

Circuitos eléctricos

Fundamentos físicos de la ingeniería civil



tech



CONTENIDO

1. Objetivos

2. Introducción

3. Circulación de cargas

4. Baterías

5. Corriente alterna

6. Resumen

7. Bibliografía



OBJETIVOS

- Describir la circulación de cargas aisladas y puntuales, así como las relaciones con otras ecuaciones y principios para calcular el campo eléctrico.
- Reconocer la resistencia de los conductores aplicados a circuitos de corriente alterna, observando sus características más relevantes y su resistencia.
- Identificar las baterías, generadores y condensadores.
- Distinguir la corriente alterna profundizando en ella, así como en el comportamiento de resistencias, bobinas y condensadores en corriente alterna.
- Mostrar los cálculos de desfase, independencia, los diferenciales circuitos en CA, RL RC, RLC, así como la potencia activa reactiva y resonancia.
- Establecer las formas de medir la corriente en un circuito.

INTRODUCCIÓN

En el siglo XIX, durante el origen industrial del uso de la electricidad se utilizaba la corriente continua. La ventaja en la utilización de este tipo de corriente es que se puede almacenar en baterías. Sin embargo, un tiempo más tarde, Nikola Tesla desarrolló la corriente alterna. Este hecho provocó una importante disputa entre Thomas Edison y George Westinghouse para distribuir la electricidad utilizando una tecnología u otra en la llamada guerra de las corrientes.

El sistema usado hoy en día de corriente alterna, básicamente, fue ideado por Nikola Tesla. La corriente alterna superó las limitaciones que se generaban al emplear la Corriente Continua (CC), que es un sistema ineficiente para la distribución de energía a gran escala debido a problemas en la transmisión de potencia.

CIRCULACIÓN DE CARGAS

De acuerdo a Hewitt [1], la corriente eléctrica se define como el flujo de cargas eléctricas que atraviesa por unidad de tiempo la sección transversal de un cable. Esto es así porque uno o más electrones de cada átomo metálico tienen libertad de moverse a lo largo de la redícula atómica. Estos portadores de carga se llaman electrones de conducción.

Aunque, en los fluidos conductores, como en una batería de automóvil, tanto iones positivos como electrones componen el flujo de la carga eléctrica. Si los extremos de un conductor eléctrico están a potenciales eléctricos diferentes, cuando hay una **diferencia de potencial**, la carga fluye de un extremo al otro. El flujo de carga persiste en tanto haya una diferencia de potencial. Para lograr un flujo de carga en un conductor, se debe hacer según Hewitt [1] algún arreglo que permita mantener una diferencia de potencial mientras la carga fluye de un extremo al otro.

En los circuitos de alambres metálicos, los electrones constituyen el flujo de carga. Los protones, por otra parte, no se mueven porque están ligados en el interior de los núcleos de los átomos que están más o menos bloqueados en posiciones fijas.

La tasa de **flujo eléctrico** se mide en **amperes**. Un ampere es una tasa de flujo igual a 1 coulomb de carga por segundo. La unidad de la **diferencia de potencial eléctrico (voltaje)** es el **volt**. El voltaje no va a ningún lado, la carga es la que se mueve. El voltaje produce una corriente, si hay un circuito completo (figura 1).

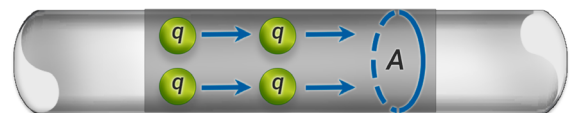


Figura 1. Cargas en un conductor [2].

Tipler [2] señala que, cualquier carga eléctrica acelerada y, por tanto, cualquier corriente eléctrica cambiante, **da lugar a una onda electromagnética que se propaga a muy alta velocidad fuera** de la superficie del conductor. Esta velocidad suele ser una fracción significativa de la velocidad de la luz, como puede deducirse de las ecuaciones de Maxwell y es, por ende, muchas veces más rápida que la velocidad de deriva de los electrones. Por ejemplo, en las líneas de corriente alterna, las ondas de energía electromagnética se propagan a través del espacio entre los cables, moviéndose desde una fuente hasta una carga distante, aunque los electrones en los cables solo se mueven de un lado a otro en una distancia minúscula.

Intensidad de la corriente (J) es =

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = qn \cdot A v_d \cdot \Delta t$$

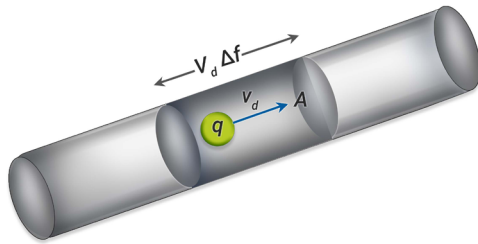


Figura 2. Carga total [2].

En el tiempo Δt , todas las cargas contenidas en el volumen sombreado pasan por medio de A . Si existen n portadores de carga por unidad de volumen, cada uno de carga q , la carga total de este volumen es $\Delta l \cdot Q = n \cdot q \cdot A \cdot \Delta l$, donde v_d es la velocidad de desplazamiento de los portadores de carga como se ve en la (figura 2).

La **corriente** a través de la superficie S se define como el flujo del **vector densidad de corriente** $\vec{J}$ mediante la superficie, esto es:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} = \int_S \vec{J} \cdot \hat{n} dA$$

dA es un elemento de área multiplicado por el vector unitario $\hat{n}$ que es perpendicular a la superficie S en el punto donde se ubica dicho elemento de área. Si $\vec{J}$ es uniforme y si la superficie es plana, lo cual significa que el vector unitario $\hat{n}$ es constante, entonces la intensidad se puede expresar de la forma siguiente:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} = \vec{J} \cdot \vec{A} = \vec{J} \cdot \hat{n} A = J A \cos \theta$$

Se observa un ejemplo en la (figura 3):

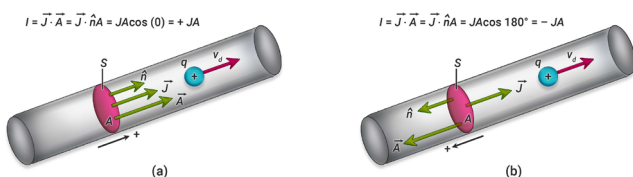


Figura 3. La superficie plana S es perpendicular al vector densidad de corriente $\vec{J}$ [2].

Según Tipler [2], el vector superficie $\vec{A}$ correspondiente a la superficie S queda definido por la dirección del vector unitario $\hat{n}$. Sin embargo, existen dos posibilidades para la dirección de $\hat{n}$.

a) La corriente I a través de S es positiva si las direcciones de $\vec{u}$ y $\vec{j}$ son iguales.

b) La corriente I a través de S es negativa si las direcciones de $\vec{n}$ y $\vec{j}$ son opuestas.

Resistencia

La cantidad de corriente que existe depende no solo del voltaje, sino también de la **resistencia eléctrica que ofrece el conductor** al flujo de carga [2]. La resistencia de un alambre depende tanto del **grosor** como de la **longitud** del alambre y de su **conductividad** particular. Los alambres gruesos tienen menos resistencia que los alambres delgados. Los alambres más largos tienen más resistencia que los alambres cortos.

Ahora se ha preparado una comparación con la ayuda de Hewitt [1]: el alambre de cobre tiene menos resistencia que el alambre de acero del mismo tamaño. La resistencia eléctrica, asimismo, depende de la **temperatura**. Mientras mayores sean los empujones entre los átomos dentro del conductor, mayor será la resistencia que ofrezca el conductor al flujo de carga. En la mayoría de los conductores, un aumento de temperatura significa un aumento de resistencia. La resistencia de algunos materiales **llega a cero a temperaturas muy bajas**, se trata de los **superconductores**.

La resistencia eléctrica se mide en unidades llamadas **ohms**. $(\Omega) = \frac{1 \text{ V}}{\text{A}}$

El cociente entre la caída de potencial en la dirección de la corriente y la intensidad de la corriente se llama **resistencia del segmento**: $R = \frac{V}{I}$

En la (figura 4) se visualiza una foto de resistencias en un circuito.

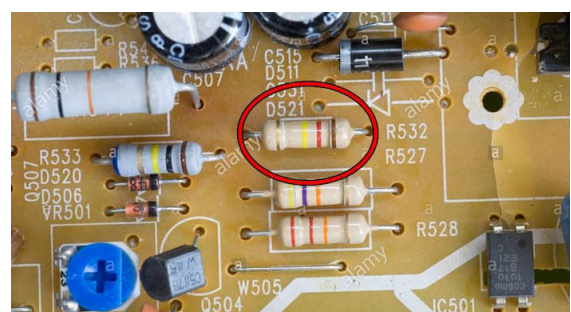


Figura 4. Resistencias de carbono con el código de color colocadas sobre un panel de circuitos [2].

Las bandas de colores deben ser leídas comenzando con la que está más próxima al extremo de la resistencia. Con las primeras dos bandas se determina un número entre **1** y **99**. La tercera banda representa el número de ceros que se han de añadir a la derecha del número formado por las dos primeras (figura 5).



Colores digitos	Tolerancia
Negro = 0	Marrón = 1 %
Marrón = 1	Rojo = 2 %
Rojo = 2	Dorado = 5 %
Naranja = 3	Plateado = 10 %
Amarillo = 4	Ninguno = 20 %
Verde = 5	
Azul = 6	
Violeta = 7	
Gris = 8	
Blanco = 9	

Figura 5. Bandas de colores en resistencias [2].

La ley de Ohm

La expresión formal de esta ley relaciona el voltaje, la corriente y la resistencia [2], es la siguiente: $V=I.R$. Se denomina, normalmente, como la ley de Ohm incluso cuando la resistencia varía con la corriente I . Cuanto mayor sea el voltaje, mayor será la corriente. Pero si la resistencia de un circuito se duplica, la corriente será la mitad de lo que sería de otro modo. Cuanto **mayor sea la resistencia, menor será la corriente** (figura 6).



Figura 6. Resistores [1].

Para muchos materiales, la resistencia no depende de la caída de voltaje ni de la intensidad. Estos materiales, en los que se incluyen la mayor parte de los metales, se denominan **materiales óhmicos**. La **corriente alterna** (CA) actúa como su nombre lo sugiere. Los electrones en el circuito se mueven **primero en una dirección y luego en la dirección contraria**, esto se logra al alternar la polaridad del voltaje en el generador u otra fuente de voltaje.

Rapidez y fuente de los electrones en un circuito

Como menciona Hewitt [1], cuando se acciona el interruptor de luz en la pared y el circuito se completa, ya sea CA o CD, la lámpara parece brillar de inmediato. La corriente se establece a través de los alambres casi a la rapidez de la luz. **No son los electrones los que se mueven con esta rapidez**. Si bien los electrones dentro del metal a temperatura ambiente tienen una rapidez promedio de algunos millones de kilómetros por hora, no forman ninguna corriente porque se mueven en todas las direcciones posibles. No hay un flujo neto en ninguna dirección preferida.

No obstante, **cuando se conecta una batería o un generador, en el interior del conductor se establece un campo eléctrico**. Los electrones continúan sus movimientos aleatorios **mientras que, al mismo tiempo, son empujados por este campo**. El campo eléctrico es el que puede viajar por un circuito casi a la **rapidez de la luz**. En el espacio afuera del alambre, según palabras de Hewitt [1], el campo eléctrico tiene un patrón determinado por la ubicación de las cargas eléctricas, incluidas algunas cargas que se acumulan sobre la superficie del alambre. En el interior del alambre, el campo eléctrico se dirige a lo largo del alambre.

Circuitos eléctricos

Como explica Hewitt [1], cualquier trayectoria a lo largo de la cual puedan fluir los electrones es un **circuito**. Para un flujo continuo de electrones debe haber un circuito completo, sin brechas. Por lo general, **una brecha la proporciona un interruptor eléctrico que puede abrirse o cerrarse** para cortar o permitir el flujo de energía. La mayoría de los circuitos tiene más de un dispositivo que recibe energía eléctrica. En general, estos dispositivos se conectan en un circuito en una de dos formas, en **serie** o en **paralelo**.

- **Circuitos en serie:** en este caso, los electrones pasan por todas las resistencias sucesivamente, es decir, por todas ellas circula la misma intensidad de corriente. La diferencia de potencial total (DV) será la suma de los DV en cada resistencia, como se ve en la (figura 7).

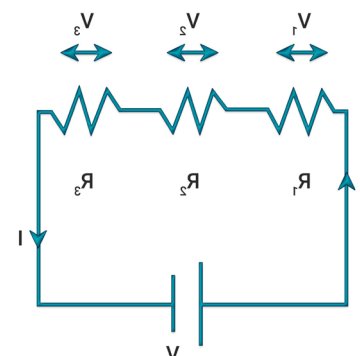


Figura 7. Circuito en serie [3].

En un **circuito en serie**, todos los componentes están conectados de extremo a extremo, formando una ruta única para el flujo de corriente.

Las más importantes características de los circuitos en serie son:

- La corriente eléctrica tiene una sola ruta a través del circuito. Esto significa que la corriente que pasa por medio de la resistencia de cada dispositivo eléctrico a lo largo de la ruta es la misma.
 - A esta corriente se resiste la resistencia del primer dispositivo, la resistencia del segundo y también la del tercero, de modo que la resistencia total a la corriente en el circuito es la suma de cada una de las resistencias a lo largo de la ruta del circuito.
 - La corriente en el circuito es numéricamente igual al voltaje suministrado por la fuente, dividido entre la resistencia total del circuito. Esto coincide con la ley de Ohm.
 - El voltaje suministrado es igual a la suma de cada una de las "caídas de voltaje" a través de cada dispositivo. Esto es consistente con el hecho de que la energía total suministrada al circuito es igual a la suma de las energías suministradas a cada dispositivo.
 - La caída de voltaje por medio de cada dispositivo es proporcional a su resistencia: la ley de Ohm se aplica por separado a cada dispositivo. Esto se deduce del hecho de que más energía se disipa cuando una corriente pasa mediante una resistencia grande que cuando la misma corriente pasa a través de una resistencia pequeña.
- En un **circuito paralelo**, todos los componentes están conectados entre sí, formando de manera exacta **dos conjuntos de puntos** eléctricamente comunes. Los electrones se reparten entre las distintas ramas del circuito, volviendo a encontrarse luego. La intensidad total se divide entre las ramas ($I_1 + I_2 + I_3 + \dots$). Al estar conectadas las resistencias a los mismos puntos del circuito, la diferencia de potencial es la misma para todas (figura 8).

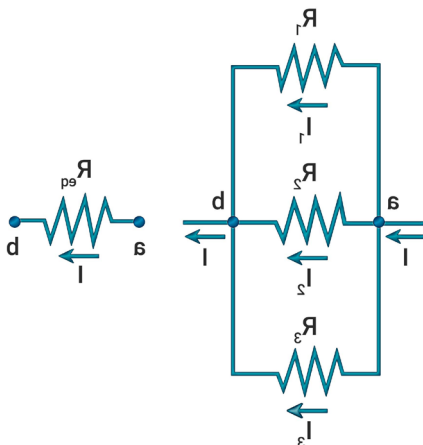


Figura 8. Circuito en paralelo [3]

Las principales **características** de las conexiones en paralelo son:

- Cada dispositivo se conecta a los mismos dos puntos A y B del circuito. Por tanto, el voltaje es el mismo a través de cada dispositivo.
- La corriente se divide entre las ramas paralelas. La ley de Ohm se aplica por separado a cada rama.
- La corriente total del circuito es igual a la suma de las corrientes en sus ramas paralelas. Esta suma es igual a la corriente de la batería u otra fuente de voltaje.
- A medida que aumenta el número de ramas paralelas, la resistencia global del circuito disminuye. La resistencia global se reduce con cada ruta agregada entre cualesquiera dos puntos del circuito. Esto significa que la resistencia global del circuito es menor que la resistencia de cualquiera de las ramas.

Cuando en un circuito se tienen varias combinaciones serie y paralelo mezcladas, hay que ir calculando las resistencias equivalentes por grupos, del más pequeño al más grande (figura 9).

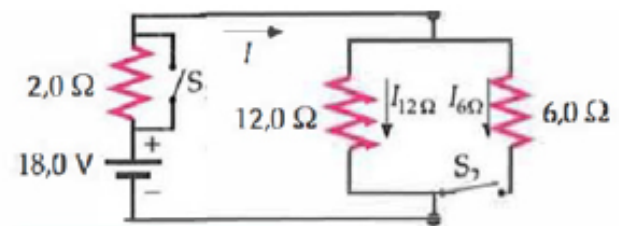


Figura 9. Asociaciones de resistencias en serie y en paralelo [2].

Fusibles de seguridad

Para **evitar la sobrecarga** de los circuitos pueden conectarse fusibles en serie a lo largo de la línea de suministro. De esta forma, toda la corriente de la línea debe pasar por el fusible. Una corriente mayor que 20 A fundirá el fusible, que se "apagará" y romperá el circuito. Antes de sustituir un fusible quemado, es necesario determinar y solucionar la causa de la sobrecarga. Con frecuencia, el aislamiento que separa a los alambres en un circuito se corroe y permite que los alambres se toquen. Esto reduce mucho la resistencia en el circuito, lo que acorta efectivamente la ruta del circuito y se llama **cortocircuito**.

En las construcciones modernas, los fusibles se han sustituido por **disyuntores** (interruptor automático) que utilizan imanes o tiras bimetálicas para abrir un interruptor cuando la corriente es muy grande. Las compañías eléctricas usan disyuntores para proteger sus líneas durante todo el recorrido de vuelta hasta los generadores.

Leyes de Kirchhoff

Ahora se ha preparado una comparación con la ayuda de Eisman [3] y se darán algunas definiciones previas:

- **Malla:** bucle o “subcircuito” cerrado que se puede establecer dentro de un circuito más complejo.
- **Rama:** parte del circuito entre un nudo y otro. Es una línea sin ramificar que incluye elementos como resistencias, generadores, motores, entre otros. Por todos los elementos de una rama del circuito, circula la misma intensidad.
- **Nudo:** un nudo es un punto del circuito donde este se bifurca o ramifica o donde se unen varias ramas. Por cada rama que confluye en el nudo circulará una determinada intensidad. Se cumple siempre, por el principio de conservación de la carga, que la suma de las intensidades que entran en el nudo, es igual a la suma de las intensidades que salen del nudo.

En términos de Wikipedia [4], las **leyes de Kirchhoff** son dos igualdades que se basan en la conservación de la energía y la carga en los circuitos eléctricos. Son ampliamente usadas en ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica. Ambas leyes de circuitos pueden derivarse directamente de las ecuaciones de Maxwell, pero Kirchhoff precedió a Maxwell y gracias a Georg Ohm su trabajo fue generalizado. Estas leyes son utilizadas para hallar corrientes y tensiones en cualquier punto de un circuito eléctrico.

- **Regla de mallas:** la suma algebraica de las variaciones de potencial a lo largo de cualquier bucle o malla del circuito debe ser igual a cero

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_N = 0$$

- **Regla de los nudos:** en un punto o nudo de ramificación de un circuito en donde puede dividirse la corriente, la suma de las corrientes que entran en el nudo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen del mismo.

¿Cómo se aplican las leyes de Kirchhoff en corriente alterna?

En un circuito y siguiendo una línea cerrada (malla o lazo), la segunda **ley de Kirchhoff** indica que la suma de las **tensiones** instantáneas es igual a cero. Esto es aplicable, tanto en **corriente continua**, como en **corriente alterna**. En un caso se tendrán, como elementos pasivos, resistencias y en otras impedancias.

Energía en circuitos eléctricos

La **energía perdida por unidad de tiempo**, como indica Tipler [2], es la potencia P disipada en el segmento conductor que, a su vez, es la velocidad con la que se disipa la energía potencial eléctrica en dicho segmento: $P=I \cdot V$

Si I se expresa en amperes y V en volts, la potencia perdida viene expresada en watts. La pérdida de potencia es el producto de la disminución de energía potencial por unidad de carga, V y el flujo de carga por unidad de tiempo

$$P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

BATERÍAS

La batería eléctrica, inventada en 1800 por Alessandro Volta (1745-1827), fue uno de los más importantes descubrimientos prácticos en la ciencia. Según Hewitt [1], las baterías y los generadores eléctricos realizan trabajo para alejar las cargas negativas de las positivas. En general, mas no siempre, en las baterías químicas este trabajo lo realiza la desintegración química de zinc o plomo en ácido y la energía almacenada en los enlaces químicos se convierte en energía potencial eléctrica.

Los generadores, como los alternadores en los automóviles, separan carga mediante inducción electromagnética. Una batería de automóvil común proporciona una presión eléctrica de 12 V a un circuito conectado a través de sus terminales. Entonces, a cada coulomb de carga se le suministran 12 J de energía que se hace fluir en el circuito unido a dichas terminales.

Tipler [2] señala que cuando se establece un campo eléctrico en un conductor, el gas de electrones incrementa su energía cinética debido al trabajo que el campo realiza sobre los electrones libres. Sin embargo, pronto se va alcanzando el estado estacionario, ya que esta energía adicional se convierte rápidamente en energía térmica del conductor por las colisiones entre los electrones y los iones de la red cristalina del material. El mecanismo por el cual el incremento de energía interna del conductor da lugar a un aumento de su temperatura se denomina **efecto Joule**.

Con objeto de mantener una corriente estacionaria en un conductor se necesita disponer, según Tipler [2], de un suministro de energía eléctrica. Un aparato o dispositivo que suministra energía eléctrica recibe el nombre de fuente de fuerza electromotriz (fem), término que hoy en día no se suele utilizar. Esta denominación induce a confusión porque no se trata de una fuerza. Ejemplos de estas fuentes fem son una batería o pila que convierte la energía química en energía eléctrica o un generador que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

De acuerdo a Hewit [1], en una batería real, la diferencia de potencial entre los bornes de la batería, denominada **tensión en los bornes**, no es simplemente igual al valor de la fem de la batería. Considerar el circuito formado por una batería real y una resistencia. Si la corriente se varía modificando la resistencia R y se mide la tensión en los bornes, resulta que esta decae de manera ligera a medida que crece la intensidad de la corriente. Es como si existiera una pequeña resistencia dentro de la batería. Así pues, una batería real puede considerarse como una batería ideal de fem más una pequeña resistencia r , denominada resistencia interna de la batería.

Elementos generadores: pila, batería, dinamo

Tal y como explica Eisman [3], **suministran energía a los electrones** para que continúen su circulación por el circuito. En CC poseen una polaridad (+, -), esto indica que, funcionando correctamente, los electrones, al pasar por el generador entran por el polo positivo (+) y salen por el negativo (-). En caso contrario, si la corriente circula al revés por el generador, ya no suministraría energía, sino que la consumiría, produciendo, por lo general, un calentamiento del generador y su posterior avería (aunque, a veces, esta corriente al contrario es útil, por ejemplo, es la forma de recargar una batería). En las pilas y baterías la energía proviene de una reacción química (reacción redox). En las dinamos (la de una bicicleta) se obtiene a partir del rectificado de **corriente alterna**.

Características de un generador

Como mencionó Eisman [3] con anterioridad, **la fuerza electromotriz (f.e.m., o más usado, e)**, la cantidad de energía que el generador suministra a cada unidad de carga eléctrica (a cada C) que pasa por él se mide, por tanto, en J/C. Esta unidad recibe el nombre propio de voltio (V). Es precisamente lo que aparece indicado en una pila (1,5 V, 4,5 V, 12 V en una batería).

Resistencia interna (r): también los generadores ofrecen una resistencia u oposición al paso de los electrones por ellos. Asimismo, esto hace que consuman algo de energía que se traduce, normalmente, en calentamiento. De ahí que, al conectar el generador al circuito, no será capaz de suministrar toda la energía que tiene indicada, sino un poco menos, como ejemplo, al conectar una pila de 4,5 V a una linterna, en realidad solo suministra 3,8 V aproximadamente.

Tensión a circuito abierto de un generador: es la tensión que se mide entre los bornes del generador cuando no está conectado al circuito. En ese caso, no circulará intensidad por él y no habrá caída de tensión interna debido a la resistencia interna. Se estará midiendo, entonces, la fuerza electromotriz del generador.

Generadores en serie y en paralelo, de acuerdo a Eisman [3], se distinguen entre

- **Serie:** varios generadores puestos en serie (respetando la polaridad) se comportan como un solo generador, cuya fem fuera la suma de las fem individuales y una resistencia interna igual a la suma de las resistencias internas individuales. Es una asociación muy usada: para ejemplificar, las pilas de 4,5 V son la asociación serie de 3 pilas de 1,5 V. Las baterías de los coches consisten en una serie de celdas o pilas individuales.
- **Paralelo:** conectar generadores (pilas) en paralelo solo tiene utilidad si son idénticos entre sí, es decir, con la misma fem y parecida resistencia interna. De lo contrario, por la pila de menor fem circulará la corriente en sentido contrario al habitual (desde el positivo al negativo por dentro de la pila), haciendo que esta se deteriore y consuma energía en lugar de suministrarla. Una conexión en paralelo de baterías iguales mantiene el mismo voltaje (no lo aumenta), pero multiplica la "capacidad", podrá suministrar corriente durante más tiempo antes de consumirse las pilas.

Motores: (M) un motor es un dispositivo que extrae energía del circuito en forma de movimiento (energía cinética). Se diferencia en esto de las resistencias (calor, luz). Su estructura es similar a un generador de tipo dinamo. De hecho, se caracteriza por tener una eM, llamada ahora fuerza contraelectromotriz (fcem) y una resistencia interna (r).

Recordar que un **condensador eléctrico**, también conocido frecuentemente como capacitor, es un dispositivo pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente, en forma de láminas o placas, en situación de influencia total (esto es, que todas las líneas de campo eléctrico que parten de una van a parar a la otra) separadas por un material dieléctrico o por vacío.

Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, adquieren una determinada carga eléctrica, positiva en una de ellas y negativa en la otra, siendo nula la variación de carga total.

Aunque desde el punto de vista físico un condensador no almacena carga ni corriente eléctrica, sino simplemente energía mecánica latente, al ser introducido en un circuito, se comporta en la práctica como un elemento “capaz” de almacenar la energía eléctrica que recibe durante el periodo de carga, la misma energía que cede después durante el periodo de descarga.

Al conectar una CA sinusoidal $v(t)$ a un condensador circulará una corriente $i(t)$, también sinusoidal, que lo cargará, originando en sus bornes una caída de tensión, $-v_c(t)$, cuyo valor absoluto puede demostrarse que es igual al de $v(t)$. Todo lo anterior, una vez alcanzado el régimen estacionario. Al decir que por el condensador circula una corriente se debe puntualizar que, en realidad, dicha corriente nunca atraviesa su dieléctrico. Aquello que sucede es que el condensador se carga y descarga al ritmo de la frecuencia de $v(t)$, por lo que la corriente circula externamente entre sus armaduras, esto hace referencia a la corriente de conducción, no obstante, en el interior del dieléctrico se puede hablar de la corriente de desplazamiento.

Por lo tanto, en los circuitos de CA, un condensador ideal se puede asimilar a una magnitud compleja sin parte real como se ve en la (figura

$$\vec{X}_C = 0 - jX_C = X_C \angle -90^\circ$$

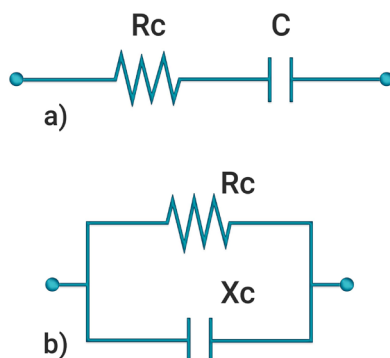


Figura 10. Circuitos equivalentes de un condensador en CA [3].

CORRIENTE ALTERNA

El sistema usado hoy en día, tal y como relata Hewitt [1], fue ideado fundamentalmente por Nikola Tesla y la distribución de la corriente alterna fue comercializada por George Westinghouse. La corriente alterna superó las limitaciones que aparecían al emplear la corriente continua (CC), la cual constituye un sistema ineficiente para la distribución de energía a gran escala debido a problemas en la transmisión de potencia.

Tal como explica Esiman [3], la corriente alterna se genera fácilmente mediante inducción magnética en los generadores de ac, diseñados para producir una fem sinusoidal. La razón del amplio uso de la corriente alterna, que minimiza los problemas de transmisión de potencia, viene determinada por su facilidad de transformación, cualidad de la que carece la corriente continua.

En palabras de Eisman [3], se resume que la energía eléctrica transmitida viene dada por el producto de la tensión, la intensidad y el tiempo. Dado que la sección de los conductores de las líneas de transporte de energía eléctrica depende de la intensidad, se puede modificar la tensión con un transformador hasta altos valores (alta tensión), disminuyendo en igual proporción la intensidad de corriente. Esto permite que los conductores sean de menor sección y, por tanto, de menor costo. Además, minimiza las pérdidas por efecto Joule, que dependen del cuadrado de la intensidad. Una vez en el punto de consumo o en sus cercanías, la tensión puede ser de nuevo reducida para posibilitar su uso industrial o doméstico de forma cómoda y segura.

La corriente alterna (CA) es una corriente:

- Variable en el tiempo.
- Su sentido cambia periódicamente, pasando de positivo a negativo y viceversa.
- Simétrica (alcanza los mismos valores en un sentido y en otro).
- Sinusoidal $I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t)$ o $I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t)$

Donde I_0 es la amplitud o valor máximo de la intensidad, ω es la frecuencia angular, que indica la rapidez con la que cambia I . Se mide en rad/s. Está relacionada con la frecuencia ν , $\omega = 2\pi\nu$, se mide en hercios ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$) y con el periodo $T = 2\pi/\omega = \frac{1}{\nu}$: tiempo en realizar una oscilación (s), se ve su imagen en la (figura 11).

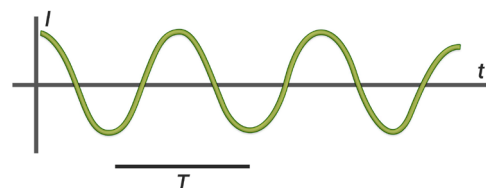


Figura 11. Intensidad frente a corriente en onda [3].

Generación de corrientes alternas:

Como mencionó Eisman [3], la corriente alterna es producida por inducción en una espira o solenoide de N espiras que gira en el interior de un campo magnético con velocidad angular ω . Al girar con MCU, la orientación entre el vector superficie de la espira y el campo cambiará, con lo que el flujo magnético que atraviesa la espira también será variable.

$$\Phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \dots = B \cdot N \cdot S \cdot \cos(\omega t)$$

Por la ley de Faraday-Lenz se inducirá corriente eléctrica en el circuito, con una fuerza electromotriz:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = B \cdot N \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)$$

La frecuencia de la corriente alterna suele ser alta (kHz, MHz). Incluso en los casos de frecuencia más bajas (50 Hz en las redes eléctricas domésticas) el sentido de la corriente cambia 100 veces por segundo. Teniendo en cuenta la velocidad característica de los electrones en un cable (unos mm por segundo), estos apenas se desplazan unas centésimas de mm antes de cambiar de sentido.

Pero, ¿cómo se transmite entonces la energía por lo cables? Pues de forma parecida a las ondas sonoras o las olas en el agua. Básicamente, los electrones realizan un movimiento vibratorio y la energía de esta vibración se transmite por el cable como una onda electromagnética a velocidades cercanas a la de la luz.

Ventajas y desventajas de la CA frente a la CC:

La corriente alterna tiene una serie de ventajas sobre la corriente continua, en palabras de Eisman [3], se puede ver que:

- Es transformable, con lo que es fácil obtener altas o bajas tensiones, según convenga.
- Es rectificable (convertible en CC).
- Puede transportarse a larga distancia con menos pérdidas en los cables, aprovechando la transformación a alta tensión.
- Puede generarse gran cantidad de energía, aprovechando diversas fuentes.

Sin embargo, también tiene desventajas respecto a la CC en lo siguiente:

- **Capacidad de almacenamiento.** Es fácil almacenar energía de CC en pilas y baterías, para dispositivos que consumen poca potencia. La CA no puede ser almacenada y en las centrales debe ajustarse la producción a la demanda de energía del momento. Por lo tanto, es mejor usar CC en dispositivos pequeños, que consuman poca energía y sean portátiles (ordenadores, teléfonos móviles, tablets, linternas, etc.) y CA cuando se requiere mucha potencia.

Valores instantáneos: tanto la intensidad que circula por el circuito como el voltaje entre los extremos de cualquier dispositivo, varían con el tiempo de forma senoidal. Tal como explica Eisman [3], los diferentes elementos conectados al circuito introducen un desfase ϕ entre la tensión y la intensidad, es decir, no se hacen cero al mismo tiempo ni alcanzan su valor máximo simultáneamente. $I(t)$ y $V(t)$ tendrán la forma

$$I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t) \quad V(t) = V_0 \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

Teniendo en cuenta que las frecuencias típicas de las CA usadas industrial y comercialmente son elevadas (50 Hz en la red eléctrica, kHz, MHz e incluso GHz en algunos aparatos), el valor de tensión o intensidad en un instante determinado no ofrece información útil.

Valores máximos: son I_0 y V_0 , las amplitudes de las funciones trigonométricas.

Valores medios: si se calcula el valor medio de la intensidad (o de la tensión) a lo largo de un periodo el resultado es cero, ya que se compensan los valores positivos de un semiperíodo con los negativos del otro. Por ende, tampoco los valores medios aportan información relevante.

$$I_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T I_0 \cdot \cos(\omega t) \cdot dt = 0$$

Valores eficaces: de acuerdo a Eisman [3], aunque el valor medio de la intensidad sea cero, eso no significa que no haya movimiento de electrones ni consumo de energía en una resistencia R . Los electrones están realizando de manera constante un movimiento de vibración cambiando de sentido en cada semiperíodo. Este movimiento hace que, por efecto Joule, consuman energía en la resistencia, independientemente del sentido del movimiento

La potencia consumida será $P(t) = R \cdot I^2 = R \cdot I_0^2 \cos^2(\omega t)$

La energía consumida en un periodo $E = \int_0^T R \cdot I_0^2 \cdot \cos^2(\omega t) \cdot dt = R \cdot I_0^2 \cdot \int_0^T \cos^2(\omega t) \cdot dt = R \cdot I_0^2 \cdot T$

Si se compara este resultado, como indica Esiman [3], con una corriente continua que consumiera la misma energía, en otros términos, si se estudia el problema “como si la corriente fuera continua”, circulando una intensidad I_e :

$$E = R \cdot I_e^2 \cdot T$$

Se visualiza que la intensidad de corriente continua necesaria para consumir la misma energía que la corriente alterna es I .

$$I_e^2 = \frac{I_0^2}{2} \rightarrow I_e = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

Este valor se denomina valor eficaz y es el más usado al estudiar circuitos de corriente alterna, ya que, como ya se verá, usando valores eficaces sí se cumple la ley de Ohm, cosa que no ocurre con los valores instantáneos, debido al desfase.

Del mismo modo que la intensidad eficaz es $I_e = I_0 / \sqrt{2}$, el voltaje eficaz es $V_e = V_0 / \sqrt{2}$

Diagrama de fasores (diagrama de Fresnel)

En palabras de Eisman [3], los fasores son una herramienta muy útil para representar magnitudes que varían de forma senoidal. Un fasor es una magnitud compleja (con sus partes real e imaginaria) que rota con una velocidad angular igual a ω .

Un **fasor** consta de:

- **Módulo:** I_0, V_0
- **Fase:** ángulo (en radianes) que forma con el eje x. Es ωt en el caso de la intensidad y $\omega t + \phi$ en el caso de la tensión.

Al rotar, la proyección del fasor sobre el eje real da la expresión del **valor instantáneo** $I(t) = I_0 \cdot \cos(\omega t)$ $V(t) = V_0 \cdot \cos(\omega t + \phi)$

Los fasores de V y de I giran al mismo ritmo, manteniendo entre ellos el desfase ϕ . Si se toma como referencia el valor de la intensidad y se coloca en el eje x (figura 12).

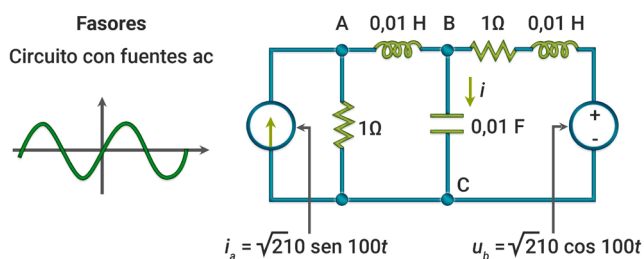


Figura 12. Fasores en AC [4].

Ley de Ohm en ca. Impedancia, factor de potencia

Los elementos conectados en el circuito [3], en general, introducen un desfase entre la intensidad y la tensión. Este desfase hace que no haya una proporcionalidad entre los valores instantáneos de intensidad y tensión, como ocurría en corriente continua. No se cumple la ley de Ohm, tal y como se le conocía, con los valores instantáneos $I(t)$ y $V(t)$.

Sin embargo, esta proporcionalidad sí existe entre los fasores y entre los valores máximos V_0 e I_0 o los valores eficaces V_e, I_e . Esto hace que se pueda expresar la ley de Ohm con estos valores. La magnitud que relaciona los valores máximos (y los eficaces) de tensión e intensidad en un circuito se denomina impedancia (Z) y se mide en **ohmios**.

La expresión formal de esta ley es la siguiente [3]:

$$V_0 = Z \cdot I_0 \quad V_e = Z \cdot I_e \quad \text{En todo el circuito } \epsilon_0 = Z \cdot I_0 \quad \epsilon_e = Z \cdot I_e$$

La **impedancia**, según explica Eisman [3], es también una magnitud expresada en números complejos, con su parte real y su parte imaginaria. Si se representa la impedancia de un circuito o de un elemento del mismo en el diagrama de fasores, se debe tener en cuenta no solo su valor en ohmios (el módulo), sino además el desfase que produce (ϕ). El esquema será así:

Donde **R**, la parte real, es la **resistencia** del elemento y está relacionada con el consumo real de energía. **X**, la parte imaginaria, se denomina **reactancia** y está relacionada con la energía almacenada en forma de campos eléctricos o magnéticos. Se cumple que:

$$R = Z \cdot \cos \phi \quad X = Z \cdot \sin \phi \quad Z^2 = R^2 + X^2 \quad \tan \phi = X/R$$

La cantidad $\cos \phi$ se denomina “factor de potencia”

Conexiones serie y paralelo de impedancias:

La conexión de varios dispositivos en un circuito sigue las mismas reglas que en el caso de resistencias en corriente continua:

Conexión en serie: $Z_T = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots$

Conexión en paralelo: $1/Z_T = 1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_3 + \dots$

No olvidar, como señala Eisman [3], que **son números complejos**. Para sumar impedancias (caso de una conexión en serie se deben sumar las partes reales (resistencias) e imaginarias (reactancias) por separado, para luego calcular el valor de la impedancia (Z) y del desfase total aplicando el diagrama de fasores.

En un sistema de corriente alterna los **componentes básicos** son las resistencias, los condensadores y las autoinducciones.

Corriente trifásica

De acuerdo a Tipler [2], se denomina **corriente trifásica** al conjunto de tres corrientes alternas de igual frecuencia, amplitud y valor eficaz que presentan una diferencia de fase entre ellas de 120° y están dadas en un orden determinado. Cada una de las corrientes que forman el sistema se designa con el nombre de **fase**.

La generación trifásica de energía eléctrica es más común que la monofásica y proporciona un **uso más eficiente de los conductores**. La utilización de electricidad en forma trifásica es mayoritaria para transportar y distribuir energía eléctrica y para su utilización industrial, incluyendo el accionamiento de motores. Las corrientes trifásicas se generan mediante **alternadores** dotados de tres bobinas o grupos de bobinas, arrolladas en un sistema dispuesto a 120 grados eléctricos entre cada fase.

Se denomina corriente **monofásica**, en palabras de Tipler [2], a la que se obtiene de tomar una fase de la corriente trifásica y un cable neutro. En España y demás países que utilizan valores similares para la generación y transmisión de energía eléctrica, este tipo de corriente facilita una tensión de 230 voltios, lo que la hace apropiada para que puedan funcionar adecuadamente la mayoría de electrodomésticos y luminarias que hay en las viviendas.

El sistema **trifásico** presenta una serie de **ventajas** tales como la economía de sus líneas de transporte de energía (hilos más finos que en una línea monofásica equivalente) y de los transformadores utilizados, así como su elevado rendimiento de los receptores, especialmente motores, a los que la línea trifásica alimenta con potencia constante y no pulsada, como en el caso de la línea monofásica

Comportamiento de resistencias, bobinas y condensadores en ca.

Ahora se ha preparado un resumen, con la ayuda de Esiman [3], sobre estos tipos de elementos:

Resistencias:

Un elemento puramente resistivo se comporta en corriente alterna igual que en corriente continua. No introduce desfase alguno entre tensión e intensidad y su impedancia es igual a su resistencia. Esto se visualiza de forma gráfica en la (figura 10). Para una resistencia sí se cumpliría la ley de Ohm, incluso con los valores instantáneos

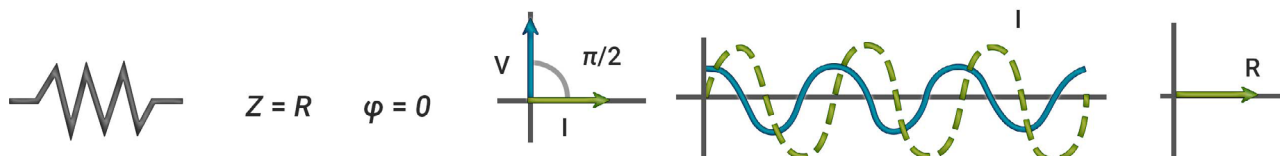


Figura 11. Sobre resistencias, ley de ohm [3].

Bobinas (autoinducciones, inductancias):

En CA, una autoinducción introduce un desfase $\pi/2$ entre la tensión y la intensidad (desfase positivo, la tensión está adelantada respecto a la intensidad). Suponiendo que su resistencia sea nula, su impedancia es solo reactiva (X_L) y depende del coeficiente de autoinducción (inductancia, L) y de la frecuencia. Esto se observa gráficamente en la figura 11.

Cálculo del desfase y de la impedancia

Cuando una bobina es sometida a una tensión variable circulará una intensidad variable por ella, lo que hará que varíe el flujo magnético y se genere corriente inducida según Faraday-Lenz. La fem inducida se opone a la tensión aplicada. Así, $V_L = -\epsilon = -(-L \, dI/dt)$

Siendo $I = I_0 \cdot \cos(\omega t)$, al derivar, se obtiene $V_L = -L\omega \cdot I_0 \cdot \sin(\omega t) = L\omega \cdot I_0 \cdot \cos(\omega t + \pi/2)$, donde se ve que la tensión está desfasada (adelantada) $\pi/2$ respecto a la intensidad y que la impedancia es $L\omega$. ($V_0 = L\omega \cdot I_0$)

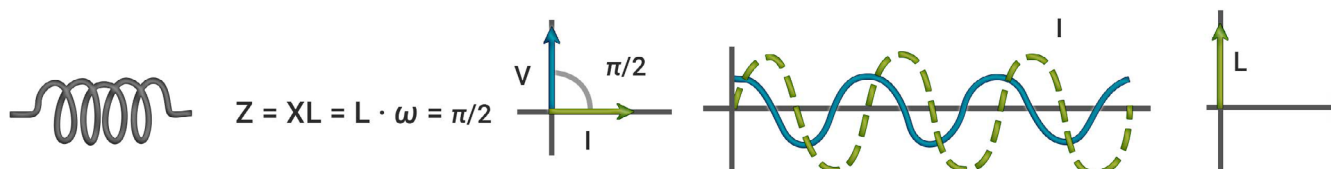


Figura 11. Sobre bobinas, inductancia y frecuencias [3].

Condensadores

En CA, un condensador introduce un desfase $-\pi/2$ entre la tensión y la intensidad (desfase negativo, la tensión está retrasada respecto a la intensidad). Su impedancia es solo reactiva (X_C) y depende de la capacidad del condensador (C) y de la frecuencia (ω), lo cual se ve en la (figura 12).

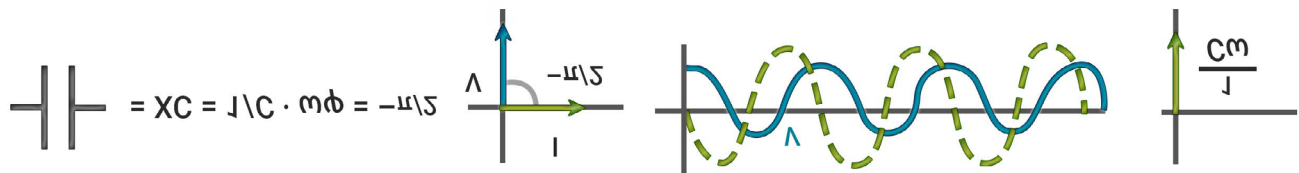


Figura 12. Sobre condensador, impedancia y capacidad [3].

Circuitos de corriente alterna. Conexiones en serie

Ahora se resumirán estos tipos de circuitos con la ayuda de Eisman [3]:

Circuito RL:

En este circuito la impedancia tiene dos partes: una resistiva (R) y otra reactiva (X_L).

La impedancia total será la suma (compleja, fasorial) de ambas:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$$

El factor de potencia $\cos\phi = R/Z = R/\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$

Un circuito RL siempre produce un desfase ϕ positivo. Se dice que el factor de potencia es inductivo, lo cual se ve gráficamente en la (figura 13).

Cálculo del desfase y de la impedancia:

Cuando un condensador se somete a una tensión alterna estará constantemente cargándose y descargándose, por lo que permitirá el paso de corriente por el circuito. La relación entre intensidad y tensión en un condensador es:

$$I = C dV/dt \rightarrow VC = 1/C \int I \cdot dt$$

Siendo $I = I_0 \cdot \cos(\omega t)$, al integrar, se obtiene $V = 1/C\omega \cdot I_0 \cdot \sin(\omega t) = 1/C\omega \cdot I_0 \cdot \cos(C\omega - \pi/2)$, donde se ve que la tensión está desfasada (retrasada) $-\pi/2$ respecto a la intensidad y que la impedancia es $1/C\omega$ ($V_0 = 1/C\omega \cdot I_0$)

Circuito RC:

En este circuito la impedancia tiene dos partes: una resistiva (R) y otra reactiva (X_C).

La impedancia total será la suma (compleja, fasorial) de ambas:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + (1/C\omega)^2}$$

El factor de potencia $\cos\phi = R/Z = R/\sqrt{R^2 + (1/C\omega)^2}$

Un circuito RC siempre produce un desfase ϕ negativo, aunque el factor de potencia, $\cos\phi$, sea positivo. Se dice que el factor de potencia es capacitivo (figura 14).

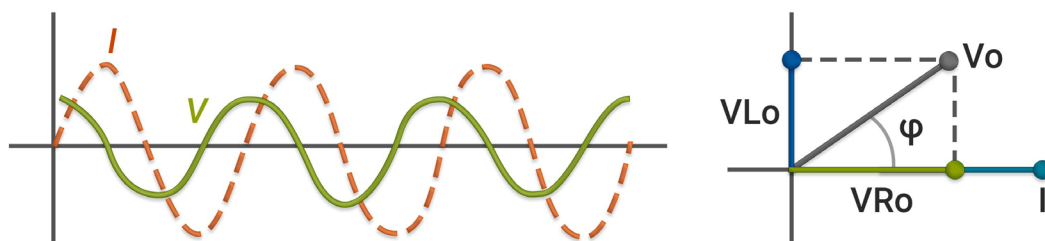


Figura 13 . Sobre circuito RL, impedancia [3].

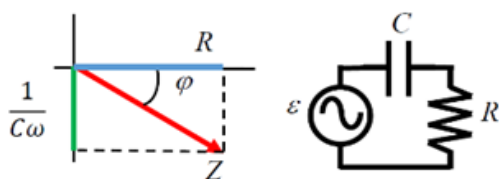


Figura 14. Sobre circuito RC, factor de potencia [3].

Circuito RLC:

En este circuito la impedancia se debe a tres elementos. La parte resistiva es R y la parte reactiva se debe tanto a la bobina (X_L) como al condensador (X_C). La impedancia total será la suma (compleja, fasorial) de estas contribuciones. Tener en cuenta que como L produce un desfase $+\pi/2$ y C produce un desfase $-\pi/2$, a la hora de sumar las reactancias en el diagrama fasorial (figura 15) se obtiene $X = |X_L - X_C|$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}$$

El factor de potencia $\cos\phi = R/Z = R / \sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}$

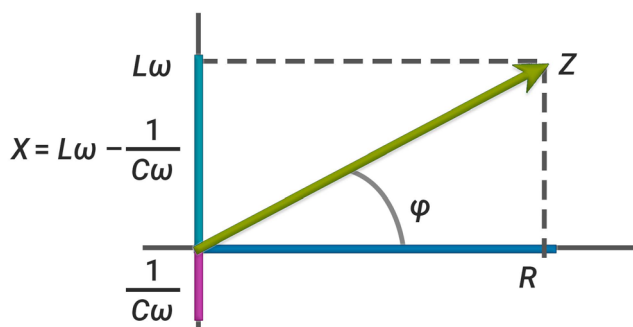


Figura 15. Sobre circuito RLC, factor de potencia [3].

Un circuito RLC produce un desfase ϕ que puede ser positivo (circuito inductivo) o negativo (circuito capacitivo), según cuál de los elementos tenga mayor contribución a la reactancia. Esto se visualiza en la (figura 16).

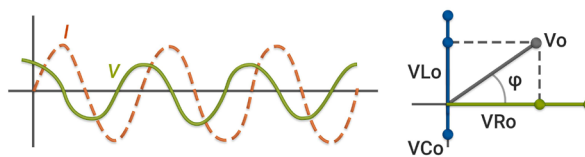


Figura 16. Sobre circuito RLC, desfase [3].

Potencia activa, reactiva y aparente. Resonancia

Potencia instantánea ($P(t)$):

Es la potencia media consumida en un periodo. Se mide en vatios (W).

$$p = V_e \cdot I_e \cdot \cos\phi$$

Se ve que la potencia consumida depende del desfase. La cantidad $\cos\phi$ se denomina "factor de potencia" e indica qué parte de la potencia aparente se consume realmente en la resistencia. El factor de potencia puede ser inductivo (en el caso de que ϕ sea positivo) o capacitivo (ϕ negativo) y se debe indicar.

Potencia aparente (P_{ap}):

Es el resultado de multiplicar el voltaje eficaz por la intensidad eficaz. No tiene sentido físico. Se mide en voltioamperios (VA), para diferenciarlo de la potencia activa, que se mide en W.

$$P_{ap} = V_e \cdot I_e$$

Potencia reactiva (P_r):

Es la potencia que se **almacena en condensadores y bobinas en forma de campos eléctricos y magnéticos, respectivamente**. No es una energía consumida durante el funcionamiento del circuito, sino que está circulando entre bobinas de manera constante, condensadores y el generador. Se pone de manifiesto al cerrar y abrir el circuito (situación transitoria), ya que se emplea energía en crear los campos, eléctrico y magnético, durante la carga de condensadores y bobinas y la posterior descarga de estos produce una corriente adicional al abrir el circuito. Esta corriente adicional que circula del generador a los elementos reactivos y viceversa puede tener valores muy elevados y debe ser tenida en cuenta al diseñar el circuito para evitar sobretensiones y chispazos. En la (figura 17) se grafican estos conceptos.

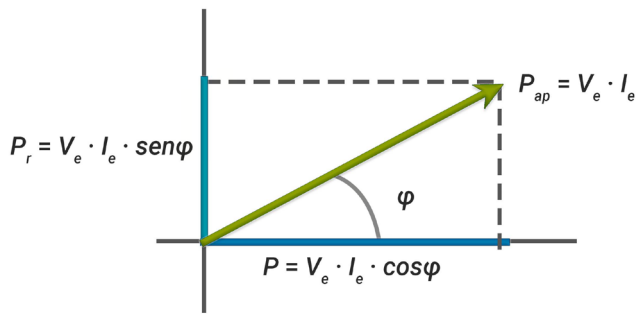


Figura 17. Potencia relativa [3].

Se mide en **voltioamperios reactivos** (VAR) y se calcula con $P_r = V_e \cdot I_e \cdot \sen\varphi$

El diagrama de fasores puede también usarse para las potencias.

Resonancia en un circuito RLC:

De acuerdo a Eisman [3], se produce el fenómeno de resonancia en un circuito RLC cuando las reactancias inductiva y capacitiva se compensan, de forma que su diferencia se hace cero, con lo que la reactancia es nula y la impedancia es igual a la resistencia. El circuito se comporta como si fuera puramente resistivo.

$$X_L = X_C \rightarrow L\omega = 1/C\omega \rightarrow X = X_L - X_C = 0 \rightarrow Z = R$$

En estas circunstancias, el factor de potencia es $\cos\varphi = 1$ y tanto la intensidad como la potencia consumida son máximas. El desfase es nulo entre tensión e intensidad (están en fase).

La resonancia se da para una frecuencia concreta

$$L\omega = 1/C\omega \rightarrow \omega = 1/\sqrt{LC}$$

La resonancia se usa para sintonizar una cadena de radio, por ejemplo, ajustando la capacidad de un condensador variable, se puede sintonizar una u otra frecuencia de radio. Hay que tener en cuenta que, aunque el circuito se comporta como si fuera puramente resistivo en lo que a consumo de potencia se refiere, ambas reactancias siguen estando presentes, transformando de manera constante energía eléctrica en magnética y viceversa, lo cual puede producir tensiones muy elevadas en la bobina y en el condensador.

Medición de la corriente

En palabras de Tipler [2], la corriente puede medirse con un amperímetro. La corriente eléctrica puede medirse directamente con un galvanómetro, pero este método implica romper el circuito eléctrico, lo que a veces resulta inconveniente. De igual forma, la corriente puede medirse sin romper el circuito detectando el campo magnético asociado a la corriente.

Medir la intensidad de corriente en un circuito de CA es más complicado que para una corriente continua. Para esto se utilizan dispositivos como un amperímetro o pinzas amperimétricas. El uso de pinzas amperimétricas es la forma más conveniente y segura, pero solo es adecuada para cableado o cable abierto. Este método permite medir la corriente sin romper el circuito, que es mucho más seguro y rápido.

Los dispositivos, en cuanto a circuito, por tanto, utilizan varias técnicas para medir la corriente: resistencia de derivaciones, efecto Hall, transductores de sensor de corriente, transformadores (sin embargo, no se puede medir la corriente continua), sensores de campo, bobina de Rogowski, pinza amperimétrica.

RESUMEN

Se ha estudiado la circulación de cargas eléctricas viendo conceptos como diferencia de potencial, tasa de flujo, voltaje etc. Además, se ha profundizado en el concepto de resistencia de los conductores aplicados a circuitos de corriente alterna viendo sus características más relevantes, así como resistencia de segmento y total,

Se ha visto qué son los materiales óhmicos y el comportamiento de los electrones en un circuito. Se ha estudiado y profundizado en los tipos de circuitos eléctricos tanto en serie como en paralelo y ambos mezclados viendo las características de cada uno de ellos con ventajas y desventajas.

Se incorporó al estudio la ley de Kirchhoff y sus conceptos más fundamentales. Se ha pasado por el estudio de las baterías, generadores y condensadores, se ha hecho hincapié en la corriente alterna profundizando en este campo y viendo el comportamiento de resistencias, bobinas y condensadores en corriente alterna, cálculos de desfase, impedancia. Se estudiaron los diferentes tipos de circuitos en CA, RL, RC, RLC y la potencia activa reactiva y resonancia. Por último, las formas de medir la corriente en un circuito.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Hewit, "Física conceptual", ed.12. México: Pearson Educación, 2009.
- [2] P. Tipler. "Física para la ciencia y la tecnología". Ed. Reverté. Barcelona, España. 2007.
- [3] E. Eisman. Dpto. "Física y Química Electrotecnia". España. IE Padre Manjón, 2018.
- [4] S. Franco. "Electric Circuits Fundamentals". The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering. EE. UU.: Ed. OUP, 2009.