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 complemetarios, la función senoidal, variaciones de las funciones trigonométricas con el ángulo, representación vectorial y operaciones con vectores.

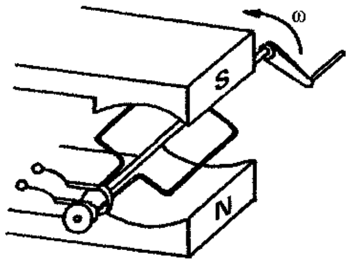

Figura 12.1. Alternador elemental.

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.

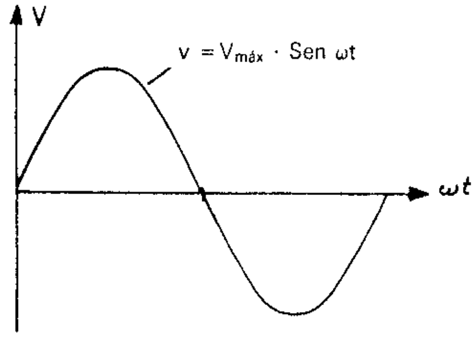

Figura 12.2. Representación de una tensión senoidal.

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:

$$v = V_{máx} \text{ sen } \omega t$$

Donde $V_{máx}$ 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).

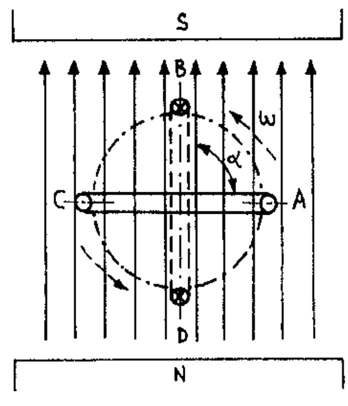

Figura 12.3. Espira que gira dentro de un campo magnético.

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

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).

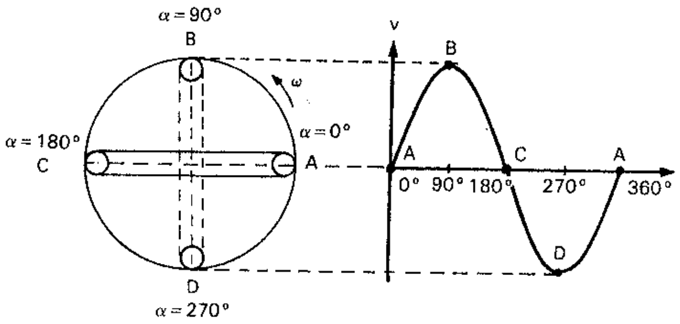

Figura 12. 4. Al girar la espira se produce una tensión senoidal.

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:

$$v_p = v \cos \gamma$$

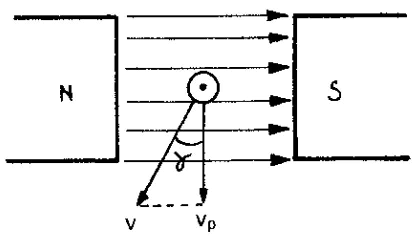

Figura 12.5. F.e.m. inducida en un conductor que se mueve en dirección oblicua al campo magnético.

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

$e = B\,L\,v_p$, 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)

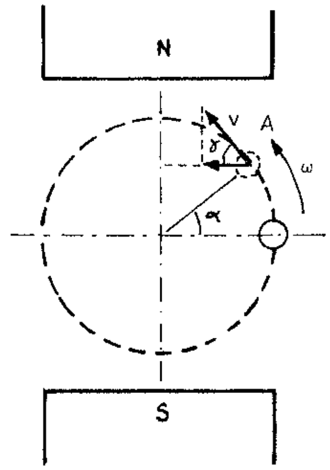

Figura 12.6. F.e.m. de un conductor que gira dentro de un campo magnético.

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:

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

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

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

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:

$$\boxed{e = E_{máx}\, sen \omega t}$$

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, sen 0° = 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:

$e = E_{máx} \operatorname{sen} 45°$.

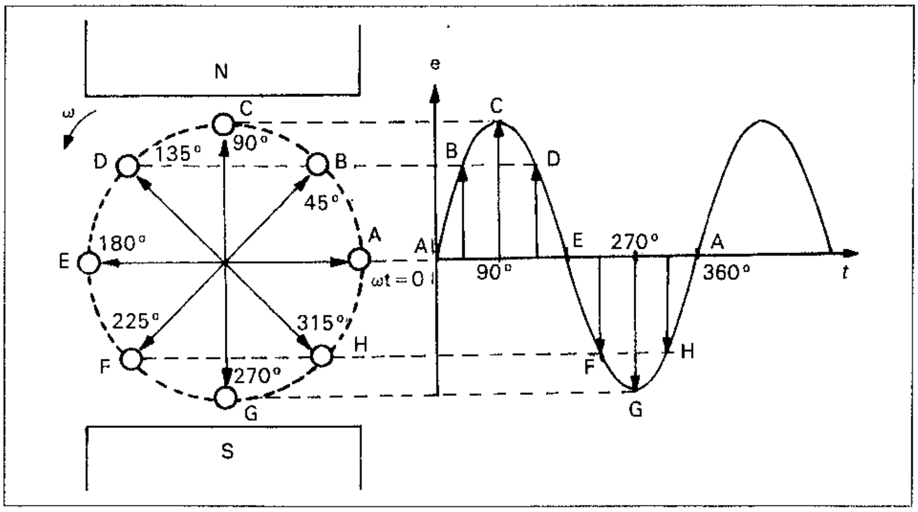

Figura 12.7. Generación de una f.e.m. senoidal.

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

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:

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

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

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

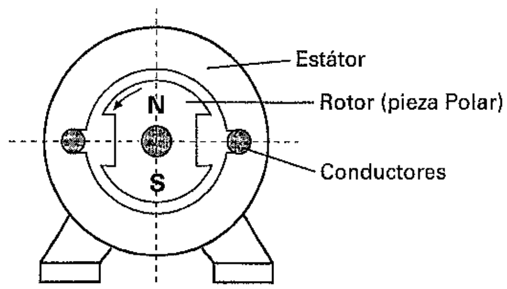

Figura 12.8. Alternador elemental donde los conductores permanecen fijos y el campo magnético es móvil.

12.3 Valores característicos de la C.A.

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

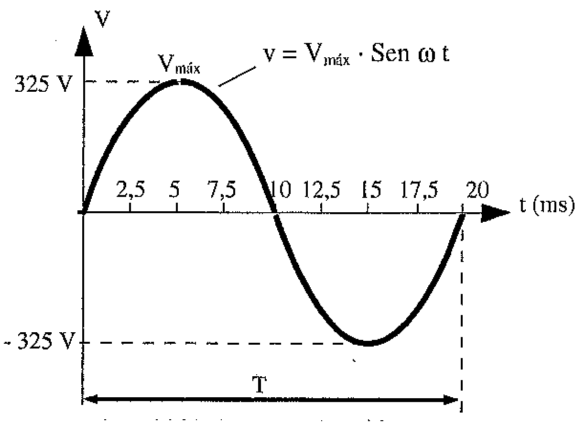

Figura 12.9. Representación de una C.A. senoidal industrial.

12.3.1 Valor instantáneo

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

$$v = V_{máx} \text{ sen } \omega t$$

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 $\omega t = \alpha$, $v = 325$ sen $30° = 162{,}5$ V

12.3.2 Valor máximo de la tensión

La tensión senoidal alcanza diferentes valores según la posición relativa de los conductores respecto al campo magnético. Varía a cada instante, de tal forma que por cada ciclo es dos veces nula y dos veces máxima (pero de sentido opuesto $+V_{máx}$ y $-V_{max}$). 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 aquélla que en las mismas condiciones produce los mismos efectos caloríficos en una resistencia eléctrica que una tensión continua del mismo valor.

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

$$V_{ef} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}}$$

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:

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

Ejemplo: 12.2

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

Solución: $V_{ef} = \frac{V_{máx}}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} = 230 \text{ V}$

Ejemplo: 12.3

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

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

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:

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

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

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.

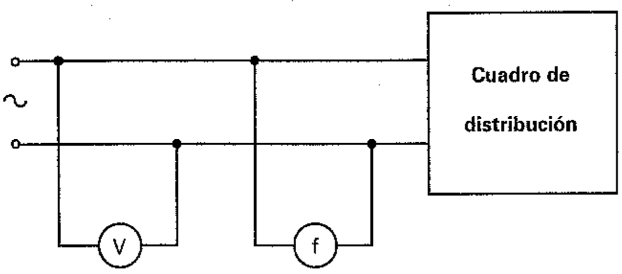

Figura 12.10

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

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

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 alternador, 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 ($\alpha = 2\pi$):

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

$$\boxed{\omega = 2\pi f}$$

Ejemplo: 12.8

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

Solución: Primero calculamos la velocidad angular:

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

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

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

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