

Introducción a las Mediciones Eléctricas

**Escuela de Educación Técnico
Profesional N 669**

2019

Introducción a las Mediciones Eléctricas

Prof. Juan Manuel Maffei

This work is licensed under a Creative Commons
“Attribution-ShareAlike 3.0 Unported” license.



Usted es libre de:

- Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato
- Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

Bajo los siguientes términos:

- Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatante.
- CompartirIgual — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.
- No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Índice general

1 Sobre las mediciones	7
1.1 Magnitudes	7
1.1.1 Precisión y exactitud	8
1.2 Sistema Internacional de Unidades	8
1.2.1 Unidades	8
1.2.2 Prefijos	9
1.2.3 Reglas	9
1.3 Consideraciones para la lectura de mediciones	10
1.3.1 Cifras significativas	10
1.3.2 Redondeo	10
1.3.3 Notación científica y de ingeniería	11
1.4 Mediciones directas e indirectas	12
1.5 Generalidades de instrumentos de medición eléctrica	13
1.5.1 Instrumentos analógicos	13
1.5.2 Instrumentos digitales	14
1.5.3 Clase de un instrumento	15
1.5.4 Simbología de los instrumentos de medición eléctrica	15
2 Errores	17
2.0.1 Error absoluto	17
2.0.2 Tolerancia	17
2.0.3 Error relativo	18
2.1 Clasificación de los errores	19
2.1.1 Errores humanos	19
2.1.2 Errores sistemáticos	19
3 Magnitudes eléctricas	21
3.1 El átomo	21
3.1.1 Fuerza eléctrica	22
3.1.2 Materiales conductores y aislantes	23
3.2 Diferencia de potencial eléctrico o tensión	23
3.3 Intensidad de corriente eléctrica	24

3.4	Relación entre tensión y corriente: la resistencia	25
3.4.1	Ley de Ohm	26
3.5	Potencia (para corriente continua)	26
3.5.1	Energía	27
3.5.2	Eficiencia	27
3.6	Campos eléctricos	28
3.6.1	Capacitores	28
3.7	Campos magnéticos	31
3.7.1	Inductores	32
3.8	Sobre la resistencia, capacidad e inductancia	33
3.9	Régimen transitorio en circuitos con capacitores e inductores	33
3.9.1	Redes capacitivas	33
3.9.2	Redes inductivas	35
4	Corriente alterna	39
4.1	Corriente alterna senoidal	42
4.1.1	Definición matemática	43
4.1.2	Relaciones de fase	45
4.2	Valores rms	46
4.3	Respuesta en frecuencia	49
4.3.1	Respuesta del resistor	49
4.3.2	Respuesta del inductor	50
4.3.3	Respuesta del capacitor	50
4.4	Fasores	51
4.4.1	Síntesis de álgebra de complejos	52
4.4.2	Impedancia	53
4.5	Potencia	54
4.5.1	Triángulo de potencias	57
4.5.2	Compensación del factor de potencia	59
5	Puestas a tierra	61
6	Instrumentos de medición	67
6.1	Galvanómetro	67
6.2	Multímetro	67
6.2.1	Voltímetro	68
6.2.2	Amperímetro	68
6.2.3	Óhmetro	68
6.3	Vatímetro	71
6.4	Capacímetro	71
6.5	Frecuencímetro	71
6.6	Pinza amperométrica	72
6.7	Megohmetro, megger o medidor de aislamiento eléctrico	74
6.8	Telurímetro o medidor de puesta a tierra	74

6.9	Osciloscopio	75
6.10	Comprobadores de tensión	77
6.10.1	Buscapolo	77
6.10.2	Medidor inductivo	77
6.11	Cofímetro o medidor de factor de potencia	77
6.12	Medidores de energía	77
6.12.1	Transformadores de corriente	77
6.13	Medidor de campo electromagnético	77
6.14	Milióhmetro	78
6.15	Generadores de funciones	78

Capítulo 1

Sobre las mediciones

1.1. Magnitudes

Medir es **comparar el valor de una magnitud con otro**, al que se consideró la **unidad** de dicha magnitud, a través de un experimento físico.

Una **magnitud** es toda aquella propiedad de un cuerpo que pueda ser medida.

La **cantidad** es el valor numérico que toma la medida dentro de un sistema de mediciones.

La **unidad** es la cantidad física que se toma como referencia para hacer las mediciones

Ejemplo 1.1. Dada la expresión: Altura del edificio = 80 metros,

- Altura es la magnitud.
- 80 es la cantidad.
- metro es la unidad.

Quiere decir que la altura del edificio (magnitud: longitud) es 80 veces (cantidad) la longitud de referencia denominada metro (unidad).

Las unidades se fijan según acuerdos internacionales por el Comité Internacional de Pesos y Medidas. Recientemente, en noviembre de 2018, se votó la redefinición de algunas de las unidades fundamentales, incluida el Ampere (para medir corriente eléctrica).

Durante este curso, usaremos el **Sistema Internacional de Unidades**, pero es posible que en otros contextos se utilicen otros, como el sistema inglés o el CGS.

1.1.1. Precisión y exactitud

Es común utilizar los términos **precisión** y **exactitud** como sinónimos, pero en el ámbito de la metrología, existe una diferencia:

- Precisión se refiere al grado de dispersión del conjunto de valores obtenidos en la medición repetida de una magnitud.
- Exactitud se refiere al grado de concordancia entre lo medido y su valor verdadero.

A su vez, el **sesgo** es la diferencia entre el valor medido y el valor exacto, que puede ser corregido mediante la calibración. Por lo general, una corrección del sesgo suele mejorar la exactitud, pero no la precisión.

1.2. Sistema Internacional de Unidades

1.2.1. Unidades

Magnitud (símbolo)	Unidad (símbolo)
longitud (L)	metro (m)
masa (M)	kilogramo (kg)
tiempo (T)	segundo (s)
corriente eléctrica (I)	ampere (A)
temperatura (Θ)	kelvin (K)
intensidad lumínica (J)	candela (cd)
energía (E)	julio (J)
fuerza (F)	newton (N)
potencia (P)	vatio (W)
carga eléctrica (Q)	coulomb (C)
tensión eléctrica, diferencia de potencial (V)	voltio (V)
capacitancia	faradio (F)
resistencia eléctrica (R)	ohmio (Ω)
flujo magnético	weber (Wb)
campo magnético	tesla (T)
inductancia (L)	henrio (H)
flujo luminoso	lumen (lm)
frecuencia	hertz (Hz)

1.2.2. Prefijos

Factor de multiplicación	Nombre	Símbolo
10^{24}	yotta	Y
10^{21}	zetta	Z
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10^1	deka	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a
10^{-21}	zepto	z
10^{-24}	yocto	y

1.2.3. Reglas

1. Los símbolos son siempre impresos en letra tipo romana, indistintamente del tipo de letra usado en el resto del texto.
2. Los símbolos son escritos en minúscula excepto cuando el nombre de la unidad se deriva de un nombre propio.
3. Los símbolos de los prefijos se imprimen en letra tipo romana sin espacio entre los símbolos del prefijo y la unidad.
4. Los símbolos nunca se pluralizan.
5. Nunca use un punto después de un símbolo, excepto cuando el símbolo ocurre al final de una oración.
6. Siempre use un espacio entre el número y el símbolo, excepto cuando el primer carácter de un símbolo no es una letra.
7. Los símbolos se usan en conjunto con números en lugar de escribir el nombre completo de la unidad; cuando no hay números, las unidades se escriben con su nombre propio.

1.3. Consideraciones para la lectura de mediciones

1.3.1. Cifras significativas

Según el nivel de precisión que se requiera en una medición, será necesario utilizar una determinada cantidad de cifras significativas.

Existen magnitudes continuas, que son aquellas que entre dos valores poseen infinitas posibilidades, y magnitudes discretas, que entre dos valores cualesquiera poseen una cantidad numerable y finita de posibilidades.

- Ejemplo 1.2.**
- La cantidad de conductores dentro de una caja es una magnitud discreta (puede haber uno, dos, diez o incluso ningún cable, pero no 1,3 cables).
 - La longitud de un conductor es una magnitud continua (puede medir 0,5 m, o 0,554 m, o 0,5533223 m).

Las mediciones de magnitudes continuas siempre serán aproximadas, y las mediciones de magnitudes discretas, en muchos casos, pueden ser exactas.

El número de cifras significativas determinan la precisión de una medición.

Siempre que se opere con dos medidas, la precisión de ambas deberá ser consistente. Esto significa que si se suma una medición con precisión de decimales con otra con precisión de milésimos, el resultado será impreciso. En estos casos, el número con menor precisión determinará la precisión de la solución.

1.3.2. Redondeo

En muchos casos, será necesario redondear las mediciones. Para ello, se toma la lectura hasta el último dígito significativo que se esté considerando, sumando 1 al mismo si el próximo dígito es mayor o igual que 5, o dejándolo como está (truncar) si el próximo dígito es menor que 5.

Ejemplo 1.3. Si $V_1 = 3,25\text{V}$, $V_2 = 2,4201\text{V}$ y $V_3 = 3,245\text{V}$,

- $V_1 + V_2 = 3,25\text{V} + 2,4201\text{V} = 5,6501\text{V} = 5,65\text{V}$
- $V_1 + V_3 = 3,25\text{V} + 3,245\text{V} = 6,495\text{V}$. Como el número con menor precisión tiene dos dígitos decimales, deberá redondearse, sumando una unidad a las centésimas (porque el dígito de las milésimas es 5) obteniendo $6,50\text{V}$ o $6,5\text{V}$.

1.3.3. Notación científica y de ingeniería

En la sección 1.2.2, se han usado, como factores de multiplicación, potencias de 10.

A veces, cuando los valores con los que se trabaja son muy grandes o muy pequeños, suele ser cómodo utilizar potencias de 10. De ese modo, puede expresarse estos valores indicando sólo sus cifras significativas, multiplicadas por una potencia de 10.

Si la potencia es positiva, el factor de multiplicación será un 1 y tantos ceros como indique el exponente:

Valor	Potencia	Operación
1	10^0	$10/10$
10	10^1	10
100	10^2	10×10
1000	10^3	$10 \times 10 \times 10$
...
1 y n ceros	10^n	$10 \times 10 \times 10...n$ veces

Si la potencia es negativa, debe recordarse la siguiente propiedad de las potencias:

$$\frac{1}{10^n} = 10^{-n}$$

Esto da lugar al siguiente razonamiento:

Valor	Potencia	Operación
0,1	10^{-1}	$1/10$
0,01	10^{-2}	$1/100$
0,001	10^{-3}	$1/1000$
0,0001	10^{-4}	$1/10000$
...
0, ($n - 1$) ceros y 1	10^{-n}	$1/1(n$ ceros)

Ejemplo 1.4. Expresar los siguientes valores en forma decimal.

- $3 \times 10^{-3} = 3 \times \frac{1}{1000} = 3 \times 0,001 = 0,003$
- $12 \times 10^4 = 12 \times 1000 = 12000$
- $3,25 \times 10^6 = 3,25 \times 1000000 = 3250000$
- $3,25 \times 10^{-4} = 3,25 \times 0,0001 = 0,000325$

En los ejemplos anteriores, se procedió a multiplicar un número por una potencia de 10, para obtener valores más pequeños o más grandes, y a simple vista resulta más legible.

Es una convención en notación científica, que la mantisa o coeficiente por el cual se multiplique la potencia de 10, debe estar entre 1 y 10.

La notación de ingeniería es similar, excepto que los exponentes de la potencia de 10 deben ser múltiplos de 3 y la mantisa debe estar entre 1 y 1000. Esto permite utilizar prefijos de magnitud como los que se enunciaron en la sección 1.2.2.

Ejemplo 1.5. Convertir las siguientes medidas para eliminar los prefijos, según la tabla de la sección 1.2.2.

- $3\mu F = 3 \times 10^{-6}F = 0,000003F$
- $1,2mA = 1,2 \times 10^{-3}A = 0,0012A$
- $120pF = 120 \times 10^{-12}F = 0,000000000120F$
- $22M\Omega = 22 \times 10^6\Omega = 22000000\Omega$

1.4. Mediciones directas e indirectas

Una medición directa es la que se realiza con un instrumento sobre un determinado elemento, mientras que una medición indirecta involucrará, además, algún paso adicional mediante el cálculo.

Ejemplo 1.6. ■ Medir la tensión de un tomacorriente con un voltímetro es una medición directa.

- Con un voltímetro se mide la tensión en una rama de un circuito de CC. Luego se mide la corriente con un amperímetro en serie. Finalmente, se multiplican ambos resultados y con ello se obtiene la medición indirecta de la potencia.

1.5. Generalidades de instrumentos de medición eléctrica

1.5.1. Instrumentos analógicos



Figura 1.1: Instrumentos analógicos de medición de magnitudes eléctricas

Los instrumentos de medición analógicos utilizan una aguja para visualizar las lecturas mediante una aguja, que se mueve de manera continua, al igual que la magnitud que se intenta medir.

En muchos casos, no requieren de alimentación externa, se visualiza de forma más sencilla la variación (crecimiento o decrecimiento) y no son muy sofisticados.

Por otra parte, son más tendenciosos a errores de lectura groseros (por las confusiones en cuanto a las escalas), y tienen poca resolución.

Los instrumentos de medición analógica poseen un **alcance**, que es el valor máximo que puede medir dicho instrumento y una cantidad de divisiones denominadas **deflexiones**, que serán las que indiquen el valor medido según la posición de la aguja.

A partir de estas medidas, puede calcularse la **constante de lectura K**, que es la relación entre el alcance y la máxima cantidad de deflexiones. Esta medida indica la mínima unidad de variación legible.

$$K = \frac{\text{Alcance}}{\alpha \text{MAX}}$$

El **rango de medida** es el tramo de la escala en el cual las lecturas son confiables mientras que el **rango de indicación** corresponde a toda la escala del instrumento.

1.5.2. Instrumentos digitales

Los instrumentos digitales muestran un número de varias cifras en vez de una escala continua. Lo hacen mediante un display digital de varios dígitos, y a veces con alertas sonoras o lumínicas.

Si bien su construcción es más compleja que la de los instrumentos analógicos y requieren una alimentación externa en todos los casos, tienen una alta resolución, evitan los errores de lectura, modifican muy poco el circuito en el que se conectan (impedancia de entrada muy alta) y son muy rápidos.

En algunos casos, se incluye la selección automática de escalas y permiten introducir sus datos directamente en otro sistema (computadoras) para poder procesarlos.

Los instrumentos digitales poseen una determinada **cantidad de dígitos**, que pueden ir de 0 a 9 y un **dígito de sobrerrango**, que sólo puede mostrar 0 ó 1.

La **sensibilidad**, en un instrumento digital, corresponde a el dígito menos significativo del rango.

La **resolución**, por otra parte, no tiene unidad. Para calcularla, se debe pensar en la máxima lectura posible y dividir el valor mínimo que puede medir el último dígito sobre esta lectura máxima. Esto quiere decir, que es el menor cambio posible a observar en la cantidad medida.

$$\text{Resolución} = \frac{1}{10^d} \text{ siendo } d \text{ la cantidad de dígitos}$$

La resolución también se suele expresar como porcentaje.

Con estos datos, se puede hallar la sensibilidad en función de la resolución del instrumento:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Resolución} \times \text{Valor a plena escala}}{1000}$$

La **deriva de la sensibilidad** es la variación que sufre la sensibilidad como consecuencia de las condiciones ambientales en las que se realiza el experimento de medición.

1.5.3. Clase de un instrumento

La clase de un instrumento es uno de los indicadores de la precisión del mismo. Es el valor porcentual que expresa la relación entre el error absoluto y el alcance del mismo:

$$\text{Clase} = \frac{\text{ErrorAbsMax}}{\text{Alcance}} \times 100$$

Ejemplo 1.7. En la figura 1.2, se puede apreciar que la clase del instrumento es 2,5. Como se ve, el alcance máximo es de 50 V. ¿Cuál es el error absoluto máximo que puede producirse?

Solución: Reemplazando en la ecuación de clase:

$$2,5 = \frac{\text{ErrorAbsMax}}{50\text{V}} \times 100 \rightarrow \text{ErrorAbsMax} = \frac{2,5 \times 50\text{V}}{100} = 1,25\text{V}$$

Clase del instrumento	Aplicación
0.05 a 0.1	Patrones de referencia. Calibración de instrumentos. Ensayos de laboratorio muy precisos.
0.2 a 0.5	Ensayos de laboratorio. Contraste de instrumentos de una clase al menos 5 veces mayor
>1	Tableros, paneles de escala vertical, instrumentos portátiles de baja precisión.

1.5.4. Simbología de los instrumentos de medición eléctrica



Figura 1.2: Voltímetro Clase 2,5

Capítulo 2

Errores

Las mediciones no son exactas, ya que, suponiendo que no exista ningún error humano en el proceso de medición, dependen de la precisión del instrumento. En otras palabras, toda medida estará afectada por un error.

2.0.1. Error absoluto

Si se supone una medida X_v teórica ideal exacta y X_m el valor medido real, el error absoluto E_{abs} se define como la diferencia entre ambos:

$$E_{abs} = X_m - X_v$$

2.0.2. Tolerancia

En la mayoría de los casos, es posible calcular el mayor error absoluto posible (límite de error) en una medición, recurriendo al análisis de las características de los instrumentos y de las técnicas utilizadas. Así, se podría expresar una medición con su respectiva tolerancia, para indicar el grado de precisión de dicha medida.

Ejemplo 2.1. Un capacitor posee una capacidad de $10\mu F \pm 0,1\mu F$. Esto significa que su valor real estará comprendido entre $9,9\mu F$ y $10,1\mu F$.

Ejemplo 2.2. Un resistor posee una resistencia de $1000\Omega \pm 5\%$. Esto significa que su valor real estará comprendido entre 950Ω y 1050Ω .

Valor verdadero probable

Debido a que se desconoce el valor verdadero original, se tomará el valor verdadero probable X'_v , que considerará todas las causas de error posibles (por el operador, por el método y por el instrumento utilizado).

De ese modo, se puede redefinir el error absoluto como:

$$E_{abs} = X_m - X'_v$$

2.0.3. Error relativo

El error relativo permite conocer la magnitud de un error cometido. Se calcula efectuando el cociente entre el error absoluto y el valor real.

$$E_{rel} = \frac{X_m - X'_v}{X'_v}$$

Error relativo porcentual

Suele ser útil expresar el error relativo como porcentaje. Para eso, multiplicamos el error relativo E_{rel} por 100:

$$e \% = 100 \times E_{rel}$$

Ejemplo 2.3. Se tomó la medición de la tensión de una rama de un circuito, obteniendo un valor de 30V, y un valor real de 27V.

Hallar el error absoluto, el error relativo y el error relativo porcentual.
Solución:

$$E_{abs} = 30V - 27V = 3V$$

$$E_{rel} = \frac{3V}{27V} \approx 0,1111V$$

$$e \% = 100 \times 0,1111V = 11,11\%$$

Ejemplo 2.4. Se tomó la medición de la tensión de una rama de un circuito, obteniendo un valor de 233V, y un valor real de 230V.

Hallar el error absoluto, el error relativo y el error relativo porcentual.

Solución:

$$E_{abs} = 233V - 230V = 3V$$

$$E_{rel} = \frac{3V}{230V} \approx 0,01304V$$

$$e \% = 100 \times 0,01304V = 1,3\%$$

Nótese que, si bien en ambos ejemplos el error absoluto es el mismo, el error relativo del ejemplo 2.3 es mucho mayor que la del ejemplo 2.4; por lo que la segunda medición es mucho más precisa.

2.1. Clasificación de los errores

2.1.1. Errores humanos

Son los errores producidos por una mala elección del instrumento o del método, por una mala interpretación del operario (como por ejemplo una transposición de cifras), o bien por una implementación errónea (una lectura en escala incorrecta).

Es posible detectar errores groseros controlando de forma permanente la coherencia de los valores dentro de una serie de mediciones. Si existe un valor que resulte sospechoso para el contexto en el cual se tomó, entonces debería revisarse.

2.1.2. Errores sistemáticos

Son errores que se producen en todas las mediciones tomadas.

Pueden producirse por:

- Errores en el método utilizado.
- Errores en los instrumentos, ya sea por la clase de los mismos como por el desgaste natural o el uso en condiciones inadecuadas.
- Errores por tendencia del observador, ya sea en exceso o en defecto.
- Errores condicionados por el ambiente. Aspectos como la temperatura, humedad, vibraciones o presión, pueden afectar la precisión de un instrumento o de la técnica utilizada.

Capítulo 3

Magnitudes eléctricas

En este capítulo, arribaremos a definir **intensidad de corriente eléctrica**, **tensión eléctrica**, **resistencia eléctrica**, y veremos cómo estas tres magnitudes se encuentran relacionadas. Para ello, será necesario contar con nociones acerca de los átomos y su estructura. Tranquilo... no nos detendremos demasiado en estas ideas, pero debés saber que son fundamentales para poder construir una base sólida en la comprensión de los fenómenos eléctricos.

3.1. El átomo

La materia está constituida por unidades muy pequeñas (del orden de los picómetros) llamadas **átomos**.

Para tener una noción más clara de la pequeñez de los átomos, *el diámetro de un átomo es al diámetro de una manzana como el diámetro de una manzana es al diámetro de la Tierra*.

A su vez, estos átomos poseen un **núcleo**, formado por **protones** y **neutrinos**, y uno o varios **electrones**; todos atraídos o repelidos por lo que se conoce con el nombre de **fuerza eléctrica**.

Si en el Universo, todas las partículas se atrayeran entre sí, entonces toda la materia estaría comprimida en un único bloque compacto.

Si, por el contrario, todas las partículas se repelieran, el Universo sería un gas en permanente expansión.

Es lógico pensar entonces, que estos tres tipos de partículas (protones, neutrones y electrones), se encuentren atraídas o repelidas entre sí de manera equilibrada para que el Universo pueda subsistir tal y como lo conocemos.

Se dice que los protones tienen carga eléctrica positiva, que repele cargas positivas pero que atrae cargas negativas. Entonces, estos protones positivos

en el núcleo, atraen a una nube de electrones negativos a su alrededor para constituir el átomo.

Los electrones, con carga negativa, son atraídos por el núcleo positivo de protones, pero se rechazan entre sí. Son muy ligeros y se mueven muy rápido.

Debido a este rechazo entre los electrones, no atravesamos una pared al tocarla, ya que los electrones de nuestra mano rechazan a los electrones de la pared.

Si bien la masa de un protón es mucho mayor a la de un electrón, ambos poseen la misma cantidad de carga eléctrica (es decir que un electrón es tan negativo como positivo es un protón).

Las fuerzas eléctricas de atracción y repulsión, harán que las cargas de un átomo se encuentren balanceadas. En otras palabras: un átomo tendrá la misma cantidad de protones que de electrones, y entonces es eléctricamente neutro.

Aunque los átomos tengan carga neutra, es posible que los electrones de sus capas externas, sean atraídos por el núcleo de otros átomos, provocando una “asociación” que da lugar a la formación de moléculas.

3.1.1. Fuerza eléctrica

Según la cantidad de electrones que se encuentren atraídos al núcleo de un átomo, se organizarán en diferentes capas o niveles de energía. Mientras la distancia al núcleo sea mayor, la **fuerza eléctrica** será menor.

La fuerza eléctrica es una magnitud vectorial, que aparece entre dos cuerpos cargados eléctricamente, y puede ser de atracción o de repulsión.

Para comprender mejor la fuerza eléctrica, puede recurrirse a una analogía con la fuerza magnética: A medida que se acerca un imán fijo a un metal, se puede percibir que la fuerza de atracción entre ambas piezas es mayor, y a medida que se aleja, la fuerza es menor.

La fuerza eléctrica entre dos cuerpos cargados se calcula mediante la Ley de Coulomb:

$$F = k \times \frac{q_1 \times q_2}{d^2}$$

- $k = 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$
- q_1 y q_2 son las cantidades de carga de ambos cuerpos, expresados en Coulombs.
- d es la distancia que separa ambos cuerpos.

Con respecto a la unidad de carga, 1 Coulomb equivale a aproximadamente $6,241509 \times 10^{18}$ electrones, o 6,24 millones de billones de electrones... que si bien es una cantidad enorme, sólo representa a la carga que pasa por un cargador de teléfono celular durante unos pocos segundos.

3.1.2. Materiales conductores y aislantes

Aplicando esta Ley, puede deducirse que los electrones de un átomo pueden estar fuerte o débilmente atraídos por el núcleo según la distancia que mantengan con respecto al núcleo.

Si la atracción entre el núcleo y alguno de sus electrones es débil, ese material es conductor. Si, por el contrario, todos los electrones del átomo se encuentran fuertemente atraídos por el núcleo, no se podrán desprender con facilidad del átomo y por lo tanto son materiales aislantes.

Pero la atracción de los electrones con los núcleos de sus respectivos átomos no depende sólo de su “cercanía al núcleo” sino también de la completud de las capas: los átomos con capas completas suelen ser estables y los átomos con capas incompletas suelen tener más facilidad para ceder electrones (recordando que un material que cede electrones con facilidad es un conductor).

Una capa de electrones puede contener hasta $2n^2$ electrones, donde n es el número de capa.

Tomando como ejemplo el cobre, cuyos átomos poseen 29 protones y 29 electrones, los electrones se encuentran distribuidos de la siguiente forma:

- Capa 1: 2
- Capa 2: 8
- Capa 3: 18
- Capa 4: 1

El electrón de la cuarta capa, se encuentra alejado del núcleo, y además, está en una capa incompleta, porque la cuarta capa puede contener hasta $2 \times 4^2 = 32$ electrones, y por estos motivos el cobre es buen conductor de corriente eléctrica.

Si hubiera, en las inmediaciones del átomo de cobre, una fuerza de atracción lo suficientemente fuerte, el electrón de la cuarta capa se liberaría del átomo padre, quedando el átomo con 29 protones y 28 electrones y carga positiva. Cuando esto ocurre, el átomo se convierte en un ion positivo.

3.2. Diferencia de potencial eléctrico o tensión

Algo similar ocurre en todas las baterías: una separación de cargas positivas y cargas negativas, a través de medios químicos.

Una fuente de tensión no es más que un dispositivo con regiones de carga positiva y carga negativa. Mientras mayores sean estas cargas, mayor será la tensión o voltaje.

Para efectuar este proceso de separación de cargas, es necesario gastar cierta energía. Así, la **diferencia de potencial** se define como el trabajo necesario para mover estas cargas.

$$\text{Dif. de potencial eléctrico } V = \frac{\text{energía potencial } W}{\text{carga } Q} \quad (3.1)$$

Si utilizamos las unidades del S.I., se dice que *1 Volt de potencial equivale a 1 Joule de energía por 1 Coulomb de carga*

$$1V = 1 \frac{J}{C}$$

Ejemplo 3.1. Determinar la tensión entre dos puntos si se requieren 80 J de energía para mover 20 C de carga.

Solución: Aplicando la ecuación 3.1, se tiene

$$\frac{80J}{20C} = 4V$$

Ejemplo 3.2. Determinar la energía consumida para mover una carga de 0,05 C entre dos puntos si la tensión entre los mismos es de 10 V.

Solución: De la ecuación 3.1, se despeja

$$\text{Energía potencial} = \text{Potencial eléctrico} \times \text{carga}$$

Luego

$$0,05C \times 10V = 0,5J$$

3.3. Intensidad de corriente eléctrica

La corriente eléctrica o intensidad de corriente eléctrica, es el flujo de cargas eléctricas; es decir, el movimiento de electrones a lo largo del tiempo.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (3.2)$$

La unidad que utilizamos para la corriente es el Ampere, y equivale a 1 Coulomb de carga fluyendo durante 1 segundo de tiempo:

$$1A = \frac{1C}{1s}$$

Ejemplo 3.3. Determinar la corriente eléctrica en Amperes si la carga que fluye es de 0,01 C durante 5 mS.

Solución: De la ecuación 3.2 se sabe que las unidades deberán ser Coulomb para las cargas y segundos para el tiempo. Por ello, debe realizarse la conversión $5\text{mS} = \frac{5}{1000}\text{S} = 0,005\text{S}$, y a continuación, aplicar la ecuación, obteniendo:

$$I = \frac{0,01\text{C}}{0,005\text{S}} = 2\text{A}$$

Ejemplo 3.4. Calcular cuánto tiempo deberá pasar para que circule 1 C de carga si la corriente en un circuito es de 0,3 A.

Solución: De la ecuación 3.2 se despeja el tiempo, obteniendo:

$$t = \frac{Q}{I} \quad (3.3)$$

Y luego, es inmediato que

$$t = \frac{1\text{C}}{0,3\text{A}} = (1/3)\text{S} \approx 0,333\text{S}$$

3.4. Relación entre tensión y corriente: la resistencia

Es común confundir tensión con corriente, pero son dos términos completamente diferentes.

Aplicar una tensión a un material conductor hará que fluya corriente eléctrica por el mismo.

La tensión es la causa, mientras que la corriente es la consecuencia.

Sin tensión no puede haber corriente eléctrica, pero sí puede existir tensión entre dos puntos sin una corriente que circule entre los mismos (esto ocurre, por ejemplo, entre los bornes de una pila que no está conectada en un circuito, ya que existe tensión pero no hay corriente circulando entre los mismos).

Si la tensión es la causa de la corriente, evidentemente una modificación de los valores de tensión alterará la corriente obtenida.

La **resistencia** es la medida de la oposición que presenta un determinado material al paso de la corriente eléctrica. Para medirla, se utiliza como unidad el **Ohmio**, que se simboliza con la letra griega Ω .

3.4.1. Ley de Ohm

Si se piensa en una definición del tipo *Efecto* = $\frac{\text{Causa}}{\text{Oposición}}$, se puede definir la **Ley de Ohm** como sigue:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.4)$$

donde V es la tensión en Voltios, I es la intensidad de corriente en Amperes y R es la resistencia en ohmios.

Figura 3.1: Circuito básico

De la ecuación 3.4 se pueden despejar:

$$V = I \times R \quad (3.5)$$

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.6)$$

3.5. Potencia (para corriente continua)

La **potencia** es la cantidad de trabajo que puede realizarse en una cantidad de tiempo. En otras palabras, es *la velocidad a la que se realiza un trabajo*.

Ejemplo 3.5. Un motor GRANDE posee más potencia que un motor PEQUEÑO porque puede realizar más trabajo en la misma cantidad de tiempo.

En términos analíticos, la potencia (en Watts o vatios) es la relación entre trabajo (en Joules) y tiempo (en segundos).

$$P = \frac{W}{t} \quad (3.7)$$

Despejando W en la ecuación 3.1, se obtiene $W = QV$. Esto puede aplicarse en la ecuación 3.7, obteniendo:

$$P = \frac{QV}{t} = V \frac{Q}{t}$$

Finalmente, reemplazando la ecuación de corriente 3.2 en ésta última, se obtiene:

$$P = V \times I \quad (3.8)$$

También puede reemplazarse esta última ecuación en la Ley de Ohm, obteniendo:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.9)$$

$$P = I^2 R \quad (3.10)$$

3.5.1. Energía

Para que la potencia convierta energía de cualquier forma, se debe utilizar durante un tiempo. Cuanto más tiempo se consuma la potencia, mayor será la energía consumida.

$$W = P \times t \text{ energía en Watts/hora} \quad (3.11)$$

$$W = P \times t \times 1/1000 \text{ energía en kiloWatts/hora} \quad (3.12)$$

La energía W se medirá en Wh (watts/hora) o kWh (kilowatts/hora) según convenga.

Nótese que la unidad para el tiempo establecida por el SI es el segundo, pero en este caso resulta muy pequeño (y por lo tanto los valores medidos usando esta unidad serían muy grandes), y debe tenerse especial cuidado al operar con estas magnitudes, ya que puede ser necesario realizar conversiones.

3.5.2. Eficiencia

La eficiencia η (eta) se define como la relación entre la **potencia de entrada** y la **potencia de salida** del sistema.

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (3.13)$$

Este es un valor decimal que varía entre 0 y 1. Habitualmente, se lo suele expresar en porcentaje (por lo que se debería multiplicar la expresión anterior por 100)

$$\eta \% = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \times 100 \quad (3.14)$$

Si la eficiencia de un sistema fuera del 100 %, esto significaría que su potencia de entrada es igual a la potencia de salida. En la práctica, sabemos que esto no es posible, porque todo sistema tendrá pérdidas por transformación de

energía, y esto implica una diferencia entre las potencias:

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{salida}} + P_{\text{perdida}}$$

3.6. Campos eléctricos

Alrededor de un cuerpo cargado, existirá un **campo eléctrico**. A medida que la distancia al cuerpo sea menor, la **densidad del campo eléctrico** será mayor.

La **densidad de flujo** se define como la relación entre las líneas de flujo y el área que se está evaluando. Como la densidad de carga aumenta consecuentemente con la carga eléctrica, ambas magnitudes (carga y flujo) pueden igualarse.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Carga}}{\text{Área}}$$

La **fuerza del campo eléctrico** F_{ce} es la fuerza que actúa sobre una carga Q en un punto:

$$F_{ce} = \frac{F}{Q}$$

Reemplazando la fuerza en la ecuación anterior según la *Ley de Coulomb*, se obtiene:

$$F_{ce} = \frac{kQ}{r^2} \quad (3.15)$$

Esto quiere decir, que la fuerza del campo eléctrico está relacionada con el tamaño de la carga y la distancia que se mantenga con ésta. A medida que la distancia sea mayor, la fuerza eléctrica será *mucho menor* (dado que el término en el denominador está elevado al cuadrado).

3.6.1. Capacitores

Existe un componente eléctrico cuyo principio de funcionamiento está directamente relacionado con los campos eléctricos: **el capacitor**.

Construcción y principio de funcionamiento

Un capacitor está constituido por dos placas conductoras paralelas separadas a una distancia mínima, por un material **dieléctrico** (aislante), que puede ser aire, mica, cerámica, poliéster, entre otros.

Dado el circuito de la figura 3.2, al cerrar el interruptor y por ahora omitiendo la resistencia (o suponiendo que posee una resistencia de 0Ω), la placa inferior se comenzará a cargar con electrones libres, y la placa superior con cargas positivas.

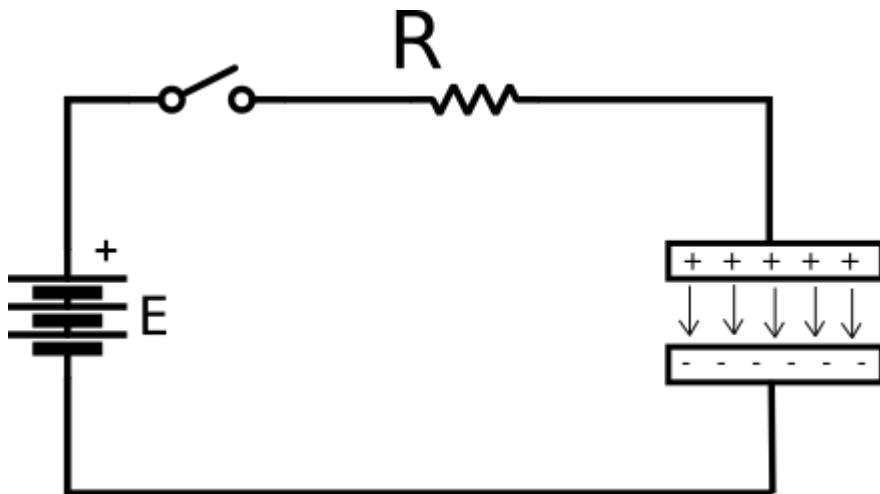


Figura 3.2: Circuito de carga básico de un capacitor

Entre las placas, se alcanzará la tensión de la fuente E.

Como la distancia entre ambas es muy pequeña, las cargas se verán atraídas por una fuerza eléctrica (que recordando la ecuación 3.15, será mayor si la distancia entre ambas es menor), y permanecerán atraídas incluso si se elimina la fuente de alimentación (o si se abre el circuito con el interruptor).

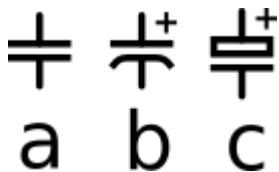


Figura 3.3: Símbolos del capacitor: (a) No polarizado, (b) y (c) Polarizado

Capacitancia

La **capacitancia** de un capacitor es la cantidad de cargas que puede almacenar en él, cuando está completamente cargado.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.16)$$

La unidad utilizada para medir la capacidad es el **Farad**, y 1 Farad de carga equivale a una carga de 1 Coulomb a una diferencia de potencial de 1 volt.

$$1\text{Farad} = \frac{1\text{C}}{1\text{V}}$$

Redefiniendo la ecuación 3.15 para el caso del capacitor, resulta

$$F_{ce} = \frac{V}{d} \quad (3.17)$$

considerando la fuerza eléctrica en *Voltios/metro*, la tensión en *voltios* y la distancia en *metros*.

El campo eléctrico también es afectado por la **permitividad** del material que se utiliza como dieléctrico. Un aumento en la permitividad del material, permitirá que la misma carga se almacene con un campo eléctrico menor; es decir, con un potencial eléctrico menor. Analizando la ecuación 3.16, si la tensión disminuye, la capacitancia aumentará. En otras palabras, *si la permitividad del dieléctrico es mayor, la capacidad será mayor*.

La permitividad ϵ se define como $\epsilon = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_0}$, donde ϵ_r es la permitividad relativa del material y ϵ_0 es la permitividad del vacío.

En la siguiente tabla, se recopilan los valores de algunos materiales utilizados para la construcción de dieléctricos de capacidores.

Material	Permitividad relativa
Aire	1,0006
Papel	1,5
Aceite	2,8
Mica	4
Cuarzo	4,5
Baquelita	5
PVC	30 a 40
Agua destilada	80
Acetona	191

Si se desea calcular la capacitancia teniendo en cuenta los valores de permitividad eléctrica, la ecuación es la siguiente,

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (3.18)$$

considerando ϵ en *Farad/metro*, el área en metros cuadrados, la distancia en metros y la capacidad en Farads.

Debe tenerse en cuenta que los capacitores poseen un **voltaje de trabajo máximo**, que representa la máxima tensión que puede aplicarse en forma continua sin dañar el dispositivo. Si se excede, se puede dañar el dieléctrico.

3.7. Campos magnéticos

Alrededor de un imán permanente existe un campo magnético. Así como se usaron líneas de campo eléctrico para representar los efectos de un campo eléctrico, se usarán **líneas de flujo magnético** para describir el comportamiento de los campos magnéticos.

Las líneas de flujo irradian del polo norte al polo sur del imán, y regresan al norte por el interior del mismo.

Si el imán se divide, aparecerán nuevos polos norte y sur en cada material.

Como se sabe popularmente, los polos opuestos de los imanes generan una fuerza de atracción, mientras que los polos semejantes se repelerán.

Los materiales en los cuales es posible establecer con facilidad líneas de flujo magnético son **ferromagnéticos**, mientras que aquellos que provocan más dificultad para esta tarea son **diamagnéticos**. La magnitud que distingue esta propiedad (el magnetismo) de un material, es la **permeabilidad** y se simboliza con μ .

Si un material **diamagnético** se interpone en un campo magnético, no le provocará una interferencia demasiado grande, y el campo lo atravesará, casi como si este material no estuviera. Si, por el contrario, se interpone un material **ferromagnético**, el campo pasará por el material en vez de por el aire, modificando la trayectoria de las líneas de flujo.

Alrededor de todo conductor por el que circule una corriente, existirá un campo magnético.

Si es un conductor como el de la figura 3.4, aparecerá un campo magnético, con líneas de flujo en el sentido mostrado por las líneas azules.

Si, en cambio, el conductor es una espira como la de la figura 3.5, el campo resultará en una dirección común, como muestra la flecha azul gruesa.

Finalmente, por un bobinado (más de una vuelta), como el de la figura 3.6, se producirá un campo magnético de trayectoria continua, muy parecida a la de un imán permanente. Este es el principio de funcionamiento del electroimán.

La cantidad de líneas de flujo por área unitaria se denomina **densidad de flujo**,

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (3.19)$$

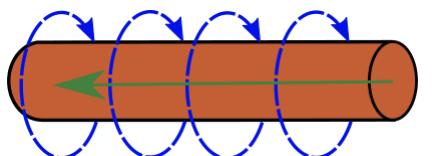


Figura 3.4: Sentido de la corriente y del campo magnético en conductor de un hilo

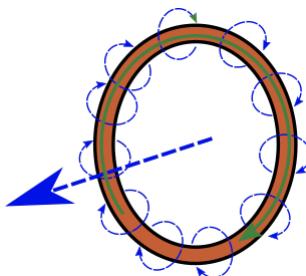


Figura 3.5: Sentido de la corriente y del campo magnético en una espira

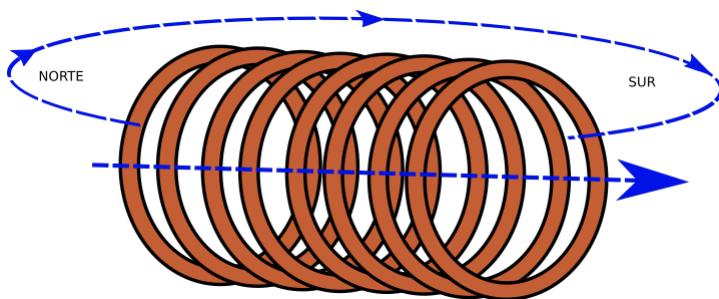


Figura 3.6: Sentido de la corriente y del campo magnético en una bobina

Siendo las unidades utilizadas en el Sistema Internacional:

- Teslas (T) para la densidad,
- Weber (Wb) para el flujo magnético y
- Metros cuadrados (m^2) para el área.

La densidad de flujo en un electroimán se relaciona de manera directa con el número de vueltas del bobinado (N) y la corriente que lo atraviesa (I). Estas dos magnitudes se relacionan dando lugar a la **fuerza magnetomotriz**:

$$F_m = N \times I \quad (3.20)$$

3.7.1. Inductores

El dispositivo descrito en la sección anterior se llama **inductor**, y consiste simplemente en un bobinado por el cual se hace circular una corriente eléctrica.

La fuerza del campo magnético es determinada por la **inductancia** del inductor.

La inductancia es la medida de la oposición a un cambio de corriente en el inductor y se mide en Henries (H).

Existen varios factores que intervienen en los valores de inductancia:

- Permeabilidad del material del núcleo μ ($Wb/A \times m$).
- Cantidad de vueltas del devanado N .
- Área A (m^2).
- Longitud l (m).

Todos estos valores se relacionan en la siguiente ecuación:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (3.21)$$

3.8. Sobre la resistencia, capacidad e inductancia

Cuando se observa un circuito con un símbolo de resistencia, se piensa inmediatamente en el componente eléctrico resistor. De igual manera, ocurre al observar los símbolos de capacitor e inductor. En muchos casos, estos símbolos se utilizan para representar otros elementos que consuman o absorban energía. Por ejemplo, una resistencia puede ser un calefactor o una lámpara, o un inductor podría ser un parlante o un motor.

La inductancia aparecerá alrededor de cualquier conductor por el cual circule corriente eléctrica. En los capítulos siguientes, se trabajará brevemente con estas magnitudes, para poder analizar su comportamiento transitorio y en frecuencia, que es donde surgen sus propiedades más interesantes.

3.9. Régimen transitorio en circuitos con capacitores e inductores

3.9.1. Redes capacitivas

Los cambios en los circuitos en las redes que poseen inductancia y capacidad no son instantáneos. Por ello, es conveniente evaluar el **régimen transitorio** de los circuitos, que corresponde a la respuesta que se produce ante una variación en el circuito hasta que se alcanza el **régimen permanente**, que es el momento en el cual los valores permanecen estables. En el caso de una red capacitiva, los transitorios son:

- Fase de carga.
- Fase de descarga.

En una red inductiva, los transitorios son:

- Fase de almacenamiento.
- Fase de liberación.

Fase de carga de una red capacitiva

Al conectar un capacitor C a una fuente de alimentación V (por el momento, se supondrá que es continua) en serie con una resistencia R, éste acumula carga entre sus placas. Al principio, el movimiento de cargas es muy veloz, pero transcurrido un tiempo, el incremento es mucho más lento, hasta que finalmente se estabiliza. Esto se modela con la ecuación:

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{-t/\tau} \quad (3.22)$$

Donde $\tau = RC$ se denomina **constante de tiempo** y se mide en segundos.

Para deducir que τ refiere a tiempo, se utilizará la Ley de Ohm, la ecuación 3.16 y la ecuación 3.2:

$$\tau = RC = (V/I)(Q/V) = \left(\frac{V}{Q/t}\right)(Q/V) = t$$

Por el contrario, la tensión en el capacitor será mínima en el instante en el cual se suministra tensión entre las placas, e irá aumentando a medida que las placas se vayan cargando. Cuando esto ocurra, la tensión será la de la fuente. Esto se modela con la ecuación:

$$v(t) = V(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.23)$$

Como una buena aproximación, se sabe que luego de cinco constantes de tiempo, la carga del capacitor es casi completa (más el 90 %). Esto suele ser útil para realizar cálculos y estimaciones.

Para demostrarlo, se reemplaza $t = 5\tau$ en la ecuación 3.23, obteniendo:

$$\begin{aligned} v(5\tau) &= V(1 - e^{-5\tau/\tau}) \\ v(5\tau) &= V(1 - e^{-5}) \\ v(5\tau) &= V - Ve^{-5} \\ v(5\tau) &= V - 0,07358V \\ v(5\tau) &= 0,926V \end{aligned}$$

Lo que ocurre con la corriente en este periodo de tiempo es que se vuelve muy cercana a 0A, debido a que las placas están casi cargadas por completo. El razonamiento es el mismo, pero reemplazando $t = 5\tau$ en la ecuación 3.22, y se dejará para ejercicio del lector.

Conclusiones 3.9.1. La tensión de un capacitor no varía de forma instantánea.

Durante la fase de carga, la corriente comienza siendo muy alta, pero luego de cinco constantes de tiempo, se vuelve cercana a 0 A. Por el contrario, la tensión comienza siendo 0 V y transcurridos cinco constantes de tiempo, se vuelve cercana al valor de la fuente de alimentación.

El mayor cambio de voltaje y de corriente ocurren durante la primera constante de tiempo.

Cuando el transitorio comienza, el circuito equivalente del capacitor es un cortocircuito, pero cuando el transitorio finalizó, el circuito equivalente del capacitor es un circuito abierto.

Fase de descarga de una red capacitiva

La manera más rápida de descargar un capacitor es cortocircuitando sus contactos. Esto hará que la corriente fluya de una placa a la otra de forma acelerada, pero esto conlleva varios riesgos para el operario y para el componente, que, como mínimo, provocará un chispazo, dependiendo de su capacidad.

Si se piensa en el circuito utilizado para la fase de carga (batería en serie con resistencia y capacitor), cortocircuitando la batería (o reemplazándola por un cable), el capacitor se descargará por la resistencia de forma más lenta y segura, pero es importante notar que la polaridad de la corriente se invertirá. La curva de descarga de la tensión será similar a la curva de carga de la corriente:

$$v(t) = Ve^{-t/\tau} \quad (3.24)$$

Y la corriente será la misma que en la fase de carga, pero con la polaridad invertida:

$$i(t) = -\frac{V}{R} e^{-t/\tau} \quad (3.25)$$

Al igual que en la fase de carga, se supone que la fase de descarga estará casi completa luego de cinco constantes de tiempo.

En este análisis de respuesta transitoria, se omitirán las condiciones iniciales. Esto quiere decir, que se supondrá que los capacitores **siempre están descargados**.

3.9.2. Redes inductivas

Fase de almacenamiento en una red inductiva

Existen semejanzas entre la **tensión de una bobina** y la **corriente de un capacitor**. Para el siguiente análisis, se supondrá un circuito RL serie (fuente de tensión continua, interruptor, resistencia e inductor).

Así como un capacitor almacena energía en forma de campo eléctrico entre sus placas, una bobina almacena energía en forma de campo magnético. En el instante en el que se cierra el interruptor, la bobina ofrece una **acción de bloqueo**, efecto de la *Ley de Lenz* (refiérase al capítulo correspondiente a *Máquinas eléctricas* para un mejor desarrollo). Esta acción de bloqueo, impedirá la aparición de corriente de manera instantánea, provocando una curva de respuesta de corriente muy similar a la de tensión del capacitor: al principio $i_L = 0$, luego se incrementará rápidamente, y finalmente se acercará con menor rapidez al valor determinado por la red V/R . Este comportamiento es modelado con la siguiente ecuación:

$$i(t) = \frac{V}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.26)$$

Con la constante de tiempo, esta vez definida como $\tau = \frac{L}{R}$, extendiéndose el análisis sobre la misma realizada con los capacitores.

La tensión en la bobina será:

$$v(t) = Ve^{-t/\tau} \quad (3.27)$$

Conclusiones 3.9.2. La fase de almacenamiento finaliza aproximadamente en cinco constantes de tiempo.

En una red inductiva, el cambio de corriente nunca es instantáneo, debido a sus características de bloqueo.

Apenas se cierra el interruptor, la bobina se convierte en un circuito abierto, pero luego de que finalice su fase de almacenamiento, se comporta como un cortocircuito.

Fase de liberación en una red inductiva

En una red capacitiva, la energía se mantenía almacenada en forma de campo eléctrico, aún cuando se desconectara la fuente de tensión, debido a la atracción de cargas entre las placas (sólo se descargaría por las corrientes de fuga). En un inductor, al eliminar el flujo de corriente eléctrica, el campo magnético se liberará rápidamente, y la reducción abrupta de corriente provocará un chispazo en los contactos. Como la tensión es producto de la **variación en la corriente**, y la variación es abrupta, la tensión será muy alta.

Al liberar la energía, el inductor sigue la curva de descarga de las siguientes ecuaciones de tensión y corriente respecto del tiempo:

$$v(t) = -Ve^{-t/\tau} \quad (3.28)$$

$$i(t) = \frac{V}{R}e^{-t/\tau} \quad (3.29)$$

Conclusiones 3.9.3. Los inductores y capacitores, idealmente, no disipan energía, sino que la almacenan como campo eléctrico (en el caso del capacitor) o como campo magnético (en el caso del inductor).

Todas las fases transitorias analizadas tienen una duración aproximada de cinco constantes de tiempo.

Capítulo 4

Corriente alterna

Cuando en una gráfica de **tensión en función del tiempo** se observa un nivel de tensión por arriba del eje de abscisas, se considera positivo. Cuando está por debajo del eje, se considera negativo, y por lo tanto, representa a una corriente que está circulando en sentido contrario.

De esa manera, una tensión que se encuentre sin cruzar el eje en un determinado período de tiempo, se denomina **continua**. Si el sentido de la corriente cambia de forma periódica (es decir, pasa de negativa a positiva o viceversa, y se repite su forma de onda al transcurrir un determinado tiempo), se denomina **alterna**.

Ejemplo 4.1. En las imágenes se pueden apreciar distintas variaciones de la tensión a lo largo del tiempo.

- En la **figura 4.1**, la tensión es continua.
- En la **figura 4.2**, la tensión es alterna, y tiene una forma de onda cuadrada.
- En la **figura 4.3**, la tensión es alterna, y tiene una forma de onda senoidal.
- En la **figura 4.4**, la tensión, si bien tiene forma de onda senoidal, es continua, porque se encuentra siempre por arriba del eje de abscisas. En otras palabras: nunca cambia su sentido, sino que sólo varía su valor de tensión.

Sí bien existen varias formas de ondas de corriente alterna (triangular, cuadrada), la más difundida es la **forma senoidal**, que se puede apreciar en la figura 4.3. Esto es así, porque es el voltaje que se genera en las plantas eléctricas y

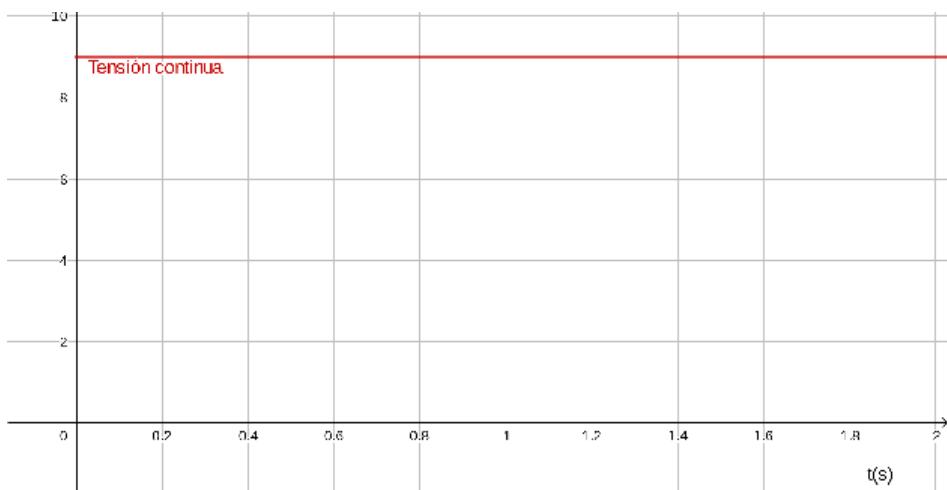


Figura 4.1: Corriente continua

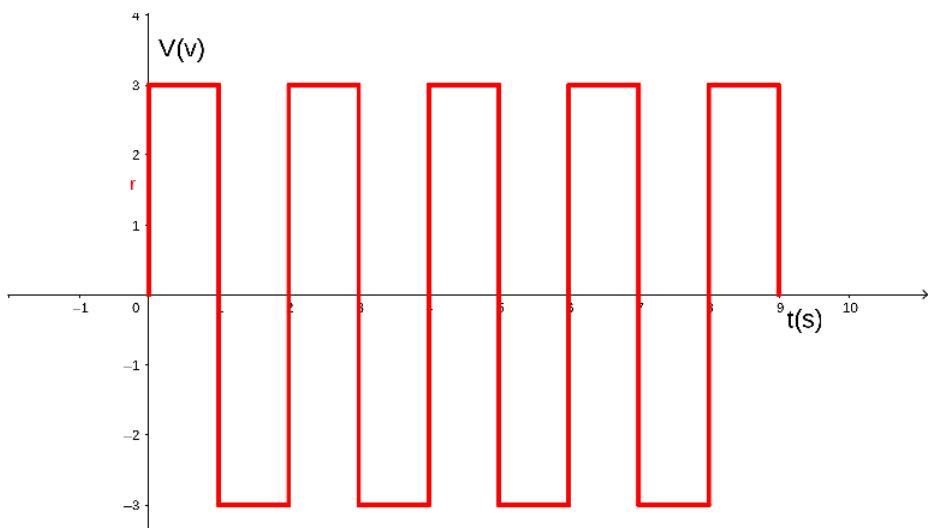


Figura 4.2: Corriente alterna cuadrada

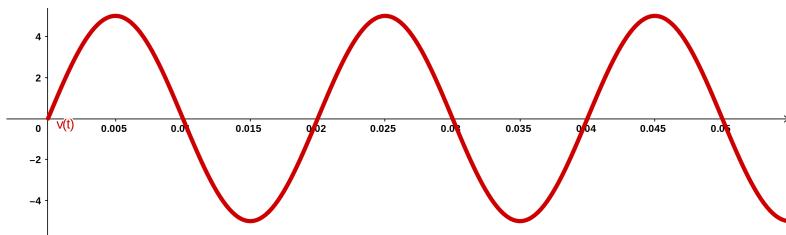


Figura 4.3: Corriente alterna senoidal

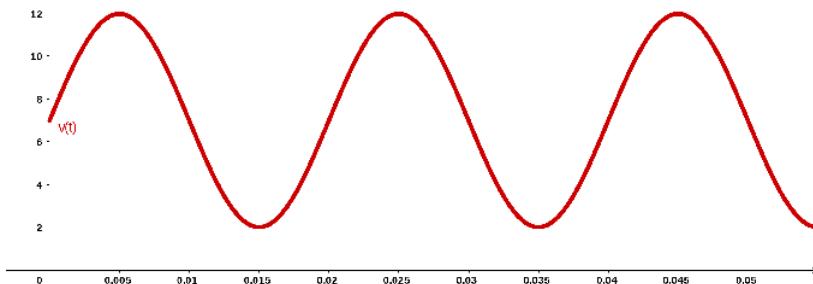


Figura 4.4: Corriente con forma senoidal no alterna

porque, además, permite realizar ciertos cálculos matemáticos que la explican y predicen, aunque son algo más complejos que los de corriente directa o continua.

4.1. Corriente alterna senoidal

En la figura 4.5 se puede distinguir una onda alterna senoidal. Pueden distinguirse los siguientes parámetros:

- Valor instantáneo: magnitud de una forma de onda en cualquier instante. Se han indicado como ejemplos e_1 , e_2 y e_3 .
- Valor pico: valor instantáneo máximo medido con respecto al nivel de 0 Volts. En la gráfica, se indicó como V_p . También se indicó el valor de pico negativo como $-V_p$.
- Valor pico a pico: tensión entre V_p y $-V_p$. Es la suma entre las magnitudes de los valores de pico positivo y negativo.
- Ciclo: parte más pequeña de una onda hasta que comienza a repetirse.
- Periodo T : Tiempo que dura un ciclo. En el ejemplo se tiene 3 períodos (de O a T_1 , de T_1 a T_2 y de T_2 a T_3 , aunque pueden indicarse otros períodos).
- Frecuencia f : es la cantidad de ciclos que ocurren en 1 segundo. La frecuencia se mide en hertz (Hz), donde 1 Hertz = 1 ciclo por segundo.

Del desarrollo anterior, se desprende que:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

Y que:

$$T = \frac{1}{f} \quad (4.2)$$

Donde **T** se mide en segundos, y f se mide en Hz (Hertz).

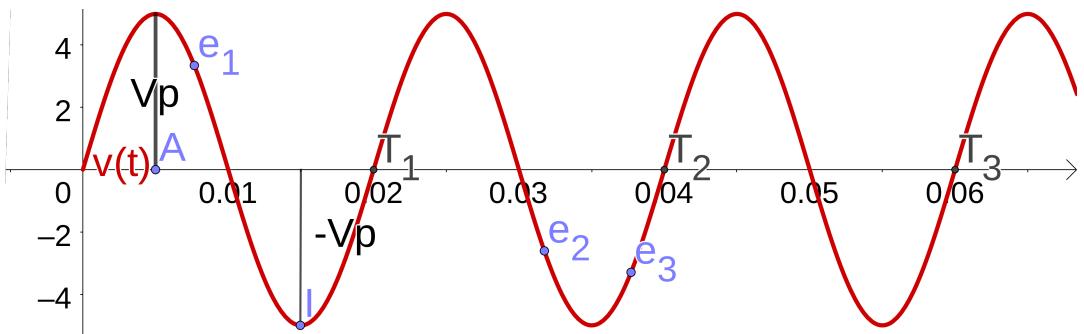


Figura 4.5: Corriente alterna senoidal: parámetros

Ejemplo 4.2. En la figura 4.6 se puede apreciar una onda senoidal que representa la tensión utilizada en Argentina.

El valor de pico es $V_p = 311 \text{ V}$ y el periodo $T = 0,02 \text{ s}$.

La frecuencia es

$$f = \frac{1}{0,02 \text{ s}} = 50 \text{ Hz}$$

El valor de pico a pico es

$$V_{pp} = 2 \times 311 \text{ V} = 622 \text{ V}$$

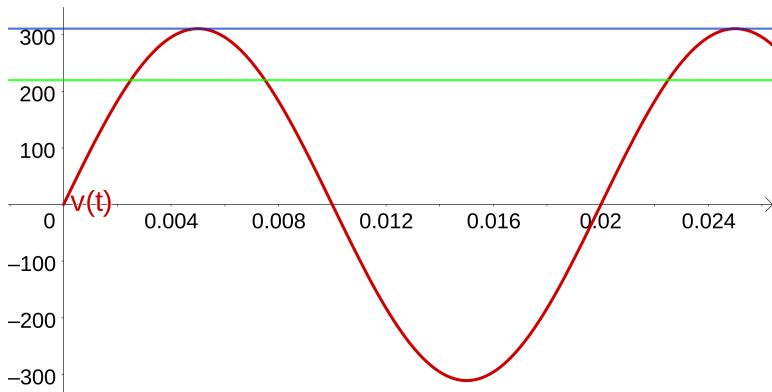


Figura 4.6: Corriente alterna en Argentina. En color azul, la tensión de pico y en color verde, la tensión eficaz

4.1.1. Definición matemática

Si se desea considerar a la tensión (en voltios) en función del tiempo (en segundos) para una forma de onda senoidal, se deberá partir de la función

$$v(\alpha) = \operatorname{sen}(\alpha)$$

Obsérvese que en vez de utilizarse la variable t (que se suele utilizar para indicar tiempo como número real), se ha definido un ángulo α . Esto se debe a que la función senoidal está definida como el conjunto de valores que se obtienen al proyectar verticalmente un vector de radio que gira con movimiento circular uniforme alrededor de un punto fijo. La forma senoidal completa se trazaría luego de haber completado una rotación de 360 grados alrededor del centro (o 2π radianes).

Suele ser más cómodo trabajar con **radianes** en vez de **grados sexagesimales** para medir los ángulos y es lo que se hará en este texto.

La idea de **proyectar verticalmente** el vector proviene de la trigonometría, ya que el $\operatorname{sen}\alpha = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{radio}}$, como puede apreciarse en la figura 4.7. Como el radio del vector es 1, entonces $\operatorname{sen}\alpha = \text{cateto opuesto}$, que es la **proyección vertical** del vector.

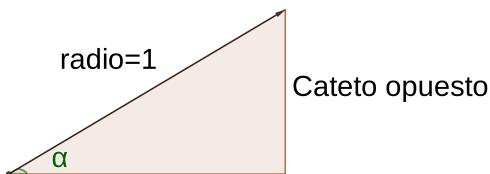


Figura 4.7: Seno en un triángulo rectángulo

Un desarrollo de esta idea puede apreciarse en la figura 4.8.

Figura 4.8: Forma de onda senoidal a partir de la proyección de un radio versor

El vector gira con una velocidad angular ω alrededor del centro, determinada por la ecuación

$$\omega = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{\alpha}{t}$$

lo cual implica que

$$\omega t = \alpha$$

Como una vuelta completa se realiza en un periodo T (que a su vez tarda 360 grados o 2π en realizarse), se puede decir que

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

o bien, si se utiliza la ecuación 4.1,

$$\omega = 2\pi f$$

Volviendo a la ecuación de la tensión en función del tiempo, podría redefinirse como

$$v(t) = \operatorname{sen}(\omega t)$$

, permitiendo expresar, ahora sí, la tensión en función del tiempo.

Sólo falta un detalle... debe observarse que el valor de pico de esta onda es el mismo que el del radio vector (1). Por lo tanto, la forma final de la onda seno

que representa a la tensión en función del tiempo, deberá estar multiplicada por el valor de pico, de la siguiente forma:

$$v(t) = V_p \times \operatorname{sen}(\omega t) \quad (4.3)$$

4.1.2. Relaciones de fase

Si la onda se desplaza θ grados, la expresión de la tensión se vuelve

$$v = V_p \times \operatorname{sen}(\omega t \pm \theta)$$

Si se comparan dos ondas senoidales de la **misma frecuencia**, pueden indicarse relaciones de **adelanto** o de **atraso** de una con respecto a la otra.

Ejemplo 4.3. En la figura 4.9 puede apreciarse la función $v(t) = \operatorname{sen}(\omega t)$ en color rojo y en color azul la función $v(t) = \cos(\omega t)$. Nótese que la forma de onda es exactamente igual al seno, pero con un desplazamiento en el eje horizontal: esto es lo que habitualmente se denomina **desfasaje**. De ese modo, el coseno se podría redefinir como un seno desplazado, o viceversa:

$$\operatorname{sen}(\alpha) = \cos(\alpha - 90)$$

$$\cos(\alpha) = \operatorname{sen}(\alpha + 90)$$

Puede apreciarse en la figura, la función $\operatorname{sen}(\omega t - 90)$ en color verde. Nótese que si el ángulo de desplazamiento es positivo, como en el ejemplo anterior, la curva se desplaza hacia la izquierda, y si el ángulo es negativo, como en este caso, el desplazamiento es hacia la derecha.

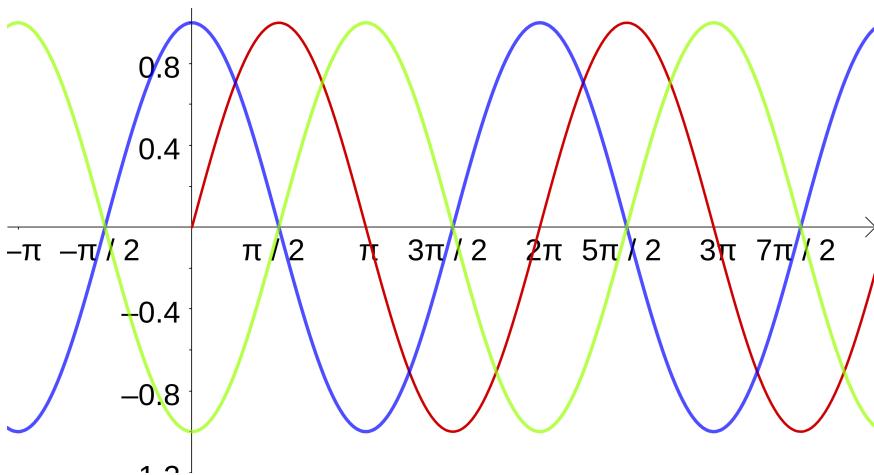


Figura 4.9: Ondas desfasadas

4.2. Valores rms

El **valor RMS** o **valor eficaz**, es el valor de tensión o corriente alterna que produce la misma potencia que su equivalente en corriente continua.

No debe confundirse el valor eficaz con el **valor promedio**. El valor promedio de una tensión es la suma algebraica de las áreas respecto de la longitud de la curva. Si se analiza la corriente alterna senoidal, se observará que el valor promedio de tensión es de 0 V. No ocurre lo mismo con la **tensión eficaz**.

Al analizar la figura 4.10, se puede observar tres ondas senoidales en fase. La más pequeña (azul), corresponde a la corriente eléctrica, medida en Amperes. La onda intermedia es la tensión (roja), expresada en Voltios. Estas ondas, poseen un semicírculo positivo y un semicírculo negativo, lo que indica un cambio en el sentido de la corriente.

La onda que toma mayor amplitud (verde), es la **potencia entregada**, calculada como el producto entre la tensión y la corriente eléctrica. Como se puede observar, todo el tiempo es positiva (excepto en los instantes 0, 0,1s y 0,2s).

Entonces, el problema de hallar la tensión eficaz, reside en observar para qué valor de tensión continua, la potencia entregada sería la misma que la de la onda más grande (verde) de la figura 4.10.

A continuación se supondrá que se aplica una tensión con valor de pico V_p y corriente de pico I_p sobre una resistencia R .

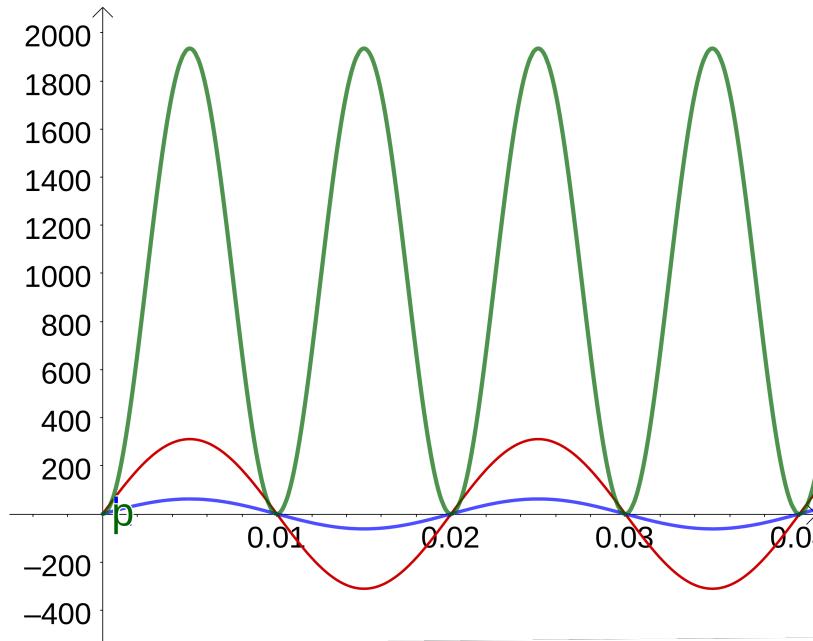


Figura 4.10: Entrega de potencia en una corriente alterna senoidal

$$p(t) = i(t)^2 R$$

$$p(t) = [I_{\text{p}} \text{sen}(\omega t)]^2 R$$

$$p(t) = I_{\text{p}}^2 \text{sen}^2(\omega t) R$$

En este punto se utiliza la identidad trigonométrica $\text{sen}^2(\omega t) = \frac{1}{2}(1 - \cos(2\omega t))$.

$$\begin{aligned} p(t) &= I_{\text{p}}^2 \left[\frac{1}{2}(1 - \cos(2\omega t)) \right] R \\ p(t) &= \frac{I_{\text{p}}^2 R}{2} - \frac{I_{\text{p}}^2 R}{2} \cos(2\omega t) \end{aligned}$$

Se anula el segundo término por poseer valor medio igual a 0

$$p(t) = \frac{I_{\text{p}}^2 R}{2}$$

Como se desea evaluar el valor de corriente continua equivalente, se supondrá que ahora se aplicó una corriente directa I_{DC} a la misma carga resistiva. Su potencia P_{DC} se calcularía de la siguiente forma:

$$P_{DC} = I_{DC}^2 R$$

Al igualar P_{DC} con $p(t)$, se obtiene:

$$\begin{aligned} p(t) &= P_{DC} \\ \frac{Ip^2 R}{2} &= I_{DC}^2 R \\ I_{DC} &= \frac{Ip}{\sqrt{2}} = 0,707Ip \end{aligned}$$

Es decir, que el valor de corriente continua equivalente de una corriente senoidal alterna es 0,707 su valor de pico. Este mismo análisis puede realizarse con la tensión, obteniendo el mismo valor.

Mediante el cálculo se puede demostrar a través de la integración, pero excede los temas de este curso.

Conclusiones 4.2.1. Las siguientes ecuaciones permiten hallar valores eficaces a partir de valores de pico.

$$I_{\text{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{\text{PICO}} = I_{\text{PICO}} \times 0,707 \quad (4.4)$$

$$V_{\text{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{\text{PICO}} = V_{\text{PICO}} \times 0,707 \quad (4.5)$$

Las siguientes ecuaciones, despejadas de las anteriores, permiten encontrar valores de pico a partir de valores eficaces.

$$I_{\text{PICO}} = \sqrt{2} I_{\text{RMS}} = I_{\text{RMS}} \times 1,414 \quad (4.6)$$

$$V_{\text{PICO}} = \sqrt{2} V_{\text{RMS}} = V_{\text{RMS}} \times 1,414 \quad (4.7)$$

4.3. Respuesta en frecuencia

Una vez ha transcurrido el periodo transitorio en capacitores e inductores, puede analizarse estos componentes como se describe en esta sección.

4.3.1. Respuesta del resistor

Para frecuencias de línea (50 Hz en el caso de Argentina), las cargas resistentes tienen un comportamiento lineal, y por ello puede aplicarse directamente la Ley de Ohm para calcular sus tensiones y corrientes.

Figura 4.11: Curvas de respuesta del resistor en corriente alterna

Figura 4.12: Circuito resistivo con una fuente de corriente alterna

$$i = \frac{V_{\text{RMS}} \times \text{sen}(\omega t)}{R} = \frac{V_{\text{RMS}}}{R} \text{sen}(\omega t) = I_{\text{RMS}} \text{sen}(\omega t)$$

Como se observa en la figura 4.11, la fase de la corriente y la tensión es la misma. Por lo tanto, la variación de corriente y tensión ocurren en la misma proporción y puede considerarse:

$$I_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{RMS}}}{R} \quad (4.8)$$

$$V_{\text{RMS}} = I_{\text{RMS}} \times R \quad (4.9)$$

4.3.2. Respuesta del inductor

La tensión a través de un inductor está directamente relacionado con la velocidad de cambio de la corriente a través del mismo. En corriente alterna, esta variación está dada, entre otros factores, por la frecuencia de la red. Por ello, existe una relación entre la frecuencia, la tensión en el inductor y su valor de inductancia.

$$\begin{aligned} v_L &= L \frac{di_L}{dt} \\ v_L &= L \frac{d}{dt} (I_p \times \operatorname{sen}(\omega t)) \\ v_L &= L (\omega I_p \times \operatorname{cos}(\omega t)) \\ v_L &= \omega L I_p \times \operatorname{cos}(\omega t) \\ v_L &= \omega L I_p \times \operatorname{sen}(\omega t + 90^\circ) \end{aligned}$$

Como se explicó antes, el valor de pico está relacionado con $\omega = 2\pi f$, y por L como se explicó anteriormente. También puede apreciarse que la corriente y la tensión difieren en su fase por 90° .

Al establecer una tensión entre los bornes de un inductor, aparecerá un campo magnético en el área circundante al mismo. Al eliminarse dicha tensión, el campo desaparecerá pero no de forma instantánea. Es decir, que variará desde su máxima intensidad hasta llegar a desaparecer por completo. Debido a que existe una variación de campo magnético, se inducirá una corriente entre sus bornes (Ley de Faraday), y además, será en sentido opuesto a la fuente que lo produjo (Ley de Lenz).

Conclusiones 4.3.1. En el inductor, la tensión v_L va por delante 90° a la corriente i_L .

$$i_L = I_p \times \operatorname{sen}(\omega t) \quad (4.10)$$

$$v_L = \omega \times L \times I_p \times \operatorname{sen}(\omega t + 90^\circ) \quad (4.11)$$

4.3.3. Respuesta del capacitor

La tensión en un capacitor está limitada por la velocidad a la cual se depositan o liberan las cargas entre sus placas, y por ello, a mayor frecuencia, mayor corriente.

Por otra parte, mientras mayor sea el valor de capacitancia, mayor será la corriente capacitiva resultante, debido a que $i = C(dv/dt)$.

$$\begin{aligned}i_C &= C \frac{dv_C}{dt} \\i_C &= C \frac{d}{dt}(Vp \times \operatorname{sen}(\omega t)) \\i_C &= C(\omega \times Vp \times \operatorname{cos}(\omega t)) \\i_C &= \omega \times C \times Vp \times \operatorname{sen}(\omega t + 90^\circ)\end{aligned}$$

Conclusiones 4.3.2. En el capacitor, la corriente i_C va por delante a la tensión v_C unos 90° .

$$v_C = Vp \times \operatorname{sen}(\omega t) \quad (4.12)$$

$$i_C = \omega \times C \times Vp \times \operatorname{sen}(\omega t + 90^\circ) \quad (4.13)$$

4.4. Fasores

Los fasores permiten relacionar tensiones y corrientes alternas senoidales de una forma más sencilla que si se trabajara directamente con las ondas.

La resolución de problemas con ondas senoidales requeriría el uso de ecuaciones diferenciales, pero con el modelo que se propondrá en esta sección, los cálculos serán mucho más sencillos. Esto es posible porque existe isomorfismo entre el espacio vectorial de funciones armónicas de velocidad angular ω y el espacio vectorial R^2 . Para demostrarlo, es necesario contar con conocimientos de álgebra abstracta, por lo que no se realizará tal demostración ya que excedería los contenidos del curso.

Si todas las ondas con las que se trabaja, poseen la misma velocidad angular, pueden representarse como fasores, que son vectores rotatorios que giran en sentido antihorario con velocidad angular ω .

Estos vectores rotatorios pueden ser representados como números complejos, y utilizar el álgebra de complejos para operar con ellos.

Los datos necesarios para poder definir cada oscilación en este sistema son la **amplitud** y el **ángulo de fase**.

El módulo del vector representa el valor eficaz de la onda, mientras que la frecuencia está relacionada con la velocidad a la que giran (cuestión que será omitida, porque se supone que todos giran a la misma velocidad angular), y la fase está representada por el ángulo entre fasores.

En otras palabras, los fasores representan una fotografía instantánea de la posición del vector giratorio que define las ondas de tensión y de corriente.

Para realizar operaciones con fasores (lo cual es más sencillo que operar con ecuaciones de ondas), se debe utilizar el álgebra de los números complejos, resultando más conveniente utilizar la **forma rectangular** para realizar sumas y restas, y la **forma polar** para realizar multiplicaciones y divisiones.

4.4.1. Síntesis de álgebra de complejos

Un estudio completo de números complejos excede el contenido de este apunte. Se limitará a sintetizar las técnicas necesarias para trabajar con fasores.

Dado un fasor de nombre \dot{v} (nótese que se añadió un punto, para indicar que se trata de un fasor), con módulo $|V|$ y ángulo θ , con a como su componente en x y b como su componente en y , puede representarse dicho vector de dos formas:

1. Forma polar: $|V|\angle\theta$
2. Forma rectangular: $a + jb$

Nota: j es la unidad imaginaria, que en aplicaciones matemáticas suele ser la letra i . Para aplicaciones eléctricas, se prefiere la letra j para no confundirlo con la corriente eléctrica.

Ambas formas son suficientes para representar por completo el fasor, pero entonces, ¿por qué podría ser preferible trabajar con una u otra?

La respuesta es muy sencilla... para sumar y restar, es conveniente trabajar con números en forma rectangular, mientras que para dividir y multiplicar fasores, suele ser más fácil en forma polar.

Conversión entre formas

Utilizando el teorema de Pitágoras y las relaciones trigonométricas, es posible encontrar que para el fasor $\dot{v} = |V|\angle\theta = a + jb$:

- $|V| = \sqrt{a^2 + b^2}$
- $\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a}$
- $a = |V| \cdot \cos(\theta)$
- $b = |V| \cdot \sin(\theta)$

Siendo las dos primeras relaciones las utilizadas para convertir **de forma polar a rectangular**, y las dos últimas para convertir **de forma rectangular a polar**.

Operaciones

Dados dos fasores $\dot{u} = a_u + jb_u$ y $\dot{v} = a_v + jb_v$, con la siguiente forma polar equivalente $\dot{u} = |\mathbf{U}| \angle \theta_u$ y $\dot{v} = |\mathbf{V}| \angle \theta_v$

$$\dot{u} + \dot{v} = (a_u + a_v) + j(b_u + b_v)$$

$$\dot{u} - \dot{v} = (a_u - a_v) + j(b_u - b_v)$$

$$\frac{\dot{u}}{\dot{v}} = \left| \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{V}} \right| \angle (\theta_u - \theta_v)$$

$$\dot{u} \times \dot{v} = |\mathbf{U}| \times |\mathbf{V}| \angle (\theta_u + \theta_v)$$

4.4.2. Impedancia

La **oposición** en un circuito de corriente alterna, está dada por la Ley de Ohm. Ocurre que, al incorporar capacitancias e inductancias, la idea de **resistencia** resulta insuficiente para modelar la oposición.

La impedancia, cuyo término proviene de la idea de *impedir el paso de la corriente*, estará compuesta por una parte **resistiva**, y una parte **reactiva** (que reacciona, o no sólo consume energía sino que también puede almacenarla y devolverla eventualmente). Los componentes **reactivos** serán los inductores y los capacitores.

Para el caso del inductor, según las ecuaciones 4.10 y 4.11, se define a la oposición del mismo como **reactancia inductiva** X_L de la siguiente forma:

$$X_L = \frac{\omega \times L \times I_p \times \operatorname{sen}(\omega t)}{I_p \times \operatorname{sen}(\omega t)} = \omega L$$

De manera análoga, para el capacitor y según las ecuaciones 4.13 y 4.12, se define como **reactancia capacitativa** X_C a:

$$X_C = \frac{V_p \times \operatorname{sen}(\omega t)}{\omega \times C \times V_p \times \operatorname{sen}(\omega t)} = \frac{1}{\omega C}$$

La **impedancia** \dot{z} , puede ser definida como un fasor que relaciona la **resistencia** con la **reactancia** de la siguiente forma:

$$\dot{z} = R + j(X_L - X_C) \tag{4.14}$$

La diferencia con los fasores de tensión y de corriente, es que la impedancia no se encuentra girando sino que está estática.

Si se vuelve a analizar lo expuesto en este capítulo según la relación Efecto = $\frac{\text{Causa}}{\text{Oposición}} \rightarrow \text{Oposición} = \frac{\text{Causa}}{\text{Efecto}}$, como se ha hecho anteriormente, y volviendo a suponer a la corriente como el **efecto** que produce la **tensión**, se puede abordar

la idea de **impedancia**, definida como *la oposición que presenta un circuito de de corriente alterna al aplicarle una tensión.*

$$\dot{z} = \frac{\dot{v}}{\dot{i}} \quad (4.15)$$

En la ecuación 4.15, \dot{z} refiere a la impedancia, y tanto \dot{v} como \dot{i} son fasores (números complejos que representan a la tensión y corriente alterna respectivamente).

4.5. Potencia

La ecuación general de la potencia es:

$$p = vi$$

Nótese que las tres magnitudes varían en el tiempo (y por ello están escritas en minúscula). Para el caso de corriente continua, bastaría con operar utilizando la ecuación 3.7, pero cuando se trata de una corriente alterna senoidal, este cálculo es algo más complejo, y más aún cuando existen desfasajes entre la tensión y la corriente aplicada a la carga.

En corriente alterna se definen tres tipos de potencia: la activa, reactiva y aparente, y a su vez, se introduce un factor de potencia.

La **potencia activa** es la que consume cualquier aparato eléctrico para funcionar, y se mide en Watts (W).

En corriente alterna las bobinas y los condensadores no sólo consumen energía, sino que también la acumulan. Entonces, una cierta cantidad de potencia se mueve dentro del circuito pero no sale de él, y recibe el nombre de **potencia reactiva**. Éste tipo de potencia se mide en Volt-Amperes reactivos (VAr).

En el caso de la potencia reactiva, no hay un real consumo de energía, ya que primero se consume y luego se devuelve, pero este fenómeno implica que el proveedor de energía deba entregar toda esta potencia (la activa y también la reactiva, aunque luego ésta última vaya a ser devuelta), con su consecuente necesidad de dimensionar los conductores para un consumo mayor. Pareciera ser que, como la potencia reactiva no es disipada, entonces no debería ser tenida en cuenta, pero para el proveedor de energía es importante, ya que debe entregarla de todos modos, aunque luego sea devuelta. Desde el punto de vista del consumidor, una parte de la energía se pide “prestada” para hacer funcionar elementos con consumos reactivos (como motores o transformadores) y luego se devuelve a la red, pero de todos modos, aunque esta energía no haya sido parte de la energía aprovechada por los elementos de la red, fue necesaria para hacerlos funcionar correctamente.

La **potencia aparente** corresponde a la energía que se entrega por el proveedor, que no sólo expresa el valor de potencia activa sino también a la potencia

reactiva. Esto llevaría a pensar que la potencia aparente es simplemente la suma de ambas potencias, pero debe recordarse que en corriente alterna, ambos valores corresponden a ondas, y por lo tanto su cálculo no es tan simple de realizar. La unidad que se utiliza para medir la potencia aparente es el Volt-Ampere (VA).

A continuación, se muestran imágenes para distintos tipos de consumo.

- Para el consumo resistivo puro de la figura 4.13, las ondas de corriente y de tensión están en fase. La potencia será el producto entre ambas, y como se observa en la gráfica, siempre es positiva (está por arriba del eje de abscisas). Esto significa que siempre se está entregando potencia activa.
- En los consumos capacitivo puro e inductivo puro de las figuras 4.15 y 4.14 respectivamente, puede apreciarse que durante medio ciclo de potencia, el sistema entrega potencia, pero la otra mitad de tiempo la absorbe. En otras palabras, la potencia activa es de 0 W, porque nunca se está disipando energía, y la potencia es puramente reactiva.
- En las curvas de la figura 4.16, se observa un consumo real, que es en parte reactivo y en parte activo, pero la parte activa es mayor que la reactiva. Es decir, que la potencia entregada es mayor a la potencia devuelta. Esto es lo que ocurre en las redes eléctricas reales.

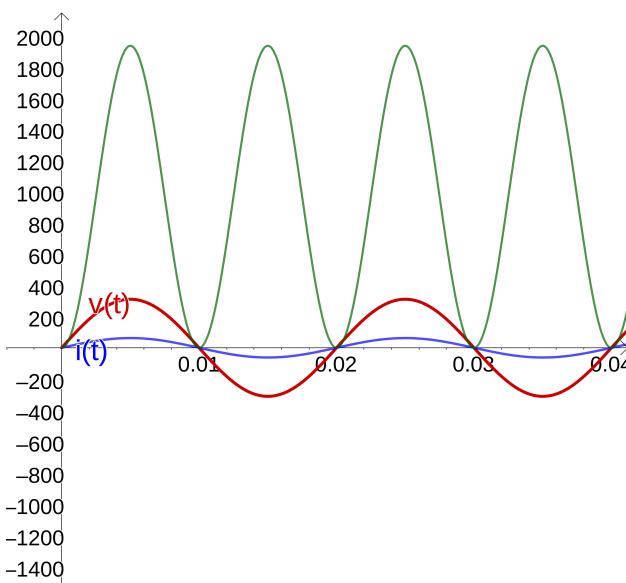


Figura 4.13: Respuesta de un circuito resistivo puro en C.A.: corriente en azul, tensión en rojo y potencia en verde

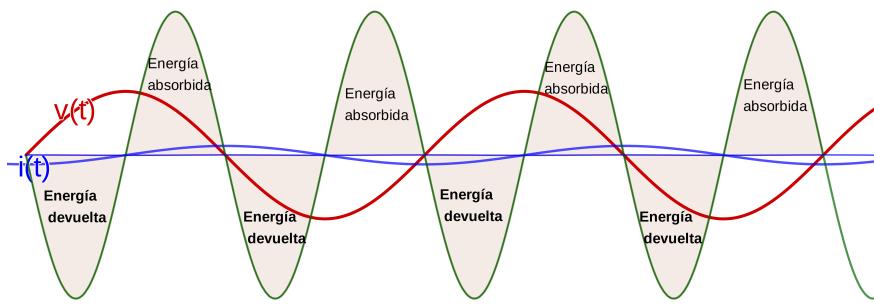


Figura 4.14: Respuesta de un circuito inductivo puro en C.A.: corriente en azul, tensión en rojo y potencia en verde

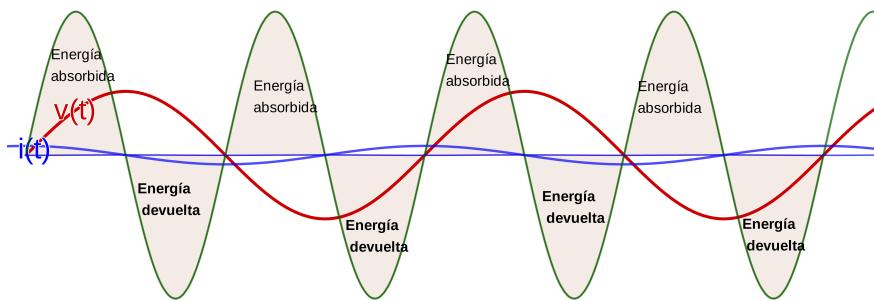


Figura 4.15: Respuesta de un circuito capacitivo puro en C.A.: corriente en azul, tensión en rojo y potencia en verde

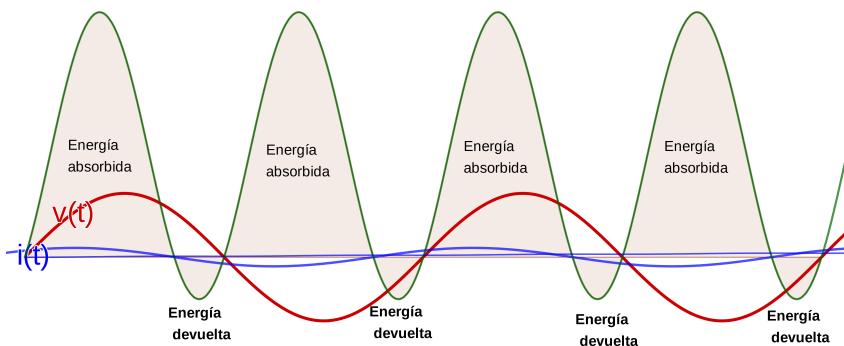


Figura 4.16: Respuesta de un circuito real (resistivo y reactivo) en C.A.: corriente en azul, tensión en rojo y potencia en verde

Como la realización de operaciones con ecuaciones de ondas es algo complejo e impreciso, se verá a continuación cómo hacerlo con fasores.

4.5.1. Triángulo de potencias

Si se recuerda la representación fasorial de la impedancia, se verá que en el eje de ordenadas se expresaban los fasores de reactancia: hacia arriba X_L , y hacia abajo X_C , y en el eje de abscisas, el valor de resistencia R .

El triángulo de potencias estará formado por:

- La potencia activa P en el eje de abscisas.
- La potencia reactiva Q en el eje de ordenadas.
- La potencia aparente S como la suma de ambos vectores.
- El ángulo entre P y S , llamado φ .

De ese modo, la relación entre la potencia activa y la aparente es el **factor de potencia**, o también llamado **coseno de φ** , debido a que ésta es la forma en la cual se calcula.

Utilizando el Teorema de Pitágoras, se llega a la conclusión de que la relación entre las tres potencias es:

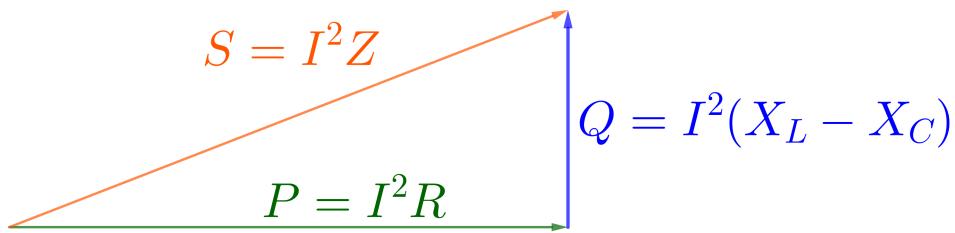


Figura 4.17: Triángulo de potencias

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (4.16)$$

Y dado que $S = V_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}}$, utilizando trigonometría se pueden definir las potencias activa y reactiva como:

$$Q = V_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}} \times \sin(\varphi) \quad (4.17)$$

$$P = V_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}} \times \cos(\varphi) \quad (4.18)$$

Como se indicó en el apartado anterior, la potencia reactiva implica el transporte de energía que no será aprovechada posteriormente. Las pérdidas en los cables por efecto Joule serán mayores aunque para el consumo efectivo de potencia activa no haya diferencias. Esto perjudica claramente a las empresas que suministran energía. Por este motivo, en talleres e industrias, se suele **penalizar el consumo reactivo excesivo**, limitando el **factor de potencia** a 0,8 (siendo 1 el valor ideal).

Por ello, suele ser necesario compensar la potencia reactiva con cargas capacitivas (o inductivas).

Si se tienen las potencias y se desea calcular el factor de potencia ($\cos\varphi$), de la ecuación de potencia aparente, y de la ecuación de P obtenida en 4.18,

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (4.19)$$

Las unidades que se utilizan para los distintos tipos de potencia son:

- Watt y sus múltiplos, para la **potencia activa**.
- Volt-Ampere para la **potencia aparente**.
- Volt-Ampere reactivo para la **potencia reactiva**.

Ejemplo 4.4. Una carga consume 3 W de potencia activa, 4 VAr de potencia reactiva y 5 VA de potencia aparente.

Debido a que en la ecuación 4.19 se eliminan las unidades, el **factor de potencia** no posee unidad.

4.5.2. Compensación del factor de potencia

En la industria y en las instalaciones residenciales, las cargas son principalmente inductivas, como las de motores y transformadores. Por este motivo, el factor de potencia suele ser menor a 1 y es necesario corregirlo para evitar multas y mejorar el rendimiento de la instalación.

Si se observa las curvas de potencia 4.14 y 4.15, se puede verificar que la potencia promedio es 0, cuando las cargas son puramente inductivas o puramente capacitivas, y por lo tanto, no se está realizando trabajo útil.

Para el mejoramiento del factor de potencia, se desea reducir la potencia reactiva a **0 VAr**, haciendo que el ángulo de desfasaje disminuya a 0 grados.

La potencia activa no deberá cambiar, ya que es el trabajo útil que realiza la instalación, y lo que haremos mediante la corrección, es lograr que el valor de potencia aparente sea lo más cercano posible al valor de potencia activa.

Cuando la parte imaginaria del fasor de impedancia sea positivo (carga inductiva), será necesario mejorar el factor de potencia a través de la instalación de capacitores en paralelo.

Procedimiento:

1. Hallar el valor de impedancia de la línea.
2. Expresar la impedancia en forma polar. De este modo, el ángulo θ de la impedancia será igual al ángulo φ , y el coseno de dicho ángulo, será igual al **factor de potencia inicial**.
3. Como el factor de potencia final buscado es 1, el ángulo de desfasaje será 0 grados, la potencia reactiva será 0 VAr y la potencia activa será igual a la potencia aparente. Esto significa que la potencia que deberá absorver el conjunto de capacitores a instalar será exactamente igual al valor de potencia reactiva medido o calculado en un principio.
4. Como la tensión que caerá en el capacitor será la misma que la tensión de la fuente, la potencia en el capacitor será puramente reactiva $Q = \frac{|V|^2}{X_C}$. Despejando X_C ,

$$X_C = \frac{|V|^2}{Q}$$

5. Por definición de reactancia capacitiva, $X_C = 1/(\omega fC)$. En el paso anterior se pudo calcular X_C , por lo que se reemplazará en la ecuación anterior y se podrá despejar C de la misma, hallando así el valor de capacidad necesario para corregir el factor de potencia,

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

Capítulo 5

Esquemas de conexión a tierra

El paso de la corriente eléctrica por el cuerpo humano puede llevar a lesiones que van desde quemaduras leves hasta la muerte.

La descarga puede ocurrir al producirse un **contacto directo** del cuerpo con alguna parte de la instalación, o bien a través de un **contacto indirecto** con alguna de las masas puestas accidentalmente en tensión.

Ejemplo 5.1. Un niño que toque la parte metálica del terminal fase de un interruptor, recibirá una descarga eléctrica por encontrarse en **contacto directo** con una de las partes vivas de la instalación.

Al ocurrir una falla en una heladera, toda su carcaza metálica queda en contacto con el conductor fase. Cuando una persona toque esta carcaza, recibirá una descarga por **contacto indirecto**.

Existen distintos **esquemas de conexión a tierra** que permiten proteger a las personas y animales ante contactos directos e indirectos.

5.1. Dispositivos de protección

Fusible

Consiste en un conductor de diámetro menor al del resto de la instalación. Ante un eventual cortocircuito, el exceso de corriente provocará que el fino conductor se funda, protegiendo al resto de la instalación. El fusible se utiliza sólo una vez. Es decir que cuando su filamento se funde, debe ser modificado.

Interruptor termomagnético

Se trata de un dispositivo que consiste en un electroimán y un sensor bimetalico conectados en serie.

Al producirse un exceso de corriente, la temperatura aumenta en el bimetal, y éste, que funciona como un interruptor normalmente cerrado, se abre e interrumpe el circuito. También es posible que la corriente active el electroimán, y que éste actúe mecánicamente abriendo el circuito. Finalmente, se cuenta con una llave manual para activar y desactivar el interruptor.

Interruptor diferencial

Se trata de un interruptor que sensa, a través de una bobina toroidal, la corriente de entrada y de salida de la instalación. Debido a que su diferencia debe ser siempre 0A, si existe alguna corriente de fuga, automáticamente se encarga de interrumpir el circuito.

En este capítulo se trabajará según los parámetros establecidos en el reglamento de la AEA del 2006 y las normas IEC *****.

Consideraciones del reglamento

Es indispensable, para evitar accidentes por contactos indirectos, verificar:

- El cumplimiento del sistema de puesta a tierra indicado.
- El funcionamiento de los dispositivos de corte automático.
- Que cada masa se encuentre conectada a un conductor de protección de puesta a tierra.

Existe un protocolo claro para la verificación y medición de puestas a tierra, elaborado por la Superintendencia de Riesgos de Trabajo, disponible en los recursos anexos a este documento, junto con la resolución 900 de la SRT, que regula los requerimientos de medición de puestas a tierra.

Este documento sirve para formalizar las presentaciones de los informes que se deben presentar ante ART, o SRT o las ATL (Ministerios de Trabajo Regionales de cada provincia), y se verá en profundidad cómo debe completarse en estas páginas.

Existen distintos tipos de puesta a tierra:

- Toma de Tierra del neutro de Transformador.
- Toma de Tierra de Seguridad de las Masas.
- De protección de equipos electrónicos.
- De informática.
- De iluminación.
- De pararrayos.
- Otros.

Continuidad de las masas: Circuito de puesta a tierra continuo y permanente, circuito de puesta a tierra con capacidad de conducir la carga de la corriente de falla.

Protecciones contra contactos indirectos: DD, IA, FUS.

No es lo mismo DD que ID, ya que en plantas industriales o locales comerciales grandes se requieren más de 500mA (hasta 10A) e instalaciones de hasta 2000 o 3000A de trabajo.

Interruptor automático y fusible no puede usarse en viviendas, locales comerciales (donde actúa personal no capacitado). Este tipo de instalaciones sólo puede usar esquema TT, en el cual la corriente de falla es demasiado baja como para ser vista por un IA o un FUS. Sólo se puede emplear protección diferencial de 30mA en todos los circuitos terminales y de 300mA en los circuitos principales.

No alcanza sólo con medir puestas a tierra (R_{PAT}), sino que en toda instalación deben actuar dispositivos automáticos de desconexión.

La creencia popular de que conectar una masa eléctrica a tierra se protege a las personas contra los contactos indirectos, ya que la tensión de contacto entre la persona y la masa sería muy baja es FALSA. La sola presencia de una puesta a tierra adecuada no asegura la seguridad de una instalación, sino que además, debe acompañarse con un dispositivo de desconexión inmediata ante la aparición de una corriente de falla. Es decir, que lo que salvará de la muerte a la persona o animal que se ponga en contacto con la masa electrificada, será la desconexión automática de la alimentación antes que se produzca el contacto.

Las masas no se conectan en serie, sino que se debe hacer por derivación con el conductor de tierra.

El problema de los electrodos dispersos: si existen electrodos dispersos en la instalación eléctrica, la puesta a tierra no es aceptable, debido a que no existe equipotencialidad.

CIRCUITOS TERMINALES DE HASTA 32A

El tiempo de desconexión depende del ECT y del tipo de circuito que se utilice. Cualquiera sea el ECT adoptado, si el circuito terminal tiene un consumo de hasta 32 A para las tensiones de servicio (220 V), la protección contra C.I. debe realizarse en los tiempos máximos siguientes:

- Esquema TN-S: $0,2\text{ s} = 200\text{ mS}$.
- Esquema TT: $0,06\text{ s} = 60\text{ mS}$.

Para los esquemas TT, se deben utilizar los DD de 30 mA, pero para verificar la seguridad, se debe utilizar los tiempos de disparo recorridos por **5 veces la corriente diferencial**. Entonces es falso que **los diferenciales deban actuar en 30 mS**

Las R_{PAT} no necesitan ser tan bajas como se cree.

La resolución 900 pide que se realice una verificación anual de las puestas a tierra, y que los telurímetros utilizados tengan una certificación (sin importar su antigüedad).

Ensayos para verificar si el dispositivo diferencial puede desconectar ante contactos indirectos indicados por la norma:

1. Un diferencial no debe disparar con la mitad de la corriente diferencial (un diferencial de 30 mA no debería dispararse con una corriente de 15 mA o menos).
2. Se debe aplicar la corriente de 30 mA en una sola aplicación y el diferencial deberá disparar en un tiempo no mayor a 300 mS.
3. Si el diferencial está recorrido por el doble de su corriente diferencial, el dispositivo deberá dispararse en la mitad del tiempo máximo. Es decir, que si a un diferencial de 30 mA se le aplican 60 mA, deberá disparar en un tiempo no mayor a 150 mS.
4. Se debe comprobar el tiempo de disparo al aplicar 5 veces su corriente nominal, y deberá ser como máximo de 40 mS.

Cuando se emplea protección diferencial no se debe considerar el tiempo de apertura I_{Δ_n} sino I_{Δ_m} .

CIRCUITOS SECCIONALES O MAYORES A 32A

Para circuitos seccionales (aquellos que van de tablero a tablero) o para circuitos terminales mayores a 32 A, se permitirán tiempos mayores a los mencionados anteriormente, permitiendo aplicar el principio de selectividad.

Para el esquema TN-S, se admitirán tiempos de desconexión de hasta 5 segundos, mientras que para el esquema TT, el tiempo máximo de desconexión será de 1 segundo.

USO DEL CRITERIO DE SELECTIVIDAD

Ejemplo 5.2. En una vivienda, se utiliza un interruptor diferencial de 100 mS selectivo en el tablero principal. Este tablero se conecta con otros tres tableros terminales diferentes, siguiendo la siguiente regla de seccionamiento:

1. Cocina, baño.
2. Habitación 1, habitación 2.
3. Patio, cochera.

En cada tablero terminal, se utilizan interruptores de 30 mA.

Al producirse una falla en la aislación de un velador de la habitación 2, actúa el interruptor diferencial del tablero 2, permitiendo reconocer la falla de manera más sencilla y sin dejar sin alimentación al resto de la vivienda.

ELECTRODOS DISPERSOS

Es común observar, en distintas instalaciones, electrodos dispersos (en distintas máquinas, al pie de una central telefónica, al pie de equipos de telecomunicaciones, etc.)

Esto está prohibido por el reglamento, a menos que estos electrodos se conecten entre sí y a la barra de puesta a tierra, logrando equipotencializarse.

Las masas eléctricas y las masas extrañas deben conectarse a un conductor de equipotencialidad o en su defecto, al conductor de protección.

Conductor de equipotencialidad y conductor de protección: ...

Los electrodos de puesta a tierra de descargas atmosféricas deben estar conectados a la barra de cobre de puesta a tierra del tablero principal. Esto evitará la aparición de arcos eléctricos porque habrá equipotencialidad entre las masas de tierra y del edificio o instalación.

ESQUEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA

Las redes de alimentación ponen a tierra el neutro a través de un electrodo llamado **puesta a tierra de servicio**, y las masas eléctricas se ponen a tierra a través de una **puesta a tierra de protección**.

Para establecer las condiciones de protección (tensiones de contacto esperables y tiempos máximos tolerables de desconexión) es necesario conocer el esquema de conexión a tierra empleado.

ESQUEMA TT

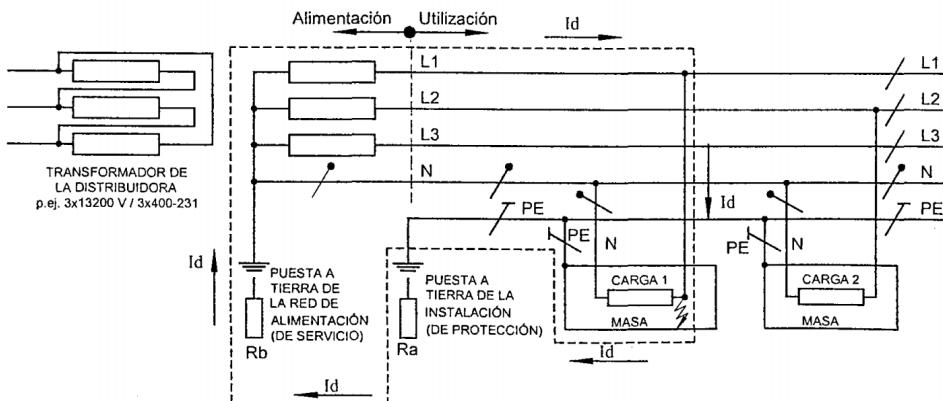


Figura 5.1: ECT TT. Fuente: AEA, 2006

En el esquema se puede apreciar la puesta a tierra de servicio R_b , la puesta a tierra de protección R_a , los conductores de puesta a tierra PE conectados desde el electrodo R_a a la **barra de puesta a tierra PE**, y a todos los tomacorrientes de tres espigas. Al producirse un contacto indirecto, la corriente de defecto I_d circulará desde la fase L_1 hasta el electrodo R_a , para luego recorrer por tierra la

distancia que sea necesaria hasta alcanzar el electrodo de puesta a tierra de servicio R_s y cerrar el circuito.

El valor de resistencia de puesta a tierra puede, según el reglamento, alcanzar los 40Ω siempre y cuando la protección diferencial posea una corriente de disparo máxima de 300 mA .

Antiguamente se buscaba un valor menor a 10Ω para la puesta a tierra, pero en realidad, esto era conveniente cuando no existía protección diferencial, debido a que esto haría que la corriente de falla sea mucho mayor, y activaría los termomagnéticos o fundiría los fusibles. Para sistemas con protección diferencial (como es obligatorio para el sistema TT), no es necesario que el valor óhmico de la puesta a tierra sea tan elevado.

Ejemplo 5.3. Dada una puesta a tierra en un buen suelo, en el que se ha alcanzado una resistencia de puesta a tierra de 10Ω , y la distribuidora de energía posee una resistencia de puesta de servicio de 1Ω , la corriente de defecto se podría calcular según la Ley de Ohm, de la siguiente forma:

$$I_d = \frac{V_{\text{línea}}}{\text{Suma de resistencias}}$$

$$I_d = \frac{220 \text{ V}}{10 \Omega + 1 \Omega} = 20 \text{ A}$$

Es decir que ante una falla en una instalación típica, un valor de corriente cercano a 20 A circulará por la rama de la corriente de defecto. Este valor es muy superior a los valores de corte de los interruptores diferenciales.

Las siglas TT indican Tierra-Tierra. Esto significa que el sistema dispone de una puesta a tierra de servicio y una puesta a tierra para la instalación por separado. La puesta a tierra de servicio es responsabilidad de la empresa distribuidora, mientras que la tierra de la instalación es trabajo del instalador.

Nunca se debe, en un esquema TT, conectar la tierra con neutro, debido a que la seguridad dependería de la calidad del neutro que entregue la compañía. Además, esto provocaría que el esquema se convierta en TN-S.

La Ley fija que la tensión de contacto máxima es de 24 V , y toda tensión superior en masas eléctricas o extrañas, deberá ser detectada por el diferencial e interrumpida de inmediato para evitar accidentes.

El protocolo exige medir R_a (el cual deberá ser menor a 40Ω , verificar la continuidad de los conductores de protección (aquellos que van desde cada dispositivo y tomacorriente de tres contactos al conductor de tierra) y del conductor de tierra (que es el conductor que va desde el electrodo R_a hasta la barra de puesta a tierra en el tablero principal. Se deberá verificar también, mediante los distintos ensayos, el dispositivo de protección que proteja contra contactos indirectos (interruptor diferencial).

TN-S

Las instalaciones que utilizan este esquema son aquellos que toman en media tensión (como por ejemplo grandes industrias) o aquellos que han incorporado un transformador en su instalación, con el fin de adecuar el sistema a TN-S (por venir de un ECT TT).

Aquí el conductor de protección de la instalación se conecta a la barra de neutro. De ahí el nombre TN (Tierra-Neutro).

Por otra parte, se debe destacar que la conexión entre tierra y neutro se hace en las barras del tablero principal, pero los conductores de tierra y de neutro deberán estar separados a lo largo de la instalación (por ello la letra S en TN-S).

La corriente de falla se produce por los elementos metálicos (no por la tierra) y por ello es de muy alto valor y se permite utilizar fusibles o interruptores automáticos (además de diferenciales, como era el caso del esquema TT).

Dicho de otra forma, la resistencia R_b no participa del lazo de corriente de falla, pero aún así debe poseer un valor muy bajo por otras razones: ... ESCRIBIR RAZONES

TN-C Esquema. Tiene tres problemas. IT Esquema. Sólo en quirófanos.

Capítulo 6

Instrumentos de medición

Todas las fotografías que se encuentran en esta sección, corresponden a los instrumentos que se encuentran en el laboratorio de mediciones de la EETP669.

6.1. Galvanómetro

6.2. Multímetro



Figura 6.1: Multímetro



Figura 6.2: Multímetro de banco

6.2.1. Voltímetro

6.2.2. Amperímetro

6.2.3. Óhmetro



Figura 6.3: Vista frontal de multímetro digital

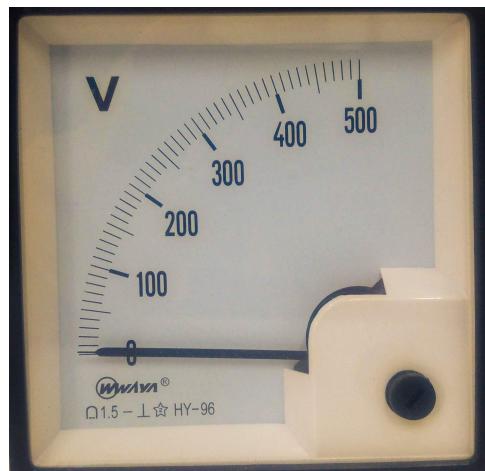


Figura 6.4: Voltímetro



Figura 6.5: Amperímetro

6.3. Vatímetro

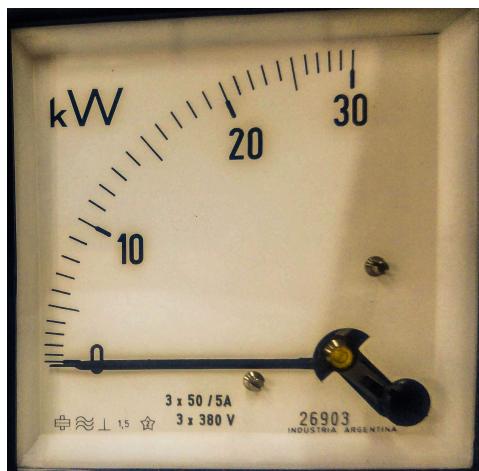


Figura 6.6: Vatímetro analógico

6.4. Capacímetro

6.5. Frecuencímetro



Figura 6.7: Frecuencímetro de banco

6.6. Pinza amperométrica



Figura 6.8: Pinza amperométrica



Figura 6.9: Vista frontal de pinza amperométrica
75

6.7. Megómetro, megger o medidor de aislamiento eléctrico

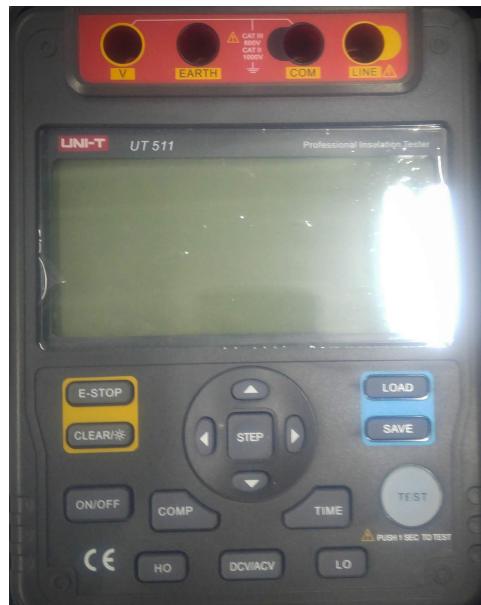


Figura 6.10: Vista frontal de medidor de aislamiento

6.8. Telurímetro o medidor de puesta a tierra



Figura 6.11: Telurímetro

6.9. Osciloscopio

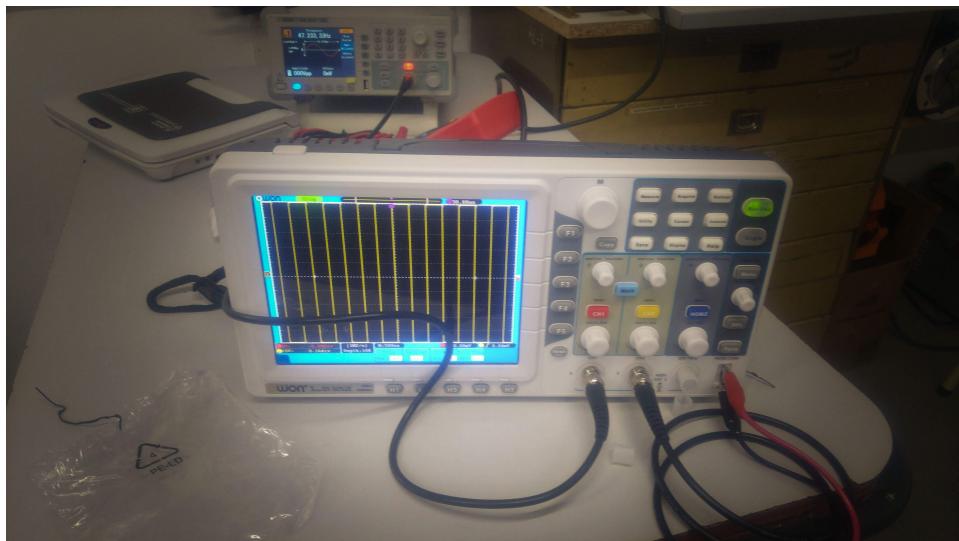


Figura 6.12: Osciloscopio con pantalla LED



Figura 6.13: Osciloscopio con pantalla CRT

6.10. Comprobadores de tensión

6.10.1. Buscapolo

6.10.2. Medidor inductivo

6.11. Cofímetro o medidor de factor de potencia



Figura 6.14: Medidor de factor de potencia (cofímetro) analógico

6.12. Medidores de energía

6.12.1. Transformadores de corriente

6.13. Medidor de campo electromagnético



Figura 6.15: Medidor de campo electromagnético

6.14. Milióhmetro

6.15. Generadores de funciones

inventario 2 Medidor de campo electromagnético Benetech GM3120 2 Capacímetro E-Sun EM6013A 8 Multímetro UNI-T UT58D (tensión AC-DC, corriente AC-DC, Capacidad, Inductancia, ganancia de transistores, óhmetro, continuidad). 2 Multímetro de banco UNI-T UT803. 8 Detector de tensión inductivo UNI-T UT12A. 1 Medidor de aislamiento UNI-T UT511. 1 Telurímetro CEM DT-5300B. 1 Medidor de aislamiento SMARTEC MI2123. 1 Telurímetro BAW UT522. 8 Pinza amperométrica Pronext TS266. 1 Medidor de aislamiento analógico YU FING YF-504. 1 Generador de funciones OWON AG1022. 1 Generador de funciones Topward 8120 2 Frecuencímetros de banco GW Instek GFC-8131H

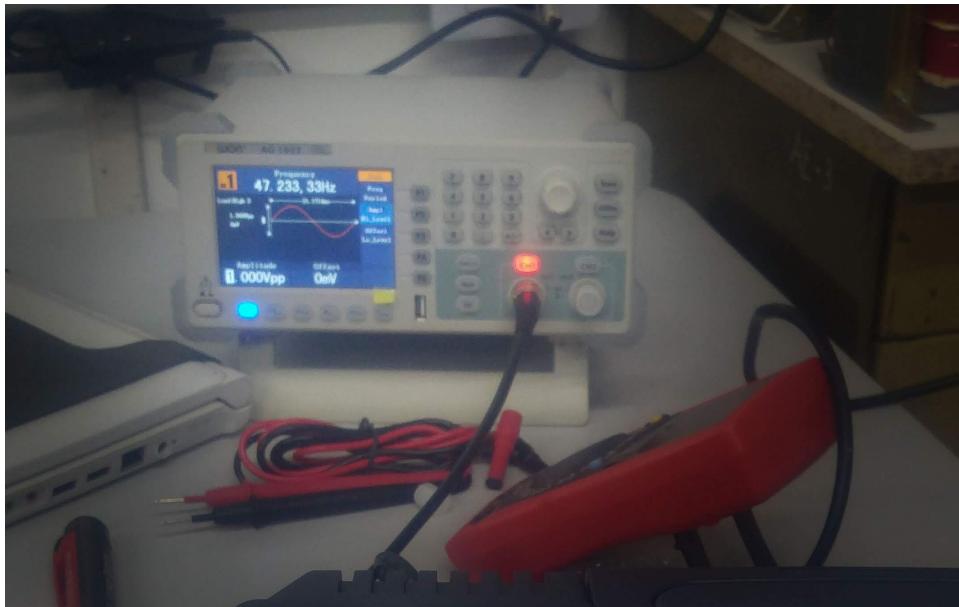


Figura 6.16: Generador de funciones



Figura 6.17: Generador de funciones



Figura 6.18: Generador de funciones

Bibliografía

- BOYLESTAD, R., (2011). *Introducción al análisis de circuitos* Decimosegunda edición, México, Pearson Educación.
- HEWITT, P. (2002). *Conceptual physics*. Pearson Educación.
- BOLTON, W. (1995). *Mediciones y pruebas eléctricas y electrónicas*. Marcombo.
- CALDERÓN, J. (2006). *Fundamentos de las Mediciones Eléctricas. Teoría y Prácticas de Laboratorio*. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Los Andes.
- SAMSÓ, F. (2008). *Apuntes de Cátedra de Máquinas e Instalaciones Eléctricas*. Departamento de Electrónica. Universidad Tecnológica Nacional: Facultad Regional Mendoza.
- ORTEGA, G.; GÓMEZ, M. & BACHILLER, A. (2002). *Problemas Resueltos de Máquinas Eléctricas*. Thomson. Madrid.
- SUÁREZ, J. A. (2006). *Medidas Eléctricas: segunda edición*. Libro de cátedra de Mediciones Eléctricas I: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- FRANK, E. (1969). *Análisis de Medidas Eléctricas*. McGraw Hill. Madrid.
- ASOCIACIÓN ELECTROTÉCNICA ARGENTINA (2007). *Documento Normativo 95150. Suministro y medición en baja tensión*. AEA.
- ASOCIACIÓN ELECTROTÉCNICA ARGENTINA (2006). *Documento Normativo 90706 Guía para la gestión del Mantenimiento en instalaciones*. . AEA.
- ASOCIACIÓN ELECTROTÉCNICA ARGENTINA (2006). *Documento Normativo 90364-7-771 Reglamentación para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles – Viviendas, oficinas y locales (unitarios)*. . AEA.

-