

La Corriente Alterna

12

Introducción

En la actualidad la forma que se ha impuesto para la generación, transporte y consumo de la energía eléctrica es la de la corriente alterna. Este tipo de corriente, frente a la corriente continua, presenta una serie de ventajas que la hacen ideal para la mayoría de las aplicaciones.

Contenido

- ▼ Generación de una C.A. senoidal.
- ▼ Valores fundamentales de la C.A.
- ▼ Circuito con resistencia pura en C.A.
- ▼ Circuito con bobina pura en C.A.
- ▼ Reactancia inductiva.
- ▼ Circuito con condensador puro en C.A.
- ▼ Reactancia capacitiva.

Objetivos

- ▼ Definir los procesos que se dan en la generación de una corriente alterna.
- ▼ Identificar los valores fundamentales de una C.A., así como seleccionar el instrumento de medición adecuado para su medida.
- ▼ Manejar adecuadamente el osciloscopio para medir las magnitudes asociadas a un C.A. senoidal.
- ▼ Explicar los procesos que se dan en un circuito de C.A. al conectar resistencias, bobinas y condensadores.

12.1 Ventajas de la corriente alterna

En los inicios del desarrollo de los sistemas eléctricos, la electricidad se producía en forma de corriente continua mediante las dinamos. Este tipo de generador resulta bastante más complejo y difícil de mantener que los alternadores, ya que necesitan para extraer la energía eléctrica del rotor (parte del generador en movimiento giratorio) de un colector en forma de anillo metálico subdividido en el que frotan escobillas de grafito. Además la energía no se podía transportar a largas distancias, dado que no existía un sistema práctico que fuese capaz de elevar y reducir la tensión de grandes cantidades de energía (recordar que para transportar grandes cantidades de energía eléctrica se necesita elevar la tensión para conseguir que la intensidad de la corriente no sea muy grande. Así se evita el uso de grandes secciones en los conductores y se reducen las pérdidas por efecto Joule).

Los alternadores han sustituido en su totalidad a las dinamos, ya que, por un lado, evitan el uso de colectores (la energía eléctrica se produce directamente en el estator del generador) y por otro, producen corriente alterna que se puede elevar y reducir con facilidad gracias a los transformadores eléctricos (éstos necesitan de corrientes variables para funcionar).

En cuanto al consumo de energía eléctrica, los motores de C.A. son más sencillos y robustos que los de C.C. y resultan apropiados para la mayoría de las aplicaciones. En aquellos casos en que se hace necesario el uso de la corriente continua (alimentación de aparatos electrónicos, tratamientos electroquímicos, recarga de baterías de acumuladores, motores de C.C.) la conversión de C.A. a C.C. es sencilla y barata gracias a los rectificadores a base de diodos.

12.2 Producción de una corriente alterna

Dado que la C.A. sigue las variaciones de la función senoidal, antes de abordar su estudio, conviene que realices previamente un pequeño repaso a los siguientes conocimientos de matemáticas: funciones trigonométricas (seno, coseno y tangente), ángulos complementarios, la función senoidal, variaciones de las funciones trigonométricas con el ángulo, representación vectorial y operaciones con vectores.

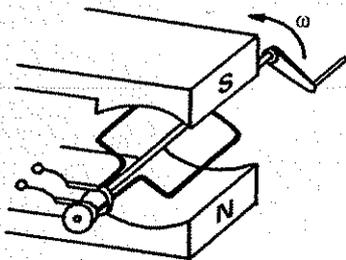


Figura 12.1. Alternador elemental.

En la Figura 12.1 se muestra el aspecto de una alternador elemental. Consta de un campo magnético fijo producido por un imán, dentro del cual se hace girar un conductor eléctrico en forma de espira. Al cortar los conductores en su movimiento giratorio en el campo magnético, se produce en los

mismos una fuerza electromotriz de inducción que se muestra como una tensión V en los extremos de la espira. Para poder conectar dichos extremos a un receptor eléctrico es necesario utilizar un par de anillos conductores unidos eléctricamente con los mismos y situados en el eje de giro de la espira. Los receptores se conectan a través de unas escobillas fijas de grafito que mediante frotamiento consiguen un aceptable contacto eléctrico con los anillos colectores.

Se puede comprobar que la tensión que aparece en los terminales de la espira es variable y posee la forma de una senoide, tal como se muestra en la Figura 12.2.

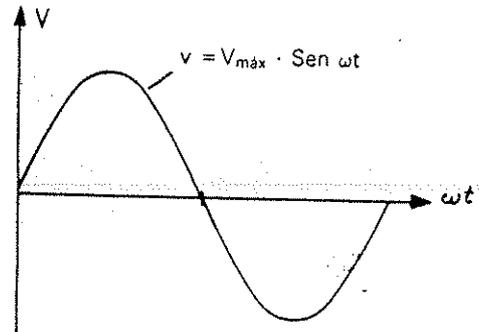


Figura 12.2. Representación de una tensión senoidal.

Una corriente alterna senoidal se caracteriza por que el valor de la corriente y de la tensión en cada instante cambia de valor e incluso de sentido, siguiendo un ciclo repetitivo según la función senoidal.

El valor instantáneo de la tensión es:

$$v = V_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t$$

Donde $V_{\text{máx}}$ es el valor más alto que alcanza la tensión, ω es la velocidad angular que suministra el alternador y t es el tiempo.

Para poder comprender mejor estas variables vamos a estudiar cómo se consigue generar esta forma de onda senoidal mediante un alternador elemental como el de la Figura 12.1.

La espira gira en el seno de un campo magnético a una cierta velocidad angular ω , que la mediremos en radianes por segundo (Figura 12.3).

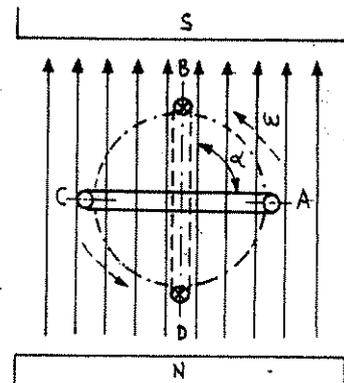


Figura 12.3. Espira que gira dentro de un campo magnético.

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

La velocidad angular ω nos indica el ángulo α girado por la espira en la unidad de tiempo.

En su giro los conductores de la espira cortan el campo magnético, por lo que aparecen en los mismos una f.e.m. inducida. Si observamos atentamente las distintas posiciones que toma la espira respecto al campo magnético, podremos comprobar que el corte de ésta respecto al campo magnético no siempre es perpendicular. Es más, sólo se produce ese caso en los puntos B y D. En los puntos A y C los conductores se mueven paralelamente al campo magnético, por lo que aquí la f.e.m. es cero. Al moverse el conductor entre cualquiera de estos puntos aparece un ángulo de corte que está entre 0° y 90° ; ¿qué f.e.m. se produce entonces? (Figura 12.4).

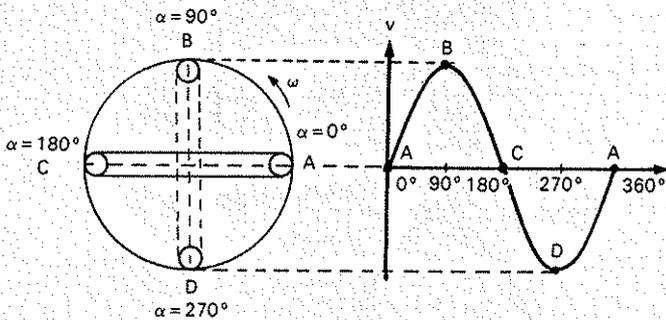


Figura 12.4. Al girar la espira se produce una tensión senoidal.

Para poder averiguarlo, tendremos que determinar primero cuál es el valor de la f.e.m. inducida en un conductor cuando se mueve con un ángulo γ respecto a la perpendicular de las líneas de fuerza del campo magnético.

El conductor de la Figura 12.5 se mueve con una velocidad (v) y un ángulo (γ) respecto a la perpendicular de las líneas de fuerza. Como para producir f.e.m. inducida debemos mover el conductor perpendicularmente, descomponemos (v) en su componente perpendicular (v_p). Al aplicar las reglas trigonométricas obtenemos el siguiente resultado:

$$v_p = v \cos \gamma$$

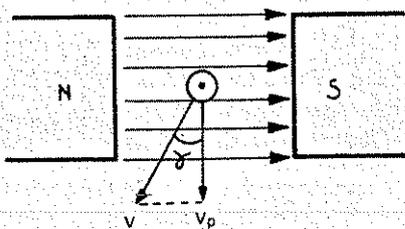


Figura 12.5. F.e.m. inducida en un conductor que se mueve en dirección oblicua al campo magnético.

La f.e.m. inducida tendrá entonces un valor de:

$$e = B L v_p \text{ de donde: } e = B L v \cos \gamma$$

e = F.e.m. inducida en voltios

B = Inducción magnética en teslas

L = Longitud del conductor en metros

v = Velocidad del conductor en m/s

$\cos \gamma$ = Coseno del ángulo con el que se mueve el conductor respecto a la perpendicular del campo magnético

Veamos lo que ocurre ahora cuando el conductor se mueve en sentido giratorio en el seno de un campo magnético.

El conductor gira con la velocidad angular ω (Figura 12.6)

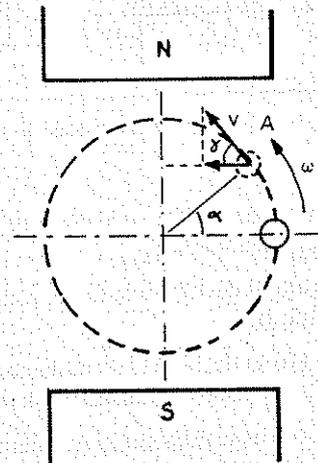


Figura 12.6. F.e.m. de un conductor que gira dentro de un campo magnético.

En el punto A se mueve con una velocidad tangencial (v). Si descomponemos esta velocidad en su componente perpendicular respecto a las líneas de campo, tendremos que:

$$e = B L v \cos \gamma$$

Ahora podemos relacionar el ángulo de giro α con el de la componente perpendicular γ , que como son complementarios:

$\cos \gamma = \text{sen } \alpha$, de donde se deduce que:

$e = B L v \text{ sen } \alpha$, y como $\alpha = \omega t$, nos queda que:

$$e = B L v \text{ sen } \omega t$$

Los valores de B , L y v suelen ser constantes en un alternador y coinciden con el valor máximo de la f.e.m. De esta forma podemos expresar el valor instantáneo de la f.e.m. en el conductor así:

$$e = E_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t$$

A ω se la conoce por el nombre de pulsación de la corriente y se expresa en radianes/segundo la f.e.m. sigue los cambios de la función senoidal, tal como se puede comprobar en la Figura 12.7.

Punto A: el conductor se mueve en dirección paralela a las líneas de fuerza, $\text{sen } 0^\circ = 0$ y, por tanto, $e = 0$.

Punto B: el conductor se mueve con un ángulo de 45° y la fuerza electromotriz alcanza un valor intermedio:

$$e = E_{\text{máx}} \text{ sen } 45^\circ$$

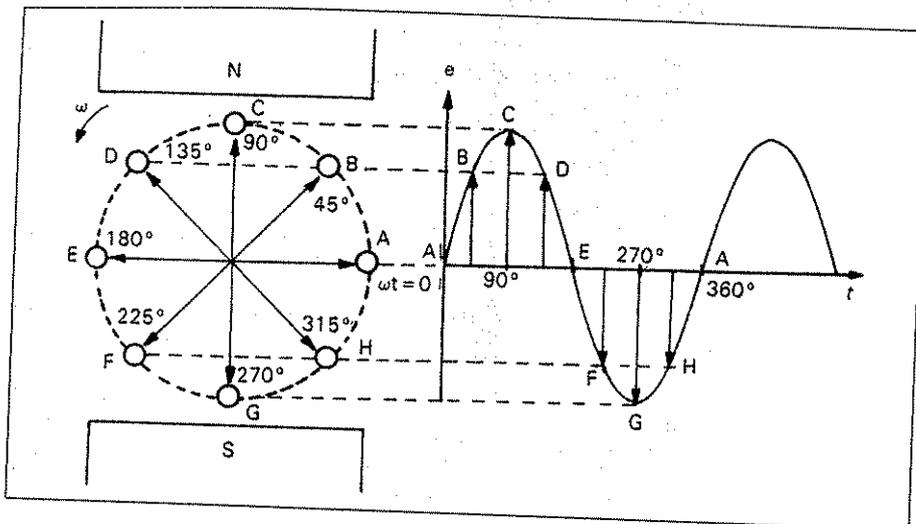


Figura 12.7. Generación de una f.e.m. senoidal.

ce una curva que se conoce como senoide. Esto es así, porque la tensión queda en función del seno del ángulo α de giro. Para estudiar todos los valores que se dan en una tensión senoidal vamos a tomar como ejemplo una C.A. como la que disponemos en nuestras viviendas, de 230 V y de frecuencia 50 ciclos por segundo. En la Figura 12.9 se muestra el aspecto que presentaría la misma en la pantalla de un osciloscopio.

Punto C: el ángulo es de 90° , se alcanza el valor máximo de la f.e.m.: $e = E_{\text{máx}} \text{ sen } 90^\circ = E_{\text{máx}}$.

Punto D: el ángulo es de 135° y la f.e.m. alcanza el mismo valor que en el punto B.

Punto E: El ángulo es de 180° y el conductor se mueve en dirección paralela a las líneas de fuerza, por lo que $e = 0$.

Punto F: Se invierte el sentido del movimiento del conductor y, con él, el de la f.e.m. (aplicar regla de la mano derecha).

Punto G: Se alcanza el valor máximo negativo:

$$e = E_{\text{máx}} \text{ sen } 270^\circ = -E_{\text{máx}}$$

Punto A: Se completa una vuelta completa del conductor y con ella se cubre un ciclo completo.

En la práctica y con el fin de eliminar los anillos colectores, los alternadores se construyen de tal forma que lo que se pone en movimiento de giro son las piezas polares que producen el campo magnético inductor. En el estator se sitúan los conductores donde se genera la f.e.m. de inducción cuando son cortados por el campo magnético en movimiento (Figura 12.8).

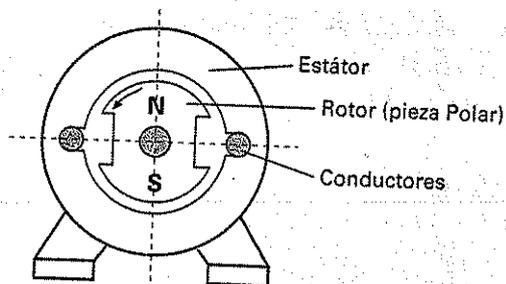


Figura 12.8. Alternador elemental donde los conductores permanecen fijos y el campo magnético es móvil.

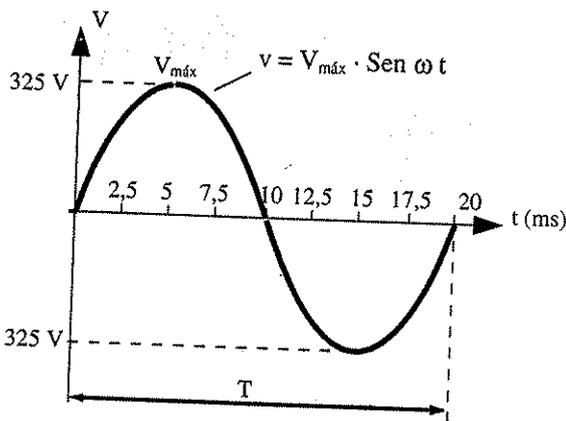


Figura 12.9. Representación de una C.A. senoidal industrial.

12.3.1 Valor instantáneo

Es el valor que toma la tensión en cada instante del tiempo siguiendo la función senoidal:

$$v = V_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t$$

En el ejemplo de la Figura 12.9 existen todos aquellos valores instantáneos comprendidos entre 0 y 325 V y entre 0 y -325 V.

Ejemplo: 12.1

¿Cuál sería la tensión instantánea de nuestro ejemplo para un ángulo de giro de 30° del alternador elemental?

Como $\omega t = \alpha$, $v = 325 \text{ sen } 30^\circ = 162,5 \text{ V}$

12.3 Valores característicos de la C.A.

Al representar en un gráfico la tensión que aparece en un alternador en función del tiempo o del ángulo de giro, apare-

12.3.2 Valor máximo de la tensión

La tensión senoidal alcanza diferentes valores según la posición relativa de los conductores respecto al campo magnético. Varía a cada instante, de tal forma que por cada ciclo es dos veces nula y dos veces máxima (pero de sentido opuesto $+V_{\text{máx}}$ y $-V_{\text{máx}}$). Se conoce como valor máximo al mayor de todos ellos, y que en el gráfico se da en las crestas de la senoide. En nuestro ejemplo este valor es de 325 V.

12.3.3 Tensión eficaz

Dado que la tensión cambia constantemente (en nuestro ejemplo desde 0 V a 325 V) se hace necesario determinar un valor intermedio que represente a la tensión para realizar los cálculos y medidas; nos referimos a la tensión eficaz. En nuestro ejemplo, la tensión eficaz es 230 V y es el que mide un voltímetro de C.A. La tensión eficaz también se puede definir como aquella que en las mismas condiciones produce los mismos efectos caloríficos en una resistencia eléctrica que una tensión continua del mismo valor.

Para una C.A. senoidal, se puede demostrar que la tensión eficaz es $\sqrt{2}$ más pequeña que la tensión máxima:

$$V_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$$

12.3.4 Intensidad eficaz

Al igual que ocurre con la tensión, la intensidad de la corriente también varía según una función senoidal, siendo dos veces nula y dos veces máxima por cada ciclo del alternador. La intensidad eficaz es el valor intermedio que produce los mismos efectos energéticos que una corriente continua del mismo valor. Además es la que indican los amperímetros de C.A. Aplicando la ley de Ohm tendríamos que:

$$I_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{ef}}}{R}, \quad \text{siendo} \quad I_{\text{ef}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}}$$

Ejemplo: 12.2

¿Cuál es el valor eficaz de una tensión alterna si su valor máximo es 325 V?

$$\text{Solución: } V_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{325}{\sqrt{2}} = 230 \text{ V}$$

Ejemplo: 12.3

¿Cuál es el valor máximo de una tensión alterna de 125 V?

$$\text{Solución: } V_{\text{máx}} = V_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2} = 125 \cdot \sqrt{2} = 177 \text{ V}$$

Ejemplo: 12.4

Conectamos una resistencia de 100 ohmios a una red de C.A. de 230 V. Determinar el valor eficaz y máximo de la intensidad de la corriente.

Solución: Siempre que nos indiquen el valor de la tensión o corriente de una C.A. se refiere al valor eficaz, que en nuestro ejemplo es de 230 V. De esta forma el valor eficaz de la corriente lo calculamos aplicando la ley de Ohm:

$$I_{\text{ef}} = \frac{V_{\text{ef}}}{R} = \frac{230}{100} = 2,3 \text{ A}$$

$$I_{\text{máx}} = I_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2} = 2,3 \cdot \sqrt{2} = 3,25 \text{ A}$$

El conocimiento de los valores máximos que alcanza la tensión de una C.A. es muy importante, ya que es necesario seleccionar los aislantes adecuados para aparatos y conductores eléctricos que sean capaces de soportar dichos valores máximos.

12.3.5 Valor medio del ciclo completo

Si realizamos la media de todos los valores en un ciclo completo, dado que la mitad son positivos y la otra negativos, obtendremos un resultado de cero. Es por eso que, como un aparato de C.C. mide exclusivamente el valor medio, al realizar una medida con un voltímetro o amperímetro de C.C. en un sistema de C.A. obtendremos una medida de cero.

12.3.6 Ciclo o período

En el alternador elemental estudiado al comienzo de este capítulo, se podría decir que cada vuelta que da la espira produce un ciclo. El período es el tiempo que transcurre en un ciclo completo. Se representa por la letra T y se mide en segundos.

En el ejemplo de la Figura 12.9 se puede comprobar que el período es de 20 milésimas de segundo. Este tiempo es bastante pequeño, y en el caso de que lo produjese nuestro alternador elemental, significaría que tardaría solamente en completar una vuelta 20 ms.

¿Cuántas vueltas dará nuestro alternador elemental en un tiempo de 1 segundo?

Como por cada vuelta se invierten 0,02 segundos, en 1 segundo tendremos:

$$\frac{1}{0,02} = 50 \text{ vueltas}$$

En este caso se podría decir que el alternador gira a 50 vueltas por segundo y produce una C.A. senoidal de 50 ciclos por segundo.

12.3.7 Frecuencia

Es el número de ciclos que se producen en un segundo. Se representa por la letra f y se mide en Hertzios (Hz) o en ciclos/segundo.

De esta definición es fácil deducir que, en el caso del alternador elemental la frecuencia es de 50 Hz y que coincide con las revoluciones por segundo de la espira. También se deduce que para calcular la frecuencia, conocido el período, emplearemos la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{T}$$

Ejemplo: 12.5

¿Cuál será el valor de la frecuencia de una C.A. senoidal si mediante un osciloscopio determinamos que su período es de 0,010 segundos?

Solución: $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,010} = 100 \text{ Hz}$

Ejemplo: 12.6

Determinar el período que le corresponde a la frecuencia de la red eléctrica americana si su frecuencia es de 60 Hz.

Solución:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0,01666 \text{ s} = 16,66 \text{ ms}$$

Para medir la frecuencia se utiliza el frecuencímetro.

Ejemplo: 12.7

En la Figura 12.10 se muestra el esquema de conexiones de un frecuencímetro y un voltímetro de C.A. conectados a la entrada de un cuadro de distribución. Las lecturas de estos aparatos de medida son 40 Hz y 500 V, respectivamente. Determinar el período y el valor máximo de la tensión.

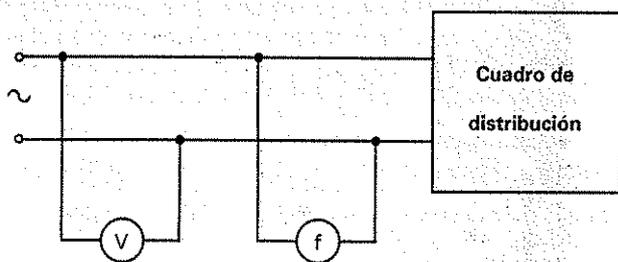


Figura 12.10

Solución: $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40} = 0,025 \text{ s}$

$$V_{\text{máx}} = V_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2} = 500 \cdot \sqrt{2} = 707 \text{ V}$$

12.3.8 Relación entre la frecuencia y la velocidad angular

La frecuencia está relacionada directamente con la velocidad angular ω a la que gira el alternador. Para que un alterna-

dor, con un par de polos, produzca, por ejemplo, una frecuencia de 50 Hz, necesita girar a una velocidad (n) de 50 revoluciones por segundo. La velocidad angular que le correspondería en este caso sería la siguiente:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{50 \cdot 2\pi}{1} = 100 \pi \text{ rad/s}$$

Otra forma de verlo sería así: en una revolución se cubre un tiempo igual a un período ($t = T$) y un ángulo igual a 2π radianes ($\alpha = 2\pi$):

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T}, \quad \text{como } f = \frac{1}{T}$$

$\omega = 2\pi f$

Ejemplo: 12.8

¿Qué valor instantáneo alcanzará una tensión de 50 Hz si el valor máximo es de 311 y el tiempo de 0,003 s?

Solución: Primero calculamos la velocidad angular:

$$\omega = 2 \pi f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 100 \cdot \pi \text{ rad/s}$$

El valor instantáneo a los 0,003 s se calcula así:

$$v = V_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t = 311 \cdot \text{sen} (100 \cdot \pi \cdot 0,003 \text{ rad}) = 311 \cdot \text{sen} (54^\circ) = 251,6 \text{ V}$$

* Nota: se ha transformado el ángulo en radianes a grados para operar el seno.

12.4 Receptores elementales en corriente alterna

Ahora vamos a estudiar el comportamiento de los receptores elementales cuando son sometidos a una corriente alterna. Dentro de la multitud de receptores que se pueden construir existen tres elementos claramente diferenciados. Nos referimos a las resistencias, bobinas y condensadores. Estos receptores se comportan de diferente manera, según se les aplique corriente continua o alterna.

12.4.1 Circuito con resistencia pura

Los circuitos con resistencia aparecen prácticamente en todo tipo de receptores, ya que hay que tener en cuenta que los propios conductores con los que se diseñan los receptores siempre poseen algo de resistencia. Por supuesto, los receptores que utilizan básicamente las resistencias son los calefactores.

En corriente continua: Recordemos que cuando una corriente continua fluye por una resistencia, ésta se calienta. Para calcular el valor de la corriente aplicamos la ley de Ohm:

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

- I = Intensidad en amperios
- V = Tensión en voltios
- R = Resistencia en ohmios

La potencia que aparece en la resistencia se transforma en energía calorífica y se calcula mediante las expresiones:

$$P = V \cdot I$$

$$P = R \cdot I^2$$

P = Potencia en vatios

En corriente alterna: Una resistencia pura se comporta de forma similar en corriente alterna que en continua. En este caso también se cumple la ley de Ohm, pero ahora se aplica con los valores eficaces de la corriente y la tensión, que son los que indicarían un amperímetro y un voltímetro, respectivamente (Figura 12.11).

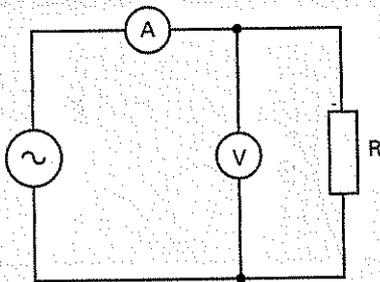


Figura 12.11

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

- I = Intensidad eficaz en amperios
- V = Tensión eficaz en voltios
- R = Resistencia en ohmios

De esta manera, se puede deducir que, para una tensión determinada aplicada a una resistencia, la intensidad eficaz que aparece en corriente alterna es del mismo valor que la intensidad de corriente continua que recorre el mismo circuito.

Es por eso que la potencia que se desarrolla en C.A. es igual que la que se desarrolla en C.C. Hecho que se puede comprobar experimentalmente. Si conectamos un vatímetro para medir la potencia a la que trabaja una resistencia óhmica pura, podremos verificar que la lectura del vatímetro es la misma para C.C. que para C.A., siempre y cuando utilicemos los mismos valores de tensión e intensidad en C.C. que los eficaces de C.A.

$$P = V \cdot I$$

$$P = R \cdot I^2$$

P = Potencia en vatios

Dado que la tensión que aplicamos a la resistencia varía según la forma de una senoide, si aplicásemos la ley de Ohm a todos estos valores, obtendremos una intensidad de corriente eléctrica que también es una senoide, tal como se muestra en la Figura 12.12.

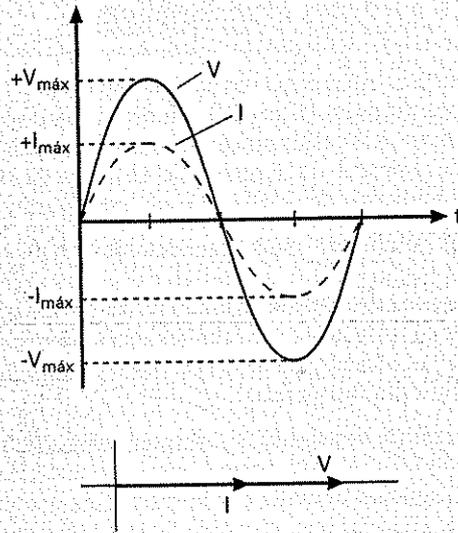


Figura 12.12. Representación de la tensión y corriente en una resistencia.

Si observamos detenidamente la representación gráfica de la tensión e intensidad podremos comprobar que, cuando el valor de la tensión V aumenta o disminuye, también lo hace el de la corriente I, alcanzando los valores máximos y nulos en el mismo instante de tiempo. En este caso se puede decir que **la corriente y la tensión están en fase.**

En el gráfico inferior de la Figura 12.12 se ha representado el diagrama vectorial de V y de I. Estas magnitudes aparecen dibujadas como dos vectores que giran a la velocidad ω en el sentido contrario a las agujas de un reloj; el valor instantáneo de las mismas es el que correspondería a la proyección de estos vectores en el eje Y. Para que la representación sea correcta es necesario dibujar estos vectores con una longitud que sea proporcional a los valores de la tensión e intensidad.

Ejemplo: 12.9

Determinar la corriente y potencia que aparecerán en una resistencia pura de 50 ohmios si la sometemos a una tensión alterna senoidal de 220 V. Dibujar el diagrama vectorial.

Solución: Mientras no nos indiquen ninguna otra referencia, la tensión a la que se refiere el enunciado de este problema es el valor eficaz. De esta forma el valor eficaz de la intensidad de la corriente, es:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ A}$$

La potencia la podemos calcular así:

$$P = R \cdot I^2 = 50 \cdot 4,4^2 = 968 \text{ W}$$

El diagrama vectorial lo dibujamos a una determinada proporción de los valores $I = 4,4 \text{ A}$ y $V = 220 \text{ V}$, tal como se muestra en la Figura 12.13.

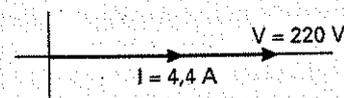


Figura 12.13

12.5 Circuito con bobina

Las bobinas están presentes en todos aquellos receptores en los que sea necesario la producción de un campo magnético. Nos referimos a los electroimanes, contactores, motores, reactividades de arranque de lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de mercurio, vapor de sodio, etc.), transformadores, etc.

Para el estudio del comportamiento de la bobina vamos a partir del hecho de que su resistencia es cero. Hecho, que como se podrá entender, es en la mayoría de las aplicaciones falso, ya que los conductores con los que se construyen habitualmente las bobinas son de cobre, por lo que siempre tienen una determinada resistencia.

En corriente continua: Si conectamos una bobina a una tensión continua, en ella aparece una corriente eléctrica que queda únicamente limitada por la resistencia que posean los conductores con los que haya sido fabricada. Según la ley de Ohm: $I = V/R$. Dado que esta resistencia suele ser pequeña, si aplicamos una tensión elevada a la bobina, aparece una fuerte corriente por la misma, desarrollándose una fuerte potencia que puede llegar a destruirla por el fuerte calor generado.

En corriente alterna: Si conectamos la misma bobina a una tensión alterna, se puede comprobar experimentalmente que ahora la corriente que fluye por la misma es más bien moderada. Si conectamos un vatímetro podríamos comprobar que el consumo de potencia es prácticamente nulo, a pesar de la existencia de una cierta corriente. De aquí se puede sacar la conclusión de que la bobina desarrolla una cierta oposición a la corriente eléctrica de carácter diferente a la resistencia óhmica.

Todos estos fenómenos se deben al efecto de autoinducción de la bobina:

Cuando la bobina es recorrida por una corriente alterna, aparece una corriente variable, y por tanto un campo magnético también variable (Figura 12.14). Dado que las líneas de fuerza del flujo magnético, que ella misma genera, cortan a sus propios conductores, surge una f.e.m. de autoinducción que, según la ley de Lenz, se va a oponer a la causa que la produjo. Es decir, se opone en todo momento a los cambios de corriente.

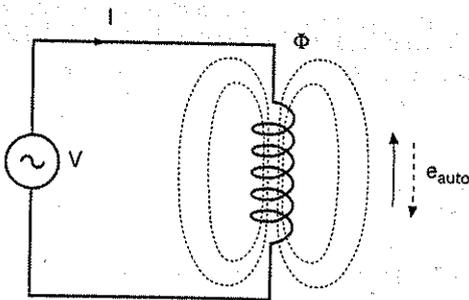


Figura 12.14. La f.e.m. de autoinducción de la bobina se opone a la corriente.

Cuando la corriente, siguiendo las variaciones de la función senoidal, tiende a crecer, el campo magnético también lo hace. Aparece entonces una f.e.m. que se opone a que la corriente se establezca, provocando un efecto de retraso en la corriente eléctrica respecto de la tensión (al conectar una bobina a una tensión alterna, la tensión aparece inmediata-

mente, mientras que la corriente tarda un cierto tiempo en establecerse). En estas condiciones la bobina se está cargando de energía en forma de campo magnético creciente.

Cuando la corriente se ha establecido con su valor máximo por la bobina, la f.e.m. de autoinducción se hace cero. Pero cuando la corriente empieza a disminuir, también lo hace el campo, y entonces se genera una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que se opone a que la corriente desaparezca. Ahora la bobina descarga hacia el generador la energía que había acumulado en forma de campo magnético decreciente.

Realmente, una bobina pura (sin resistencia óhmica) devuelve toda la energía que ha utilizado para crear el campo magnético y, en consecuencia, la potencia media que consume es cero.

En la Figura 12.15 se ha representado a la corriente eléctrica con un retraso de 90° respecto de la tensión. Observa cómo, efectivamente, cuando la intensidad quiere crecer la tensión es máxima, siendo en este momento cuando se carga la bobina.

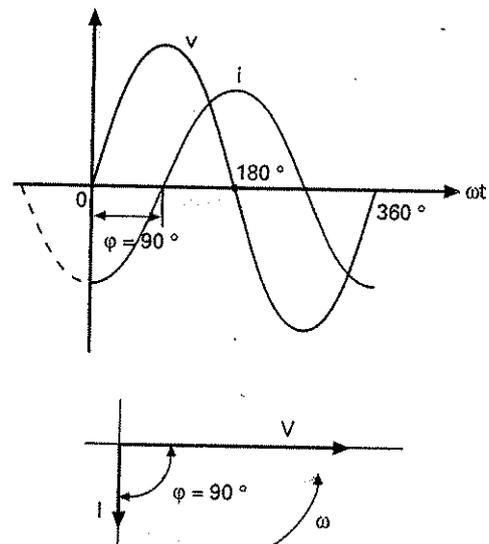


Figura 12.15. Diagrama vectorial de V e I en una bobina pura.

En este caso se dice que la intensidad está desfasada en retraso respecto a la tensión en un cuarto de ciclo, es decir ángulo ϕ de 90° .

Una bobina pura retrasa un ángulo de 90° a la corriente respecto de la tensión.

12.5.1 Reactancia inductiva de una bobina

Como la oposición que presenta la bobina a la corriente alterna tiene que ver con los fenómenos de autoinducción, ésta será mayor cuanto mayor sea el coeficiente de autoinducción L y más rápidas sean las variaciones de la corriente alterna, es decir la frecuencia f . Si llamamos reactancia inductiva X_L a la oposición que presenta la bobina a la corriente, tendremos que:

$$X_L = 2\pi fL$$

X_L = Reactancia inductiva en ohmios

f = Frecuencia en hertzios

L = Coeficiente de autoinducción en henrios

Para calcular el valor eficaz de la corriente en una bobina aplicaremos la siguiente expresión, que es muy similar a la ley de Ohm:

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

12.5.2 Potencia en una bobina

Tal como indicábamos al principio de este tema, si se mide la potencia de una bobina pura al aplicarla una C.A., se puede comprobar que el vatímetro indica una potencia igual a cero.

Al contrario que ocurre en una resistencia, en una bobina pura no se produce ningún consumo de energía calorífica. La corriente que recorre la bobina sirve únicamente para generar el campo magnético.

En realidad lo que ocurre es que, al intentar crecer la corriente por la bobina, también lo hace el campo magnético, produciéndose un consumo de energía eléctrica. En este caso la energía fluye del generador de C.A. hacia la bobina y es cuando decimos que ésta se está cargando de energía electromagnética. Una vez alcanzada la corriente máxima y el flujo máximo, éstos tienden a disminuir siguiendo la trayectoria senoidal, desarrollándose una f.e.m. de autoinducción de tal sentido que genera una energía eléctrica que, ahora, fluye desde la bobina hacia el generador. En este caso, la bobina devuelve la energía al generador. De esta manera tenemos que la bobina no consume realmente la energía, simplemente la toma prestada durante un cuarto de ciclo para generar su campo electromagnético, para devolverla en el siguiente cuarto de ciclo.

Dado que el vatímetro mide el valor medio de la potencia y ésta es positiva durante un cuarto de ciclo y negativa en el siguiente, éste no indica ninguna potencia.

Aunque la bobina no consuma energía real para su funcionamiento, las constantes cargas y descargas de la misma hacen que circule una determinada corriente por los conductores y, por tanto, también aparece una potencia que fluctúa por los mismos, que llamaremos **potencia reactiva** (Q_L).

En una bobina: $Q_L = X_L I^2$ (VAR) (volti-amperios-reactivos).

Ejemplo: 12.10

Se conecta una bobina con un coeficiente de autoinducción de 0,2 henrios a una red de C.A. de 50 Hz, tal como se muestra en la Figura 12.16. Si el voltímetro indica una tensión de 125 V, averiguar las lecturas del amperímetro y el vatímetro, así como la potencia reactiva de la bobina. Dibujar el diagrama vectorial

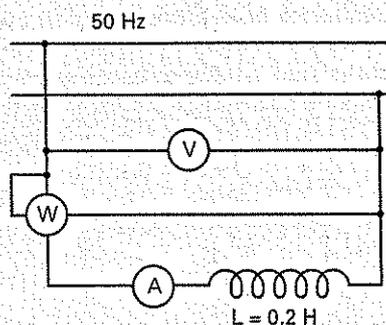


Figura 12.16

Solución: Primero determinamos la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,2 = 62,8 \Omega$$

La intensidad de la corriente eléctrica quedará limitada por el valor de esta reactancia.

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{125}{62,8} = 2 \text{ A}$$

La lectura del amperímetro es de 2 A, que se corresponde con el valor eficaz de la corriente.

Con estos valores ya podemos dibujar el diagrama vectorial (Figura 12.17). Para ello tendremos en cuenta que la bobina produce un retraso de 90° a la corriente respecto de la tensión.

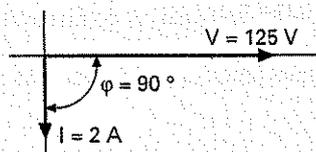


Figura 12.17

La potencia reactiva la calculamos con la expresión:

$$Q_L = X_L I^2 = 62,8 \cdot 2^2 = 251 \text{ VAR}$$

Como se trata de una bobina pura, el vatímetro indica cero vatios.

12.6 Circuito con condensador

Los condensadores no son receptores que se utilicen tan habitualmente en C.A. como las resistencias y las bobinas. Sin embargo son muy útiles, por ejemplo, para contrarrestar los fenómenos negativos que producen las potencias reactivas de las bobinas.

En corriente continua. Cuando aplicamos C.C. a un condensador, éste se carga de energía eléctrica, haciendo fluir corriente eléctrica por el circuito sólo durante dicha carga. De esta forma, se puede decir que un condensador no permite el paso de la corriente continua.

En corriente alterna. Si conectamos un condensador a una tensión alterna (Figura 12.18), se puede comprobar experimentalmente que ahora sí fluye corriente de una forma cons-

tante. Si conectásemos un vatímetro, al igual que ocurre con el circuito con bobina, podríamos comprobar como el consumo de potencia es nulo, a pesar de la existencia de una cierta corriente. De aquí se puede sacar la conclusión de que el condensador, lo mismo que la bobina, no consume potencia.

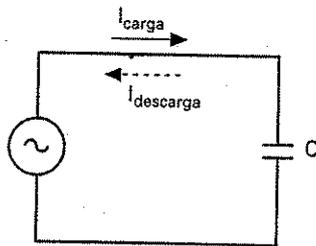


Figura 12.18. El condensador se carga y descarga al aplicarle C.A.

Estudiemus con detenimiento los fenómenos que se dan. Cuando aplicamos la tensión al condensador, como éste está totalmente descargado, aparece en el mismo una fuerte corriente de carga. Según se carga el condensador, la tensión que aparece en el mismo va aumentando mientras disminuye la corriente. Cuando se completa la carga la corriente es cero y la tensión alcanza su valor máximo. Se habrá podido observar en esta explicación, que en un condensador primero aparece la corriente, siendo la tensión cero (nivel de carga inicial cero) y según se va cargando el mismo la tensión crece y la corriente disminuye. Por esta razón, se puede decir que el condensador adelanta la corriente en el tiempo respecto de la tensión. En el diagrama vectorial este desfase se corresponde a un ángulo de 90° en ciclo (Figura 12.19).

Cuando la tensión aplicada al condensador comienza su descenso, éste descarga la energía acumulada en el 1/4 de ciclo anterior, apareciendo una corriente de descarga por el circuito.

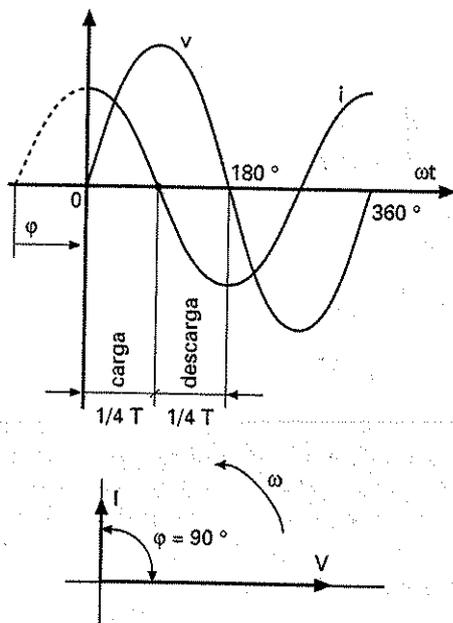


Figura 12.19: Diagrama vectorial de V e I en un condensador.

Un condensador puro adelanta un ángulo de 90° a la corriente respecto de la tensión.

12.6.1 Reactancia capacitiva de un condensador

Un condensador, en C.A., hace que fluya constantemente una corriente eléctrica por el circuito debido a las constantes cargas y descargas del mismo. Es importante hacer notar que esta corriente nunca llega a atravesar el dieléctrico del condensador, pero sí existe por los conductores que lo alimentan.

Como el establecimiento de la corriente eléctrica en un condensador cuando le es aplicado una C.A. tiene que ver con los fenómenos de carga y descarga del mismo, dicha corriente será mayor cuanto mayor sea la capacidad del condensador y más rápidas sean dichas cargas y descargas, es decir la frecuencia f . Si llamamos reactancia capacitiva X_C a la oposición que presenta el condensador a la corriente, tendremos que:

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

X_C = Reactancia capacitiva en ohmios

f = Frecuencia en hertzios

C = Capacidad del condensador en faradios

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

Para calcular el valor eficaz de la corriente en un condensador aplicaremos la expresión similar a la ley de Ohm:

12.6.2 Potencia en un condensador

Al igual que ocurre con la bobina, si se mide con un vatímetro la potencia de un condensador al conectarlo a una C.A., se puede comprobar que éste indica una potencia igual a cero.

En un condensador tampoco se produce ningún consumo de energía calorífica. Este hecho se debe a que en el primer cuarto de ciclo el condensador se carga de energía eléctrica en forma de carga electrostática, por lo que la energía fluye del generador de C.A. al condensador. En el siguiente cuarto de ciclo el condensador se descarga hacia el generador, devolviendo al mismo la energía acumulada. Al igual que con la bobina, el condensador no consume realmente la energía, simplemente la toma prestada durante un cuarto de ciclo, para devolverla en el siguiente cuarto de ciclo. Por esta razón el vatímetro, que indica el valor medio de la potencia instantánea, indica una potencia igual a cero.

La corriente que fluye hacia el condensador sirve sólo para producir las cargas y descargas constantes del mismo. Además, aquí también aparece una potencia reactiva Q_C producida por la energía que se intercambia entre el condensador y el generador.

En un condensador: $Q_C = X_C I^2$ (VAR) (volti-amperios-reactivos).

Se puede comprobar que cuando la bobina descarga su energía eléctrica acumulada en forma de campo electromag-

nético, se produce el ciclo de carga del condensador. En conclusión, se puede decir que la potencia reactiva del condensador es negativa respecto a la bobina y que, por tanto sus efectos se compensan. Este aspecto habrá que tenerlo en cuenta cuando conectemos en un mismo circuito bobinas con condensadores.

Ejemplo: 12.11

Se conecta un condensador de 75 μF una red de C.A. de 50 Hz, tal como se muestra en la Figura 12.20. Si el voltímetro indica una tensión de 220 V, averiguar las lecturas del amperímetro y el vatímetro, así como la potencia reactiva del condensador. Dibujar el diagrama vectorial.

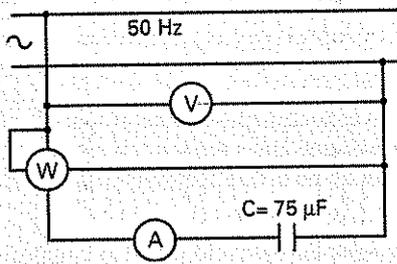


Figura 12.20

Solución: Primero determinamos la reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 75} = 42,4 \Omega$$

La intensidad de la corriente eléctrica quedará limitada por el valor de esta reactancia.

$$I = \frac{V}{X_C} = \frac{220}{42,4} = 5,2 \text{ A}$$

La lectura del amperímetro es de 5,2 A.

Con estos valores dibujamos el diagrama vectorial (Figura 12.21). Para ello tendremos en cuenta que el condensador produce un adelanto de 90° a la corriente respecto de la tensión.

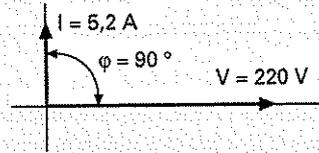


Figura 12.21

La potencia reactiva la calculamos con la expresión:

$$Q_C = X_C I^2 = 42,4 \cdot 5,2^2 = 1.146 \text{ VAR}$$

Como se trata de un condensador, el vatímetro indica cero vatios.

Actividades

1. Consigue un generador de funciones (instrumento muy utilizado en electrónica que sirve para producir tensiones variables a diferentes frecuencias) y, a modo de ejercicio práctico, comprueba con un osciloscopio los valores de las magnitudes asociadas a las tensiones senoidales de diferentes frecuencias (véase figura 12.22).

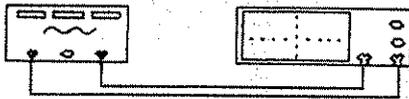


Figura 12.22. Esquema de conexiones de un osciloscopio midiendo las magnitudes asociadas a tensiones senoidales proporcionadas por un generador de funciones.

Antes de realizar la medida necesitaremos conocer en qué consiste un osciloscopio.

El osciloscopio es un aparato de medida que va a ser indispensable para el análisis y comprobación de los valores que se dan en una tensión variable. Su aplicación en el campo de la electrónica se hace indispensable. Un osciloscopio lo que hace es mostrar en su pantalla la forma que posee una determinada tensión o corriente eléctrica. Es decir, representa en un eje de coordenadas las variaciones de estas magnitudes en función del tiempo.

Así, por ejemplo, la imagen que aparecería en la pantalla del mismo al aplicarle una tensión alterna senoidal sería la mostrada en la Figura 12.23.

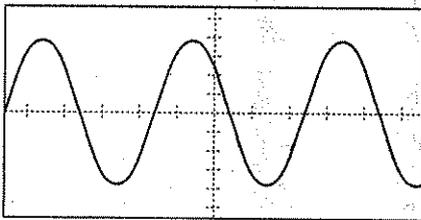


Figura 12.23. Imagen de una tensión senoidal en un osciloscopio.

Así, por ejemplo, en el caso de que la imagen que aparece en la pantalla fuese la de la Figura 12.24, los grados de desviación serían: atenuador vertical: 4 V/div; base de tiempos: 1 ms/div, el valor máximo y eficaz de la tensión, así como el período y la frecuencia la calcularemos así:

$$V_{\text{máx}} = 3 \text{ div} \cdot 4 \text{ V/div} = 12 \text{ V}$$

$$V_{\text{eficaz}} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \dots = 8,5 \text{ V}$$

$$T = 8 \text{ div} \cdot 1 \text{ ms/div} = 0,008 \text{ s} \quad f = 1/T = \dots = 125 \text{ Hz}$$

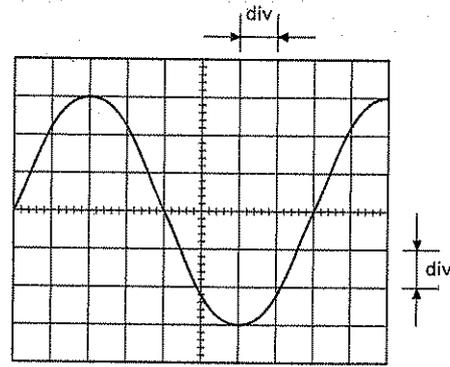


Figura 12.24

Para ampliar conocimientos sobre el manejo del osciloscopio conviene que antes realices un estudio más completo del mismo, como el que se propone en el Capítulo 16 de esta obra.

2. Con este sencillo ejercicio práctico comprobaremos los ángulos de desfase que provocan las bobinas puras y los condensadores.

Consigue una bobina con un coeficiente de autoinducción elevado y de baja resistencia óhmica. Conectaremos el canal A del osciloscopio en derivación con la bobina; de esta forma, conseguimos que aparezca por este canal la tensión senoidal aplicada.

Como el osciloscopio sólo mide tensiones, conectamos una resistencia de medida, de bajo valor óhmico, en serie con la bobina, con el fin de medir en ella la caída de tensión ($v = R_{\text{medida}} I$), que será proporcional a la corriente a medir. Para llevar a cabo esta operación, se conecta el canal B del osciloscopio, por la entrada vertical, en derivación con la resistencia de medida (Figura 12.25).

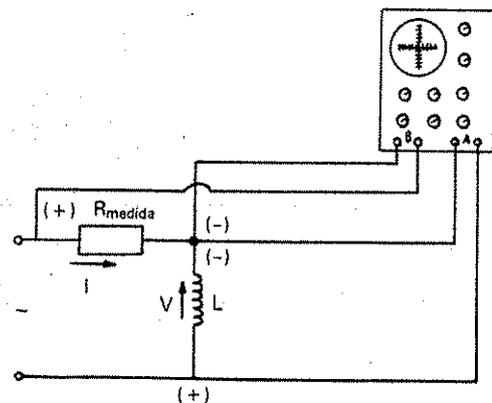


Figura 12.25. Medida de V e I con un osciloscopio.

***Nota:** Las puntas de prueba de ambos canales poseen una conexión interior en común en el terminal (-). Para evitar que se cortocircuiten las señales es conveniente

conectar al mismo punto del circuito este terminal, tal como se muestra en el esquema de conexiones de la Figura 12.25. El resultado de este condicionante es que la tensión y la corriente quedan en oposición, es decir desfasados 180° . Para poder visualizar correctamente la señal en la pantalla del osciloscopio hay que invertir la señal del canal B mediante el control de inversión de la polaridad.

¿Se consiguen exactamente 90° de desfase entre V e I?

¿Por qué razón el ángulo de desfase provocado es algo menor de 90° ?

Sustituye la bobina por un condensador y, teniendo en cuenta las mismas consideraciones, visualiza en el osci-

loscopio la tensión y la corriente por el mismo, determinando el ángulo de desfase entre V e I.

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

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

Autoevaluación

- 1) ¿A qué se debe que un alternador produzca una tensión que cambia constantemente de valor y de sentido?
 - a) Los electrones son empujados a moverse según gira el alternador
 - b) A que los conductores en su giro cortan el campo magnético con diferentes ángulos
- 2) ¿Qué indica un voltímetro de C.C. al ser conectado a una red de C.A.?
 - a) El valor eficaz
 - b) El valor máximo
 - c) Cero
- 3) ¿De todos los valores que compone una C.A. senoidal, cuál es el que se utiliza siempre para cálculos y medidas?
 - a) El valor eficaz
 - b) El valor medio
 - c) El valor máximo
- 4) ¿Por qué es interesante conocer el valor máximo de la tensión en un sistema de C.A.?
 - a) Es el que se utiliza comúnmente para realizar cálculos y medidas
 - b) Es el que hay que tener en cuenta para la elección de los aislantes
 - c) De él depende el valor de la frecuencia
- 5) ¿De los componentes que a continuación se exponen, cuál de ellos produce un adelanto de 90° a la corriente respecto de la tensión?
 - a) Una bobina
 - b) Un condensador
 - c) Una resistencia
- 6) Las bobinas y condensadores no consumen realmente energía eléctrica. ¿Cómo se denomina a la potencia eléctrica que intercambian con el generador?
 - a) Potencia activa
 - b) Potencia aparente
 - c) Potencia reactiva
- 7) Cuando se conecta una resistencia a una red de C.A. se produce un desfase entre la tensión y la corriente de:
 - a) 0°
 - b) 90°
 - c) 45°
- 8) Con un voltímetro de C.A. se mide una tensión de 100 V, ¿cuál es el valor máximo de la tensión?
- 9) Averiguar la frecuencia de una C.A. si su período es de 5 ms.
- 10) Determinar la tensión máxima que deberá soportar un aislador de una línea de transporte de energía eléctrica si la tensión eficaz entre fases es de 220.000 V.
- 11) Al medir con un osciloscopio una tensión alterna, obtenemos la señal que se indica en la Figura 12.26. Estando el atenuador vertical en 10 V/div y la base de tiempos en 5 ms/div, determinar el valor máximo, el valor eficaz, el período, la frecuencia y el valor instantáneo a los 5 ms.

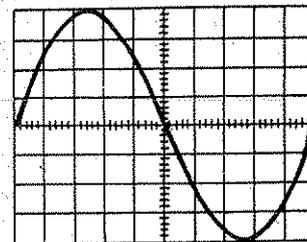


Figura 12.26

- 12) Una espira gira a 1.500 revoluciones/minuto en el seno del campo magnético formado por un par de polos. ¿Cuál será la velocidad angular, la frecuencia y el período de la tensión alterna inducida en dicha espira?
- 13) El valor máximo de una tensión senoidal es de 311 V, para una frecuencia de 50 Hz. Encontrar los valores instantáneos de la tensión para los tiempos: 1 ms, 3 ms, 5 ms, 6 ms, 10 ms, 11 ms, 13 ms, 20 ms y situar los mismos en un gráfico de la onda senoidal.
- 14) Si una tensión senoidal posee un valor de 90 V a los 30° del ciclo, encuéntrase el valor eficaz de la misma.
- 15) Al conectar un osciloscopio a una fuente de tensión senoidal aparece en su pantalla la imagen de la Figura 12.27. Averiguar la lectura de los siguientes aparatos de medida conectados a la misma fuente: a) un voltímetro de C.A.; b) un voltímetro de C.C.; c) un frecuencímetro.
- 16) Las características eléctricas de una plancha eléctrica son: $R = 50 \Omega$, $V = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Calcular la intensidad, la potencia y la energía consumida por ella en 8 horas.
- 17) Una bobina pura posee un coeficiente de autoinducción de 0,4 H. Se la conecta a una red de C.A. de 380 V y 60 Hz. Calcular la reactancia inductiva, la intensidad, la potencia reactiva y la energía consumida en 8 horas.
- 18) Se conecta un condensador de $200 \mu\text{F}$ a un alternador de 100 Hz y 50 V. Determinar la intensidad de la corriente y la potencia reactiva.

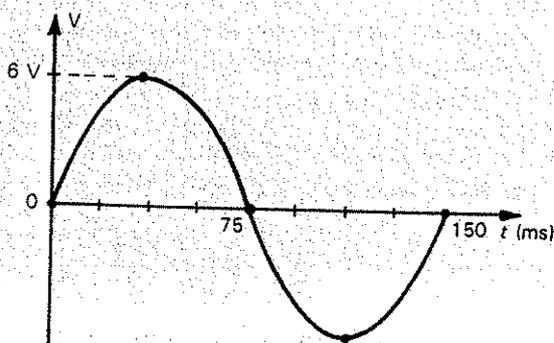


Figura 12.27