAJES QUE TIENE UN TRANSFORMADOR SE INDICAN NORMALMENTE EN LA PLACA DE CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR.

SE PUEDEN EMPLEAR EN GENERAL DOS MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN EN TRANSFORMADORES: USANDO VOLTMETROS CONECTADOS A LOS DEVANADOS DE ALTO VOLTAJE Y BAJO VOLTAJE (CUANDO ES NECESARIO SE CONECTAN A TRAVÉS DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL). POR ESTE PROCEDIMIENTO SE FIJA UN VALOR DE VOLTAJE EN EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR, TOMANDO LA LECTURA CORRESPONDIENTE A ESTE VOLTAJE EN EL DEVANADO SECUNDARIO. PARA COMPENSAR ERRORES ES CONVENIENTE INTERCAMBIAR LOS VOLTMETROS. EL PROCEDIMIENTO SE REPITE PARA VARIOS VALORES DE VOLTAJE. PARA TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS SE USA UNA FUENTE DE ALIMENTA-

CIÓN TRIFÁSICA Y SE ADMITE UNA TOLERANCIA DE $\pm 1\%$.

EL OTRO MÉTODO DE MEDICIÓN DE LA RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN ES POR MEDIO DE UN APARATO DENOMINADO TTR (TRANSFORMER TEST-TURN RATIO) Y QUE CONSISTE DE UNA SERIE DE AJUSTES PARA DAR SUFICIENTE PRECISIÓN A LA LECTURA, QUE SE TOMA CONECTANDO CABLES A CADA UNO DE LOS DEVANADOS DEL TRANSFORMADOR (POR PAREJAS). EL APARATO ES EN REALIDAD UNA FUENTE DE VOLTAJE REGULADA.

6.8 PRUEBAS AL AISLAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES

6.8.1. PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO

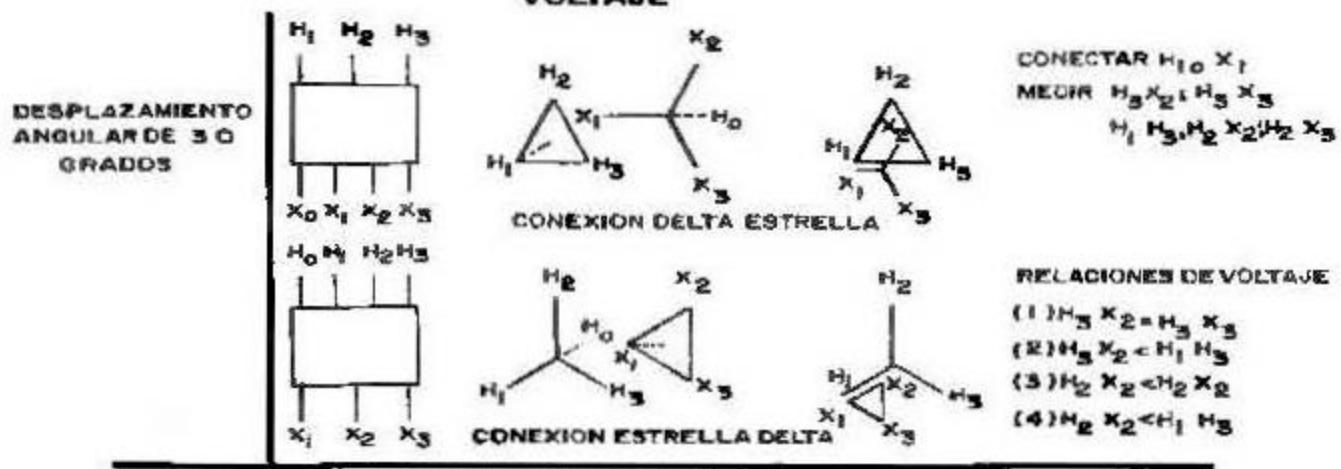
ESTA PRUEBA SE HACE PARA VERIFICAR LA RESISTENCIA DIELECTRICA DEL AISLAMIENTO ENTRE LOS DEVANADOS QUE OPERAN A DISTINTOS VOLTAJES (ALTO-VOLTAJE, BAJO VOLTAJE Y MEDIO VOLTAJE) Y ENTRE CADA UNO DE ESTOS DEVANADOS Y LAS PARTES A TIERRA DEL TRANSFORMADOR.

EL DEVANADO QUE SE VA A PROBAR SE PONE EN CORTO CIRCUITO Y SE CONECTA A LA TERMINAL DE ALTO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR EN CASCADA QUE SIRVE PARA ALIMENTAR AL TRANSFORMADOR BAJO PRUEBA. EL CIRCUITO DE RETORNO SE CONECTA AL TANQUE CONECTADO A TIERRA DEL TRANSFORMADOR BAJO PRUEBA. EL VOLTAJE SE APLICA EN FORMA GRADUAL (REGULADA) Y CONTINUA DESDE CERO HASTA EL VALOR DE PRUEBA.

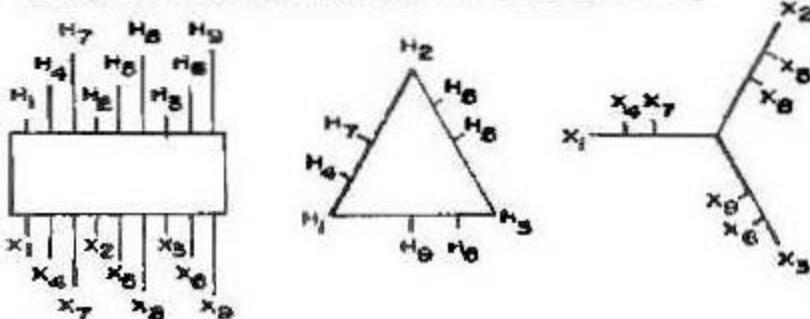
PARA LA PRUEBA SE UNEN ENTRE SI LAS TERMINALES DE ALTO VOLTAJE (POR DONDE SE APLICA EL VOLTAJE DE PRUEBA) Y TAMBIÉN SE USAN ENTRE SI Y SE CONECTAN A TIERRA LAS TERMINALES DE BAJA TENSIÓN. EL PROCESO SE INVIERTE EN LAS CONEXIONES CUANDO SE PRUEBA EL DEVANADO DE BAJA TENSIÓN.

EL VOLTAJE DE PRUEBA SE APLICA DURANTE 1 MINUTO Y SI DESDE EL MOMENTO

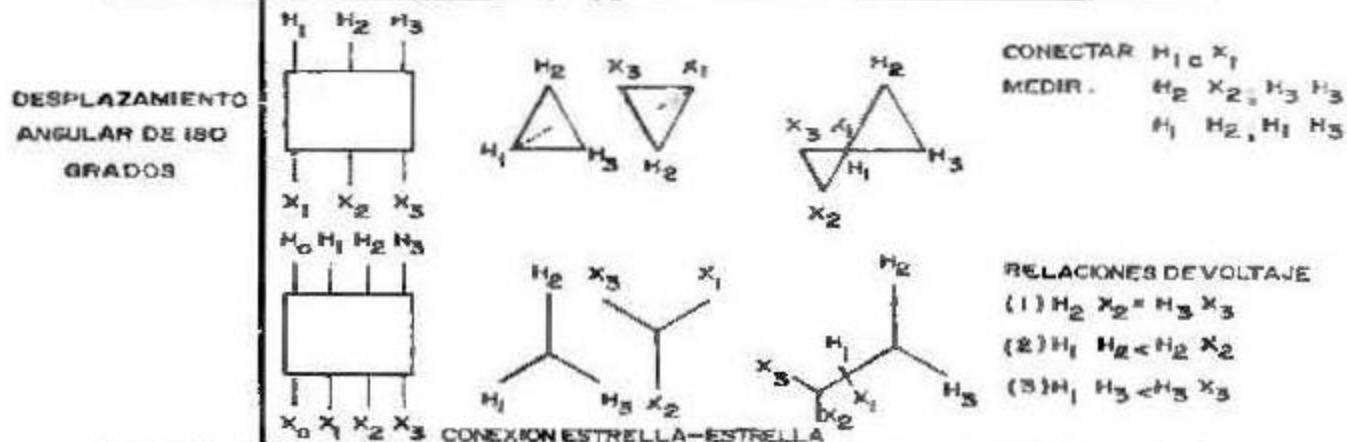
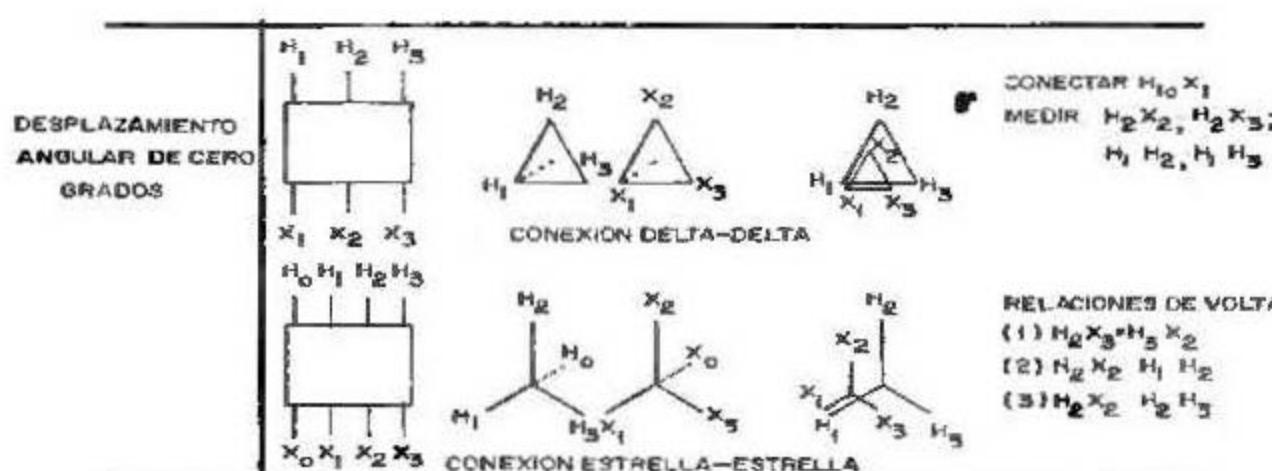
**MARCAS DE POLARIDAD DE TRANSFORMADORES
MOSTRANDO LOS DIAGRAMAS VECTORIALES DE
VOLTAJE**



EJEMPLO DE TRANSFORMADOR TRIFASICO CON TAPS.



MARCAS DE POLARIDAD	DESPLAZAMIENTO ANGULAR	DIAGRAMA PARA MEDICION	VERIFICAR MEDICIONES
----------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-----------------------------



T A B L A 6.1

DE INICIO DE LA PRUEBA LA CORRIENTE NO MUESTRA NINGÚN INCREMENTO, EL VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN NO DECRECE Y NO SE PRESENTA RUPTURA DIELECTRICA O SE ESCUCHA EXPLOSIÓN EN EL INTERIOR DEL TRANSFORMADOR, SE DICE QUE EL DEVANADO PROBADO PARA LA PRUEBA. EL MISMO PROCEDIMIENTO SE APLICA PARA CADA DEVANADO. POR LO GENERAL SE INICIA LA PRUEBA POR EL DEVANADO DE ALTO VOLTAJE. UNA INDICACIÓN DE VALORES DE PRUEBA A USAR SE DA EN LA TABLA SIGUIENTE, AUN CUANDO ESTOS VALORES SE TOMAN DE NORMA.

VALORES INDICATIVOS DE VOLTAJES DE PRUEBA PARA LA PRUEBA DE VOLTAJE APLICADO EN TRANSFORMADORES

TIPO DE TRANSFORMADOR	TENSION NOMINAL DE TRANSFORMADOR				
	HASTA 600 VOLTS	6 KV	15 KV	30 KV	115 KV
SUMERGIDO EN ACEITE	5	25	45	85	200
SECO	3	16	37	--	--

6.8.2. PRUEBA DE VOLTAJE INDUCIDO

LA RESISTENCIA DIELECTRICA ENTRE ESPIRAS, ENTRE CAPAS DE ESPIRAS, ENTRE BOBINAS Y ENTRE FASES DE AISLAMIENTO SE PRUEBA POR MEDIO DE LA LLAMADA "PRUEBA DE VOLTAJE INDUCIDO". MEDIANTE ESTA PRUEBA, UNO DE LOS DEVANADOS, POR LO GENERAL EL DE BAJO VOLTAJE, SE ENERGIZA, EN TANTO QUE LOS OTROS SE DEJAN EN CIRCUITO ABIERTO. SE MIDEN LAS CORRIENTES Y VOLTAJES DEL LADO DE SUMINISTRO POR MEDIO DE AMPERMETROS Y SWITCH SELECTORES PARA EL VOLTMETRO. EL VOLTAJE DE PRUEBA SE PROPORCIONA POR MEDIO DE UNA FUENTE QUE CONSISTE DE UN GRUPO MOTOR - GENERADOR, MEDIANTE EL CUAL EL VOLTAJE SE ELEVA GRADUALMENTE DESDE CERO HASTA EL VALOR DE -- PRUEBA. LA PRUEBA SE MANTIENE DURANTE 1 MINUTO Y DESPUES SE REDUCE EL VOLTAJE SUAVEMENTE HASTA CERO.

EL VOLTAJE DE PRUEBA PUEDE LLEGAR A SER HASTA EL 130% DEL VOLTAJE NOMI-

1- PRIMOMOTOR

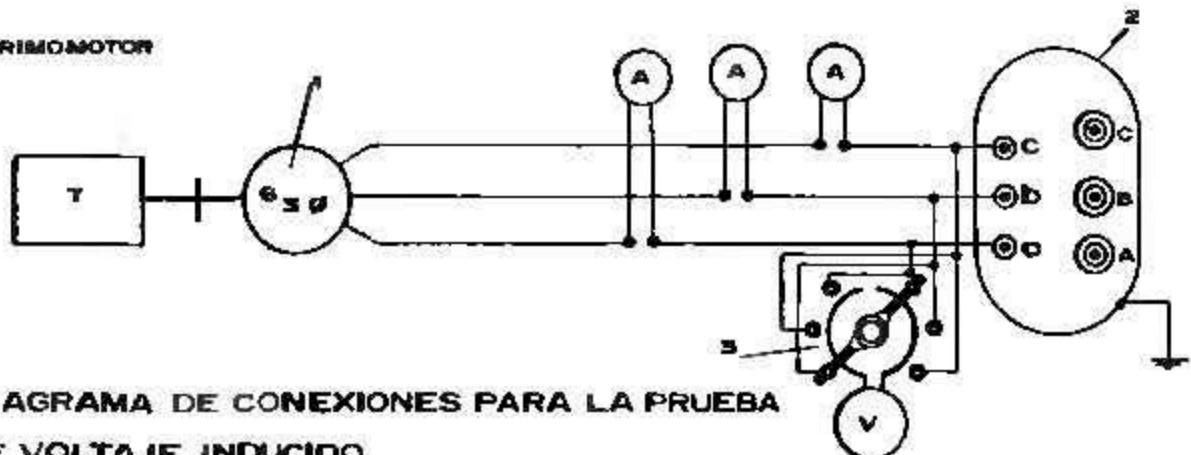
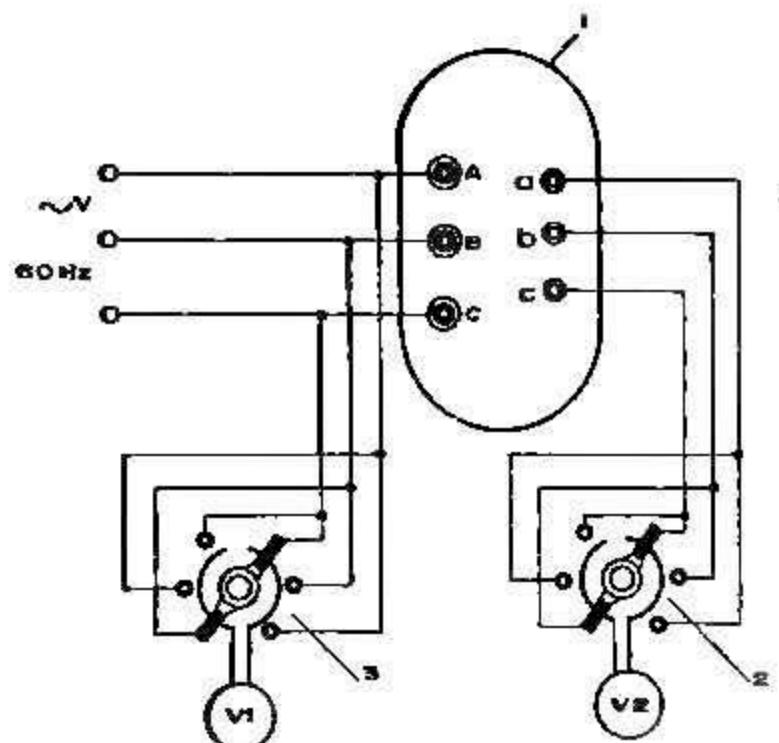


DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA PRUEBA
DE VOLTAJE INDUCIDO

- 1- GENERADOR QUE SUMINISTRA
EL VOLTAJE DE PRUEBA
2- TRANSFORMADOR DE PRUEBA
3- SWITCH SELECTOR

SE APLICA UN 130% DEL VOLTAJE NOMINAL DEL
DEVAÑADO DEBAJO VOLTAJE SI NO EXISTEN CAMBIOS
EN LAS CORRIENTES DE FASE, Y LOS VOLTAJES QUE
SON SIMETRICOS Y TAMBIEÑ NO HAY PRESENCIA DE
HUMO O GASES O HAY RUPTURA DIELECTRICA, EL
TRANSFORMADOR PASA LA PRUEBA



- 1- TRANSFORMADOR
2- SWITCH SELECTOR DEL
LADO DE BAJO VOLTAJE
3- SWITCH SELECTOR DEL
DEVAÑADO DE ALTO VOL-
TAJE

ALGUNAS VECES SE USAN
TRANSFORMADORES DE POTEN-
CIAL PARA ALIMENTAR LOS
VOLTMETROS V1 Y V2

DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA PRUEBA
DE RELACION DE TRANSFORMACION POR MEDIO
DE DOS VOLTMETROS

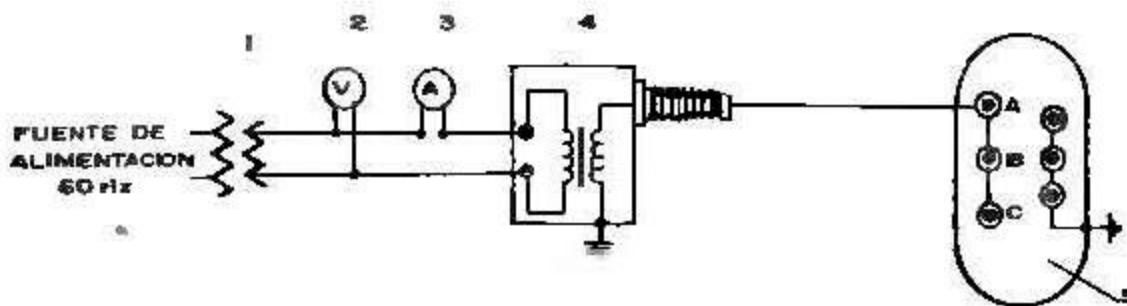
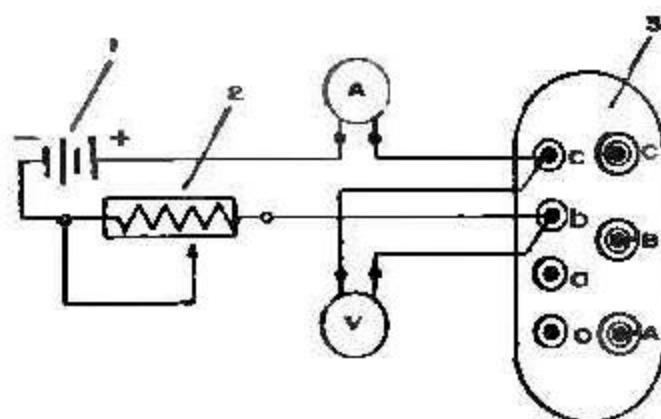


DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA PRUEBA
DE VOLTAJE APPLICADO AL DEVANADO DE ALTO
VOLTAJE

- 1.- TRANSFORMADOR REGULADOR
- 2.- VOLTMETRO
- 3.- AMPERMETRO
- 4.- TRANSFORMADOR PARA PRUEBA (CASCADA)
- 5.- TRANSFORMADOR BAJO PRUEBA

EL VOLTAJE SE APlica EN FORMA
CONTINUA DESDE CERO HASTA EL
VALOR DE PRUEBA POR MEDIO DEL
TRANSFORMADOR REGULADOR.

LA PRUEBA SE APlica 1 MINUTO Y SI EL AMPERMETRO (3) NO MUESTRA INCREMENTO EN
LA CORRIENTE Y EL VOLTMETRO (2) NO INDICA BAJA DE VOLTAJE EN EL VOLTAJE DE ALI-
MENTACION Y NO SE ESCUCHAN DESCARGAS EN EL INTERIOR, LA PRUEBA PASA, LOS OTROS
DEVANADOS SE PRUEBAN IGUAL.



- 1.- BATERIA DE 4 A 6 VOLTS
- 2.- REOSTATO PARA EL CONTROL
DE CORRIENTE
- 3.- TRANSFORMADOREN PRUEBA

DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA
MEDICION DE LA RESISTENCIA EN LOS
DEVANADOS POR EL METODO DE LA CAIDA
DE VOLTAJE

LA RESISTENCIA DE CADA DEVANADO SE CALCULA POR LA LEY DE OHM COMO $R = \frac{V}{I}$
SE DEBEN CORREGIR POR TEMPERATURA Y EL VALOR DE RESISTENCIA ENTRE FASES
NO DEBE DIFERIR EN MAS DEL 2 %

294 Pruebas a transformadores

NAL DEL DEVANADO ALIMENTADO.

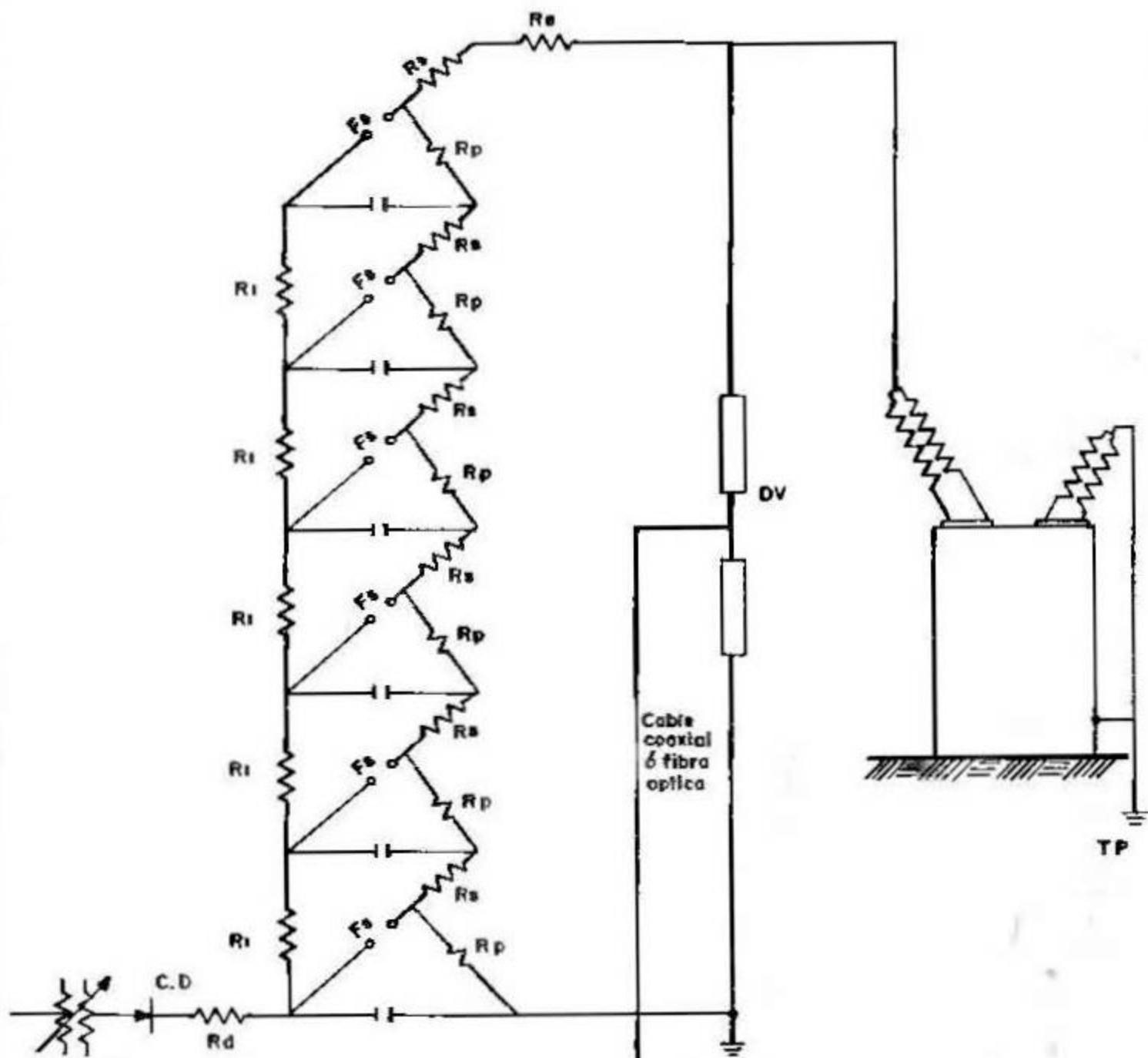
6.8.3. PRUEBA DE IMPULSO

ESTA PRUEBA SE HACE PARA VERIFICAR QUE EL AISLAMIENTO DEL TRANSFORMADOR ES CAPAZ DE SOPORTAR LAS ONDAS DE VOLTAJE DEBIDAS A IMPULSOS POR RAYO (DESCARGAS ATMOSFÉRICAS). ESTA PRUEBA INCLUYE LA VERIFICACIÓN DEL AISLAMIENTO A TIERRA, EL AISLAMIENTO ENTRE ESPIRAS Y ENTRE DEVANADOS, ASÍ COMO EL FLAMEO EN LAS BOQUILLAS ASOCIADAS A CADA DEVANADO. SE APLICA UNA FORMA DE ONDA DE IMPULSO ESTANDAR O NORMALIZADA QUE SE APROXIMA A UNA ONDA DE RAYO SE APLICA AL TRANSFORMADOR BAJO PRUEBA. EL ELEMENTO QUE PRODUCE LAS ONDAS DE PRUEBA NORMALIZADAS, SE CONOCE COMO "EL GENERADOR DE IMPULSOS" Y CONSISTE POR LO GENERAL DE UN CIERTO NÚMERO DE CONDENSADORES CONECTADOS DE TAL FORMA QUE SE CARGAN EN PARALELO DE UNA FUENTE DE VOLTAJE RELATIVAMENTE BAJO, Y SE DESCARGAN EN SERIE PARA DAR EL VOLTAJE DE PRUEBA CON LA FORMA DE ONDA NORMALIZADA.

LA ONDA NORMALIZADA DE PRUEBA ALCANZA SU VALOR DE CRESTA EN 1.2 MICROSEGUNDOS Y SE REDUCE AL 50% DE SU VALOR EN 50 MICROSEGUNDOS. EL VOLTAJE APLICADO EN CADA CASO SE OBTIENE DE NORMAS, PERO EN GENERAL VARIA DE 5 A 30 VECES EL VALOR DEL VOLTAJE NOMINAL DEL AISLAMIENTO.

PARA TRANSFORMADORES TIPO DISTRIBUCIÓN LOS VOLTAJES DE PRUEBA SE DAN EN LA TABLA SIGUIENTE.

GENERADOR DE IMPULSOS DE VOLTAJE



R_1 = Resistencia de carga

R_p = Resistencia de colo

R_s = Resistencia de frente

R_e = Resistencia de frente externa

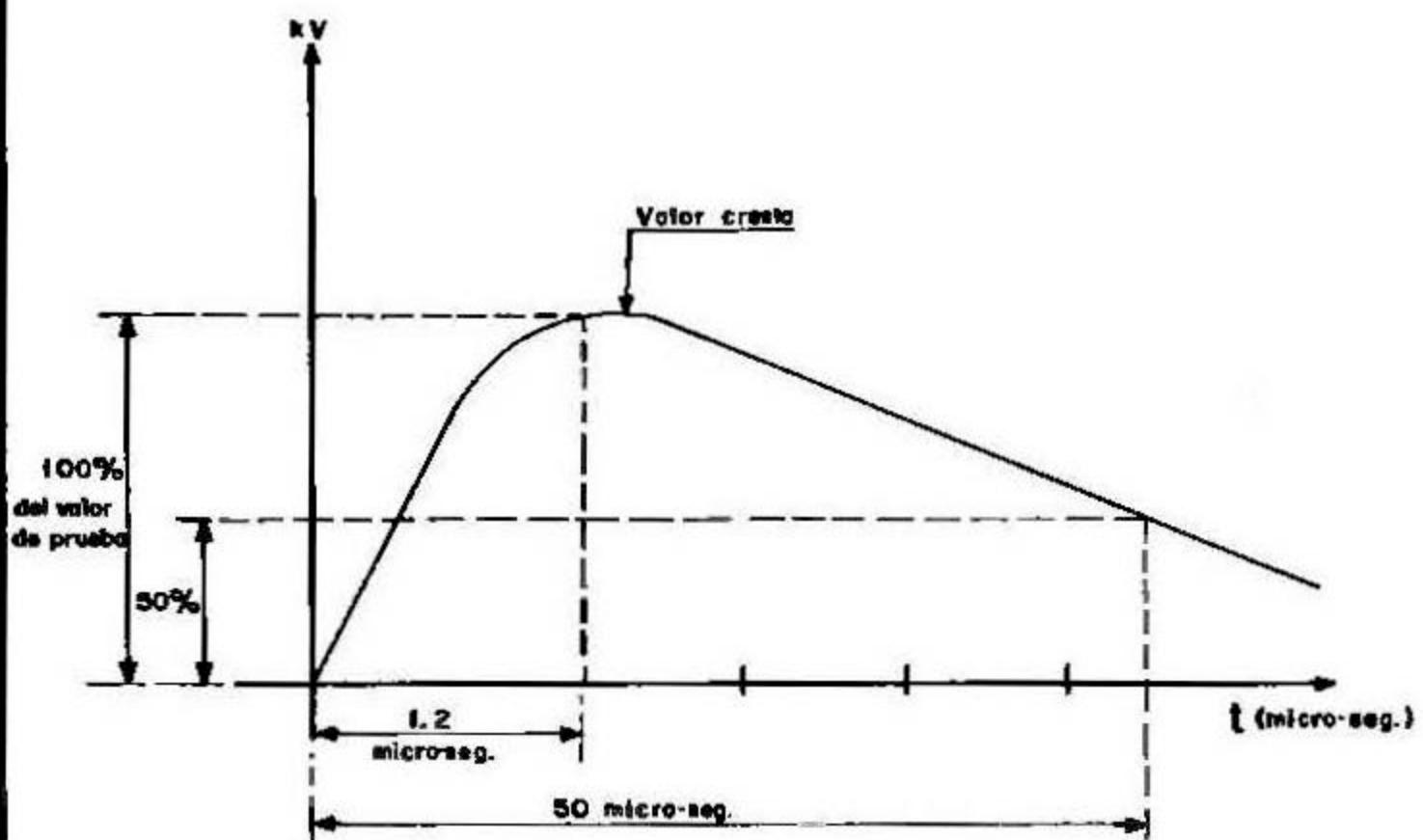
R_d = Resistencia de descarga

C_d = Capacitores de impulso (Carga y descarga)

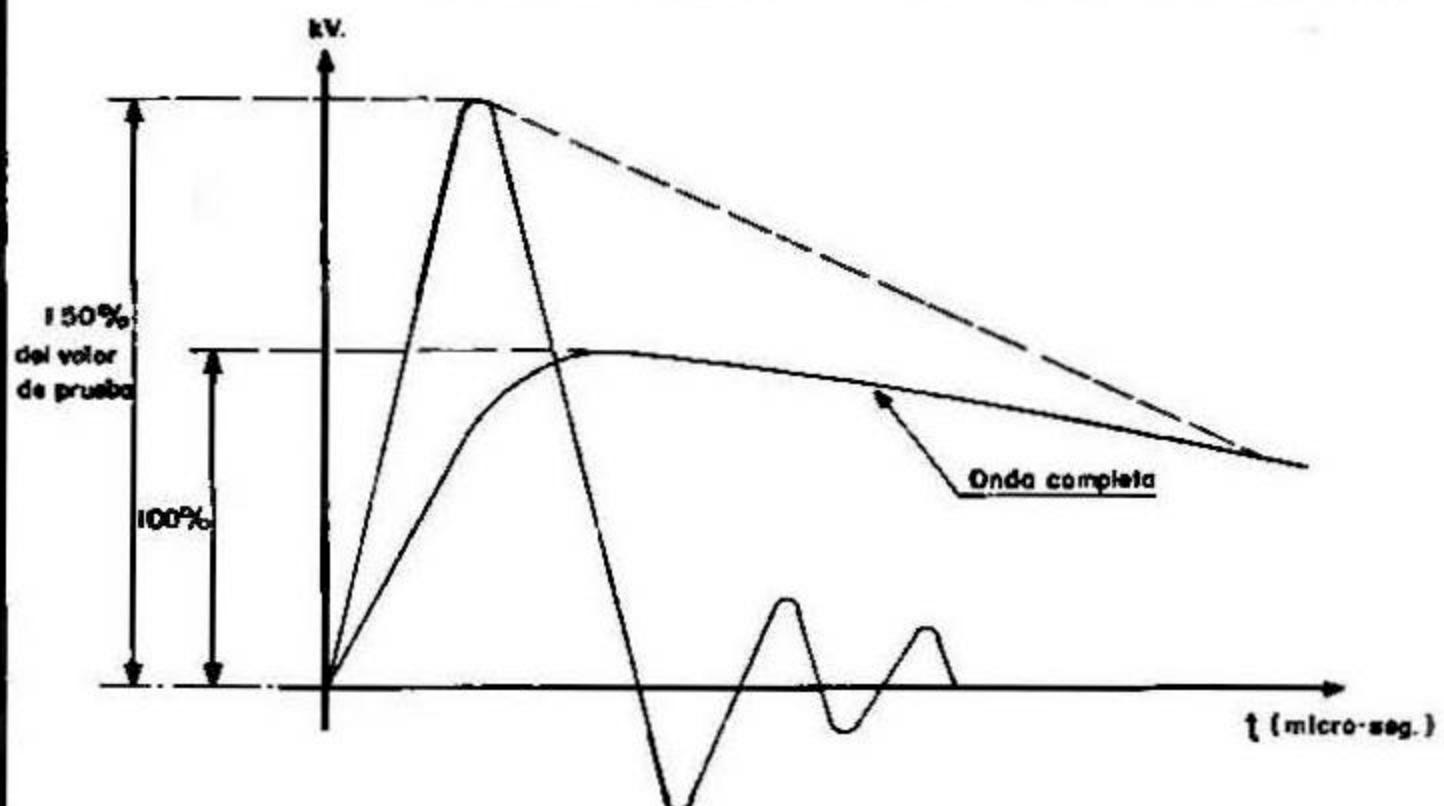
F_s = Esferas de aislamiento ajustables

DV = Divisor de voltaje

TP = Transformador bajo prueba



FORMA DE ONDA DE IMPULSO NORMALIZADA



ONDA CORTADA

LAS ONDAS DE PRUEBA SON

- 1.— Onda completa de valor reducido
- 2.— Ondas cortadas
- 3.— Onda completa de valor pleno

NIVELES BASICOS DE AISLAMIENTO AL IMPULSO PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION

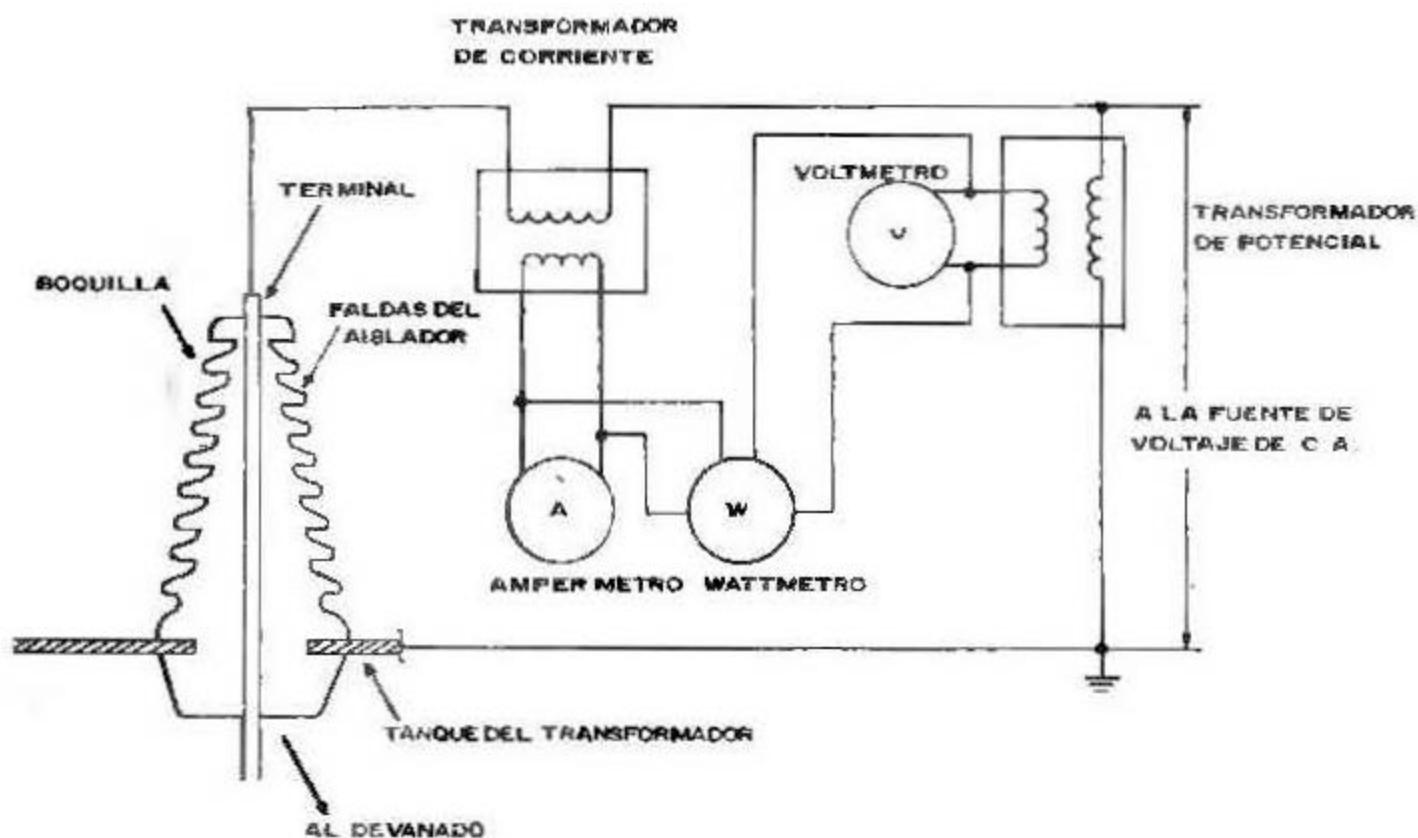
TENSION NOMINAL DEL TRANSFORMADOR KV (VALOR EFICAZ)	NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO AL IMPULSO KV CRES TA	ONDA	CORTADA
		KV CRESTA	TIEMPO MINIMO DE CORTE EN MICROSEGUNDOS
1.2	30	36	1.0
2.5	45	54	1.5
5.0	60	69	1.5
8.7	75	88	1.6
15.0	95	110	1.8
25.0	150	175	3.0
34.5	200	230	3.0

6.9 PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA A LAS BOQUILLAS DEL TRANSFORMADOR

ADEMÁS DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO Y DE ALTO VOLTAJE (VOLTAJE APLICADO, VOLTAJE INDUCIDO Y DE IMPULSO), LA PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA EN LAS BOQUILLAS SE USA PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN - DE LOS MATERIALES AISLANTES EN LAS MISMAS. LAS BOQUILLAS SE PUEDEN O - NO REMOVER DEL TRANSFORMADOR, PERO PARA LA PRUEBA SE DEBEN DESCONECTAR DE OTROS APARATOS Y DE LA BARRA A LA CUAL SE CONECTA EL TRANSFORMADOR CUANDO ESTÁ EN OPERACIÓN.

EL FACTOR DE POTENCIA SE OBTIENE LEYENDO VOLTS, AMPERES Y WATTS DEL CIRCUITO DE PRUEBA. EL EQUIPO DE PRUEBA FRECUENTEMENTE SE ENCUENTRA INTEGRADO EN FORMA DE PAQUETE Y SOLO TIENE UN INDICADOR DE FACTOR DE POTENCIA Y UN DISPOSITIVO DE CONTROL DE VOLTAJE EN EL EXTERIOR, ESTOS EQUIPOS SE CONOCEN COMO "PROBADORES DE FACTOR DE POTENCIA". LOS VALORES DE FACTOR DE POTENCIA SE ENCUENTRAN EN EL RANGO DEL 5 AL 10 POR CIENTO. UNA LECTURA NO ES SUFFICIENTE PARA DETERMINAR LA CONDICIÓN DEL AISLAMIENTO DE LA BOQUILLA, A MEDIDA QUE ESTE SE DETERIORA LAS MEDICIO

DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA PRUEBA
DE FACTOR DE POTENCIA EN LAS BOQUILLAS DE
UN TRANSFORMADOR.



LOS VALORES DE FACTOR DE POTENCIA DEBEN ESTAR EN EL RANGO

DEL 5 AL 10 % PARA SER ACEPTABLE.

TODO EL EQUIPO PUEDE ESTAR INTEGRADO EN UN PAQUETE CONOCIDO
COMO "PROBADOR DEL FACTOR DE POTENCIA".

NES DEL FACTOR DE POTENCIA AUMENTAN, PUDIENDO LLEGAR A SER DEL 100%.

6.10. MEDICIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN VACÍO Y LAS CARACTERÍSTICAS DE CORTO CIRCUITO

PARA PROPÓSITOS PRÁCTICOS, LAS PRINCIPALES PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES SON COMO SE HA MENCIONADO EN LOS CAPÍTULOS ANTERIORES, LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO Y LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS, QUE SE PUEDEN DETERMINAR POR LAS LLAMADAS PRUEBAS DE VACÍO Y DE CORTO CIRCUITO DEL TRANSFORMADOR RESPECTIVAMENTE.

6.10.1. PRUEBA DE VACÍO DEL TRANSFORMADOR

DURANTE LA PRUEBA DE VACÍO DEL TRANSFORMADOR O DE CIRCUITO ABIERTO, SE APLICA EL VOLTAJE NOMINAL DEL TRANSFORMADOR POR EL DEVANADO DE BAJO - VOLTAJE Y SE MIDEN LOS VOLTAJES V_p , LA CORRIENTE DE VACÍO I_0 Y LA POTENCIA P_0 QUE REPRESENTA LAS PÉRDIDAS DE VACÍO O EN EL NÚCLEO DEL -- TRANSFORMADOR. SE MIDE TAMBIÉN EL VOLTAJE EN EL SECUNDARIO (V_s) DEL TRANSFORMADOR. Además DE LA DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE VACÍO POR ESTA PRUEBA, SE PUEDEN CALCULAR TAMBIÉN LA POTENCIA APARENTE DE VACÍO COMO:

$$S_0 = V_p I_0; \quad \text{DONDE: } S_0 = \text{POTENCIA APARENTE DE VACÍO O EN EL NÚCLEO EN VA}$$

V_p EN VOLTS

I_0 EN AMPERES

LA POTENCIA REACTIVA QUE ABSORBE EL NÚCLEO

COMO:

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2} \quad \text{DONDE: } Q_0 = \text{POTENCIA REACTIVA EN EL NÚCLEO EN VAR}$$

PARA LOS FINES DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR, LA RESISTENCIA Y REACTANCIA DEL CIRCUITO DE MAGNETIZACIÓN, COMO:

300 Pruebas a transformadores

$$R_M = V_p^2 / P_0; \quad \text{DONDE } R_M = \text{RESISTENCIA DE MAGNETIZACIÓN EN OHMS}$$

$$X_M = V_p^2 / Q_0; \quad \text{DONDE } X_M = \text{REACTANCIA DEL CIRCUITO DE MAGNETIZACIÓN EN OHMS}$$

6.10.2. PRUEBA DE CORTO CIRCUITO

DURANTE LA REALIZACIÓN DE ESTA PRUEBA EL DEVANADO SECUNDARIO (DE BAJO VOLTAJE) SE CONECTA EN CORTO CIRCUITO Y SE APLICA POR EL DEVANADO PRIMARIO (DE ALTO VOLTAJE) UN VOLTAJE REGULADO QUE POR LO GENERAL ES DEL ORDEN DEL 5% DEL VOLTAJE DEL DEVANADO ALIMENTADO. LA CORRIENTE PRIMARIA MEDIDA (I_{CC}) NO DEBE EXCEDER AL VALOR NOMINAL DE LA CORRIENTE DEL DEVANADO ALIMENTADO (PRIMARIO), LA APLICACIÓN DEL VOLTAJE SE HACE REGULADA (EN FORMA GRADUAL) PARA EVITAR SOBRECALENTAMIENTO Y EN CONSECUENCIA UN CAMBIO RAPIDO EN LA RESISTENCIA DEL DEVANADO. DIRECTAMENTE DE LA PRUEBA SE MIDEN LOS VALORES DE LAS PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS P_{CC} , LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO O NOMINAL DEL DEVANADO ALIMENTADO (I_{CC}) Y LA CAIDA DE VOLTAJE POR IMPEDANCIA O VOLTAJE DE CORTO CIRCUITO V_{CC} ; A PARTIR DE ESTAS CANTIDADES SE PUEDEN CALCULAR LAS SIGUIENTES CONSTANTES:

LA IMPEDANCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL DEVANADO ALIMENTADO (PRIMARIO)

$$Z_{EP} = V_{CC} / I_{CC}$$

DONDE: Z_{EP} = IMPEDANCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO EXPRESADA EN OHMS

V_{CC} = EN VOLTS Y LA CORRIENTE I_{CC} EN AMPERES

$$R_{EP} = P_{CC} / I_{CC}^2$$

DONDE: R_{EP} = RESISTENCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO, EXPRESADA EN OHMS

LA REACTANCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO Y EXPRESADA EN OHMS, SE CALCULA COMO:

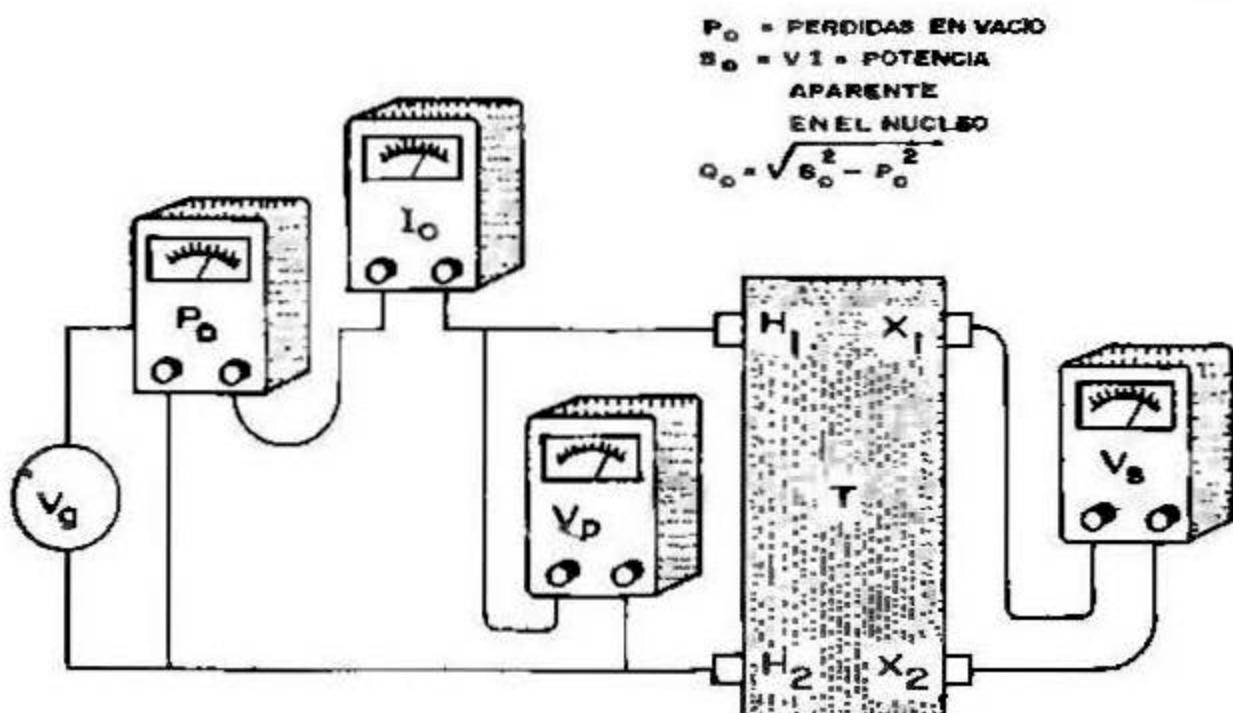


DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA DETERMINACION DE LAS PERDIDAS EN VACIO

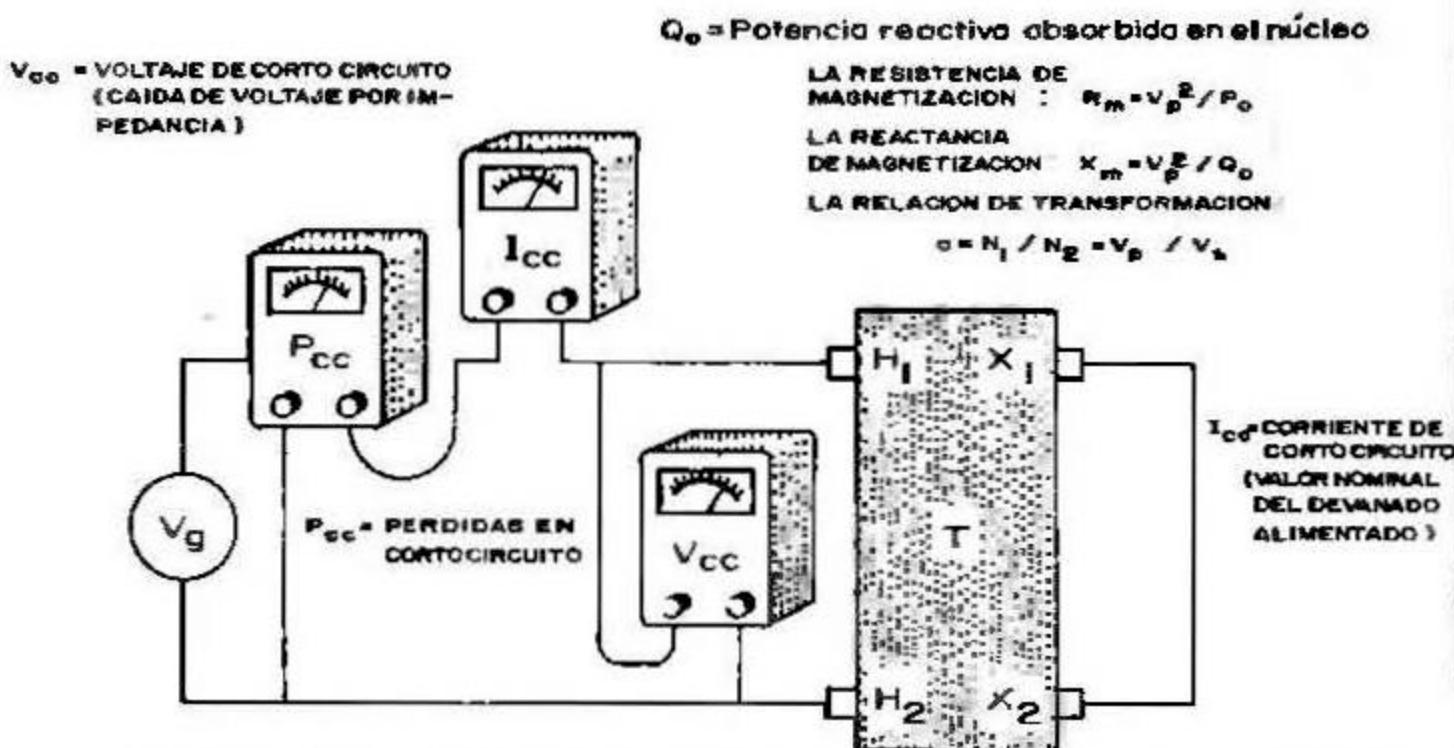


DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS DE CORTO CIRCUITO

LA IMPEDANCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO ES :

$$Z_{ep} = V_{cc} / I_{cc}$$

LA RESISTENCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO

$$R_{ep} = P_{cc} / I_{cc}^2$$

LA REACTANCIA EQUIVALENTE REFERIDA AL PRIMARIO

$$X_{ep} = \sqrt{Z_{ep}^2 - R_{ep}^2}$$

302 Pruebas a transformadores

$$X_{EP} = \sqrt{Z_{EP}^2 - R_{EP}^2}$$

6.11 TRABAJOS DE MANTENIMIENTO EN LOS TRANSFORMADORES

EL TRANSFORMADOR, POR SER UNA MÁQUINA SIN PARTES EN MOVIMIENTO (ESTÁTICA), REQUIERE DE POCO MANTENIMIENTO, SIN EMBARGO SE DEBEN REALIZAR CIERTO TIPO DE TRABAJOS DE MANTENIMIENTO, EN SU INSTALACIÓN O LUGAR DE OPERACIÓN Y QUE SE CONOCEN COMO MANTENIMIENTO DE CAMPO, YA SEA DE TIPO PREDICTIVO, PREVENTIVO O CORRECTIVO.

EN FORMA GENERAL LOS TRABAJOS QUE SE REALIZAN SON LOS SIGUIENTES:

- 1) MANIOBRAS DE DESCONEXIÓN Y CONEXIÓN (LIBRANZAS)
- 2) PREPARACIÓN DE EQUIPOS DE PRUEBAS
- 3) DESCONECTACIÓN Y LIMPIEZA
- 4) PRUEBAS DE FACTOR DE POTENCIA A DEVANADOS
- 5) PRUEBAS DE RESISTENCIA DE AISLAMIENTO (MEGGER)
- 6) PRUEBAS DE CORRIENTES DE EXCITACIÓN
- 7) PRUEBA DE FACTOR DE POTENCIA A BOQUILLAS
- 8) PRUEBAS DE RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN (T.T.R.)
- 9) PRUEBAS DE MEDICIÓN O DETERMINACIÓN DE IMPEDANCIA
- 10) PRUEBAS AL ACEITE (EN SU CASO)
- 11) REVISIÓN Y LIMPIEZA DEL GABINETE DE CONTROL (EN SU CASO)
- 12) ELIMINACIÓN DE FUGAS

13) PINTURA

14) MANTENIMIENTO AL CAMBIADOR DE DERIVACIONES

15) PRUEBAS DE OPERACIÓN Y CONTROL

DENTRO DE LAS LLAMADAS PRUEBAS DE CAMPO SE MENCIONAN LAS SIGUIENTES:

- A) RESISTENCIA DE AISLAMIENTO
- B) FACTOR DE POTENCIA DE AISLAMIENTO
- C) RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN Y POLARIDAD
- D) RESISTENCIA OHMICA DE DEVANADOS
- E) CORRIENTE DE EXCITACIÓN CON EQUIPO DE FACTOR DE POTENCIA
- F) MEDICIÓN DE IMPEDANCIA
- G) RIGIDEZ DIELECTRICA DEL ACEITE
- H) RESISTIVIDAD DEL ACEITE
- I) TENSÓN INTERFACIAL DEL ACEITE
- J) CONDICIÓN Y COLOR DEL ACEITE
- K) NÚMERO DE NEUTRALIZACIÓN DEL ACEITE
- L) HUMEDAD DEL ACEITE
- M) RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

B I B L I O G R A F I A

1. BASIC ELECTRICAL POWER TRANSFORMERS.
ANTHONY S. PANSINI ED. HAYDEN.
2. REPAIR OF POWER TRANSFORMERS.
Z. KHUDYAKOV ED. MIR.
3. ASSEMBLY OF HIGH-CAPACITY TRANSFORMERS.
U. ANSHIN , A.G. KRATZ .
ED. GOSE MERGOIZDAT Moscú.
4. ELECTRICAL MACHINES Part, I
G. N. PETROV. ED. MIR.
5. CURSO DE TRANSFORMADORES Y MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN
TERCERA EDICIÓN. G. ENRÍQUEZ HARPER. ED. LIMUSA.
6. ELECTRICAL POWER TECHNOLOGY.
T. WILDI. ED. JOHN WILEY.
7. CORSO DI COSTRUZIONI ELETTROMECCANICHE
E. DISEGNO. GIUSEPPE RAGO , ED. SANSONI,
8. A COURSE IN ELECTRICAL MACHINE DESIGN.
A. K. SAWHNEY. ED. DHANPAT RAI
9. ELETROTECNICA PRATICA.
A. BANDINI BUTI, M. BERTOLINI, U. RE.
ED. DELFINO. MILANO.