

USERS



1

CURSO VISUAL Y PRÁCTICO

**Segunda
edición**

TÉCNICO ELECTRICISTA



FUNDAMENTOS DE ELECTROTECNIA

CORRIENTE CONTINUA

MAGNETISMO

CORRIENTE ALTERNA

CIRCUITOS SERIE Y PARALELOS

SISTEMAS TRIFÁSICOS

¡AQUÍ PUEDES ENCONTRARLO!

USERSHOP

Simple, rápido y eficiente

Lo retiras en el Local
o te lo enviamos por
correo a tu domicilio

Todos los productos
USERS y USERSLife
a un clic de distancia

Múltiples medios
de pago

Ofertas y combos
exclusivos



¡TE ESPERAMOS!



usershop.redusers.com



+54-11-4110-8700



+52-55-8421-9660



usershop@redusers.com

EN ESTA CLASE VEREMOS...

1

Presentación de la colección, introducción a la electricidad, y algunos conceptos básicos relacionados con los materiales conductores y los efectos de la electricidad.

En esta primera clase, nos introduciremos en los contenidos fundamentales para ir construyendo los conocimientos que necesitamos para aproximarnos a los aspectos más complejos de la electricidad.

Analizaremos el aspecto profesional de la electricidad en cuanto a la salida laboral y sus usos cotidianos, y conoceremos algunas tareas que puede desarrollar un técnico electricista para ampliar sus posibilidades de trabajo.

Haremos una completa introducción a los conceptos básicos de la electricidad, conoceremos qué es la energía eléctrica y cómo se relaciona con la materia. Enumeraremos las leyes fundamentales que rigen a la electricidad y analizaremos las fuentes de energía potencial. Luego, revisaremos los circuitos eléctricos y detallaremos qué son los materiales conductores, aislantes y semiconductores. También veremos los efectos de la corriente eléctrica y de la temperatura sobre la resistencia.

Sumario

002 Presentación de la obra
Descripción de los temas que serán abordados en esta colección de libros y del material gráfico que acompaña a esta completa obra.

008 Energía eléctrica y energía potencial
Características diferenciadoras de la energía eléctrica y la energía potencial

014 Corriente eléctrica y materiales conductores
Conceptos importantes sobre la corriente eléctrica y descripción de los principales materiales conductores.

022 Ley de Ohm y efectos de la corriente
Principios de la ley de Ohm y análisis de los efectos de la corriente eléctrica.

UNIVERSALIDAD DE LA OBRA

Los contenidos incluidos en la presente colección están basados en el conocimiento universal de la ingeniería eléctrica. En el caso específico de las tensiones, corrientes o frecuencias normalizadas, se deben reemplazar los valores por los normalizados en cada país en particular. Para los contenidos acerca de reglamentaciones de ejecución de instalaciones eléctricas o componentes específicos, se debe utilizar el presente contenido como base de entendimiento para la posterior aplicación de las reglamentaciones de ejecución locales y utilizando los materiales normalizados por cada país.



PRESENTACIÓN DE LA OBRA

En esta colección conoceremos todas las posibilidades de trabajo que tiene un electricista, desde realizar una instalación eléctrica hasta instalar alarmas residenciales, circuitos cerrados de televisión, centrales telefónicas, portones y porteros eléctricos, aires acondicionados y grupos electrógenos, entre otras cosas.

El mundo de la **industria eléctrica** es un abanico tan grande y variado que resulta difícil encasillar al profesional especialista en pocas ramas de la actividad, dado que la diversidad de tareas que pueden desarrollarse en el marco de este ámbito la vuelve interesante, compleja y atractiva.

Por eso, la industria eléctrica ofrece un campo de acción muy completo, en el que los trabajadores deben mantenerse en constante capacitación para atender los avances tecnológicos que se presentan día a día.

Es conocido que la energía eléctrica resulta un servicio esencial, y muy necesario para la mayoría de la población; por lo que es todavía más importante la necesidad de que haya personas capacitadas en este rubro, como así también ingenieros.

Por ello, este curso de fundamentos eléctricos fue pensado para ofrecerles a los lectores las herramientas que les permitan comprender muchísimos aspectos que involucran a esta profesión y, por qué no, despertar el interés de quienes deseen profundizar sus conocimientos o necesiten decidirse a la hora de elegir el estudio de una carrera de grado. Cada paso que iremos dando tendrá como objetivo introducir al lector en el estudio de la electricidad y la electrotecnia. De acuerdo con esto, el lector podrá tomar esta publicación como base para realizar lecturas y estudios de mayor complejidad. El objetivo es que los lectores puedan tener una idea general de los contenidos que se suelen dictar en cursos y capacitaciones

extensas para profesionales idóneos, y que cuenten con herramientas propias para desarrollarse en el **ámbito profesional**, de manera tal que sean capaces de aplicarlas con fluidez y en forma intuitiva frente a los desafíos que se les presenten.

El lector de la obra obtendrá conocimientos teóricos y prácticos en conjunto con una serie de ejemplos y explicaciones que desarrollan técnicas que le ayudarán a comprender, de manera cabal, los temas y su amplio campo de aplicación.

En la actualidad, la industria eléctrica está cada vez más ligada a la electrónica, y el desafío de los profesionales es capacitarse en **electricidad** y **electrónica** o formar

Temas presentes en la colección

En esta colección, hemos condensado una gran cantidad de temas, que serán provistos en el orden adecuado para facilitar la comprensión y el aprendizaje, ya que esto último puede hacer la diferencia entre aprender y simplemente recordar datos. Se brindará al lector no solo información teórica, sino ejemplos de cálculos, dimensionamientos y criterios para ejecutar un trabajo eléctrico, de manera que pueda trabajar con calidad y en forma segura.



Actualmente, es muy alta y diversa la demanda y necesidad de profesionales para la industria eléctrica.

La ingeniería eléctrica es una de las ramas más solicitadas, dado el crecimiento de la actividad económica de los últimos años y su correspondiente necesidad de infraestructura, mantenimiento y mejora del sistema eléctrico.

El desarrollo y crecimiento de la actividad económica del país necesitan indefectiblemente de mayor generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

grupos interdisciplinarios. Por eso, es importante estar abiertos a las opciones que cada una de estas clases puede brindar. El uso en conjunto de esta colección nos provee de un enorme bagaje de recursos que nos permitirán encarar proyectos de gran complejidad.

En esta colección, comenzaremos el estudio de la energía eléctrica desde su concepción molecular, analizando la definición más básica de corriente eléctrica y potencial eléctrico, y los primeros conceptos de resistencia eléctrica. Conoceremos los fundamentos de los materiales conductores y los aislantes, junto con sus características moleculares y varios ejemplos de cada uno de los tipos. Analizaremos el método de cálculo de los circuitos eléctricos para resolver circuitos sencillos y complejos. Veremos cómo se comportan las corrientes y las tensiones en cada uno de los elementos pasivos que componen un circuito eléctrico.

El lector podrá conocer las características propias del sistema eléctrico, ya que se definirá y explicará cómo se produce la generación, la transmisión y la distribución de la energía eléctrica, de manera de conocer cómo llega la energía a los consumidores finales.

Para completar el objetivo de la colección, se ofrecerán datos referentes a instalaciones eléctricas industriales y domiciliarias, donde el lector podrá luego conocer y comprender las reglamentaciones existentes en cada país y, así, diseñar y dimensionar instalaciones eléctricas acordes con los estándares que se establecen en el mercado. Por otro lado, se estudiarán el funcionamiento, la construcción y el mantenimiento de transformadores y motores, dado que son los elementos más importantes de una instalación, además de los conductores.

El contenido brindado nos permitirá acceder a los conocimientos necesarios para cubrir un amplio rango de actividades además de la instalación eléctrica en hogares o locales. También veremos cómo realizar la instalación de **sistemas de alarmas y circuitos cerrados de televisión, centrales telefónicas, redes de computadoras y porteros eléctricos**.

Además, conoceremos de qué manera aprovechar la **energía solar** para la generación alternativa de electricidad. También veremos cómo elegir un grupo electrógeno en función de las necesidades energéticas.

Respondiendo a la demanda de los clientes, los electricistas también pueden dedicarse a instalar alarmas residenciales, circuitos cerrados de televisión, centrales telefónicas, portones y porteros eléctricos, aires acondicionados, redes de computadoras y grupos electrógenos. En esta colección aprenderemos cómo hacer estas tareas.

Las necesidades de la industria exigen nuevas aptitudes y perfiles de profesionales e idóneos, así como interacción con otras especialidades.



Contenido gráfico

En el desarrollo de esta serie de libros coleccionables, encontraremos material gráfico orientado a simplificar el aprendizaje. Infografías, diagramas, guías visuales y galerías nos ayudarán a comprender fácil y rápidamente los conceptos más complejos.

En general, los mensajes en modalidad gráfica ofrecen un rápido recorrido que abarca mucho conocimiento utilizando una menor cantidad de texto. De este modo, el tiempo insumido en la comprensión de un determinado tema es mucho menor, y el contenido es conciso y directo; además, resulta más simple asimilar la información que se incluye y más fácil recordar lo aprendido.

El contenido gráfico que acompaña a esta colección nos ayuda a comprender en forma más sencilla los conceptos presentados.



Ética profesional

El contenido técnico de la obra no excluye al lector de realizar las capacitaciones y certificaciones que lo habiliten a llevar a cabo un trabajo profesional relacionado con esta colección. Si bien el espíritu de estas publicaciones es ser lo más interesante y formadora posible, cada persona que intente realizar una habilitación o trabajo como idóneo deberá calificarse frente al organismo que corresponda.



Los conocimientos de electricidad también deben abarcar materias de gestión de edificios tales como funcionamiento de ascensores, aire acondicionado y bombas de agua, entre otras.



Contenido práctico

Como ya adelantamos, el material de texto incluido en la obra se complementa con contenido gráfico, pero además, se ofrecen procedimientos prácticos desarrollados paso a paso para mejorar la comprensión de operaciones complejas. Así, combinando imágenes con breves fragmentos de texto, resulta mucho más simple comprender aspectos que presentan una mayor complejidad.

TEORÍA NECESARIA

Si bien los contenidos de las clases iniciales son complejos y su lectura puede llevar bastante tiempo, es importante tener en cuenta que su comprensión es fundamental para avanzar en contenidos más prácticos y entretenidos.

A medida que se vaya avanzando en los temas, será posible ir haciendo análisis de casos reales y aplicaciones.

El porqué de la obra

La verdadera razón de ser de esta serie de libros coleccionables consiste en presentar temas actualizados, desarrollándolos de manera sencilla y comprensible para que sean entendidos sin necesidad de contar con conocimientos previos de electricidad o de electrotecnia. Esta obra desarrolla en detalle un determinado conjunto de temas que son necesarios para comprender el amplio campo de acción y estudio de las tecnologías que intervienen en la electricidad, paso a paso y siguiendo un hilo conductor y una lógica de conocimientos que facilitarán su lectura y comprensión.

- ♦ **Fundamentos:** se analizarán paso a paso todos los aspectos teóricos y de cálculo de la energía eléctrica; se verán sus fórmulas elementales, teoremas y leyes que fundamentan cada uno de los fenómenos físicos que intervienen en este estudio.
- ♦ **Aplicación:** se explicará cómo aplicar los fundamentos y las leyes teóricas en utilidades prácticas, como máquinas eléctricas, instalaciones eléctricas domiciliarias e industriales, o protecciones eléctricas.
- ♦ **Seguridad y normalización:** se demostrará cómo realizar un trabajo seguro, tanto para las personas como para los bienes, y se expondrá la importancia de la normalización y certificación de los materiales con el fin de realizar instalaciones de calidad.



Material complementario

Este curso incluye cuatro e-books con temas complementarios a los estudiados en las clases. Estos e-books son de acceso gratuito para los lectores de este curso y se pueden acceder en nuestro sitio de publicaciones digitales premium.redusers.com, entrando a Cursos > Técnico Electricista 2da Edición.



Instalación de alarmas

En este libro conoceremos en detalle los sistemas de alarmas domiciliarias. Desde la teoría fundamental de estos dispositivos hasta los principios electrónicos de su funcionamiento, aprenderemos cómo trabajan las centrales de alarma, los sistemas de señalización y los distintos tipos de sensores. Finalmente, profundizaremos en el control remoto de un sistema de alarma y también en equipos de automatización.



Instalación de redes

Este libro describe de forma sencilla todos los detalles sobre el funcionamiento y la instalación de redes informáticas, tanto cableadas como inalámbricas. Mediante contenidos teóricos y prácticos analizaremos la clasificación de las redes y sus principales ventajas. También conoceremos las herramientas y dispositivos necesarios para instalar una red, ya sea cableada o inalámbrica.



Fundamentos de electrónica analógica

Este libro abarca los fundamentos y las nociones básicas de la electrónica analógica, piedra angular de la electrónica digital. Entre los temas más importantes veremos los conceptos fundamentales de electricidad, de corriente continua, la clasificación de los componentes electrónicos y también el uso práctico de aplicaciones para diseñar circuitos impresos.



Fundamentos de electrónica digital

En este libro conoceremos los conceptos fundamentales de la electrónica digital. Aprenderemos la teoría relacionada con las técnicas digitales, las compuertas lógicas y los diversos circuitos combinatoriales existentes, y aplicaremos estas técnicas en las memorias de un bit, los circuitos secuenciales y la lógica programable. Para finalizar, conoceremos la arquitectura de los microcontroladores.



PARA EXPLORAR AÚN MAS

Para los lectores que deseen aventurarse más allá de los contenidos del curso, incluimos gratuitamente tres e-books adicionales con temas de lectura optativa, para ampliar sus conocimientos en otras áreas. Al igual que los anteriores, estos e-books son de acceso gratuito para los lectores de este curso y se acceden de igual manera.



Instalación de aires acondicionados

En este libro abarcaremos todos los aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de realizar la instalación o reparación de un sistema de refrigeración. Conoceremos las bases de la termodinámica, analizaremos los elementos que componen un sistema de aire acondicionado y luego, teniendo en cuenta los conocimientos adquiridos, estudiaremos las características y detalles de la instalación de estos equipos.



Electricidad del automóvil

A lo largo de este libro veremos los distintos bloques del sistema eléctrico y electrónico que dan apoyo a los bloques mecánicos del motor, así como también las herramientas de diagnóstico y los tipos de falla que puede presentar un vehículo. También conoceremos la tecnología de los motores eléctricos y electrónicos de los híbridos, y veremos una serie de circuitos útiles para armar herramientas electrónicas de diagnóstico y dispositivos que nos permiten agregar funciones adicionales a nuestro vehículo.



Sistemas de comunicación

Esta obra ha sido concebida para introducirnos en los fundamentos de los sistemas de comunicaciones actuales. Estos sistemas transmiten datos utilizando medios no necesariamente cableados o inalámbricos, como las ondas de radio. Ampliaremos nuestra perspectiva describiendo sistemas de comunicaciones ópticos inalámbricos, cada día más utilizados. En los capítulos de este libro integraremos la teoría imprescindible con distintas prácticas, de modo de proporcionar al lector una visión integradora y actualizada acerca del tema.



ENERGÍA ELÉCTRICA Y ENERGÍA POTENCIAL

Para dar inicio a esta colección dedicada a la electricidad, aprenderemos algunos conceptos básicos relacionados con la energía eléctrica y la energía potencial.

L **energía eléctrica** es causada por el movimiento de las cargas eléctricas (electrones positivos y negativos) que se encuentran en el interior de materiales conductores. Por ejemplo, cuando accionamos el interruptor de una lámpara, lo que presenciamos es que se cierra un circuito eléctrico y, por lo tanto, se genera el movimiento de electrones a través de cables metálicos. Además del metal, para que exista este transporte y se pueda encender la ampolla, es necesario un generador o una pila que impulse el movimiento de los electrones en un sentido dado.

La **materia** es todo aquello que tiene masa y que ocupa un volumen. En los átomos que forman la materia, se pueden distinguir dos partes:

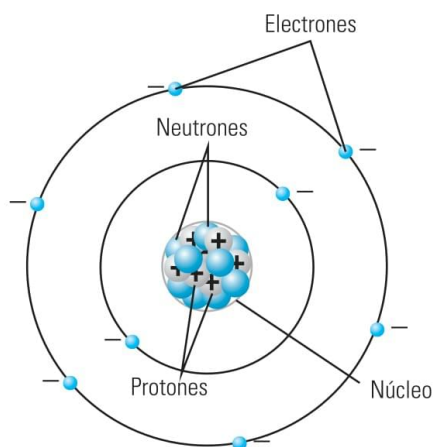
- ♦ **Núcleo:** parte central del átomo, que ocupa un espacio muy pequeño. En su interior se encuentran los protones y los neutrones, entre otras partículas subatómicas.
- ♦ **Corteza:** parte exterior del átomo, que ocupa la mayor parte de su volumen. Está formada por un único tipo de partículas subatómicas, los electrones, que se mueven a una gran velocidad alrededor del núcleo, describiendo unas trayectorias elípticas llamadas **órbitas**.

En este sentido, es importante tener en cuenta que los protones y electrones crean fuerzas de atracción y de

repulsión debido a que estas partículas atómicas tienen una carga eléctrica. La carga de un protón es la misma que la de un electrón, con la diferencia de que la carga de los protones es positiva y la de los electrones es negativa. Por otro lado, los neutrones no tienen carga eléctrica, ni positiva ni negativa. Así, los neutrones no son atraídos ni repelidos por los protones ni los electrones.

De esta forma, podemos afirmar que la carga eléctrica es una propiedad general de la materia que se puede medir, cuya unidad es el **coulomb** (C).

Un material se carga positiva o negativamente dependiendo de si pierde o gana electrones de sus orbitales más superficiales.



Modelo del átomo según sus partículas y su carga. Tanto el núcleo como los orbitales están modelados según su comportamiento.

Carga eléctrica

Para entender qué es una **carga eléctrica**, debemos mirar a nuestro alrededor y verificar que se trata de una **propiedad intrínseca de la materia**. La podemos definir como una capacidad que tienen las partículas de poder atraer o repeler otras partículas, que en su conjunto, generarán fuerzas de atracción y repulsión tal como se puede observar cuando utilizamos un magneto y un trozo de metal.

Físicamente, la carga eléctrica es la cantidad de energía que poseen las partículas en el átomo, aquellas que lo componen. Un átomo puede quedar cargado positivamente (si pierde electrones de sus órbitas) o cargado negativamente (si gana electrones). Estas cargas son las



responsables de generar fuerzas capaces de producir, en su conjunto, fuerzas mecánicas.

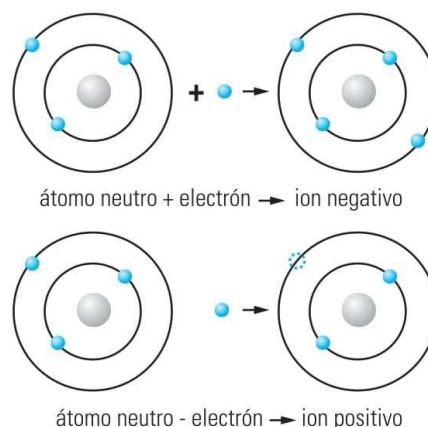
La carga eléctrica es una propiedad conservativa, esto quiere decir que se mantiene en el tiempo, es decir, que la carga inicial será la misma luego de un tiempo indeterminado, mientras que todo el sistema se encuentre aislado sin influencias externas. Entonces, **la carga no se crea ni se destruye**, esta es la propiedad conservativa de la materia.

Para poder apreciar el efecto, basta con frotar una regla o un vidrio contra una tela para observar cómo este objeto es capaz de atraer a otro, por ejemplo una hoja de papel, y esto es debido a la carga propia que adquiere el material del objeto. Así podemos definir que la carga tiene dos estados, **carga positiva y carga negativa**.

Cuando entendemos que la carga tiene dos estados, debemos poder cuantificarla. Cada carga es medida utilizando la unidad **Q** (coulomb, también designada como **C**), que se usa únicamente para designar la cantidad de carga que posee una partícula en estudio. Esta carga se ha medido experimentalmente para cada partícula, donde la menor medida es la del electrón $1,602\ 176\ 487(40) \times 10^{-19}$ coulombs (carga elemental, propia de todos los electrones que componen toda la materia). De esta forma se medirá la carga eléctrica de un cuerpo según el número de electrones que posea en exceso.

Ley de Coulomb

Físicamente, establecemos el concepto de que podemos aislar una carga eléctrica puntual y estudiamos cómo es su comportamiento de modo de establecer reglas para poder medir y cuantificar su interacción con otra o más cargas. Esta carga puntual que estudiaremos es una **idealización** aproximada de una carga existente, cuya dimensión es menor que la distancia que la separa de otra carga situada en un punto geométrico cercano. Fue **Charles-Augustin de Coulomb** quien pudo determinar, medir y experimentar



Según pierda o gane electrones, el átomo queda cargado positivo o negativamente. Siempre este intercambio sucede en sus orbitales exteriores.

estas interacciones mediante un instrumento denominado **balanza de torsión** con la que determinó el principio de las fuerzas de la electrostática.

La balanza de torsión es una máquina que, al estar sometida a una fuerza, somete un elástico a una torsión. Esto genera un desplazamiento sobre su eje que puede ser medido en función de la fuerza a la que estará sometido por repulsión o atracción de la carga en uno de sus extremos.

Por medio de esta balanza, midiendo su comportamiento, se pudo observar que la fuerza de interacción entre dos cargas cualesquiera duplica su valor si alguna de estas cargas duplica su valor y lo triplica si una de estas cargas aumenta en factor de tres, por lo que el valor de las fuerzas es proporcional al producto de estas cargas.

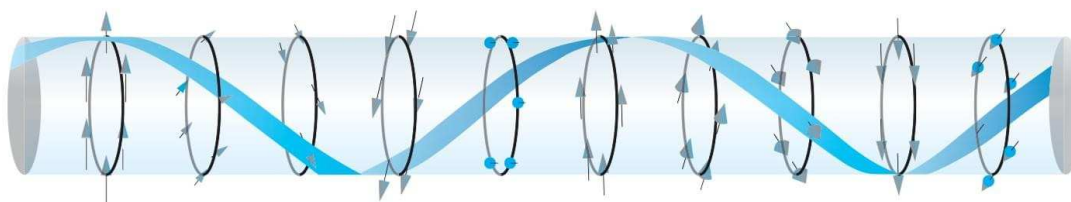
$$F \approx q_1 \cdot q_2$$

Electricidad

La **electricidad** es un fenómeno que surge a partir de las cargas eléctricas. La interacción entre las cargas genera una fuerza que produce la circulación de

electrones en un mismo sentido, produciendo corriente eléctrica. De este modo, podemos producir electricidad mediante el movimiento de cargas eléctricas.

Un tipo de energía se puede convertir en otras por el mismo procedimiento y de la misma forma puede transmitirse de un medio al otro.



El flujo de electrones sucede en los orbitales superiores, produciendo un flujo continuo de cargas de un átomo al otro.



La fuerza es proporcional al valor de sus cargas e inversamente proporcional a la distancia que las separa.

Si modificamos la distancia entre las cargas, la fuerza de atracción o repulsión también se ve modificada, de tal forma que, si duplicamos la distancia inicial, la fuerza de interacción disminuye en un factor al cuadrado (si la distancia es r , al duplicar la distancia, esta será 2^2 ; si se triplica, 3^2 ; si se cuadruplica, 4^2 , y así sucesivamente en símbolos r^2). Así se determinó que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

$$F \approx \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

donde se introdujo una constante de proporcionalidad K para quedar:

$$F = \tau \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Esta ecuación es la conocida como **ley de Coulomb** cuyo enunciando es: dos cargas puntuales ejercen una sobre otra una fuerza tal que es proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Experimentalmente se ha demostrado que la fuerza de atracción o repulsión lleva la forma de:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Donde $\frac{1}{4\pi\epsilon}$ es la denominada **constante de Coulomb** que depende del material y el medio que la rodea.

La fuerza de repulsión será mayor a medida que las cargas estén más juntas; cuando estén a una distancia máxima, las cargas permanecerán estáticas ya que su fuerza estará equilibrada y será nula. A mayor carga, mayor fuerza de repulsión. Cabe mencionar que las fuerzas de repulsión siempre estarán sobre el mismo plano y en la misma dirección una de la otra.

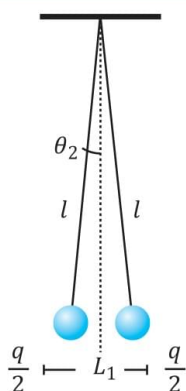
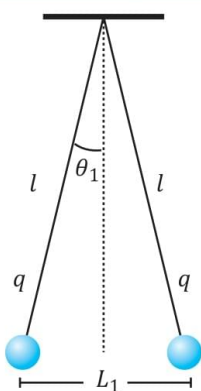


Gráfico ideal de dos cargas ejerciendo fuerzas en el mismo plano, pero en dirección opuesta.



Balanza de torsión utilizada para determinar la ley de Coulomb. Las cargas eléctricas generan una fuerza de torsión que es medida según el ángulo de torsión formado.

Campo eléctrico

El **campo eléctrico** es esencialmente formado por una carga puntual, aislada, que interacciona con el campo eléctrico de otra carga puntual si estas están a una distancia relativamente cercana. Toda carga eléctrica crea un campo eléctrico en el espacio que la rodea, en toda dirección y sentido. Dentro del campo, se generan fuerzas de atracción y repulsión entre las cargas que se encuentran en él.

El campo eléctrico produce magnitudes vectoriales y se comporta como ellas; esto quiere decir que todas las fuerzas producidas tienen dirección y sentidos. Estas fuerzas son conservativas, y su intensidad y sentido dependen de la carga originaria del campo eléctrico.

Al ser un modelo físico, se representa según las cargas que interaccionan. Supongamos que tenemos una carga puntual y aislada; si ubicamos una segunda carga a una distancia r , esta genera una fuerza de repulsión o atracción (según el valor de la carga). Si movemos la carga a otra distancia r_2 , la fuerza será diferente; así sucesivamente podremos determinar, mediante infinitos puntos, el campo eléctrico vectorial. De esta manera, se mide el campo eléctrico, según:

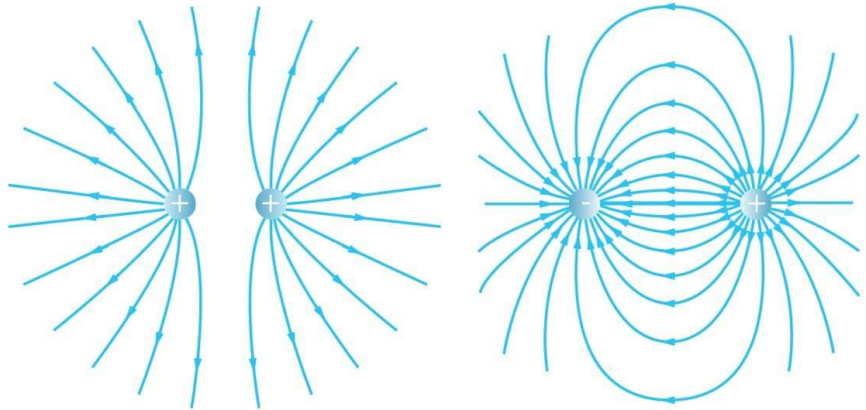
$$E = \frac{F}{q} \quad \text{y} \quad F = q \cdot E$$

Donde **E** y **F** son magnitudes vectoriales, porque tienen magnitud, dirección y sentido. Podemos leer que el campo eléctrico depende inversamente de la carga: a mayor carga, menor campo eléctrico. La fuerza de repulsión es directamente proporcional a la carga; a mayor carga eléctrica, mayor será la fuerza de atracción o repulsión.

Cada campo eléctrico posee líneas imaginarias que describen la magnitud del campo en ese punto dado; estas líneas

Electrostática

Si bien la ley de Coulomb establece la relación entre dos cargas en un mismo plano, espacialmente, estas cargas interaccionan unas con otras en toda dirección y sentido. El cálculo matemático establece que las fuerzas deben estar en el mismo eje de dirección. Para establecer esta fuerza en el espacio, es necesario calcular todas y cada una de las fuerzas generadas, y obtener una resultante final mediante trigonometría. Esta fuerza resultante producirá una corriente de electricidad en el mismo sentido.



Las cargas generan efectos espaciales en toda dirección y sentido, que interaccionan con todas las cargas circundantes.

son conocidas como **líneas de campo**. Cada línea de campo es representada como un vector tangente a las curvas del campo vectorial del campo eléctrico, cuyo fin es ayudarnos a visualizar la estructura de dicho campo. Si unimos los puntos donde la magnitud del campo eléctrico posee igual magnitud, obtendremos superficies equipotenciales, observaremos a simple vista en qué parte del campo eléctrico tendremos la misma magnitud de campo.

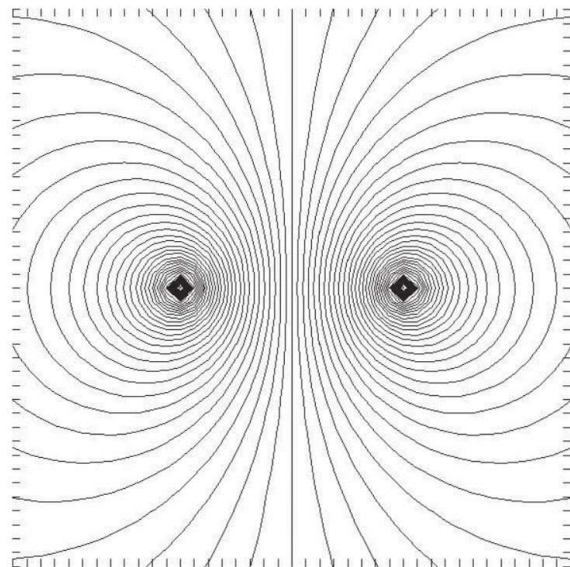
Las principales propiedades de las líneas de campo son:

- ♦ Las líneas de campo eléctrico comienzan en las cargas positivas, terminan en las negativas y finalizan en el infinito, siempre recordando que las cargas positivas generan líneas de campo como fuentes.
- ♦ La magnitud del campo es proporcional a la densidad o cantidad de líneas de campo; E será mayor donde las líneas de campo estén más cerca unas de otras.
- ♦ Dos líneas de campo no pueden cortarse entre sí ya que, si se pudiesen cortar, implicaría que en ese punto tendríamos dos vectores de campo diferente, lo cual no es posible.

Potencial y diferencia de potencial

Un campo eléctrico generado por una carga puntual tiene la capacidad de generar fuerzas de repulsión o de atracción hacia otra carga que se encuentre dentro del sistema. Gracias a la capacidad de realizar el trabajo de este campo y mover una carga determinada desde un punto a otro dividido por unidad de carga, obtendremos lo que se denomina **potencial eléctrico**. El trabajo que se requiere para desplazar una carga puntual dentro de un campo eléctrico desde un punto a otro a velocidad constante es el potencial.

El campo eléctrico es la región del espacio donde cualquier carga dentro de esta experimenta atracción o repulsión.



Existen en todo el campo eléctrico superficies equipotenciales, aquellas zonas donde la magnitud del campo eléctrico es el mismo. Estas superficies se representan como curvas cerradas.



Solo se puede estudiar el potencial eléctrico en campos estáticos en una región definida del sistema. Entonces podremos definir al potencial como:

$$V = \frac{W}{q}$$

Lo que es lo mismo decir que el potencial es una medida del trabajo por unidad de carga.

Teniendo un campo eléctrico generado por una carga q cualquiera, suponiendo que en el infinito tenemos una carga positiva y se traslada al punto **A** ejerciendo una fuerza igual y opuesta a la fuerza que ejerce el campo para alejarla, estaremos realizando un trabajo. El potencial eléctrico en un punto será este trabajo realizado sobre la carga para desplazarla desde el infinito hasta el punto **A**.

Si tomamos una carga de prueba (q_0) y la ubicamos en cualquier punto dentro del campo eléctrico generado por otra carga, en un momento **A**, el campo eléctrico influirá en la carga de prueba y la hará desplazar hacia un punto **B** (con movimiento equilibrado a velocidad constante); esto generará un potencial en **A** y otro en **B**. Esta diferencia se denomina **diferencia de potencial**, y es el trabajo que debe realizar el campo eléctrico para desplazar la carga de prueba de un punto al otro.

$$V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q_0}$$

Esta diferencia de potencial se mide en (1 volt = 1 joule/1 coulomb). Es importante aclarar que la diferencia de potencial, en su magnitud, no posee dirección ni sentido, es una magnitud escalar ya que no importa qué recorrió, sino que lo importante es su estado inicial y final (es independiente de la trayectoria). Si tomamos este concepto y lo aplicamos a un ejemplo práctico, como lo es un conductor eléctrico, una diferencia de potencial permite que se produzca un movimiento de carga, ya que, al tener un punto de mayor potencial (una pila posee un lado cargado positivamente y el otro

El potencial eléctrico es capaz de desplazar una carga del punto A al punto B dentro de un campo electrostático.

negativamente, tienen una diferencia de potencial de 1,5 V), atrae a las cargas de menor carga produciendo una corriente eléctrica.

Definimos entonces que, el potencial será una magnitud escalar, el potencial 0 corresponderá a un punto en el infinito, el potencial creado tendrá la misma polaridad que la carga, y las cargas positivas se desplazan de los puntos de mayor potencial a los de menor potencial, mientras que las cargas negativas se desplazan en sentido opuesto.

Fuentes de energía potencial

Si bien existe un sinfín de fuentes de energía potencial, a veces son pocas las maneras de poder almacenarla y convertirla en energía utilizable, al menos de manera eficiente. Sin embargo, existen fuentes de energía potencial que generan corriente continua, la cual es indispensable en casi todos los dispositivos electrónicos que utilizamos en la actualidad.

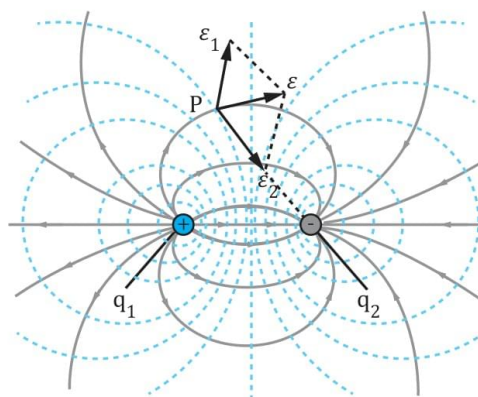
Entendemos como fuente de energía a cualquier dispositivo capaz de brindar energía eléctrica (en nuestro caso) utilizando medios químicos, mecánicos o biológicos, creando una diferencia de potencial entre dos puntos capaz de transmitir cargas eléctricas de un punto al otro en un circuito cerrado.

Algunas de las fuentes de energía potencial son: generadores de corriente continua, baterías y acumuladores. Los primeros generan corriente continua que es utilizada como fuente de carga positiva. Las baterías y acumuladores son capaces de almacenar energía química en su interior estableciendo una diferencia de potencial entre

Principio de superposición

Si calculamos el campo eléctrico **E** en un punto debido a una sola carga, este tendrá una magnitud inferior al que calcularemos si le asignamos dos o más cargas. Esto quiere decir que el campo eléctrico en un punto es la suma vectorial de los campos debidos a cada una de las cargas presentes en el sistema.

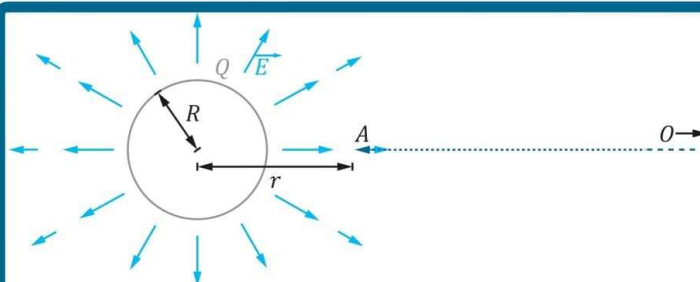
Si a determinado campo le adicionamos cargas de la misma polaridad, este campo incrementará su valor. Si por el contrario adicionamos cargas de polaridad inversa, el campo se reducirá. Este efecto lo podremos apreciar en el siguiente gráfico.



Cada punto del sistema es la suma vectorial de la inferencia del campo de cada carga.

Corriente debido a una FEM

Para que se produzca un flujo de electrones y por ende una corriente eléctrica, es necesaria una fuerza electromotriz (FEM) que logre mantener una diferencia de potencial en dos partes del circuito. Si no existiera una FEM en el circuito, no podría haber circulación de cargas. Las cargas abandonan el polo negativo hacia el polo positivo atravesando numerosas resistencias y componentes electrónicos que reducen su capacidad de circulación y generan lo que llamamos consumo eléctrico.



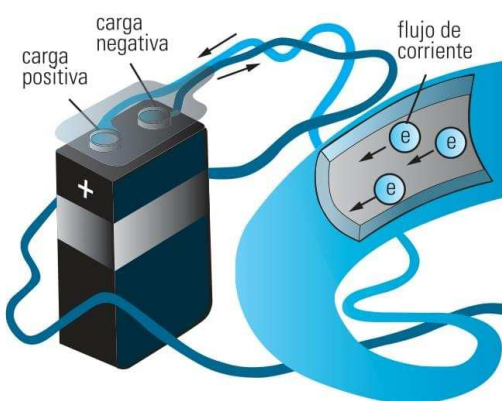
Potencial eléctrico entre dos puntos, entre A y el infinito, y una única carga puntual.

sus placas, de modo de permitirle a un circuito eléctrico aprovechar la diferencia de potencial y consumir esta corriente eléctrica que fluirá dentro del circuito a través de todos sus componentes. Los acumuladores, como dispositivos de almacenaje de energía, son cargados con anterioridad tanto positiva como negativamente para ser utilizados más adelante.

Para originar esta corriente, los generadores utilizan diversos medios mecánicos como fuentes potenciales de energía, ya sean represas (principalmente para la generación de corriente alterna), paneles fotovoltaicos, fuentes térmicas (combustible), inducción electromagnética (una de las fuentes más utilizadas en la actualidad en combinación con las anteriores), pero con el inconveniente de que, suspendida la fuente inicial, el generador no tiene la capacidad de seguir produciendo energía.

Las baterías y acumuladores utilizan reacciones químicas de materiales en distintos medios para producir desprendimiento de electrones y así aprovechar la diferencia de potencial para generar fuerzas electromotrices, que producirán una circulación eléctrica en un circuito cerrado.

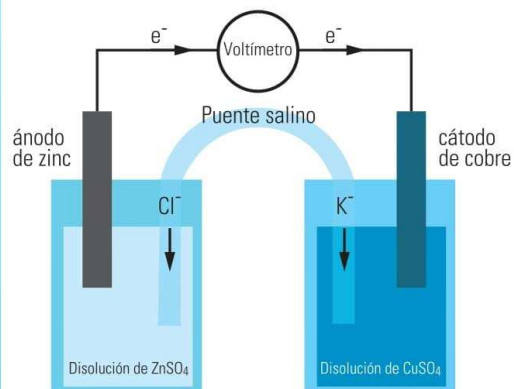
La energía potencial que puedan generar estos dispositivos deben poder ser almacenadas; hoy se mejoran los materiales para que estas puedan aumentar la producción de energía de manera más eficaz y a un menor costo.



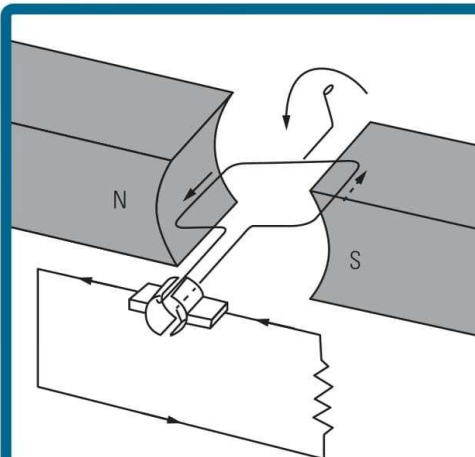
La diferencia de potencial permite a las cargas negativas (electrones) fluir desde el terminal de menor potencial al de mayor potencial.

Energía potencial renovable

Muchas de las energías potenciales conocidas son renovables. Las energías potenciales de origen químico son más aplicables para acumuladores gracias a que resultan potencialmente conservativas, hasta que son utilizadas o consumidas. Nuevas tecnologías ayudarán a optimizar las energías químicas conservando los recursos.



Funcionamiento del puente salino.



Los generadores de corriente continua casi siempre convierten energía mecánica (potencial) en energía eléctrica.



CORRIENTE ELÉCTRICA Y MATERIALES CONDUCTORES

En esta sección se describirán los conceptos básicos de la corriente eléctrica y también conoceremos los principales materiales conductores.

Como sabemos, la electricidad tiene su origen en el movimiento del **electrón**. El átomo que forma la materia está compuesto básicamente por un núcleo donde se encuentran otras partículas, como protones y neutrones; alrededor del núcleo giran en órbita los electrones.

La carga eléctrica es una propiedad física de los electrones y protones en los átomos de la materia. Se denomina corriente eléctrica al movimiento de cargas a través de un conductor. Los metales más utilizados en la industria eléctrica para el transporte de cargas eléctricas son el cobre y el aluminio. Estos metales son llamados **conductores** debido a que tienen electrones libres capaces de moverse dentro de su red cristalina. Cuando por un conductor se desplazan cargas eléctricas, podremos decir que por él circula una corriente eléctrica. La unidad en el sistema internacional de unidades, abreviado SI, es el ampere. Un ampere se define como un coulomb por segundo ($1A = 1 C/s$).

$$I(A) = \frac{Q(C)}{t(s)}$$

Esta unidad recibe el nombre del científico francés **André-Marie Ampère** (1775-1836). En equipos electrónicos la corriente en general se expresa en miliamperes ($1 mA = 10^{-3}$). La corriente por unidad de área de la sección transversal se denomina **densidad de corriente J**:

$$J(A) = \frac{I(A)}{A(m^2)}$$

La unidad de densidad de corriente es amper/metro².

La corriente eléctrica a través de los metales se manifiesta transportando electrones libres. Su velocidad es solo de algunos milímetros por segundo.

Corriente continua y alterna

En 1880 hubo una gran discusión entre dos de los más grandes inventores de la época. Esta discusión radicaba en cuál era el mejor método de distribución eléctrica.

Thomas Edison defendía la corriente continua, que no varía en el tiempo, y George Westinghouse, la corriente alterna, que varía cíclicamente en el tiempo. La batalla la ganó por fin Westinghouse, ya que en la actualidad tanto en las industrias como en las instalaciones domiciliarias la corriente alterna es la más utilizada.

La corriente continua no varía su valor en función del tiempo. Si observamos la pantalla de algún equipo que nos permita ver la forma de onda de la corriente notaremos una línea continua. La corriente continua tiene una sola dirección.

Esta corriente es generada por dispositivos del tipo: dinamos, células fotoeléctricas, pilas, etcétera. En la industria automotriz, está generalizado el uso de baterías que permiten almacenar la energía y utilizarse cuando se requiera. Los electrones que fluyen desde una celda o batería se llaman **corriente continua**, porque tiene una única dirección.

Tipo de celda	Seca o húmeda	Voltaje por celda
Carbón-Zinc	Seca	1.5
Alkalina	Seca	1.5
Plomo ácido	Húmeda	2.2
Nickel-Cadmium	Húmeda o seca	1.25

En esta tabla podemos observar los tipos más comunes de celdas y sus características.

Las baterías pueden ser conectadas de distintas maneras de acuerdo a la necesidad de la aplicación. Si conectamos las baterías en serie en polaridad aditiva, se suman los niveles de tensión, por ejemplo:

$$\text{Batt 1} = 4V; \text{Batt 2} = 4V; \text{Batt 3} = 4V$$

El nivel de tensión total es la sumatoria de las tensiones.

$$V = 4V + 4V + 4V = 12V$$



La corriente alterna, contrariamente a la corriente continua, no puede almacenarse en baterías y cambia su polaridad en forma cíclica. Para poder obtener una corriente alterna, necesitamos una fuente de voltaje alterno. La onda senoidal alterna tiene características particulares:

- ♦ Peak voltaje: valor máximo o pico
- ♦ RMS o valor eficaz: $V_{\text{peak}} * 0,707$
- ♦ Valor promedio = $V_{\text{peak}} * 0,637$

Cuando conectamos una resistencia de carga a una fuente alterna, se produce una corriente alterna, que tiene la misma forma de onda y frecuencia que el voltaje que hemos aplicado a la carga. Un voltaje senoidal queda expresado por la siguiente expresión:

$$v = V * \cos w.t$$

Es, por definición, el trabajo necesario para desplazar la unidad de carga eléctrica de un punto a otro, en contra o a favor de las fuerza del campo.

v = diferencia de potencial instantánea
V = diferencia de potencial máxima
*w = frecuencia angular = $2 * \pi * f$*
f = frecuencia, en la Argentina es 50 Hz

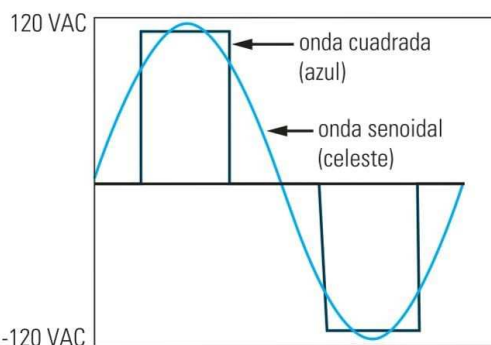
$$i = I * \cos w.t$$

i = corriente instantánea
I = corriente máxima

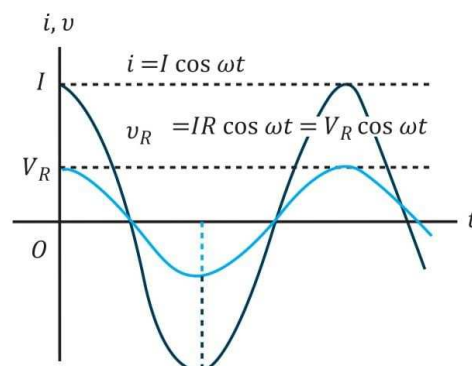
La **frecuencia angular** está relacionada con la frecuencia f en (Hz), el período es $1/f$. El valor pico a pico de la tensión está dado por $2 V_{\text{max}}$.

La **potencia monofásica** está dada por la siguiente expresión:

$$P = U * I * \cos \theta$$



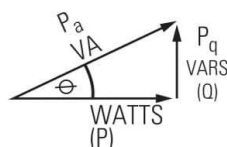
La figura representa dos tipos de ondas: onda cuadrada en color azul y onda senoidal alterna en color celeste. El valor pico es de 120 VAC.



La forma de onda de la corriente y el voltaje son proporcionales. La corriente y la tensión están en fase (no hay ángulo de desfase entre la tensión y la corriente).

Transporte de la corriente eléctrica

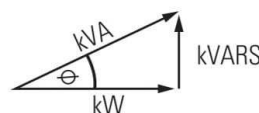
La corriente alterna puede ser transportada a grandes distancias, minimizando el efecto de la resistencia de los cables, bajando la intensidad de la corriente. Al mismo tiempo que se baja la intensidad, se sube el potencial; por eso se transporta en líneas de alta tensión. Mediante transformadores, podremos elevar o bajar los niveles de tensión para adaptarla a las necesidades. Por ejemplo, en la Argentina, la central hidroeléctrica Yacretá se encuentra a 1000 km de Buenos Aires.



$$VA = E \times I$$

$$P = E \times I (\cos \theta)$$

$$Q = E \times I (\sin \theta)$$



$$kVA^2 = kW^2 + kVAR^2$$

$$kVA = \sqrt{kW^2 + kVAR^2}$$

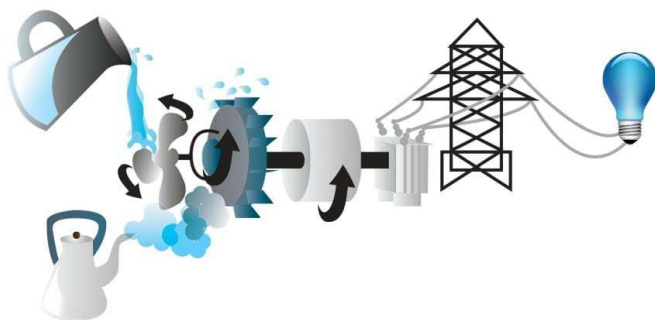
El triángulo de potencias muestra los tipos de potencia: P_a (potencia aparente), P_q (potencia reactiva), P (potencia activa), y su relación trigonométrica.



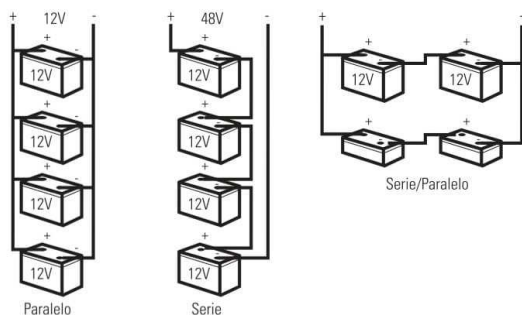
Esta fórmula es usada para determinar la corriente de un circuito monofásico:

- ♦ $P = P =$ Potencia activa [Watt]
- ♦ $P_a = S =$ Potencia aparente [VA]
- ♦ $Q = P_q =$ Potencia reactiva [VARs]
- ♦ $\cos \theta$ o también llamado comúnmente $\cos \phi$

$$\cos \theta = \frac{P}{S}$$



Esquema de sistema de generación hidroeléctrica, transporte y obtención de electricidad en nuestros hogares.



Los bancos de baterías pueden conectarse de diversas formas de acuerdo a la necesidad de la aplicación.

La descarga eléctrica de un rayo que se origina en la atmósfera por carga estática puede tener un máximo de corriente de 200.000 amperes.

Circuito eléctrico

Para que pueda circular una corriente eléctrica por un circuito eléctrico, es necesario que lo haga en un circuito cerrado. Al circuito eléctrico lo podemos asociar a un circuito hidráulico, y para eso lo debemos pensar como el camino que recorre la corriente (agua) desde la fuente hacia la carga, también llamado **consumo**.

La carga es todo elemento que consume energía para producir trabajo; podemos dar como ejemplos de nuestra vida cotidiana: los motores, las lámparas, etcétera.

La corriente, igual que el agua, circula a través de los canales que conducen el flujo de corriente; desde el punto de vista eléctrico, los canales son los conductores eléctricos que usamos para transportar la corriente de un punto a otro, es decir, transportamos los electrones al punto de la carga. En el circuito hidráulico, la diferencia de altura genera una determinada presión (tensión en un circuito eléctrico) que provoca la circulación de un caudal de líquido (corriente); la cañería ofrece una resistencia a la circulación del fluido, que depende de la longitud y el área de contacto.

La corriente que fluye por un conductor depende de la tensión aplicada y, cuanto menor sea la resistencia, en mejores condiciones circulará la corriente eléctrica.

Los circuitos eléctricos básicos que podemos encontrar son: **circuito serie** y **circuito paralelo**.

En un circuito serie, los elementos se conectan en una misma trayectoria de corriente, mientras que en un circuito paralelo la corriente que pasa a través de los resistores no necesariamente debe ser la misma, pero la tensión aplicada en los terminales es la misma para todos los elementos.

Resistencia eléctrica

La **resistencia** ideal es un elemento pasivo que disipa energía en forma de calor. Una característica de todos los conductores es su baja resistencia, pero algunos conductores ofrecen mayor resistencia que otros al flujo de corriente.

Concepto de circuito

Se denomina **circuito eléctrico** a una serie de elementos o componentes eléctricos, tales como resistencias, inductancias, condensadores y fuentes, conectados eléctricamente entre sí, con el propósito de generar y transportar energía eléctrica hacia un punto de consumo.

De esta manera, nos permite analizar las distintas variables y determinar los parámetros incógnitos. Los símbolos de los distintos elementos están regulados por normas internacionales.

Líneas de transporte de energía eléctrica

La energía generada en las centrales eléctricas se transporta mediante líneas de transmisión hasta los centros de distribución urbanos, donde se reduce el nivel de tensión en subestaciones eléctricas y se distribuye a los usuarios. Antes de llegar al usuario final, la energía eléctrica se transforma a niveles de voltaje medios. Este transporte de bloques menores de energía con destino al usuario final se denomina **distribución**.

Un conductor puede estar compuesto por paquetes de moléculas, que contienen espacios donde los electrones se pierden. En el flujo de corriente, el voltaje puede forzar a fluir estos electrones dentro o fuera de estos espacios. Para reducir la oposición al flujo de corriente del conductor, se puede aumentar el área o la sección, cambiar de material o variar algún otro parámetro físico, para que de este modo los electrones tengan más caminos para fluir.

El valor de resistencia, por lo tanto, puede ser alterado si construimos un conductor con mayor o menor longitud.

Desde otro punto de vista, cuando a un conductor se le aplica en sus extremos un voltaje, los electrones adquieren velocidad en el momento en que la fuerza asociada al campo eléctrico interno los acelera y les imprime velocidad en dirección opuesta al campo eléctrico. El choque con los átomos reduce la velocidad de los electrones como lo haría una fuerza de fricción interna. Este es el origen de la resistencia eléctrica de un material.

Analogía entre resistencia eléctrica e hidráulica

La resistencia que un conductor ofrece al paso de los electrones a través de las moléculas o átomos del conductor produce que estos átomos choquen con otros y se genere un efecto térmico. Cuanto mayor sea el número de choques, menor será la velocidad de desplazamiento. Para mantener la misma velocidad deberá aumentar la diferencia de potencial.

Haciendo una analogía con un sistema hidráulico, la presión que ejerce sobre el líquido en las cañerías equivaldría a lo que es el voltaje en un circuito eléctrico. En el caso que aumente la presión en la cañería, también aumentará la fuerza de la corriente que fluye por ella. Al incrementar el voltaje, la corriente aumenta si la resistencia es constante.

Antes hemos mencionado que variaría la resistencia eléctrica de un material conductor si se modificaran aspectos dimensionales de estos. Siguiendo con la analogía hidráulica, la mayor o menor apertura de una llave provocará mayor o menor caudal de agua, por lo que se puede simbolizar a la resistencia eléctrica con las llaves del circuito hidráulico para un mayor entendimiento. En resumen, podemos terminar de definir la resistencia eléctrica como la aptitud de un material a oponerse al paso de una corriente por su interior. La resistencia puede ser expresada con una ecuación donde se relaciona la longitud del conductor (l), la resistividad del conductor y el área del conductor (A). La resistencia de un circuito eléctrico se expresa en su unidad ohm (Ω). Para con-

ductores de longitud l del material y área A (área transversal por donde circulará la corriente), esta cantidad depende de la resistividad ρ [$\Omega \cdot m$] y conductividad σ [S/m].

La resistividad depende del material con que está fabricado el conductor de corriente:

$$R = \rho * \frac{l}{A}$$

A la inversa de la resistencia, se la denomina como **conductancia** y se determina con la siguiente ecuación:

$$G = \sigma * \frac{l}{A}$$

La resistencia eléctrica tiene la particularidad de aumentar con la temperatura.

Valor de la resistencia eléctrica

Para determinar el valor de la resistencia eléctrica de un conductor, se debe contar con un mínimo de 12 horas con temperatura controlada entre 10° y 30° . Se utiliza un puente de Wheatstone o puente de Thompson.

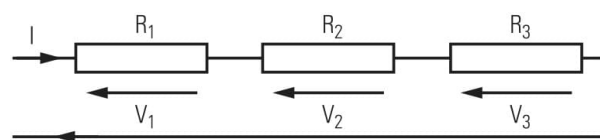
El valor de lectura que nos determine el puente en ohms dividido por la longitud del conductor en km nos dará como resultado la resistencia del conductor en Ω/km .

Si la medición se ha tomado a una temperatura distinta de $20^\circ C$, se tendrá que corregir aplicando la fórmula siguiente:

$$RT = R_{20}[1 + \alpha_{20}(T - 20)]$$

RT = resistencia a la temperatura T

α_{20} = coeficiente de variación de temperatura a $20^\circ C$



La figura muestra una sucesión de resistencias, con las caídas de potencial parcial en cada una de ellas y la caída de potencial total.



Metal o aleación	Resistencia específica ohms por mm ² -m		Coef. α de T° por °C entre 0 y 100°
	0 °C	23,8 °C	
Plata pura recocida	0,01465	0,01605	0,004
Cobre puro recocido	0,01557	0,1715	0,00238
Cobre recocido	0,0159	0,0174	0,0402
Cobre estirado en frío	0,01626	0,0178	0,0223
Oro (99,9 % de pureza)	0,02195	0,0239	0,00377
Aluminio (99,5 % de pureza)	0,0252	0,2778	0,00423
Aluminio comercial (97,5 %)	0,02658	0,0293	0,00435
Hierro (casi puro)	0,0906	0,104	0,00625

Resistencia específica aproximada y coeficientes de temperatura de metales y aleaciones

Resistores o resistencias eléctricas

Un **resistor** es un componente eléctrico diseñado explícitamente para tener una cierta magnitud de resistencia, expresada en ohms. Además, debe operar en forma segura en su entorno, incluido campo eléctrico, temperatura, humedad, radiación, y otros efectos. Algunos resistores son diseñados para convertir energía eléctrica en energía calórica. Otros son usados en circuitos de control donde modifican la señal eléctrica y la energía para alcanzar un efecto deseado. Como ejemplo podemos mencionar los resistores utilizados en el arranque de motores y en amplificadores electrónicos para controlar la ganancia total y otras características del amplificador.

Medidas eléctricas

La medición de una cantidad consiste en la comparación de una cantidad unitaria conocida de la misma especie o de su determinación como una función de diferentes tipos cuyas unidades estén relacionadas por leyes conocidas.

Un ejemplo del primer tipo de medición es la evaluación de una resistencia en ohms con un puente de Wheatstone en términos de una resistencia calibrada y una relación.

Un ejemplo del segundo tipo de medición es la calibración de la escala de un vatímetro como el producto de la corriente (en amperes) en sus bobinas de campo y la diferencia de potencial (en volts) en el circuito.

Un factor importante en la medición es la precisión; esta es una medida de la dispersión de determinaciones repetidas de una determinada cantidad, que depende de varios factores. Entre ellos, la resolución del método utilizado, las

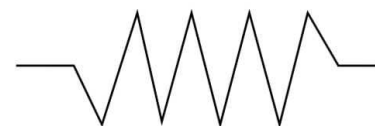
Georg Simon Ohm determinó que todo lo que se mueve o fluye encuentra una cierta resistencia. En honor a su labor, la unidad de resistencia eléctrica del sistema internacional lleva su nombre (ohm).

variaciones en las condiciones ambientales (temperatura y humedad) que pueden influir en la medición, la inestabilidad de alguno de los elementos en el circuito, etcétera. Las mediciones requeridas para certificación deben realizarse en laboratorios certificados.

El uso de instrumentos digitales a veces genera problemas en la precisión de la medición.

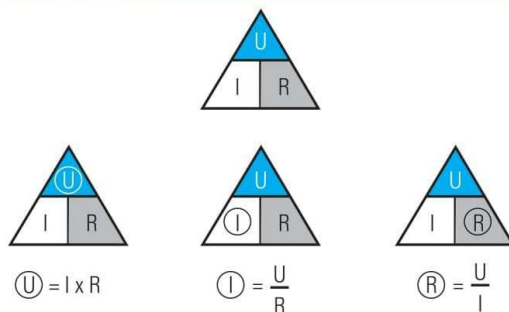
Resistencia de un material

La resistencia eléctrica de un material determina el valor de corriente, y describe las características del material y los factores externos a los que este puede estar sometido: temperatura, campo magnético, y otros factores relacionados con la capacidad de conducción de la corriente eléctrica.



Símbolo de la resistencia eléctrica en circuitos eléctricos.

Triángulo de potencias que nos ayuda a memorizar las combinaciones de ecuaciones de los distintos parámetros.





Materiales conductores

Los materiales conductores eléctricos proporcionan un medio para la circulación de corriente cuando se les aplica una diferencia de potencial.

En general, los metales son conductores de la electricidad. La conductividad en los metales, como el cobre y el aluminio, se produce debido a los electrones que se ven atraídos al terminal positivo cuando se aplica un voltaje.

La libertad con la que pueden moverse determina la conductividad y la resistividad. Las restricciones en el movimiento de los electrones están dadas por las impurezas, estrés mecánico, etcétera, por lo tanto, para lograr alta conductividad, el metal debe ser puro.

Los materiales de mayor aplicación en procesos industriales y domésticos son:

♦ **Aluminio y cobre:** son también muy utilizadas las aleaciones de estos metales, con pequeñas adiciones de otros elementos que mejoran las propiedades para aplicaciones particulares.

♦ **Aleaciones cobre-cadmio:** las aleaciones con cadmio dan una gran vida útil, además de ser resistentes al deterioro. Tienen particular uso en cables de conexión eléctrica de ferrocarriles, tranvías, grúas y equipos de similares aplicaciones. Conservan su dureza y resistencia mecánica, se utilizan en máquinas de soldadura de punto y costura de soldadura de acero, y en aplicaciones particulares de barras conmutadoras en motores eléctricos. Estas aleaciones tienen un alto límite elástico, se utilizan en pequeños resortes que tengan que conducir corriente, aplicaciones donde haya algún sistema de conmutación y en los secundarios de los transformadores para máquinas de soldar.

♦ **Aleaciones con cobre-cromo:** esta aleación es particularmente adecuada para la fabricación de electrodos utilizados en la soldadura eléctrica. El material con un tratamiento especial se puede utilizar a temperaturas de hasta 350° sin riesgo de deterioro de sus propiedades y se usa en máquinas rotativas donde las temperaturas de trabajo requeridas son más altas de lo normal. Esta aleación con un tratamiento térmico puede ser mecanizada; en el estado endurecido no es difícil de cortar, pero su mecanizado no es tan dúctil como con aleación de latón o telurio.

♦ **Aleaciones con cobre-plata:** esta aleación tiene la misma conductividad que la del cobre, pero su temperatura de reblandecimiento, después de ser tratada en frío para que se endurezca, es mucho más alto, es decir, su resistencia a la fluencia se mejora a temperaturas moderadamente elevadas. Sus principales usos son en máquinas eléctricas que operan a altas temperaturas o están expuestas a altas temperaturas de fabricación. Por ejemplo, en el secado al horno de materiales aislantes. Este tipo de aleaciones se encuentra disponible en varillas y perfiles laminados, especialmente los diseñados para colectores de máquinas eléctricas, barras de rotor y aplicaciones de similares características.

Uso cotidiano

En la vida cotidiana, usamos resistencias para calentar agua; en procesos industriales, se usan sistemas de calentamiento de gas, agua y petróleo. En algunas actividades industriales, mantener la temperatura en valores determinados es una característica importante para determinados procesos. Otras aplicaciones muy difundidas son: cocinas eléctricas, hornos, parrillas, etcétera.



Ejemplo de uso cotidiano de las resistencias.

♦ **Aleación cobre-telurio:** este tipo de aleación ofrece alta conductividad eléctrica, buenas propiedades para el mecanizado y buena resistencia a la corrosión. Aplicaciones típicas son los cuerpos de magnetrón, que a menudo son maquinados desde un cuerpo sólido. Esta aleación puede ser soldada sin dificultad.

♦ **Aleación cobre-azufre:** es de fácil mecanizado y no tiene tendencia a formar bandas gruesas en la estructura, como el telurio, y se pueden realizar piezas con buen acabado. Tiene buena resistencia al ablandamiento y a la corrosión y posee alta conductividad. Sus aplicaciones son aquellas que requieran alta conductividad eléctrica, como contactos y conectores.

Un material muy utilizado para aislar un conductor eléctrico es el polietileno reticulado (XLPE), ya que es termoestable y resistente a las altas temperaturas.

Aleaciones de resistencias

Hay muchas aleaciones con alta resistividad, pero las dos aplicaciones principales son resistencias y elementos de calentamiento.

Se requieren aleaciones para resistencias estándares para tener un coeficiente de baja temperatura. La aleación utilizada tradicionalmente es Manganina, pero ha sido sustituido por aleaciones de Ni-Cr-Al con los nombres comerciales Karma y Eva ohm. La resistividad de estas aleaciones es de aproximadamente $1,3 \mu\Omega \text{ m}$, y el coeficiente de temperatura es de $\pm 0,5 \times 10^{-5} / ^\circ \text{C}$. Para aplicaciones de precisión inferiores de cobre-níquel se utilizan aleaciones, pero tienen una resistividad inferior.



El cobre posee las siguientes características: una muy alta conductividad eléctrica y térmica, buenas propiedades mecánicas y es fácil de soldar. Es ampliamente usado para la construcción de conductores eléctricos.

La resistencia eléctrica del cobre, como la de otros metales puros, varía con la temperatura.

El aluminio tiene propiedades inferiores al cobre, su resistencia a la tracción es baja y se lo utiliza aleado o en conjunto con alambres de acero que mejoran sus propiedades mecánicas para su uso en líneas aéreas. Algunas aleaciones de aluminio son muy buenos conductores con aceptable conductividad.

Valores entre propiedades del aluminio y del cobre	Aluminio	Cobre	Unidad
Conductividad eléctrica a 20 °C	37.2×10^{-6}	58.1×10^{-6}	S/m
Resistividad eléctrica a 20 °C	2.69	1.72	$\mu\Omega$ cm
Densidad a 20 °C	2.69	8.93	kg/dm ³
Coefficiente de temperatura de la resistencia (0-100 °C)	4.2×10^{-3}	3.93×10^{-3}	per °C
Conductividad térmica (0-100 °C)	238	599	W/m °C
Punto de fusión	660	1085	°C

Comparación entre las propiedades del aluminio y del cobre.

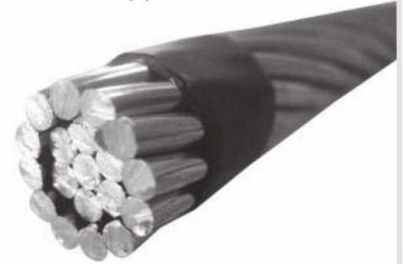
Conductores de cobre con aislación de polietileno reticulado, utilizados en instalaciones eléctricas industriales.

Cobre

Existen importantes productores de cobre en el mundo, como Estados Unidos, México o Australia, aunque es Chile el mayor país productor con aproximadamente un 34% del total de producción de cobre. Otros de los mayores productores mundiales son Suiza o Reino Unido, aunque las empresas de estos países controlan los intereses mineros fuera del país de origen.

Aluminio

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre y constituye el 7,3 % de su masa. En su forma natural, solo existe en una combinación estable con otros materiales (particularmente en sales y óxidos). Fue descubierto en 1808 y a partir de entonces, demandó muchos años de investigación y ensayos el poder aislar el aluminio puro del mineral en su estado original, y así hacer viable su producción, comercialización y procesamiento.



Barras de aluminio en subestación eléctrica exterior. Las barras son diseñadas para soportar la corriente nominal y los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuitos.

Materiales aislantes

Los materiales aislantes son, por nombrar algunos, la cerámica, el vidrio, la baquelita, la cinta aisladora de PVC, la fibra de vidrio, la goma. Todos ellos tienen en común que su resistividad es muy alta o, si queremos compararlos con los materiales conductores, su conductividad es muy baja. La resistividad es la inversa de la conductividad. Entendemos por **resistividad** la resistencia eléctrica del material por la sección y dividida por la distancia entre electrodos, de acuerdo a la siguiente fórmula. Las unidades son (Ω m):

$$\rho = \frac{R \times S}{l}$$

En los conductores, el valor de la resistividad es muy baja, mientras que en los aislantes es muy alta. El aislante perfecto o ideal sería aquel cuya resistividad fuese infinita, o lo que es lo mismo, su conductividad fuese cero. En la realidad, este material ideal no existe; cualquier material real tendrá va-

Un aislante es un material cuya resistividad es muy alta. Cuanto más alta sea, resultará mejor aislante.

lores de resistividad menores a este valor ideal. Al analizar el comportamiento físico atómico de los materiales, vemos que los materiales conductores tienen gran facilidad para ceder electrones y cargas, permitiendo el desplazamiento de estos por su cuerpo.

En el caso de los materiales aislantes, nos encontramos con que no ceden electrones fácilmente, se oponen con fuerza al desplazamiento de cargas eléctricas a través de su estructura. Por esta propiedad física se los emplea como aislantes. Este comportamiento lo podemos medir mediante la resistencia de aislación, que se obtiene en $M\Omega$, y cuanto mayor sea nos indica qué tan bueno es el material empleado como aislador.

La **resistividad** es la medida que se utiliza para conocer la facilidad o dificultad que presenta un material para permitir el pasaje de cargas eléctricas por su cuerpo.

El material que se empleará se elige de acuerdo a la diferencia de potencial que debe soportar el aislante, entre la tensión del conductor que soporta y la tierra. La resistencia de aislación deberá ser tal que impida el paso de corriente eléctrica entre el conductor y la tierra. Esta propiedad también se denomina **rigidez eléctrica**, y nos indica cuál es la tensión máxima a la que puede ser sometido un aislador sin dañarse, o sea, sin permitir que circule por su cuerpo una corriente eléctrica. Los aislantes, de acuerdo al uso y empleo al que estén destinados, serán desarrollados con diferentes materiales.

Una placa sobre la que se desarrolla un circuito electrónico de baja potencia, por ejemplo la placa madre de una PC, o la placa de circuito impreso de un equipo de audio o de un televisor, podrán ser de fibra de vidrio o de otros materiales similares, pues los campos eléctricos a los que se verán sometidas son bajos, y las corrientes son pequeñas.

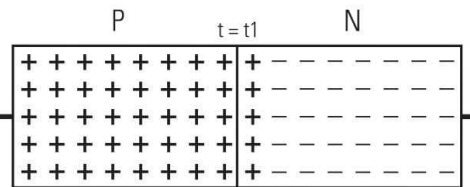
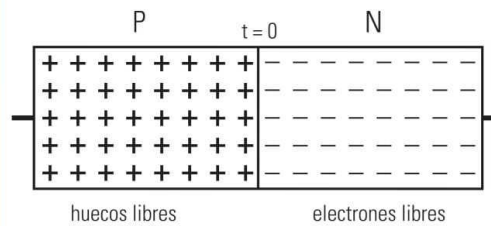
Materiales semiconductores

Los **materiales semiconductores** son denominados así pues, de acuerdo a determinadas condiciones, pueden comportarse como conductores o aisladores. En su origen, su principal uso se dio en la industria electrónica, donde se desarrollaron elementos para reemplazar a las válvulas de vacío. Los diodos y transistores eran desarrollados a partir del germanio, que luego se lo reemplazó por el silicio con el que se desarrollan transistores, integrados, etcétera.

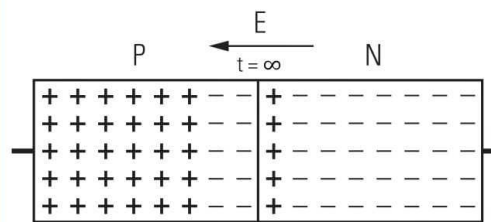
Hoy en día se realizan mezclas de materiales que se comportan como los semiconductores originales, por ejemplo el arseniuro de galio (AsGa), que se emplea en la fabricación de los leds de alta potencia empleados para iluminación.

Para obtener la máxima utilidad de un material semiconductor, se lo debe emplear como dos planchas, una de un material con carga positiva y el otro con carga negativa, íntimamente unidas formando una **juntura de unión**.

Al formarse la unión o juntura, tenemos de un lado electrones libres (material de tipo N) y del otro lado huecos libres (material de tipo P); con el paso del tiempo, los electrones libres comienzan a migrar hacia el otro lado de la juntura ocupando los huecos aledaños a ella. Este paso de electro-

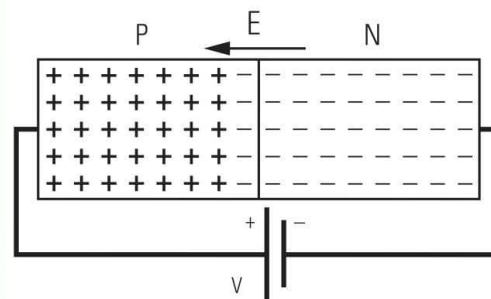


Se comienzan a desplazar donadores y aceptores a lo largo de la juntura, un desplazamiento de electrones comienza a crear una zona vacía.

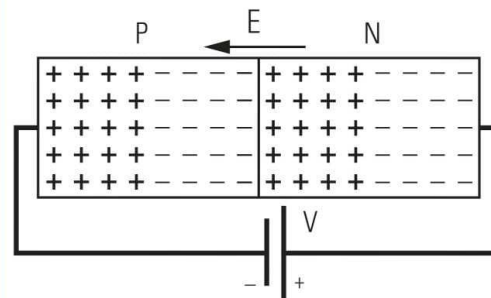


El movimiento de electrones a través de la juntura para ocupar huecos del otro lado termina cuando el campo eléctrico que se forma se opone al movimiento de los mismos, creándose así una "zona de vaciamiento".

Proceso de formación de una juntura P-N a lo largo del tiempo hasta alcanzar el equilibrio.



Polarizando en directa la juntura, disminuye la zona de vaciamiento, y hay circulación de corriente.



Polarizando en inversa la juntura, crece la zona de vaciamiento, y no hay circulación de corriente.

Polarización de una juntura P-N en directa e inversa, y efecto sobre la zona de vaciamiento y la circulación de corriente.



Los PLC son dispositivos de control programables destinados al control de redes domésticas, de procesos industriales, etc.

nes origina un campo eléctrico E que comienza a oponerse al pasaje de electrones. Transcurrido un tiempo largo, la juntura queda formada y en equilibrio; el campo eléctrico presente impide el pasaje de electrones y, por lo tanto, la circulación de corriente.

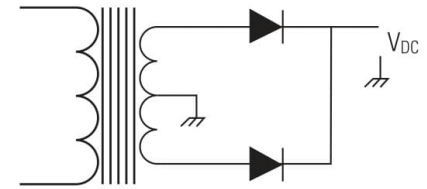
Este campo eléctrico E crea una tensión V_0 que se denomina **barrera de potencial**.

Al polarizar la juntura, de acuerdo a cómo se conecte la batería, se reducirá la zona de vaciamiento; si la batería se conecta en contra del campo (polarización directa), se reduce la tensión efectiva de la barrera de potencial, con lo cual aumenta la circulación de electrones (aumenta la corriente). Si se conecta la batería en favor del campo eléctrico (polarización inversa), aumenta la barrera de potencial y no circularán electrones por la juntura, con lo cual la corriente se reduce.

Aplicación de diodos

Una de las aplicaciones más empleadas en la industria y presente en general en cualquier equipo electrónico es la configuración del rectificador.

En esta ella, se obtiene una tensión continua a partir de una tensión alterna.



Aplicación de diodos, rectificador de corriente alterna a continua.

La juntura P-N es la estructura básica de cualquier componente (diodo, transistor, circuitos integrados, etc.) desarrollados a partir de elementos semiconductores.

Vemos que, entre las varias aplicaciones que tienen los semiconductores, el de llave electrónica es una de ellas, con la ventaja sobre los interruptores mecánicos de no tener la presencia de una chispa cuando se conecta o desconecta como ocurre con un interruptor o un contactor normal.

Existen otras aplicaciones industriales en iluminación, como en artefactos de bajo consumo y gran potencia lumínica. También se los utiliza para el desarrollo de elementos de control de procesos industriales (PLC).

LEY DE OHM Y EFECTOS DE LA CORRIENTE

Conoceremos una de las leyes más importantes de la electricidad y, además, repasaremos los efectos de la corriente.

La **ley de Ohm** es una ley fundamental de la electricidad, establece la relación entre tres elementos: tensiones, corrientes y resistencias. Si se conocen dos de ellos, podemos calcular fácilmente el tercero.

$$V = R \times I$$

Por ejemplo, si tenemos una resistencia de 1 ohm (Ω) y la corriente es de 1 ampere (A), la caída de tensión sobre la resistencia será de 1 volt (V).

$$1V = 1\Omega \times 1A$$

Si conocemos la tensión y la corriente, calculamos la resistencia como el cociente entre la tensión y la corriente.

$$R = V / I$$

Si conocemos la tensión y la resistencia, calculamos la corriente como el cociente entre la tensión y la resistencia.

$$I = V / R$$

La ley de Ohm puede ser aplicada en todos los campos. Por ejemplo, si tenemos que calcular una línea de alimentación

de un largo determinado y conocemos la tensión de alimentación en la entrada de la línea (V_0) y, asimismo, conocemos la mínima tensión que se debe aplicar al dispositivo (V_m) y la corriente de alimentación necesaria para este (I_a), de forma que una vez conectado su funcionamiento sea el correcto, podemos calcular la máxima caída de tensión admisible en la línea de alimentación como:

$$\Delta V = V_0 - V_m$$

Conociendo las características de los conductores, resistencia en función de la sección, podemos calcular la resistencia total del alimentador como:

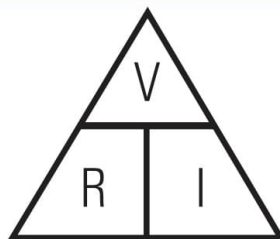
$$R = \Delta V / I_a = (V_0 - V_m)$$

Una vez conocida la resistencia total de la línea de alimentación, se divide esa resistencia por la longitud de la línea, y tenemos la resistencia por metro de alimentador, la cual se mide en (Ω/m). Si entramos en las tablas de los fabricantes de cables con ese valor, obtendremos la sección mínima que asegure en el alimentador una caída de tensión menor o igual a la máxima admitida, así alimentaremos el equipo sin problemas.

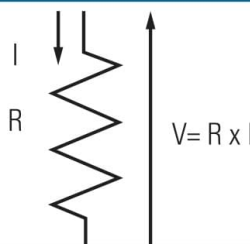
Efecto de la corriente eléctrica

La corriente eléctrica es utilizada por su efecto calórico; al circular genera calor en el conductor y por eso se la utiliza en estufas, hornos e iluminación (el filamento de la lámpara calentado queda incandescente).

La circulación de corriente genera campos electromagnéticos a su alrededor, por lo que se pueden hacer funcionar motores bobinando en forma adecuada el rotor y el estator. Si se la hace pasar por un líquido, se produce la electrólisis; si el líquido es agua, se produce la separación del oxígeno y del hidrógeno. Los efectos que se producen al ser aplicada sobre el cuerpo humano dependerán no solo del valor de la intensidad, sino también de la frecuencia y la tensión utilizada. Por ejemplo, en un electrobisturí, que produce el corte y la inmediata coagulación de la sangre de la herida, se aplican frecuencias altas del orden de los 500 KHz, potencias de corte de 400 a 500 W y de coagulación de 160 a 200 W.



Ley de Ohm.
La representación en triángulo nos da la exacta relación existente entre los tres elementos (V , R , I).



Ley de Ohm. La caída de potencial (V) en un resistor es igual al valor de ese resistor (Ω) por la corriente (I) que circula por él.

También se la utiliza en electroestimulación ya que, aplicando diferentes formas de onda de baja frecuencia, se estimula el funcionamiento de diferentes músculos; esto es utilizado en kinesiología. Pero, además de los efectos benéficos de la electricidad sobre el cuerpo humano, también existen efectos nocivos, el caso típico es la electrocución.

El pasaje de la corriente hace que el corazón pierda el ritmo de latido (se dice que el corazón **fibrila**) y, cuando esto ocurre, la sangre deja de circular en forma normal; por otra parte, puede producir otros movimientos musculares que impiden la respiración, y la persona muere por la combinación de falta de oxígeno y mala irrigación sanguínea. Asimismo, en los puntos de entrada y salida produce quemaduras de tercer grado (necrosis de los tejidos).

El **efecto skin** o efecto pelicular se produce dentro de los conductores al circular una corriente eléctrica por ellos.

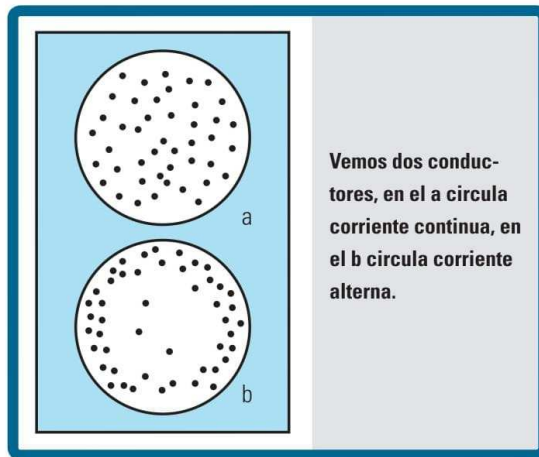
Si la corriente es continua, los electrones se desplazan en forma homogénea dentro del conductor; la densidad de corriente es homogénea en toda la sección de este. En cambio, si se hace circular una corriente alterna por el conductor, la densidad de corriente será mayor en la periferia que en el centro. En bajas frecuencias, este efecto no es apreciable, pero a medida que se aumenta la frecuencia el efecto es más notable; por tal razón, en las líneas de transmisión de microondas, entre el radio y la antena, el conductor utilizado es totalmente hueco, pues la corriente eléctrica circula únicamente por la periferia del conductor.

¿TE RESULTA ÚTIL?

Lo que estás leyendo es el fruto de trabajo de cientos de personas que ponen todo de sí para lograr un mejor producto. Utilizar versiones "pirata" desalienta la inversión y da lugar a publicaciones de menor calidad.

**NO ATENTES CONTRA LA LECTURA.
NO ATENTES CONTRA TI.
COMPRA SOLO PRODUCTOS ORIGINALES.**

Si tenés alguna duda, comentario o querés saber más sobre nuestros productos, puedes contactarte con nuestro Servicio de atención al lector:
usershop@redusers.com



Vemos dos conductores, en el a circula corriente continua, en el b circula corriente alterna.

Efecto de la temperatura sobre la resistencia

Todo material conductor tiene una resistencia propia, la que es función de la resistividad, y está dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho \times l}{S}$$

La resistencia está entonces estipulada para una determinada condición física del conductor.

Ahora bien, en general todos los conductores tienen determinada la resistividad a 20 °C, y su unidad es el Ωm .

Al aplicar calor a un conductor; se tienen dos efectos: uno es la dilatación del material, y el otro efecto reside en que el calor genera un movimiento de los átomos en la estructura molecular que provoca una mayor cantidad de interferencias para el libre desplazamiento de los electrones.

Estas interferencias, en definitiva, tienen mayor importancia que la dilatación del material, y provocan como efecto inmediato un crecimiento de la resistividad.

La fórmula que regula la variación de la resistividad con la temperatura es:

$$\rho_T = \rho_0 \times (1 + \alpha \times \Delta T) = \rho_0 \times [1 + \alpha \times (T - T_0)]$$

En dónde α es el coeficiente de temperatura y ρ_0 es la resistividad a la temperatura T_0 ; T es la temperatura a la que se desea calcular la resistividad. Esta propiedad de variar la resistencia con la temperatura ha sido aprovechada para desarrollar componentes electrónicos denominados **termistores PTC y NTC**.

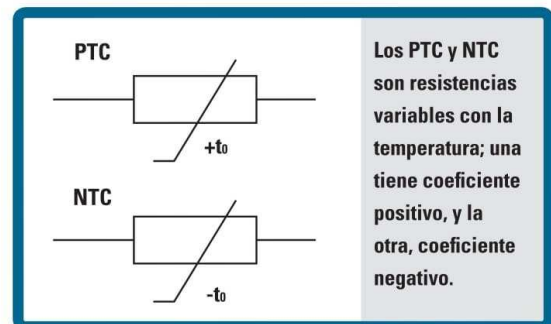
En el caso de los PTC, el coeficiente de variación es positivo, por lo tanto, aumenta la resistencia si aumenta la temperatura, y en los NTC el coeficiente es negativo, por lo que la resistencia disminuye al aumentar la temperatura.

Material	Resistividad (Ωm)	Coef. de temp. (K^{-1})
Cobre $1,7 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$	
Aluminio	$2,8 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
Plata $1,6 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-3}$	
Plomo 22×10^{-8}	$4,3 \times 10^{-8}$	
Carbono	3500×10^{-8}	$-0,5 \times 10^{-3}$
Nicrón	100×10^{-8}	$0,4 \times 10^{-3}$

En esta tabla, se muestran los valores de la resistividad de algunos materiales a 20 °C y el coeficiente α de su variación con la temperatura.

Los termistores están contruidos con materiales semiconductores, con lo que se logra que, con pequeñas variaciones de temperatura, se tengan grandes cambios en la resistencia del componente. La variación de temperatura puede ser no solo la del ambiente, sino también la de algún componente del circuito.

En general, la resistencia de un determinado resistor o conductor aumenta con la temperatura.



Los PTC y NTC son resistencias variables con la temperatura; una tiene coeficiente positivo, y la otra, coeficiente negativo.



Ejemplo de encapsulados comerciales de dispositivos NTC.

Respuesta de NTC y PTC

Los dispositivos semiconductores denominados **NTC** y **PTC** tienen la capacidad de variar el valor de su resistencia en función de la temperatura, ya sea la ambiente o la de un dispositivo acoplado. Los PTC se aplican para la limitación de corrientes, sensores de temperatura, desmagnetización y protección de motores eléctricos. Los NTC se aplican para retardo de relés y en modelos de trenes.

EN ESTA CLASE VEREMOS...

2

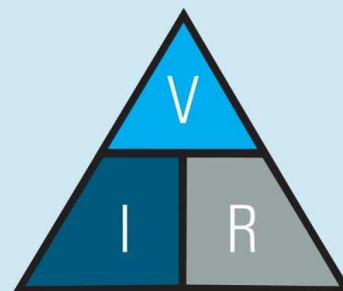
Conceptos importantes para entender el funcionamiento de un circuito eléctrico, leyes de tensión y corriente, y conexión de resistencias y capacitores.

En la clase anterior, realizamos una completa introducción a esta serie de libros dedicados a la electricidad, conocimos el material que compondrá esta obra y detallamos los temas que encontraremos a lo largo de las semanas. También analizamos los conceptos principales para comenzar a profundizar en el mundo de la electricidad, por ejemplo: potencial, fuentes de energía, corriente y circuito eléctrico. Además conocimos los materiales conductores, semiconductores y aislantes.

En esta ocasión conoceremos en detalle la caída de potencial y describiremos las características de los nodos, ramas y mallas, dentro de un circuito eléctrico. Enunciaremos las leyes relacionadas con la tensión y la corriente y, posteriormente, nos daremos a la tarea de aplicarlas en la realización de diversos tipos de conexiones, por ejemplo: la conexión de resistencias en serie, la conexión de resistencias en paralelo y también la conexión de capacitores. Para continuar, conoceremos el teorema de superposición y realizaremos un completo análisis de los elementos de un circuito eléctrico.

Sumario

- 028 Ley de tensión y corriente**
Principios y alcances de las leyes de Kirchhoff.
- 034 Conexión de resistencias y capacitores**
Comportamiento y características de resistencias y capacitores en diferentes tipos de circuitos y conexiones.
- 041 Potencia eléctrica**
Tipos de potencia eléctrica y sus principales características.
- 043 Circuitos resistivos en paralelo**
Comportamiento de las resistencias conectadas en paralelo y cálculo de resistencias totales.



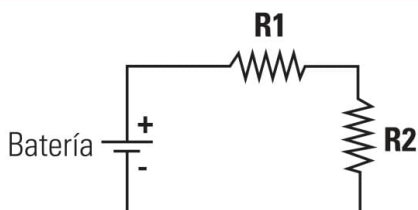


CAÍDA DE POTENCIAL

La caída de potencial es la diferencia de energía o voltaje que se presenta al atravesar un conductor entre sus extremos y que es producida por la resistencia.

En un circuito eléctrico encontraremos dos grupos de elementos, **los activos**, que generan energía (por ejemplo una pila), y **los pasivos**, que transforman la energía generada (por ejemplo una resistencia que transforma la energía eléctrica en calor). Para avanzar con algunos conceptos importantes, sería apropiado reforzar los conocimientos que adquirimos en la clase anterior.

La energía eléctrica pasa por la resistencia y se transforma en calórica.



Como sabemos, para unir a estos dos grupos de elementos necesitamos un **conductor**. Para que un material sea conductor, tiene que contar con electrones libres, que estén en la última órbita del átomo; además, la fuerza de atracción de su núcleo debe ser lo suficientemente débil como para poder liberarse (algunos metales cuentan con esta característica). Cuando logramos que estos electrones libres se muevan (con un elemento activo como una pila), tendremos un flujo de energía que denominaremos **corriente eléctrica**. Existen dos magnitudes para medir esta corriente eléctrica, la **intensidad** y la **tensión** o **voltaje**, estas se miden en **amperes** y en **volts**, respectivamente, y con ellas calcularemos la caída de potencial.

Artefactos de medición

Para medir las magnitudes de las diferencias de potencial en un circuito eléctrico, contamos con dos artefactos que nos proporcionarán esta información. Para medir la **corriente**, interrumpiremos el circuito y haremos pasar la corriente por un **amperímetro**. Para medir la **tensión** utilizaremos un **voltímetro**, colocando sus puntas en los extremos de los elementos pasivos. Es posible encontrar instrumental que cuente con los dos elementos de medición en el mismo aparato.

La intensidad de corriente eléctrica es la cantidad de carga por segundo que pasa a través de un cable (conductor) o un elemento de un circuito.

La tensión o voltaje es una medida de la separación de cargas que se establece en un elemento del circuito.

Para fijar esta idea podemos tomar como ejemplo una cañería con agua, donde los caños son los conductores, y el agua, la energía eléctrica. La intensidad de la corriente será la cantidad de agua que pasa por el caño, y el voltaje será la fuerza con la que circula el agua. Aquí aparece una tercera magnitud: **resistencia**, que en nuestro ejemplo sería el diámetro del caño. Si modificamos este tamaño, variará la corriente y la fuerza del otro lado del caño, y allí tendríamos la **diferencia de potencial**.

Si pensamos en un circuito eléctrico que cuenta con una pila de 10 volts, al pasar por una resistencia perdemos 3 volts, si medimos la tensión en este lugar tendremos 7 volts; ahora, si la energía pasa por una resistencia R2, esta consume estos 7 volts restantes para cerrar el circuito.

Aquí tenemos cómo estas resistencias generan las diferencias de potencial: la energía eléctrica salió de la pila (elemento activo) y, al pasar por una resistencia (elemento pasivo), la energía eléctrica se convierte en energía calórica.

Podemos pensar en otro ejemplo cambiando la resistencia por una **inductancia**. De la misma forma que vimos antes, tendremos que la energía eléctrica al pasar por este elemento se transformará, pero, tratándose de una bobina, obtendremos un campo magnético, y esta vez utilizaremos la energía para generar movimiento, como un motor. Este elemento pasivo también provocará una caída de potencial. Entonces tenemos que el consumo de energía que producen los elementos pasivos de los circuitos provoca en ellos una caída de potencial que mediremos en volts.

Generador



Motor

La energía eléctrica pasa por los bobinados del motor (inductancias) y se transforma en fuerza motriz (movimiento).

ELEMENTOS DE UN CIRCUITO

Un circuito está formado por los elementos activos y pasivos, combinados en formas diversas. Para facilitar su estudio, podremos definir los siguientes términos: nodos, ramas y mallas.

Un **nodo** es la unión de más de dos cables que pueden contener o no elementos activos o pasivos. En el nodo, también llamado **nudo**, podemos encontrar la unión de varios elementos como así también conductores. En este lugar veremos que llegan y salen distintas corrientes eléctricas, utilizando una ley que postula el comportamiento de estas corrientes que entran y salen del nodo.

Esta es la primera ley de Kirchhoff; que nos ayudará a comprender qué pasa con la circulación de los electrones a través de todos los elementos que componen este nodo.

Ahora bien, en el nodo se juntan varios elementos o conductores, siempre más de dos, porque, si son dos elementos, nos encontraremos con la continuidad de un circuito siguiendo una línea, y esto para nosotros comienza a ser una rama del circuito. Veamos ahora qué características tiene una rama.

Rama es el grupo de elementos que se encuentran entre dos nodos y que pueden ser activos, pasivos o simplemente conductores. Debemos definir dónde comienza y dónde termina y, para ello, contamos con los nodos del circuito que harán las veces de límites para nuestras ramas.

En nuestro circuito encontraremos entonces nodos y ramas y, si contamos con varias ramas y nodos, estaremos delante de otro concepto que debemos estudiar. Cuando cerramos el circuito con una o varias ramas, tendremos una **mall**a, que se presenta como todo recorrido cerrado dentro de un circuito.

Es importante conocer el sentido de circulación de las corrientes en un circuito. Por ejemplo, en un elemento pasivo es de positivo a negativo, mientras que en un elemento activo, como una batería, es al revés, va de negativo a positivo. Esta característica es la que nos hace distinguir si un elemento es pasivo (consume energía) o activo (entrega energía)

Para el estudio de los circuitos también contamos con una ley que nos ayudará a conocer sus características y valores. Como un repaso enunciaremos la ley de Ohm: "La corriente (I) que circula por un circuito cerrado es directamente proporcional al voltaje (V), e indirectamente proporcional a la resistencia".

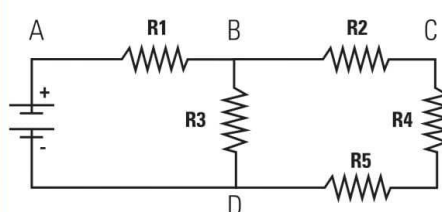
Con este postulado podremos conocer el valor que nos haga falta en un circuito, siempre contando con alguna información. Por ejemplo, si en el circuito conocemos el voltaje y la resistencia, podemos saber la corriente, dividiendo el voltaje por la resistencia. Si quisiéramos conocer el voltaje, tendríamos que multiplicar la corriente por la resistencia.

Mediciones en el circuito

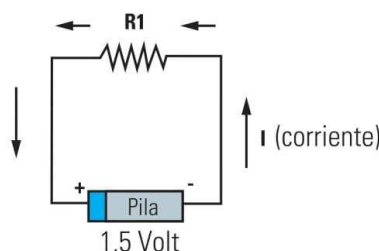
Si utilizamos los elementos de medición voltímetro y amperímetro, podremos conocer los valores de las tensiones y las corrientes que circulan por los elementos que estudiamos: nodos, ramas y mallas. Con la información recabada y la aplicación de la ley de Ohm, podremos obtener los valores deseados. Pero, claro, nos encontraremos que los circuitos en general son mucho más complejos que nuestros ejemplos y allí tendremos que recurrir a nuevas herramientas: las leyes de Kirchhoff.

Por último, si queremos conocer la resistencia, deberemos dividir el voltaje por la corriente.

Gracias a estas herramientas es posible, entonces, tomar una rama, una malla o un nodo y conocer sus características (cálculo y análisis de circuitos eléctricos).



En este circuito encontramos un grupo de elementos que separaremos usando los nodos como frontera, entonces tendremos tres ramas: BCD, DAB y BD.



Es importante conocer el sentido de circulación de las corrientes en un circuito. En un elemento pasivo es de positivo a negativo, mientras que en un elemento activo es al revés.

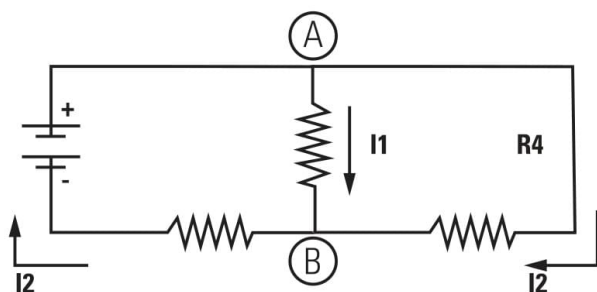
LEYES DE TENSION Y CORRIENTES

Las leyes de Kirchhoff, más conocidas como leyes de tensión, se basan en la conservación de la energía y la carga de circuitos; en estas páginas las conoceremos.

Las leyes de Kirchhoff son el punto de partida para el estudio de los circuitos eléctricos. Aquí utilizaremos los conceptos de nodos y ramas en los que se basó Kirchhoff para elaborar sus postulados.

Primera ley de Kirchhoff

La **primera ley de Kirchhoff**, **ley de nodos** o **ley para la corriente** proviene de la conservación de la carga y dice que la suma de las corrientes que llegan a un nodo es cero; es decir, que el total de corriente que entra es igual al total de la corriente que sale del nodo.



Veamos la ubicación de los **NODOS A y B**, y las corrientes que los circulan. En nuestro caso, a un nodo, seleccionando el nodo A y suponiendo que definimos como positiva la corriente entrante en el nodo: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$

Cómo llamamos a la primera ley de Kirchhoff

Esta ley es llamada **ley de nodos** o **primera ley de Kirchhoff**, y la sigla que se utiliza para referirse a ella es **LCK**. También es conocida como **ley de corrientes**.

Reforzando y utilizando la matemática podemos decir que: "la suma algebraica de todas las corrientes de cualquier nodo de un circuito es igual a cero".

Por ejemplo, podemos ver que un nodo A se extiende a lo largo de toda la parte superior de un circuito. Esto se debe a que cualquier segmento de línea continuo en un circuito debe interpretarse siempre como una conexión de resistencia nula, dado que no hay ninguna caída de potencial.

También puede establecerse desde un punto de vista eléctrico que en un nodo solo puede fijarse una única tensión, mientras que por una rama siempre circula una única corriente.

Ahora podemos reforzar la idea de malla como un lazo cerrado. Comenzando en un nodo cualquiera, se establece un lazo cerrado al ir uniendo distintas ramas de un circuito, y llegar al nodo de partida sin haber pasado más de una vez por cualquier nodo intermedio.

Aunque pueda resultar obvio, debemos conocer las características de todos los elementos de la red, tanto pasivos como activos, lo que dejará como incógnitas las tensiones y corrientes de las ramas.

En términos generales entenderemos que, cuando hablamos de resolver un circuito, estamos diciendo que queremos determinar la tensión y la corriente de cada rama. Por lo tanto, debemos definir antes las ramas (y en consecuencia los nodos), y en cada una de ellas la tensión con su polaridad y la corriente con su sentido. Esta definición es totalmente arbitraria por lo que la haremos conforme a nuestra conveniencia o necesidad, pero una vez definida se deberá respetar en todo el desarrollo del problema, y los resultados serán coherentes con ella (es decir, los signos se corresponderán con las polaridades o sentidos establecidos en un principio). La tensión y la corriente de cada rama pueden tener un valor, pero, si consideramos que puede estar constituida por varios elementos, no implica que la tensión o la corriente de algún elemento en particular sean iguales a los medidos en la rama. De otra forma, la corriente y la tensión en un elemento de la rama no coinciden, en general, con la tensión y corriente de la rama, salvo que sea un elemento único.

En este sentido se destaca que la tensión y la corriente de la rama, y no la tensión o corriente de un elemento de ella, son las que van a dar las características de esta rama.

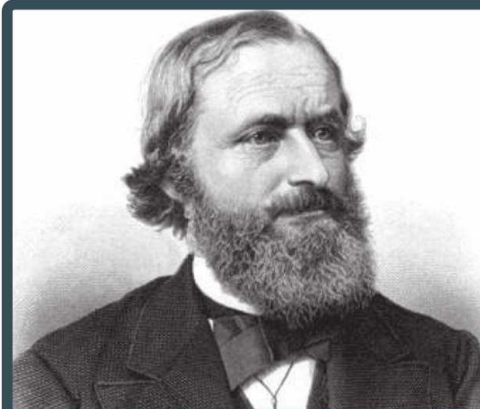
Reforcemos la idea de nodos: un nodo está definido como la unión de dos o más elementos. Sin embargo, podríamos ob-



servar que la corriente que entra a un nodo formado por la unión de dos elementos es la misma que sale, ante lo cual este tipo de nodos pierden interés para el análisis del circuito.

Solo se considerarán los nodos que unen tres o más elementos, llamándose a estos **nodos esenciales**.

De la misma manera, considerando que la rama queda definida por la unión de dos nodos, ahora este elemento queda determinado por la unión de dos nodos esenciales. Así, los elementos que quedan incluidos dentro de una rama no son más que elementos que se encuentran en serie. Recordando que la condición primordial que define una configuración serie es que circule por ellos la misma corriente, se llega a la misma conclusión que al especificar un nodo esencial.



Gustav Robert Kirchhoff postuló estas famosas leyes cuando aún era un estudiante.

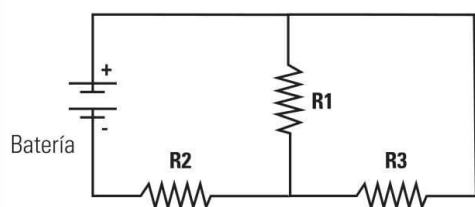
En términos generales entenderemos que, cuando hablamos de resolver un circuito, estamos diciendo que queremos determinar la tensión y la corriente de cada rama.

Por otra parte, diremos que un **lazo cerrado** es todo camino que se recorre uniendo distintas ramas de un circuito sin haber pasado más de una vez por cualquier nodo intermedio y llegar al nodo de partida. Como nueva definición se introduce el concepto de **mall**a como todo tipo de lazo cerrado que en su recorrido no contenga otro lazo.

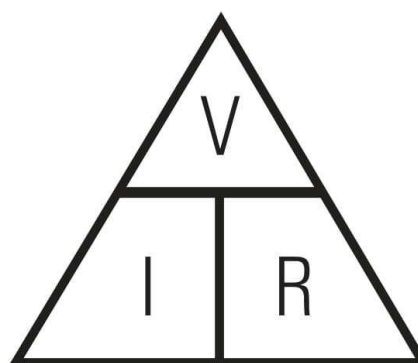
Para estudiar un circuito, el **método de nodos** utiliza las tensiones de nodo como variables del sistema. Este método es más conveniente pues se encarga de reducir el numero de ecuaciones simultaneas que tendremos que resolver.

En forma sintética, si seleccionamos el método de nodos tendremos que realizar los siguientes pasos, considerando un circuito de N nodos:

- ♦ Debe optarse por un nodo de referencia. Se asignan las tensiones V_1 y V_2 , refiriendo estas tensiones al nodo de referencia.
- ♦ Se aplica la primera ley de Kirchhoff a cada uno de los nodos, expresando la corriente que circula por cada rama en términos de las tensiones de nodo.
- ♦ Se obtiene de esta forma un sistema de ecuaciones simultáneas, cuyas incógnitas son las tensiones de nodos desconocidas.
- ♦ En primer lugar, se deben identificar los nodos del circuito. Uno de estos nodos debe establecerse como nodo de referencia.
- ♦ Lo más conveniente es optar por el nodo que conecta mayor número de ramas.



Comenzando en un nodo cualquiera, se establece un lazo cerrado al ir uniendo distintas ramas de un circuito, y llegar al nodo de partida sin haber pasado más de una vez por cualquier nodo intermedio.



Es bueno familiarizarse con este gráfico ya que nos facilita la visualización de los cálculos que deberemos realizar para obtener los resultados deseados. Este gráfico lo utilizaremos en casi todos los cálculos que se refieran al estudio de los circuitos.



- Este nodo recibe el nombre de **tierra**, pues se supone que su tensión es nula. Una vez designado el nodo de referencia, se deben referenciar todas las tensiones de los demás nodos a la tensión de referencia. Esto es, la tensión en cualquier nodo es la diferencia entre la tensión de dicho nodo y el de referencia.
- Como segundo paso, se aplica la primera ley de Kirchhoff a cada nodo (salvo el de referencia), pero expresando las corrientes desconocidas que circulan por cada rama, en término de las tensiones de nodo. Si se aplica a los nodos la ley de Kirchhoff para la corriente, se obtienen las ecuaciones simultáneas, donde las incógnitas son las tensiones de nodo.

Segunda ley de Kirchhoff

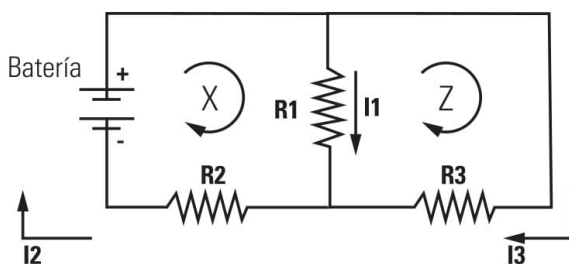
En la primera ley estudiamos las corrientes de un circuito eléctrico, ahora nos dedicaremos a las tensiones, usando como herramienta el concepto de mallas.

La **segunda ley de Kirchhoff** o **ley de mallas** establece que la suma de caídas de potencial a lo largo de una malla debe coincidir con la suma de fuerzas electromotrices (de los elementos activos) a lo largo de ella.

Reforzando la idea y utilizando la matemática, diremos que: "la suma algebraica de todas las tensiones a lo largo de cualquier lazo cerrado en un circuito es igual a cero".

Si no hubiera elementos activos, la suma de potenciales a lo largo de un recorrido cerrado es cero, lo cual está ligado al carácter conservativo del campo eléctrico.

Para su aplicación es preciso previamente asignar un sentido de recorrido a las mallas y dar algún convenio de signos.



Aquí encontramos dos mallas X y Z, y podemos verificar que es importante conocer los sentidos de las corrientes.

Una batería se tomará como positiva si, en nuestro recorrido, salimos por el polo positivo. Una caída de potencial se tomará como positiva si, en nuestro recorrido, vamos a favor de la corriente cuando pasamos por el elemento. En un circuito, las caídas de potencial son todas en resistencias óhmicas; si es I la intensidad que atraviesa a una resistencia R , la caída de potencial es IR .

Recordemos que, antes de analizar un circuito, conviene proceder a su simplificación cuando se encuentran asociaciones de elementos en serie o en paralelo.

Por ejemplo, podemos encontrarnos en un caso donde se presente una asociación de resistencias en **serie**. Se dice que varios elementos están en serie cuando se encuentran todos en la misma rama y, por tanto, atravesados por la misma corriente. Si los elementos en serie son resistencias, ya se ha visto que pueden sustituirse, independientemente de su ubicación y número, por una sola resistencia suma de todas las componentes. En esencia, lo que se está diciendo es que la dificultad total al paso de la corriente eléctrica es la suma de las dificultades que, en forma individual, presentan los elementos componentes:

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_3$$

Esta regla particularizada para el caso de resistencias sirve también para asociaciones de baterías o pilas.

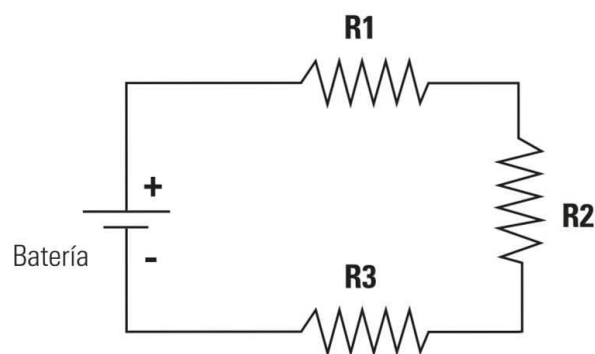
Por otra parte, se dice que varios elementos están en **paralelo** cuando la caída de potencial entre todos ellos es la misma. Esto ocurre cuando sus terminales están unidos entre sí.

Se dice que varios elementos están en serie cuando se encuentran todos en la misma rama y, por tanto, atravesados por la misma corriente.

Ahora, la diferencia de potencial entre cualquiera de las resistencias es V , la existente entre los puntos A y B. La corriente por cada una de ellas es V/R_1 o V/R_2 o V/R_3 , y la corriente total que va de A a B (que será la que atraviese las tres resistencias cuando se le aplique el mismo potencial) será $I_1 + I_2 + I_3$.



En toda malla, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada. De forma equivalente, en toda la malla, la suma algebraica de las diferencias de caída de potencial es cero.



Aquí aplicamos el concepto de rama para saber cuál es la resistencia total.

Para saber el valor de la resistencia en el caso de estar en paralelo, deberemos sumar las inversas:

$$1/R = 1/R1 + 1/R2 + 1/R3$$

Recordemos la comparación de un circuito eléctrico con una cañería. Si tenemos un caño que, en determinado lugar achica su diámetro, tendremos del otro lado menos corriente de agua y, si más adelante volvemos a achicarlo, obtendremos como resultado una reducción más pronunciada de la corriente de agua.

En cambio, si en un lugar determinado del caño colocamos dos caños unidos en sus extremos, cada uno de ellos con un diámetro menor al del comienzo, la reducción será muy inferior al ejemplo anterior ya que los caños colaboran entre sí para dejar pasar la corriente de agua.

Veamos un ejemplo real y recordemos que la resistencia se mide en ohms. En nuestro ejemplo tendremos que R1 y R3 valen 10 ohms, y R2 y R4 valen 5 ohms. Cuando las colocamos en serie (en línea), tendremos que $R = R1 + R2$, así que R será 10 ohms + 5 ohms, entonces $R = 15$ ohms

En cambio, si ponemos nuestras resistencias en paralelo (uniendo sus extremos), tendremos que $1/R = 1/R3 + 1/R4$, así $1/R$ será $1/10$ ohms + $1/5$ ohms, entonces $R = 3,33$ ohms.

Simplificar cálculos

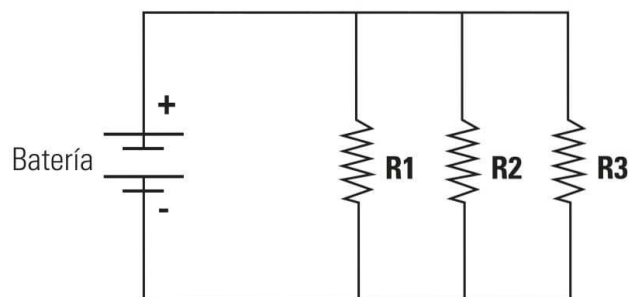
Ahora estamos en condiciones de simplificar un circuito combinado como el que se presenta en la imagen que ejemplifica la Combinación de elementos.

Utilizando el concepto de ramas, tenemos que en la rama A las resistencias R1 y R2 están en serie (en línea), mientras que en la rama B las resistencias están en paralelo (con sus extremos unidos). De esta forma nuestros cálculos serán:

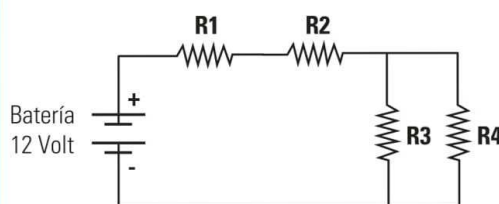
$$Ra = R1 + R2$$

$$1/Rb = 1/R3 + 1/R4$$

$$Rtotal = Ra + 1/Rb = 15 \text{ ohms} + 3,3 \text{ ohms} = 18,33 \text{ ohms}$$



Aquí volvemos a calcular la resistencia total de esta rama; es muy importante para simplificar el estudio de circuitos más complicados.



Combinación de elementos.
En este caso, combinamos los elementos para ver de qué forma se simplifican los cálculos.

Distintas formas de llamar a esta ley

Esta ley llamada **segunda ley de Kirchhoff**, o **ley de mallas**, también se puede encontrar con la sigla **LVK**, conocida como **ley de tensiones**.



RESISTENCIA DE UN CONDUCTOR

Hasta ahora tomamos a los conductores como elementos pasivos que no modifican los valores del circuito (resistencia 0), pero en la realidad los conductores tienen resistencia.

El concepto de **resistencia de un conductor** se refiere a la dificultad que presenta este para ser atravesado por las cargas eléctricas que se encuentran en movimiento. Su expresión matemática es:

$$R = P \times L/S$$

R indica la resistencia del conductor; L, su longitud; S, su sección, y P, la resistividad que a una determinada temperatura es constante para cada tipo de material con el que esté construido el conductor. Recordemos que la corriente eléctrica se logra moviendo los electrones que se encuentran en la última órbita de los átomos, y dependerá del tipo de material que estos electrones tengan mayor o menor fuerza de atracción desde el núcleo del átomo para saber en qué material es más fácil moverlos, y por ende qué material es mejor conductor de la energía eléctrica.

$$R = P \frac{L}{S}$$

El concepto de resistencia de un conductor es la dificultad que presenta para ser atravesado por las cargas eléctricas que están en movimiento; esta es su expresión matemática.

Esto nos hace pensar que, si vemos al conductor como una resistencia lineal y encontramos dificultad a lo largo de él para mover sus electrones, diremos que a mayor longitud tendremos mayor resistencia.

Mencionamos que la resistividad del conductor se mantiene a una temperatura constante, pues a diferentes temperaturas será diferente nuestro coeficiente de resistividad, pero esto varía según el material utilizado en cada conductor.

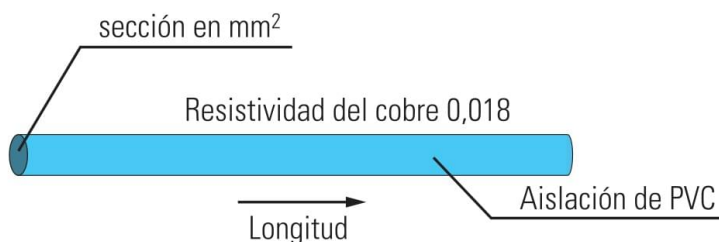
Veamos un ejemplo: si tenemos un cable de aluminio de 50 mm² de sección y 500 m de longitud, ¿cuál será la resistencia de este conductor?

Tenemos que el coeficiente de resistividad del aluminio en 20 °C es de 0,028, el largo es de 500 m y la sección del conductor 50 mm², entonces:

$$R = 0,028 \times (500/50) = 0,28 \text{ ohm}$$

Con estos datos podemos calcular la caída de potencial de los conductores. Teniendo en cuenta que nos encontramos con una caída del potencial eléctrico producida por los conductores, podemos calcular la potencia que se pierde en este por efecto de su resistencia.

Primero debemos fijar el concepto de **potencia**. Si tenemos una casa y en ella encontramos que la tensión que nos entrega la compañía de electricidad es de 220 V (tengamos en cuenta que en otros países puede ser de 110 V), y queremos poner en el fondo de la casa un tomacorriente (enchufe) para usos de mantenimiento, colocaremos un cable de 2,5 mm² de espesor. Consideremos que los cables para uso domiciliario son de cobre recubiertos por una aislación de PVC y están normaliza-



Aquí vemos las distintas magnitudes que debemos conocer de un conductor.



dos para que mantengan siempre sus características y, de esta forma, nuestros cálculos sean confiables. La longitud del cable será de 50 m y, teniendo en cuenta los datos anteriores, podemos decir que la resistencia del cable será de:

$$R = 0,018 \times (50/2,5) = 0,36 \text{ ohm}$$

Ahora bien, imaginemos que en el tomacorriente que colocamos al final del cable conectamos un artefacto eléctrico que consume 5 amperes y tenemos una tensión o voltaje de 220 V. Podemos calcular la resistencia de este artefacto:

$$R = 220 \text{ volts} / 5 \text{ amperes} = 44 \text{ ohms}$$

Potencia es la magnitud que se utiliza para medir la energía consumida por algún elemento del circuito o por el circuito en general.

Diremos también que la potencia que consume este artefacto es:

$$P = V \times I = 220 \text{ volts} \times 5 \text{ amperes} = 1100 \text{ VA}$$

Pero tenemos que también es parte del circuito el conductor, que, tiene 0,36 ohm. Podemos decir que nos encontramos con una malla con dos resistencias en serie, así que tendremos una resistencia total de 44,36 ohms. Si calculamos la corriente que le llega a nuestro artefacto tendremos lo siguiente:

$$I = V / R = 220 \text{ volts} / 44,36 \text{ ohms} = 4,96 \text{ amperes}$$

Para saber qué material es mejor conductor de la energía eléctrica y conocer la resistencia de cada uno de ellos, veremos esta pequeña tabla.

MATERIAL	P20 °C (ohm x mm2/m)
Plata	0,016
Cobre	0,018
Aluminio	0,028
Hierro dulce	0,078
Plomo	0,220

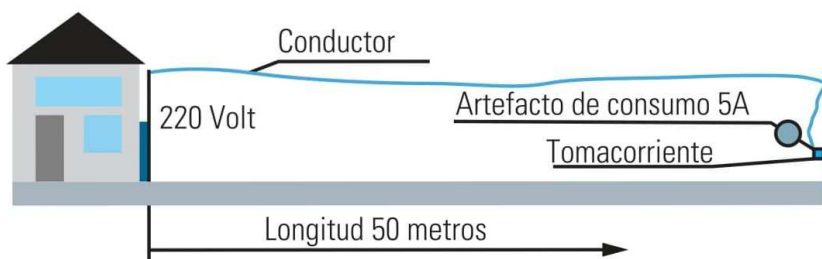
Y la potencia sería de:

$$P = V \times I = 220 \text{ volt s} \times 4,96 \text{ amperes} = 1092 \text{ VA}$$

Vemos que tanto la corriente como la potencia (directamente proporcional) no son suficientes para alimentar nuestro artefacto, así que el conductor deberá circular más corriente para satisfacer la caída de potencial de nuestro circuito. Estos ejemplos son ilustrativos, ya que debemos tener en cuenta más factores para estos cálculos, pero lo importante es ver que resulta muy relevante considerar la caída de potencial en los conductores de nuestro circuito para poder calcular la sección necesaria para el buen funcionamiento del sistema, libre de calentamiento y pérdida de potencia en general.

Coeficiente de resistividad según la temperatura

Sabemos que las diferentes temperaturas varían el coeficiente de resistividad de los materiales. Es muy necesario tener en cuenta estas variables, ya que nos podemos encontrar con diferencias importantes en la resistencia de los conductores que afecten directamente su capacidad y su rendimiento.



Es muy importante tener en cuenta la caída de potencial en los conductores de nuestro circuito, para poder calcular la sección necesaria para el funcionamiento de un sistema libre de calentamiento y pérdida de potencia en general.



CONEXIÓN DE RESISTENCIAS

El comportamiento de las resistencias en un circuito nos ayudará a entender la ley de las tensiones; en estas páginas analizaremos diferentes formas de conexión para las resistencias.

En la presente nota, analizaremos la ley de Kirchhoff para las tensiones o ley de Kirchhoff de mallas; veremos varios ejemplos numéricos y comunes a nuestra vida diaria.

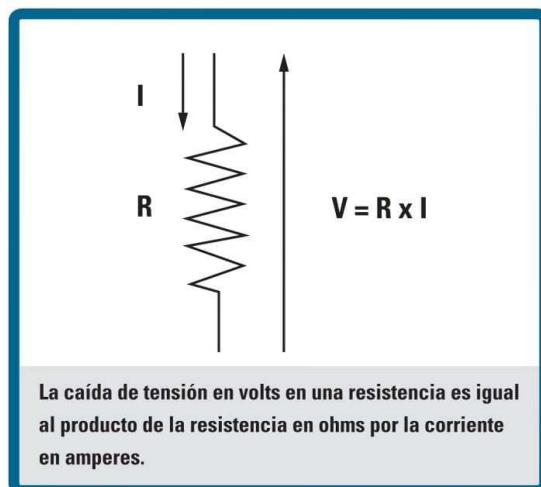
Conexión en serie

Para poder entender de mejor forma la ley de Kirchhoff de las tensiones o mallas, comenzaremos por analizar el comportamiento de las resistencias en un circuito. Para ello, empezaremos por recordar la ley de Ohm; esta nos dice que: $V = R \times I$.

Como consecuencia, si conocemos dos de las tres variables, podemos calcular la tercera: conociendo la tensión y la resistencia, calculamos la corriente como el cociente entre la tensión y la resistencia: $I = V / R$.

La ley de las tensiones de Kirchhoff, también llamada ley de las mallas de Kirchhoff, utiliza la ley de Ohm y la aplica a una malla o lazo cerrado en el que se cuenta con generadores y resistencias.

Esta ley establece que la suma de las caídas de tensión a lo largo de una malla de un circuito es igual a la suma de las tensiones de las distintas fuentes de tensión aplicadas a la misma malla.



Si tenemos una malla o lazo cerrado, allí contamos con un generador que entrega una tensión V y, por ejemplo, tres resistencias en serie; si queremos conocer la corriente I que circula por ella, aplicamos la ley de Ohm, por lo cual tenemos que:

$$I = V / R_{eq}$$

La suma de las caídas de tensión es igual a la suma de los generadores en una malla cerrada del circuito.

En este caso: $R_{eq} = R1 + R2 + R3$

Por lo cual: $I = V / (R1 + R2 + R3)$

Si damos valores, tenemos lo siguiente:

$$R1 = 5 \text{ ohms}$$

$$R2 = 10 \text{ ohms}$$

$$R3 = 15 \text{ ohms}$$

$$R_{eq} = R1 + R2 + R3 = 5 + 10 + 15 = 30 \text{ ohms}$$

Si $V = 30 \text{ volts}$ tenemos:

$$I = V / R = 30 \text{ V} / 30 \Omega = 1 \text{ A}$$

Por lo cual se tiene que las caídas de tensión individuales son:

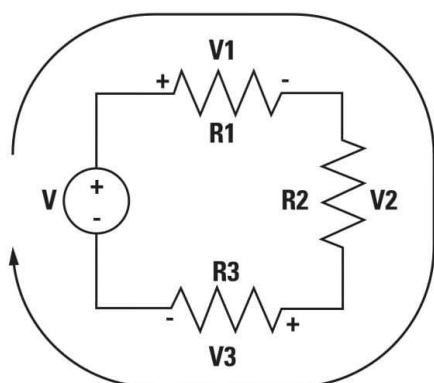
$$V1 = I \times R1 = 1 \text{ A} \times 5 \Omega = 5 \text{ V}$$

$$V2 = I \times R2 = 1 \text{ A} \times 10 \Omega = 10 \text{ V}$$

$$V3 = I \times R3 = 1 \text{ A} \times 15 \Omega = 15 \text{ V}$$

Si verificamos la suma de las caídas de tensión tenemos:

$$V1 + V2 + V3 = 5 \text{ V} + 10 \text{ V} + 15 \text{ V} = 30 \text{ V}$$



La tensión entregada por una fuente a una malla es igual a la suma de las caídas de tensión presentes en la malla.

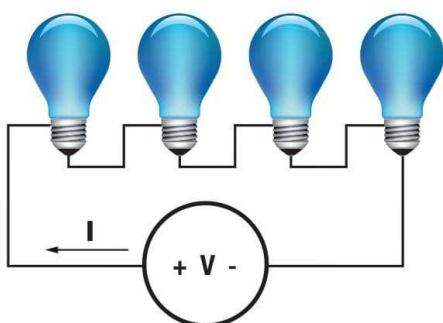
Es el mismo valor de la tensión que entrega el generador. Si reemplazamos las resistencias por lámparas, estas pueden ser todas iguales o de diferentes potencias. Veremos qué pasa en cada caso.

Si fuesen cuatro lámparas iguales, de la misma potencia lumínica, tendrían todas las mismas resistencias, por lo tanto la corriente, de acuerdo a lo visto en puntos anteriores, sería:

$$I = V / (4 \times R)$$

Por lo cual, la corriente que circula por ellas es la cuarta parte de la necesaria para que cada lámpara funcione en forma normal, o, lo que es lo mismo, la tensión aplicada a cada una es la cuarta parte de la tensión necesaria para que funcionen en forma normal.

Si fuesen cuatro lámparas de valores de potencia diferentes, tendríamos caídas de tensión distintas en cada lámpara.



En el circuito vemos cuatro lámparas en serie; la tensión aplicada hace circular una misma corriente por cada una de ellas.

La corriente que circula por todas las lámparas es única, pero ninguna lámpara funcionaría de forma adecuada porque las tensiones aplicadas son menores a las necesarias. Veamos lo anterior con ejemplos numéricos: si las lámparas son iguales y para funcionar correctamente necesitan 12 V y una corriente de 1 A.

En este caso (todas las lámparas iguales), si la fuente de tensión es de 12 V, estaremos aplicando 3 V a cada lámpara, y la corriente que circula por el conjunto es de apenas 0,25 A.

En el segundo caso: lámparas diferentes, por ejemplo todas de 12 V y corrientes de funcionamiento de 1 A, 2 A, 3 A y 4 A.

Si, como dijimos, la fuente es de 12 V, la corriente que circulará será menor a cualquiera de las mencionadas.

Calculemos la resistencia, la corriente que circula y la caída de tensión en cada lámpara. Si cada lámpara necesita 12 V para su correcto funcionamiento, recordando la ley de Ohm tenemos:

♦ Lámpara 1: $R = V / I = 12 \text{ V} / 1 \text{ A} = 12 \Omega$

♦ Lámpara 2: $R = V / I = 12 \text{ V} / 2 \text{ A} = 6 \Omega$

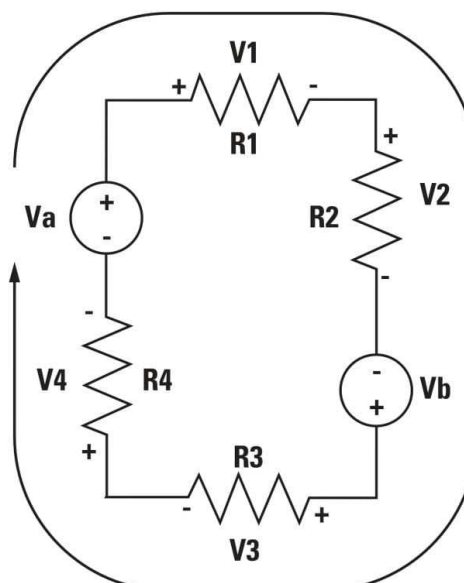
♦ Lámpara 3: $R = V / I = 12 \text{ V} / 3 \text{ A} = 4 \Omega$

♦ Lámpara 4: $R = V / I = 12 \text{ V} / 4 \text{ A} = 3 \Omega$

GENERALIZACIÓN

La ley de Kirchhoff de las tensiones o de las mallas nos dice que la suma de todas las tensiones provistas por fuentes de tensión presentes en una malla será igual a la suma de todas las caídas de tensión presentes en esa misma malla.

En el diagrama presentado se grafica esta situación. En la malla se encuentran dos fuentes (tensiones V_a y V_b) y cuatro resistencias (R_1 , R_2 , R_3 y R_4), que producen caídas de tensión (V_1 , V_2 , V_3 y V_4), la suma total da cero.





Si la tensión aplicada es de 12 V, la resistencia total de las 4 lámparas (la suma de las resistencias de cada una de ellas) es de 25Ω , por lo tanto, la corriente que circula es:

$$12 \text{ V} / 25 \Omega = 0,48 \text{ A}$$

Las caídas de tensión en cada lámpara serán:

$$\text{Lámpara 1: } V = R \times I = 12 \Omega \times 0,48 \text{ A} = 5,76 \text{ V}$$

$$\text{Lámpara 2: } V = R \times I = 6 \Omega \times 0,48 \text{ A} = 2,88 \text{ V}$$

$$\text{Lámpara 3: } V = R \times I = 4 \Omega \times 0,48 \text{ A} = 1,92 \text{ V}$$

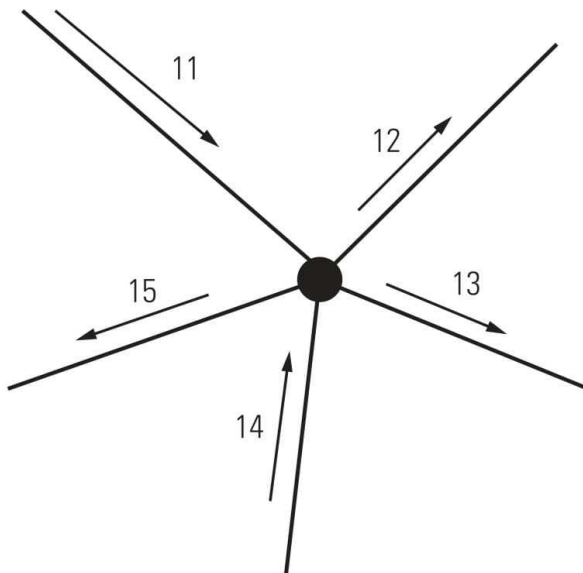
$$\text{Lámpara 4: } V = R \times I = 3 \Omega \times 0,48 \text{ A} = 1,44 \text{ V}$$

Si sumamos las caídas de tensión en las 4 lámparas tenemos:

$$5,76 \text{ V} + 2,88 \text{ V} + 1,92 \text{ V} + 1,44 \text{ V} = 12 \text{ V}$$

Este valor es el mismo que nos entrega la fuente de tensión. Vemos que, de esta forma, cada lámpara recibe una corriente menor a la que necesita para funcionar, por lo cual ninguna funcionará correctamente (su iluminación será menor que la esperada).

Como caso particular, pensemos en un circuito en el que tenemos un generador y dos resistencias iguales, de exactamente el mismo valor, por lo que las caídas de tensión en cada una de ellas serán iguales y, por lo tanto, la tensión en el punto medio de unión entre ambas resistencias será igual a la mitad de la tensión proporcionada por el generador.



En el nodo representado, convergen cinco ramas del circuito, la suma de las cinco corrientes, con su signo, es nula.

Conexión de resistencias en paralelo

Para continuar, analizaremos la ley de Kirchhoff para las corrientes o ley de Kirchhoff de los nodos.

Ya hemos visto que la corriente que circula por una resistencia es $I = V / R$. La ley de las corrientes de Kirchhoff, también llamada ley de los nodos de Kirchhoff, establece que, si tomamos cualquier nodo de un circuito y calculamos la suma total de las corrientes que entran y salen del nodo, dicha suma da como resultado cero.

Si consideramos un nodo de un circuito al que llegan 5 ramas, dos de las ramas tienen corrientes entrantes (I_1 e I_4 son entrantes) y las restantes corrientes son salientes (I_2 , I_3 e I_5 son salientes).

Adoptaremos como corrientes con signo positivo las entrantes y con signo negativo las salientes, por lo cual, expresando en forma numérica la ley de Kirchhoff de los nodos aplicada a un nodo de ejemplo, tendríamos:

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

Definimos como nodo de un circuito a aquel punto en el que se unen más de dos de sus ramas.

Cuando tenemos un circuito en el que todos los elementos están en paralelo con el generador, vemos que la tensión V del generador se aplica a todos los elementos que conforman el circuito, todas las resistencias tienen aplicadas en sus extremos la misma tensión V .

Si consideramos un circuito elemental de un generador y dos resistencias, se tiene que las corrientes individuales que circulan por cada resistencia serán:

$$I_1 = V / R_1$$

$$I_2 = V / R_2$$

Si aplicamos la ley de Kirchhoff de las corrientes, tenemos que:

$$I_3 = I_1 + I_2$$

Si queremos conocer la corriente I_3 , en forma directa a partir de las resistencias R_1 y R_2 y de la tensión V , podemos reemplazar en las ecuaciones anteriores y tenemos:



$$I_3 = I_1 + I_2 = (V / R_1) + (V / R_2)$$

Obteniendo denominador común $R_1 \times R_2$ se tiene:

$$I_3 = [(R_2 \times V) + (R_1 \times V)] / (R_1 \times R_2)$$

La suma de las corrientes entrantes a un nodo es igual a la suma de las corrientes salientes del mismo nodo.

Si sacamos factor común V en el numerador, obtenemos:

$$I_3 = V \times (R_1 + R_2) / (R_1 \times R_2)$$

En donde estamos dividiendo la tensión V por una resistencia equivalente R_E , la que es el paralelo de las resistencias R_1 y R_2 . Para calcular R_E se tiene:

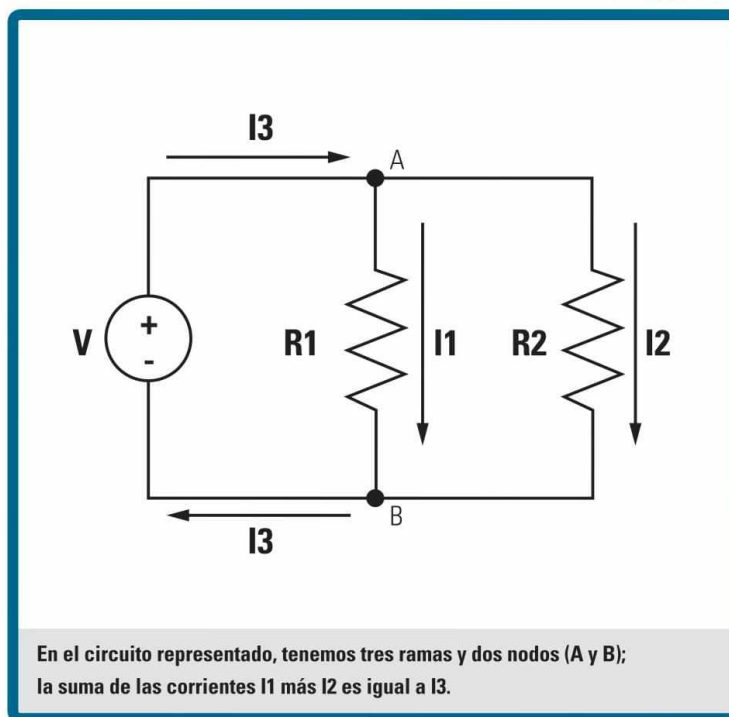
$$R_E = 1 / [(1/R_1) + (1/R_2)] = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2)$$

Con lo cual la corriente total por el circuito I_3 es igual a la tensión aplicada dividida la resistencia equivalente en el circuito, que en este caso es el paralelo de las resistencias R_1 y R_2 . Supongamos ahora que las resistencias son iguales, es decir, $R_1 = R_2$. En este caso, R_E será fácil de calcular:

$$R_E = 1 / [(1/R_1) + (1/R_1)] = (R_1 \times R_1) / (R_1 + R_1)$$

$$R_E = (R_1 \times R_1) / (2 \times R_1)$$

$$R_E = R_1 / 2$$



Si generalizamos esto y tenemos N resistencias R_1 iguales en paralelo, el valor de la resistencia equivalente será:

$$R_E = R_1 / N$$

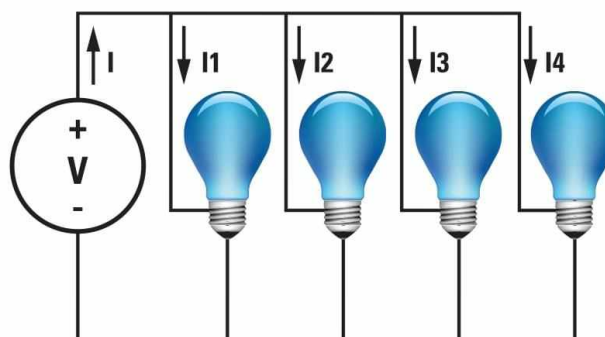
Conexión mixta de resistencias

En la presente nota, aplicaremos las leyes de Kirchhoff y veremos qué ocurre si tenemos conexiones mixtas de resistencias (series y paralelos).

Hasta ahora hemos analizado, por separado, la conexión en serie y la conexión en paralelo de resistencias. Para ello

Artefactos

En la imagen, hemos representado con una lámpara de luz a cada artefacto que tenemos en nuestra casa (heladera, acondicionadores de aire, luces, etcétera); a todos ellos les aplicamos la tensión de 220 V provista por la empresa distribuidora (que la representamos como el generador V). Las corrientes que circulan por cada artefacto son diferentes, pero la suma total es lo que nos brinda la empresa y queda registrado en el medidor de consumo.





hemos aplicado, en forma separada, las leyes de Kirchhoff de las mallas y de los nodos.

Veremos ahora cómo resolver problemas en los cuales se presentan resistencias en serie y en paralelo en forma conjunta. Si contamos con un circuito en el que tenemos una resistencia (R_1) en paralelo con un conjunto serie formado por dos resistencias (R_3 y R_4) en paralelo, que están en serie con una tercera resistencia (R_2), en él tenemos las siguientes corrientes de acuerdo a la ley de Kirchhoff de los nodos:

$$I_T = I_1 + I_2$$

$$I_2 = I_3 + I_4$$

Reemplazando tenemos:

$$I_T = I_1 + I_2 = I_1 + I_3 + I_4$$

La forma más fácil de resolver este conjunto es ir tratándolo paso a paso. Vemos que la corriente I_2 es igual a la suma de I_3 más I_4 . Por lo tanto, podemos aplicar lo visto en la ley de Kirchhoff para las corrientes.

Las conexiones combinadas de series y paralelos se reducen a un conjunto de RE en serie o en paralelo.

En el ejemplo que analizamos, procedemos a reemplazar las resistencias R_3 y R_4 por una resistencia equivalente R_{E1} ; para calcularla, procedemos recordando lo que ya hemos visto en la ley de Kirchhoff para las corrientes:

$$R_{E1} = (R_3 \times R_4) / (R_3 + R_4)$$

Reemplazamos luego la serie de R_2 y R_{E1} con la resistencia equivalente R_{E2} :

$$R_{E2} = R_2 + R_{E1}$$

Asimismo, podemos calcular la resistencia equivalente total R_{ET} del circuito, resolviendo el paralelo de R_1 y R_{E2} :

$$R_{ET} = (R_1 \times R_{E2}) / (R_1 + R_{E2})$$

La corriente I_T podemos calcularla como:

$$I_T = V / R_{ET}$$

Calculemos ahora las otras corrientes. A la resistencia R_1 se le aplica en sus extremos la tensión V , por lo cual, la corriente I_1 que circula por R_1 es:

$$I_1 = V / R_1$$

Si conocemos I_1 ahora podemos calcular I_2 :

$$I_2 = I_T - I_1$$

Conociendo I_2 podemos calcular la caída de tensión sobre R_2 , V_2 :

$$V_2 = R_2 \times I_2$$

Por lo cual, la tensión aplicada a las resistencias R_3 y R_4 será V_3 , la que se calcula como:

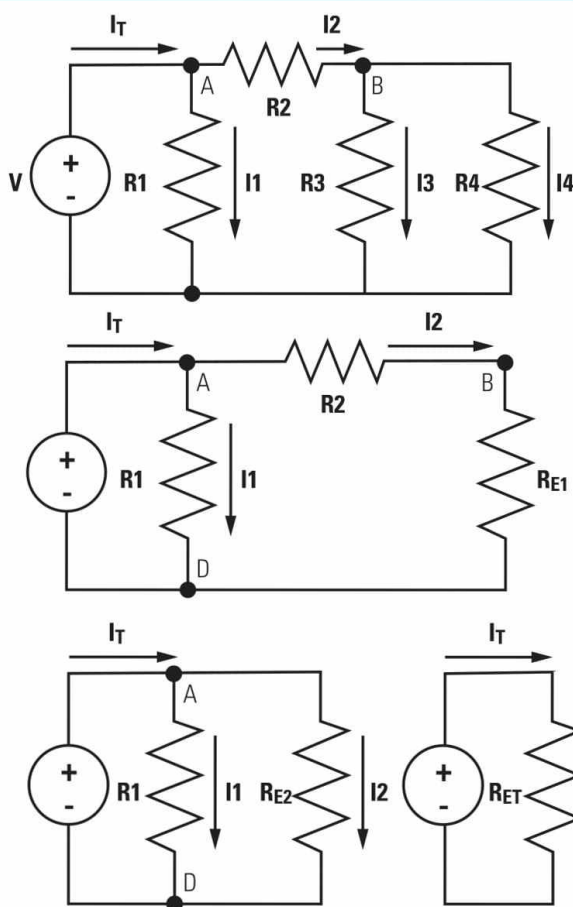
$$V_3 = V - V_2 = V - R_2 \times I_2$$

Por lo cual podemos calcular las corrientes I_3 e I_4 :

$$I_3 = V_3 / R_3$$

$$I_4 = V_3 / R_4$$

De esta forma, hemos calculado las corrientes que circulan por el circuito y las tensiones en cada nodo. Veremos ahora una aplicación de estos conceptos.



Circuito que combina resistencias en serie y en paralelo (conexión mixta), y su resolución.



Hay dos configuraciones típicas que debemos analizar y poder convertir una en otra. Son las configuraciones en **estrella** (también denominadas **delta**) y en **triángulo**.

Si queremos calcular los elementos de una configuración en función de los elementos de la otra, podemos aplicar las ecuaciones de Kennelly.

Conversión de triángulo a estrella

$$R1 = (Ra \times Rc) / (Ra + Rb + Rc)$$

$$R2 = (Ra \times Rb) / (Ra + Rb + Rc)$$

$$R3 = (Rb \times Rc) / (Ra + Rb + Rc)$$

Conversión de estrella a triángulo

$$Ra = [(R1 \times R2) + (R1 \times R3) + (R2 \times R3)] / R3$$

$$Rb = [(R1 \times R2) + (R1 \times R3) + (R2 \times R3)] / R1$$

$$Rc = [(R1 \times R2) + (R1 \times R3) + (R2 \times R3)] / R2$$

Vemos que, si las $R1$, $R2$ y $R3$ son iguales ($R_{estrella}$) y las Ra , Rb y Rc son iguales ($R_{triángulo}$), se tiene que:

$$R_{estrella} = R_{triángulo} / 3$$

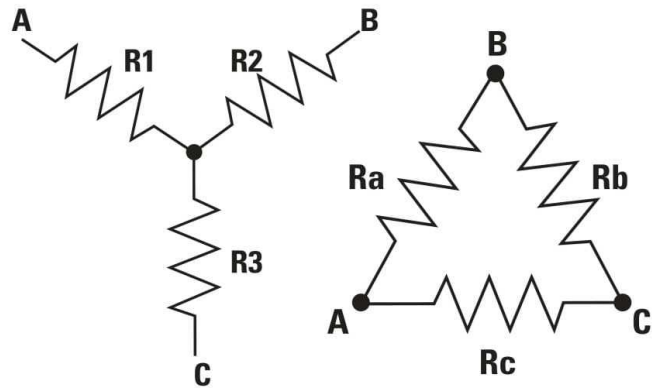
o lo que es lo mismo:

$$R_{triángulo} = 3 \times R_{estrella}$$

Una aplicación de lo que hemos visto hasta ahora la encontramos en la conexión en estrella y triángulo en un circuito para un motor trifásico. Esta conexión se usa para lograr un rendimiento óptimo en el arranque de un motor. Si tenemos un motor trifásico utilizado para la puesta en marcha de turbinas de ventilación que tienen demasiado peso, pero deben desarrollar una rotación final de alta velocidad, será necesario usar un circuito que permita cumplir con los requerimientos de trabajo.

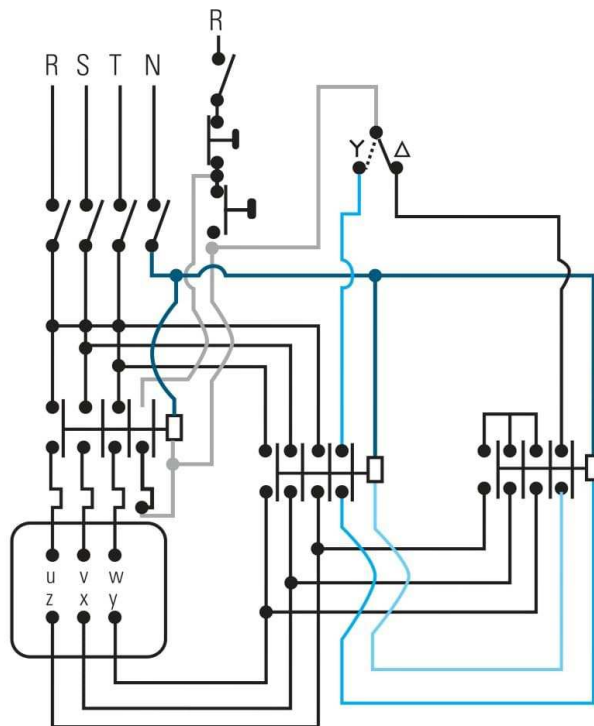
En el arranque de motores trifásicos de alta potencia, las corrientes de arranque deben ser muy altas debido a que se debe vencer la inercia; el motor tiene sus partes móviles (rotor) en reposo y, para ponerlo en marcha y obtener la máxima potencia, se las debe llevar desde el estado de reposo al de la máxima velocidad de giro. Esto implica que se debe vencer la inercia natural pasando por todos los estados intermedios hasta llegar a la máxima velocidad de giro.

Si tenemos en cuenta las expresiones anteriores, logramos, sin modificar los bobinados reales del motor, presentar diferentes impedancias a la red alcanzando las corrientes necesarias tanto para el arranque como para mantener el motor en marcha a la máxima potencia.



Las configuraciones de estrella (Y) y triángulo (Δ).

Las ecuaciones de Kennelly permiten resolver configuraciones que no son series o paralelos de resistencias.



Los motores trifásicos presentan en su arranque corrientes bastante altas, esto se debe a que es necesario vencer la inercia.



CONEXIÓN DE CAPACITORES

En esta sección conoceremos cómo se comportan los capacitores y cómo obtener, partiendo de combinaciones series y paralelos, un valor de capacidad determinado.

Básicamente, el **capacitor** es un dispositivo conformado por dos placas conductoras separadas por un material aislante (dieléctrico). Tiene la capacidad de almacenar energía al aplicársele una diferencia de potencial en sus extremos.

La capacidad, en faradios, la podemos calcular como el cociente de la carga acumulada, en coulombs, y la diferencia de potencial, en volts, aplicada entre las placas del capacitor. Esto nos dice que un capacitor de 1 faradio, al que se aplica una diferencia de potencial de 1 volt, almacena una carga de 1 coulomb. Para calcular la capacidad C de un capacitor, se aplica la siguiente fórmula:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

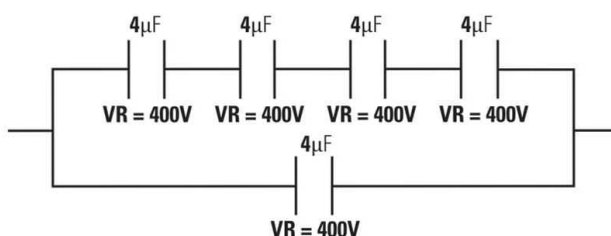
En donde:

- ♦ ϵ_0 es la permitividad del vacío que vale $8,854187817 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$; este valor es único y universal.

Tensión de ruptura

Cuando se realiza un arreglo de capacitores en serie, en paralelo, o combinando series y paralelos, es importante tener en cuenta la capacidad de ruptura de los capacitores en volts. Todos los capacitores utilizados en el arreglo deben tener una capacidad de ruptura en volts iguales entre sí y superiores a la tensión máxima que se aplicará al arreglo. La imagen nos muestra que, para el capacitor de $5 \mu\text{F}$ obtenido antes, si lo conectamos entre 2 fases aplicándole una tensión de 380 V, los capacitores deben tener una tensión de ruptura de al menos 400 V.

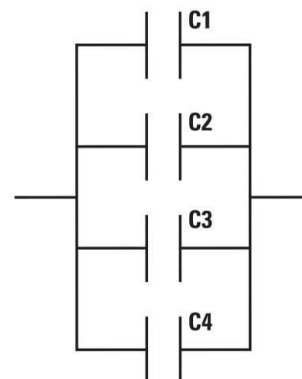
Capacitor de $5 \mu\text{F}$ - Tensión aplicada 380 V



Capacitores en serie



Capacitores en paralelo



Arreglos de capacitores en serie y de capacitores en paralelo.

- ♦ ϵ_r es la permitividad relativa del material dieléctrico instalado entre las placas y, por lo tanto, depende de cada material que se utilice en la fabricación del capacitor.
- ♦ A es el área de las placas.
- ♦ d es la distancia entre las placas (espesor del dieléctrico).

Con lo cual, conociendo las dimensiones del capacitor y el tipo de material dieléctrico, podemos calcular el valor de su capacidad. Conociendo la capacidad y la tensión aplicada, podemos calcular la carga acumulada.

Esto tiene diferentes aplicaciones. En electrónica, se lo utiliza como filtro en las fuentes de alimentación de tensión continua a fin de eliminar oscilaciones (*ripple*); también se lo puede usar en circuitos sintonizados (detectores de señal) y aplicaciones industriales.

Para calcular su impedancia, se debe tener en cuenta la frecuencia de la línea por la cual es alimentado.

$$X_C = 1 / j\omega C$$

Si queremos calcular la capacidad total de un arreglo de capacitores en serie, procedemos, tal como lo hicimos con las resistencias:

$$X_{CT} = 1 / j\omega C_T$$

$$X_{CT} = X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + X_{C4}$$

Reemplazando y operando nos queda:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}$$

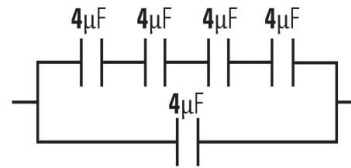
En forma análoga, la capacidad total del arreglo de los capacitores en paralelo la podemos calcular como:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

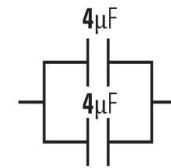
De esta forma, de acuerdo al valor de capacidad que se quiera obtener, se pueden hacer arreglos de capacitores combinando sectores en serie y sectores en paralelo para arribar al valor de capacidad requerido.

Por ejemplo, si en nuestro taller tenemos únicamente capacitores de 4 μF y necesitamos construir un capacitor de 5 μF , se procede como se indica a continuación: se ponen 4 capacitores en serie y, a este conjunto, se le agrega uno en paralelo; si necesitamos uno de 2 μF , instalando

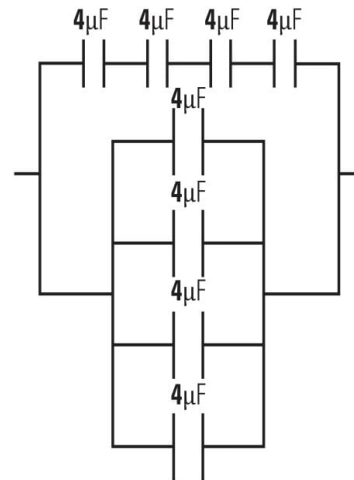
A: Capacitor de 5 μF



B: Capacitor de 2 μF



C: Capacitor de 17 μF



Diferentes combinaciones de capacitores para obtener otros de distinto valor según la necesidad.

2 capacitores en serie, y, si necesitamos uno de 17 μF , lo que deberemos hacer es poner 4 capacitores en paralelo y 4 capacitores en serie, luego conectamos en paralelo ambos conjuntos.

POTENCIA ELÉCTRICA

Analizaremos, a continuación, la potencia eléctrica, cómo se la calcula y sus diferentes tipos (activa o útil, reactiva y total).

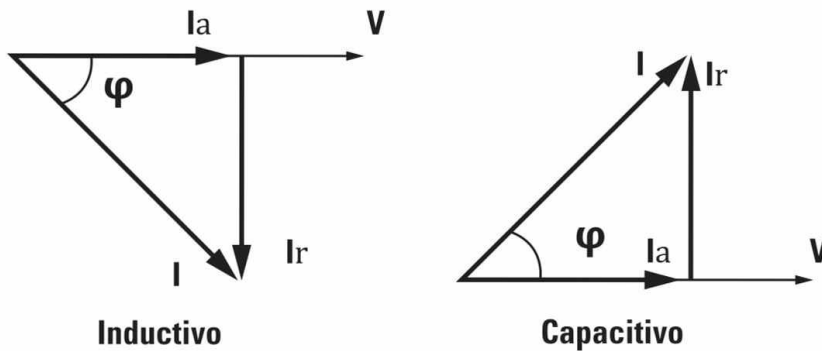
Muchas veces, en lugar de hablar de tensiones, corrientes o resistencias, es más cómodo hablar de potencia. Las distribuidoras de electricidad emiten sus facturas por **potencia consumida**. Pero ¿qué es potencia eléctrica? Básicamente, es la energía entregada por unidad de tiempo, y se la mide en **watts** (W). ¿Cómo la calculamos? En corriente continua:

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

En corriente alterna, tendremos que considerar los ángulos de fase de cada instalación.

En el presente análisis, consideraremos solo las potencias desarrolladas con corrientes continuas.

En este caso, las potencias desarrolladas serán únicamente sobre resistencias; podremos considerar a las bobinas como resistencias de bajo valor (por la resistencia del alambre de cobre con la que se han construido) y a los capacitores como la alta resistencia de pérdida de los dieléctricos.



Hemos graficado la corriente total y sus componentes activo y reactivo para casos inductivos y capacitivos.

En ambos casos, estas potencias son despreciables frente a las potencias disipadas en los elementos resistivos. Pensemos en un circuito formado por un capacitor en paralelo con un inductor que se halla en serie con una resistencia. Si queremos pensar en valores acordes con un filtro LC (formado por capacitor e inductor), en el que la resistencia es la carga donde se disipará la potencia, tendremos aproximadamente un capacitor de 2200 μF y un inductor de 100 mH, la resistencia (carga del circuito) estará en

el orden de 1 K Ω . La resistencia del alambre con el que está construido el inductor es de algunas décimas de Ω , y la resistencia de aislación del capacitor es del orden de varios M Ω .

Si analizamos la serie RL (resistencia y bobina), tenemos 1000 Ω + 0,1 Ω , lo que es prácticamente igual a 1 K Ω .

Si analizamos luego el paralelo del capacitor con la serie RL, se tiene 1 M Ω en paralelo con 1 K Ω , lo que es prácticamente igual a 1 K Ω .

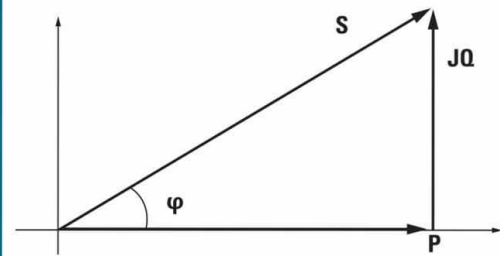
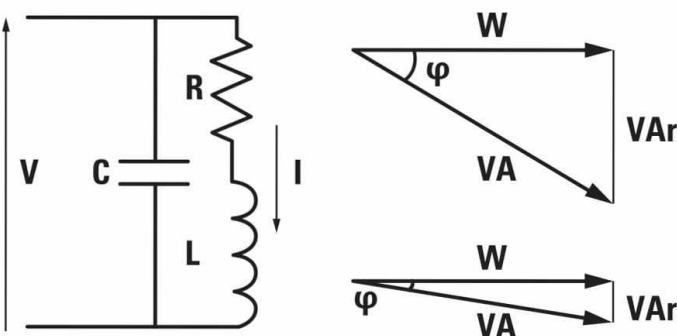
Por lo cual, en continua, se pueden despreciar los capacitores e inductores, y tendremos que toda la potencia se disipa únicamente en los elementos resistivos.

Por lo tanto, si necesitamos resolver la potencia disipada en un circuito cualquiera, únicamente debemos calcular su RET por medio de las resoluciones planteadas (leyes de Kirchhoff y conversión estrella-triángulo) para aplicar luego la fórmula de la potencia que nos dice que:

$$P = I^2 \times R_{ET} = \frac{V^2}{R_{ET}}$$

Factor de potencia

Es la relación entre la potencia real (P) y la potencia aparente (S). Se lo denomina $\cos\phi$. Las distribuidoras cobran por potencia real entregada, pero sus redes deben dimensionarse para la potencia aparente, por lo cual, a fin de lograr máxima eficiencia, multan el consumo de altos valores de potencia reactiva ($\cos\phi < 0,85$). Para reducir el valor del ángulo ϕ se deben agregar capacitores a la instalación en paralelo a las cargas, tal como se muestra en la imagen.



Representación gráfica de la potencia aparente y de sus componentes real y reactivo.

CIRCUITOS RESISTIVOS EN PALALELO

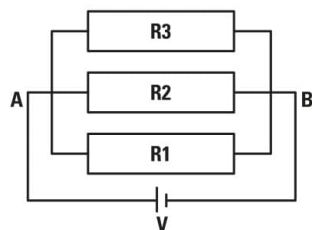
En esta ocasión analizaremos los circuitos de resistencias en paralelo y conoceremos algunos ejercicios prácticos donde calcularemos las resistencias totales.

En los circuitos en paralelo se producen varios nodos en donde la corriente se divide a distintas ramas, por lo que nos encontraremos con diferentes valores de corriente en las partes del circuito, a diferencia de los circuitos en serie. Sin embargo, la caída de tensión a través de todas las resistencias en una red resistiva es la misma.

Así podemos definir un circuito resistivo en paralelo como uno en donde las resistencias se conectan a los mismos dos puntos (o nodos), y se identifica por el hecho de que tiene más de un camino de corriente conectado a una fuente de tensión común. En el circuito de ejemplo, la tensión en la resistencia R1 es igual a la tensión en la resistencia R2, igual a la tensión en la resistencia R3, y así sucesivamente en las N resistencias que posea el circuito. Por lo tanto, para cualquier circuito resistivo en paralelo tendremos:

$$V_{R1} = V_{R2} = V_{R3} = V_{AB} = 5V$$

Ejemplo de circuito en paralelo con tres resistencias y una batería.

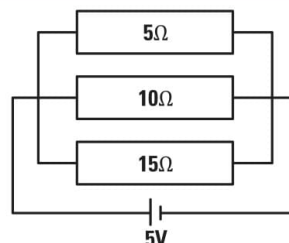


También se puede dar el caso en el que se posean dos o más resistencias en una de las ramas del paralelo. En esta situación, la caída de potencial entre los nodos sigue siendo la misma V_{AB} . Este caso se puede analizar como si esa rama fuese un circuito en serie con una batería de tensión V_{AB} donde circulara una única corriente y la caída de tensión total fuera igual a la suma de caída de tensiones de cada resistencia. Para el cálculo del circuito primero, debemos determinar la resistencia total del circuito. El método es un poco más complicado que en los circuitos serie, ya que el de la suma de todas las resistencias no es válido para este caso. La expresión general es la siguiente:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

Como podemos ver, lo que calculamos en este caso es la inversa de la resistencia total, por lo deberemos hacer la inversa del resultado para obtener el valor final. Para comprenderlo mejor resolveremos el **Ejercicio número 1**.

Ejercicio Número 1: circuitos en paralelo.



$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{5\Omega} + \frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{15\Omega}$$

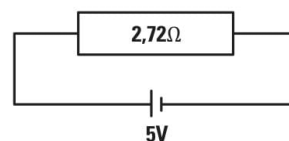
$$\frac{1}{R_T} = 0,3667\Omega \Rightarrow R_T = \frac{1}{0,3667\Omega}$$

$$R_T = 2,72\Omega$$

Al calcular la resistencia total, podemos representar el circuito en una forma equivalente y, de esta manera, calculamos la corriente que entrega la batería:

$$I_T = \frac{5V}{2,72\Omega} = 1,83A$$

Vemos un circuito paralelo equivalente con una resistencia, en el Ejercicio Número 1.



También podemos determinar la corriente que circula por cada rama. Debemos recordar que la suma de la corriente



de cada rama debe dar la corriente total calculada y que la tensión en cada rama es igual a 5V para nuestro caso:

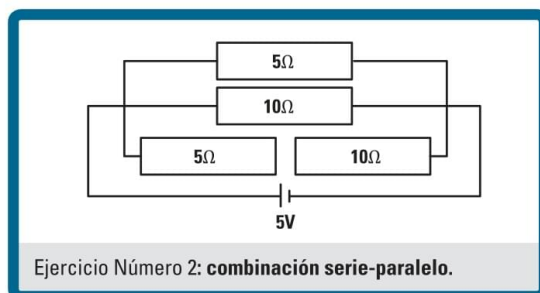
$$I_1 = \frac{5V}{5\Omega} = 1A$$

$$I_2 = \frac{5V}{10\Omega} = 0,5A$$

$$I_3 = \frac{5V}{15\Omega} = 0,33A$$

De esta manera, podemos comprobar que la corriente total es la suma de las tres parciales. Para el caso de que tengamos dos resistencias en una rama, el procedimiento es casi el mismo.

En este caso, la tercera rama posee el mismo valor resistivo, pero dividido en dos resistencias.



Como están en serie dentro de la rama, se las suma directamente, y el valor resultante es de 15 Ω. La corriente que circulará seguirá siendo la misma, pero la caída de tensión sobre cada resistencia es distinta.

Ley de Joule para el calentamiento

Cuando una corriente eléctrica circula por un elemento resistivo, este se calienta por el efecto de la corriente. Esto se debe a la interacción de los electrones que producen la corriente eléctrica con el material por donde circula. La colisión constante de los electrones y los iones atómicos del material producen calor por fricción. Este efecto es muy importante en los cálculos eléctricos, ya que es el fenómeno que explica el calentamiento de los cables, transformadores y demás equipamiento eléctrico. Una temperatura excesiva puede quemar los equipos y los cables. La fórmula para calcular el calentamiento es: $P=I^2 \cdot R$, donde el resultado es la potencia en watts del calor producido.

En el ejemplo anterior, ya habíamos determinado el valor de I_3 , entonces podemos resolver:

$$V_3 = I_3 \cdot R_3$$

$$V_3 = 0,33A \cdot 5\Omega = 1,65V$$

$$V_4 = 0,33A \cdot 10\Omega = 3,33V$$

Además, de esta manera, podemos verificar que la suma de las dos caídas de tensión sigue siendo 5 V, la pequeña diferencia se debe a errores de redondeo.

TEOREMA DE SUPERPOSICIÓN

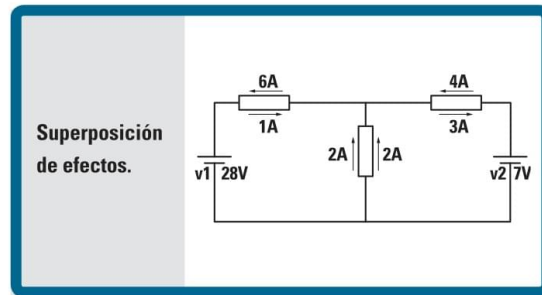
La corriente total en cualquier parte de un circuito eléctrico lineal es igual a la suma de las corrientes producidas por cada fuente por separado.

El teorema de superposición es un método utilizado para la resolución de circuitos complejos que poseen más de una fuente de alimentación. El teorema de superposición es válido para componentes que posean un comportamiento lineal, o sea que respetan la ley de Ohm. Estos elementos son: resistencias, capacitores, e inductancias con núcleo en aires. Los elementos semiconductores, como diodos y transistores, son ejemplos de componentes no lineales.

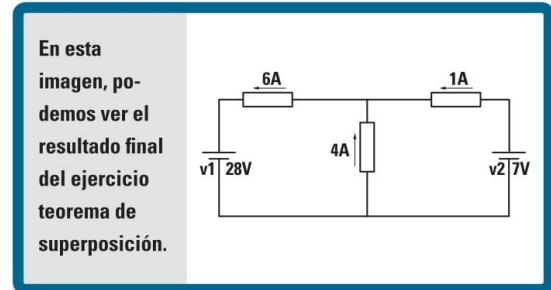
El teorema de superposición establece que, en un circuito lineal con varias fuentes, la corriente y la tensión para cualquier elemento en el circuito es la suma de las corrientes y tensiones producidas por cada fuente actuando independientemente. Para calcular la contribución de cada fuente de forma independiente, todas las otras fuentes deben ser eliminadas y reemplazadas sin afectar el resultado final. Para eliminar una fuente de tensión, la tensión debe ajustarse a cero, que es equivalente a la sustitución de la fuente de tensión

$$I_{R2} = \frac{4V}{2\Omega} = 2A$$

Hasta ahora, calculamos las tensiones y corrientes de cada fuente por separado; a continuación, debemos superponerlas para calcular las finales.



De esta manera, calculamos las corrientes finales y podemos determinar las caídas de tensiones. Cuando las corrientes nos quedan con distinto sentido, se deben restar, y el sentido de circulación es el de la corriente de mayor valor.



MÉTODOS DE ANÁLISIS

Aplicaremos los métodos de nodos y mallas para lograr la resolución de cualquier circuito, para ello encontraremos las corrientes y tensiones que corresponden a los nodos y las mallas.

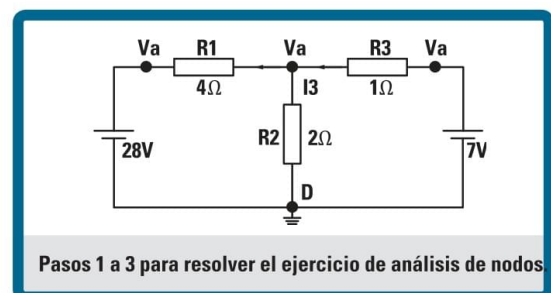
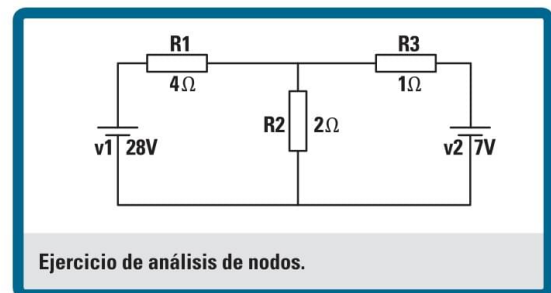
Análisis de nodos

El método de los nodos nos permite resolver cualquier circuito de una manera metódica y mecánica, basándonos en encontrar las tensiones en todos los nodos del circuito. El método de los nodos consiste en identificar cada nodo del circuito, determinar la tensión con respecto a un nodo de referencia y escribir la ley de Kirchhoff para las corrientes. La ley de Kirchhoff indica que la sumatoria de las corrientes entrantes y salientes en un nodo debe ser cero. Con el análisis de nodos, obtendremos un conjunto de ecuaciones cuya cantidad es $n-1$ nodos. El despeje de estas ecuaciones puede ser resultado en forma matricial a través de los métodos de álgebra lineal, dependiendo de la dificultad de estas. El procedimiento general para su aplicación es el siguiente:

- ♦ Identificar claramente todos los parámetros del circuito y distinguir los parámetros desconocidos de los conocidos.
- ♦ Identificar todos los nodos del circuito.
- ♦ Seleccionar un nodo como el nodo de referencia, también llamado tierra, y asignarle un potencial de 0 volts. Cualquier otra tensión en el circuito se mide con respecto a la del nodo de referencia.
- ♦ Identificar las tensiones en todos los demás nodos.
- ♦ Asignar e identificar las polaridades.
- ♦ Aplicar la ley de Kirchhoff en cada nodo y expresar las corrientes de las ramas en función de las tensiones de los nodos.

- ♦ Resolver las ecuaciones resultantes para los voltajes de los nodos.

Para resolver el mismo circuito que vimos en el teorema de superposición, podemos realizar los pasos 1 a 3 de manera simultánea.





De esta manera, identificamos 3 nodos y los nombramos como Va, Vb y Vc. El nodo D es el nodo de referencia al que le asignamos un voltaje igual a 0 y se identifica con el símbolo de tierra.

El sentido asignado a las corrientes es, en principio, arbitrario; una vez resueltas las incógnitas, si la corriente calculada es negativa, significa que el sentido es contrario al elegido. Las polaridades son definidas por el sentido de corriente elegido. Para realizar esto, debemos imaginar cómo recorre la corriente el circuito; cuando esta entra a un elemento, ese lado tendrá un signo positivo y, del lado saliente, negativo. Primero planteamos las corrientes según la ley de Kirchhoff:

$$I_3 = I_1 + I_2$$

Como vemos en el circuito, las corrientes I_2 e I_3 entran al nodo, y la corriente I_1 sale. De esta manera podemos crear una convención donde las corrientes entrantes a un nodo son positivas, y las salientes, negativas. De esta forma podemos plantear las ecuaciones:

$$\frac{Vb}{R_2} = \left(\frac{Va - Vb}{R_1} \right) + \left(\frac{Vc - Vb}{R_3} \right)$$

Cada término de esta expresión representa a cada una de las 3 corrientes planteadas. En este punto, la única incógnita es Vb, la tensión en el nodo Va es la batería de 28 V, y la tensión del nodo Vc es la batería de 7 V, ya que son el único elemento entre el nodo en el que estamos calculando la referencia de tierra. Entonces podemos reemplazar:

$$\begin{aligned} \frac{Vb}{2\Omega} &= \left(\frac{28V - Vb}{4\Omega} \right) + \left(\frac{7V - Vb}{1\Omega} \right) \\ \frac{Vb}{2\Omega} &= 7A - \frac{Vb}{4\Omega} + 7A - \frac{Vb}{1\Omega} \\ Vb \left(\frac{1}{2} \Omega + \frac{1}{4} \Omega + 1\Omega \right) &= 14A \end{aligned}$$

Resultados

Como podemos observar, se llegó a los mismos resultados que con el método de superposición, la corriente I_2 resultó con un signo negativo. De esta forma, llegamos al mismo resultado, de una manera un poco más simple y rápida.

Al obtener la tensión en el nodo Vb, podemos despejar las corrientes:

$$\begin{aligned} I_3 &= \frac{Vb}{R_2} = \frac{8V}{2\Omega} = 4A \\ I_1 &= \left(\frac{Va - Vb}{R_1} \right) = \left(\frac{28V - 8V}{4\Omega} \right) = 5A \\ I_2 &= \left(\frac{Vc - Vb}{R_3} \right) = \left(\frac{7V - 8}{1\Omega} \right) = -1A \end{aligned}$$

Análisis de mallas

El método de las mallas es un método análogo al de nodos, pero los resultados que obtenemos son las corrientes y, después, podemos calcular las tensiones.

Este sistema puede llevar a resolver ecuaciones un poco más largas, pero la aplicación es mucho más sencilla y metódica. En este método debemos identificar mallas en lugar de nodos y escribiremos una ecuación por cada malla, por lo que cuantas más mallas posea el circuito tendremos más ecuaciones; por lo tanto, necesitaremos álgebra de matrices para la resolución y, en lo posible, algún software matemático para resolverlas de manera más simple y rápida. Al igual que en el método de los nodos, este método se basa en las leyes de Kirchhoff para la aplicación y resolución. Los pasos básicos por seguir son los que detallamos a continuación.

RedUSERS
COMUNIDAD DE TECNOLOGIA

Noticias a diario.



Determinar una malla

01 Asignar una corriente de malla a cada malla. Aunque la dirección es arbitraria, se aconseja utilizar la dirección de las agujas del reloj.

02 Aplicar la ley de voltaje de Kirchhoff alrededor de cada malla, en la misma dirección que las corrientes de malla. Si una resistencia tiene dos o más corrientes de malla a través de ella, la corriente total a través de la resistencia se calcula como la suma algebraica de las corrientes de malla. En otras palabras, si una corriente que fluye a través de la resistencia tiene la misma dirección que la corriente de malla del bucle, tiene un signo positivo; de lo contrario, un signo negativo en la suma. Las fuentes de voltaje se toman en cuenta como de costumbre: si su dirección es la misma que la corriente de malla, se toma su tensión como positiva; si es contraria, es negativa.

03 Resolver las ecuaciones de lazo resultantes para las corrientes de malla.

04 Determinar cualquier corriente o tensión requerida en el circuito utilizando las corrientes de malla.

Volveremos a resolver el circuito que ya conocemos para ejemplificar el procedimiento. Hasta aquí, ya identificamos las corrientes y las mallas. En este método, la corriente se debe identificar como la circulación por un camino cerrado formando una espira; esto es la malla del circuito. Las ecuaciones de ambas mallas resultan de la siguiente forma:

Malla 1: $28V = I_1(R_1 + R_2) - I_2R_2$

Malla 2: $-7V = -I_1R_2 + I_2(R_2 + R_3)$

Las ecuaciones de las mallas se realizan con el sentido de circulación elegido para las corrientes. Como se puede apreciar para la malla, la caída de tensión en R_2 es negativa ya que la corriente I_2 circula en sentido contrario a I_1 . Para la malla 2, la caída de tensión en R_2 también es negativa ya que I_1 circula en sentido contrario.

También la tensión de la fuente de 7 V la establecemos como negativa, ya que I_2 está entrando por el borne positivo de la fuente.

En las dos expresiones planteadas, las incógnitas son las 2 corrientes; para resolver el sistema, debemos despejar una corriente de una ecuación y reemplazarla en la otra. En nuestro caso despejaremos I_1 de la primera ecuación y la reemplazaremos en la segunda:

$$I_1(R_1 + R_2) = 28V + I_2R_2$$

$$I_1 = \frac{28V + I_2R_2}{R_1 + R_2}$$

$$-7V = -\left(\frac{28V + I_2R_2}{R_1 + R_2}\right)R_2 + I_2R_3$$

$$-7V = -28\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{I_2R_2^2}{R_1 + R_2} + I_2(R_2 + R_3)$$

$$-7V + 28\frac{R_2}{R_1 + R_2} = I_2\left(-\frac{R_2^2}{R_1 + R_2} + (R_2 + R_3)\right)$$

$$-7V + 28\frac{2\Omega}{4\Omega + 2\Omega} = I_2\left(-\frac{2\Omega^2}{4\Omega + 2\Omega} + 1\Omega + 2\Omega\right)$$

$$2,333V = -I_2 \cdot 2,333\Omega$$

$$I_2 = -1A$$

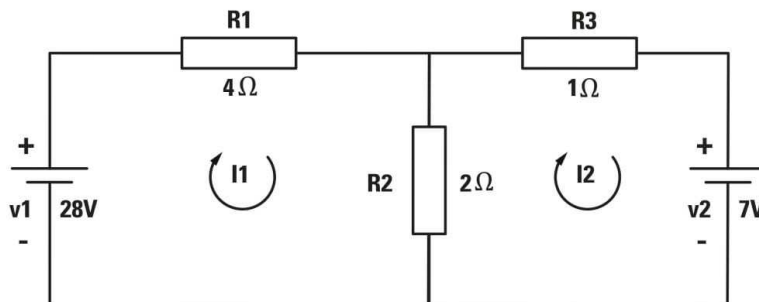
Y luego reemplazamos este resultado en la ecuación de la primera malla:

$$I_1 = \frac{28V + 1A \cdot 2\Omega}{6\Omega}$$

$$I_1 = 5A$$

Y de esta manera llegamos al mismo resultado; si bien la resolución es un poco más compleja, el planteo de las primeras ecuaciones es mucho más simple y, en circuitos con mayor cantidad de elementos, puede ser una mejor opción.

En esta imagen vemos un ejercicio de análisis de mallas.



EN ESTA CLASE VEREMOS...

3

El fenómeno de la atracción o repulsión entre dos materiales, los efectos que son ejercidos por un campo magnético y, también, los materiales magnéticos.

En la clase anterior conocimos la caída de potencial y describimos las características de los nodos, ramas y mallas dentro de un circuito eléctrico. Analizamos las leyes de Kirchhoff y las aplicamos en la conexión de resistencias en serie, la conexión de resistencias en paralelo y también la conexión de capacitores. Además, pudimos conocer el teorema de superposición y realizamos un análisis de nodos y mallas.

En la presente clase veremos en profundidad el fenómeno del magnetismo, analizaremos las características de los imanes y explicaremos la existencia de los polos magnéticos.

Repasaremos los principios de la ley fundamental del magnetismo, la teoría de Weber y también las leyes de Gauss y Ampère. Conoceremos la intensidad y el comportamiento de los campos magnéticos y veremos en detalle aquellos que son creados por corrientes eléctricas y la fuerza sobre cables paralelos con circulación de corriente.

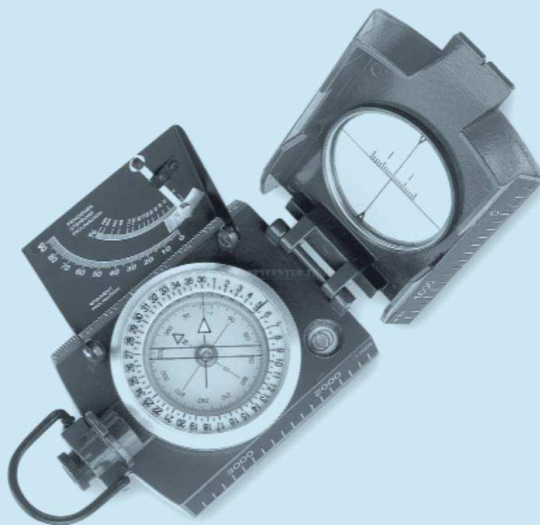
Para terminar, analizaremos el concepto de permeabilidad, la curva de primera magnetización y también la clasificación de los materiales de acuerdo a su comportamiento frente a líneas de campo magnético.

Sumario

050 Magnetismo y campo magnético
Características de la atracción o repulsión entre materiales.

058 Efectos de los campos magnéticos
Análisis de los efectos ejercidos por los campos magnéticos, leyes de Gauss y Ampère.

068 Materiales magnéticos y circuitos
Propiedades magnéticas de materiales conocidos.





MAGNETISMO Y CAMPO MAGNÉTICO

El magnetismo es el fenómeno que posee una fuerza de atracción o repulsión entre dos materiales, a través de un campo magnético conformado por líneas de inducción.

El magnetismo es un fenómeno por el que los objetos ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales. La electricidad y el magnetismo están relacionados pues cada electrón es, por su naturaleza, un pequeño imán, innumerables electrones de un material están orientados aleatoriamente en diferentes direcciones, pero en un imán casi todos los electrones tienden a orientarse en la misma dirección, creando así una fuerza magnética dependiendo del número de electrones que estén orientados. La **fuerza de atracción o repulsión** se produce cuando se aproxima un imán a un material con un alto contenido de hierro (por ejemplo, limadura de hierro).

Este fenómeno puede darse de manera natural, cuando hay un mineral que tiene condiciones magnéticas, o de manera artificial, cuando una carga eléctrica circula por un conductor y genera un campo magnético de características similares al producido por un imán natural.

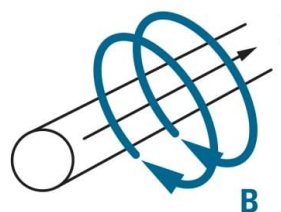
Los **imanes naturales** están compuestos por minerales de hierro, denominados **ferromagnéticos**, y los **imanes artificiales** están constituidos por una sustancia como el hierro, el cobalto o el níquel, que pueden transformarse acercándoles un imán o haciéndoles circular una corriente eléctrica.

Magnetismo

Cuando acercamos dos materiales (**imán y limadura de hierro**), se genera entre ellos un campo magnético conformado por líneas de inducción magnética invisibles; aunque, con un pequeño experimento, podemos ver el fenómeno físico. Para entender el principio de funcionamiento de un imán, de-

Ver un campo magnético

Se colocan limaduras de hierro sobre una superficie, luego se coloca un imán; este, naturalmente, tendrá un polo norte y un polo sur. Una vez apoyado, veremos cómo se empiezan a ordenar las limaduras de hierro en el sentido de las líneas de inducción magnéticas y podremos observar el campo magnético. Notaremos que, en la zona cercana a los polos, la intensidad es mayor, y, a medida que nos alejamos, esta disminuye.



El campo magnético B generado por el pasaje de una intensidad de corriente a través de un conductor eléctrico siempre será perpendicular a este.

bemos pensar en su conformación molecular, considerando que los electrones son pequeños imanes y en su estructura, a diferencia de otros materiales, sus electrones se encuentran orientados predominantemente hacia una misma dirección, lo que da como resultado un campo magnético. Por lo tanto, un material ferromagnético genera un campo magnético a partir de su conformación. Este ordenamiento será predominante hacia el norte o hacia el sur; entonces, habrá atracción magnética cuando los polos sean opuestos, y habrá una fuerza de repulsión cuando los polos sean iguales. Como la corriente eléctrica también genera un campo magnético, el campo que se genera cuando circulan electrones a lo largo de un conductor será perpendicular a dicho conductor y con ondas concéntricas. En este caso, el sentido de avance de la corriente eléctrica será la que determine el sentido del campo magnético, y generará la atracción o la repulsión. Lo interesante del magnetismo y la electricidad es que tienen una relación biunívoca ya que, a partir de una, se puede generar la otra. En presencia de un campo magnético y una espira de material conductor que corte las líneas de flujo, obtendremos una tensión inducida en dicho conductor, y eso no es más que el principio con el que se inventaron los motores eléctricos y los generadores de energía eléctrica.

Imanes

Un **imán** es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro (también puede atraer el cobalto y el níquel).

En un imán, la capacidad de atracción es mayor en sus extremos o polos. Estos polos se denominan **norte** y **sur**, debido a que tienden a orientarse según los polos geográficos.



En un imán no puede existir un solo polo. Siempre estarán presentes el polo norte y el sur, tanto es así que, si un imán se quiebra, cada parte forma otro imán por separado.

de la Tierra, que es un gigantesco imán natural.

Como sabemos, existen dos tipos de imanes: naturales y artificiales; y de acuerdo a su estado de carga magnética podemos clasificarlos en: imanes permanentes o temporales. Los primeros serán minerales de hierro, y su magnetismo puede explicarse por su génesis, pues están compuestos por pequeños dipolos (N-S). En el caso de los que tienen fuertes propiedades magnéticas, la sumatoria de estos pequeños dipolos se encuentra orientada mayoritariamente en un sentido, generando un dipolo único, y de ello resulta un mineral magnético. Estos mantienen su campo magnético continuo a menos que sufran un golpe de gran magnitud o se expongan a altas temperaturas, lo que cambiaría su ordenamiento interno, y podrían llegar a perder intensidad de campo. También tenemos las sustancias que pueden ser magnetizadas en forma artificial, ya que sus estructuras moleculares tienen la capacidad de reorientar los dipolos por frotación, acercando un imán, o haciendo circular una corriente eléctrica. Los compuestos más usados son los siguientes:

- ♦ Neodimio-hierro-boro
- ♦ Samario-cobalto
- ♦ Alnico
- ♦ Cerámica o ferrita

Los dos primeros son fuertes y difíciles de desmagnetizar. Se desarrollaron sobre todo entre 1970 y 1980. Los de alnico se popularizaron en la década del 40, son muy potentes y se desmagnetan con facilidad. Los últimos son los más populares desde 1960, ya que resultan bastante fuertes y difíciles de desmagnetizar.

Un cuerpo no puede ser magnetizado de manera infinita, existe una cantidad que limita este efecto y se llama **saturación**. El magnetismo se pierde con el tiempo; esta disminución es muy lenta, aunque en la actualidad algunos imanes artificiales tienen características retentivas muy grandes, por lo que la pérdida de magnetismo es muy reducida.

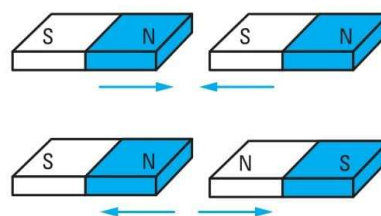
Los imanes pueden perder sus propiedades magnéticas llegando a la llamada **temperatura de Curie** que es diferente para cada composición. También se produce la desmagnetización por contacto; cada vez que algún material se pega a un imán, este pierde parte de sus propiedades. Los golpes fuertes pueden descolocar las partículas haciendo que el imán pierda su potencia.



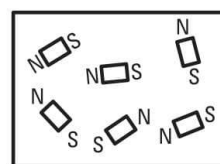
Magnetita (o piedra imán). Es un mineral de hierro con altas propiedades magnéticas, conocidas y descritas por los griegos 800 años a. de C.

Ordenamiento interno de un material

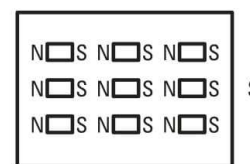
Las sustancias que se encuentran en la naturaleza pueden tener propiedades magnéticas o no. Algunas de estas sustancias tienen la capacidad de modificarse al reordenar su estructura interna y convertirse en sustancias magnéticas. Ese ordenamiento se logra acercando un imán o haciendo circular una corriente eléctrica a través de ellas.



La fuerza de atracción se da entre polos distintos: norte-sur, y la fuerza de repulsión se da entre polos iguales: norte-norte, sur-sur.



No imán



Imán

Dipolos magnéticos

Los imanes serán permanentes si su estructura permanece modificada luego del ordenamiento y serán temporales si dicho ordenamiento se pierde una vez retirado el campo magnético.



Polos magnéticos

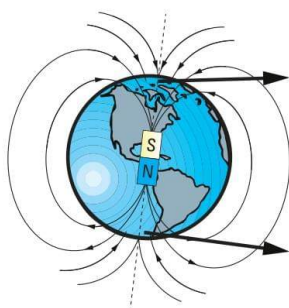
Los **polos magnéticos** son conocidos como el conjunto de puntos del planeta Tierra en donde están las zonas polares (Polo Norte y Polo Sur); allí, debido a la interacción con el campo magnético existente, se ejerce una atracción sobre los elementos sensibles al campo magnético. Un ejemplo de esto es la brújula, que cuenta con una aguja imantada que apunta al polo sur magnético (que equivale al norte geográfico).

Debemos tener en cuenta que los polos magnéticos no coinciden con los **polos geográficos**, sino que presentan un desplazamiento con respecto al eje geográfico de la Tierra. Este desplazamiento genera un ángulo entre el eje terrestre y el eje magnético denominado por la letra del alfabeto griego Delta, y este ángulo de desplazamiento se llama **ángulo de declinación**.

La brújula con su aguja apunta hacia el polo norte geográfico que equivale al polo sur magnético.

A su vez, una aguja magnetizada suspendida en su centro de gravedad no se puede mantener en forma horizontal, ya que el extremo que indica el norte se inclina hacia el suelo en el hemisferio septentrional y lo mismo sucede para el extremo que señala al sur en el hemisferio meridional. Esta inclinación que se produce con respecto a una línea horizontal imaginaria lleva el nombre de **inclinación magnética**. Este valor dependerá del lugar de la Tierra en que nos encontremos, al igual que en el caso de la declinación.

Este fenómeno terrestre se debe a los materiales con los que está compuesto el núcleo de la Tierra, que consisten en el ní-



Polo Norte Geográfico
Polo Sur Magnético

Polo Sur Geográfico
Polo Norte Magnético

Esquema de las líneas de fuerza que atraviesan la Tierra, y la ubicación de los polos geográficos y magnéticos.



Imagen de una brújula típica que se utiliza en supervivencia o, incluso, en algunos barcos.

quel y el hierro. Estos compuestos hacen que nuestro planeta funcione como un enorme imán, y de esta manera se puede ver claramente por qué funciona así la brújula.

El campo magnético que existe en la Tierra se caracteriza por su intensidad, y esta intensidad de campo se mide en gauss. Se dice así debido a que el campo que tiene el planeta en el que vivimos es bastante débil; para darnos idea, en las proximidades del ecuador es de 0,3 gauss y en las regiones extremas, o sea, las regiones polares, tiene una intensidad de 0,7 gauss.

El alineamiento formado de norte-sur de las líneas magnéticas con respecto al eje de rotación terrestre indica que el campo, a grandes rasgos, constituye un dipolo. Recordemos que resulta inclinado unos 110 grados respecto al eje de rotación terrestre.

Las líneas de campo o de fuerza

Estas líneas de fuerza que mencionamos antes son aquellas que forman una curva donde la tangente de dichas líneas proporciona la dirección del campo en ese punto. Estas líneas no son discretas como se podría pensar a simple vista (ver figura de líneas de campo en la siguiente página), ya que en el experimento que se realiza con las limaduras de hierro sobre una hoja de papel se forman líneas. La razón por la que sucede esto reside en que las líneas formadas por las limaduras solo pueden tener la anchura de una partícula de hierro, y, en cuanto se genera una línea, esta repele a las otras. En consecuencia, el número de líneas de campo que se pueden ver y la proximidad de estas depende del tamaño de las partículas de hierro.

Las líneas de campo convergen donde la fuerza del campo magnético es mayor y se alejan donde es más débil. Esto quiere decir que las líneas de campo se separan a partir de un polo y se vuelven a juntar en el otro polo. Este comportamiento es similar al del campo magnético terrestre.

Las líneas de campo fueron introducidas por **Michael Faraday** (1791-1867), quien les dio ese nombre. En esa época se pensaba que estas tenían aplicación meramente para visualizar los campos magnéticos. Se les empezó a dar impor-



Las líneas de campo convergen donde la fuerza del campo magnético es mayor y se alejan entre sí donde es más débil.

tancia con el estudio de las partículas elementales, ya que estas líneas son fundamentales para la forma en que se desplazan los electrones y los iones. Estas partículas cargadas eléctricamente tienden a permanecer unidas a las líneas de fuerza donde se colocan, girando en forma de espiral a su alrededor mientras se desplazan por ellas.

Flujo magnético

El **flujo magnético** es una medida de cantidad de magnetismo y se calcula a partir del campo magnético, la superficie sobre la cual actúa y el ángulo de incidencia formado por las líneas de campo y los diferentes elementos que están incluidos en dicha superficie; es proporcional al número de líneas de campo que atraviesa un área. La unidad de flujo magnético en el sistema internacional de unidades es el **weber**.

Leyes fundamentales del magnetismo

Como sabemos, cada imán, ya sea pequeño o grande, posee exactamente dos polos bien definidos. En estos polos es donde la fuerza magnética resulta más potente. Estos polos se llaman **polo norte** y **polo sur**.

Gracias a los experimentos que realizó Gilbert, se puede comprobar que los polos iguales se repelen y los polos distintos se atraen. Esta atracción o repulsión en particular de dos imanes depende de la fuerza de los campos magnéticos. O sea que, cuanto mayor sea la distancia que separa los imanes, mayor será la debilidad de la fuerza magnética resultante; y cuanto menor sea esta distancia, mayor será la fuerza magnética de atracción o repulsión. Otra característica fundamental que poseen los imanes es que, si se rompen, cada fragmento que conformaba el imán inicial se convertirá en un imán más pequeño.

Las leyes fundamentales del magnetismo son las que mencionamos a continuación:

- ♦ Los polos de igual signo se repelen.
- ♦ Los polos de distinto signo se atraen.

En esta imagen se pueden apreciar las líneas de campo y, a su vez, las zonas de mayor o menor intensidad de campo.

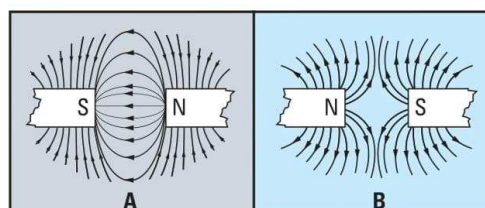
Norte y sur

La ubicación del norte y sur en los imanes se puede realizar de varias maneras: 1. Atar el imán (preferentemente del tipo varilla) en el centro y dejarlo colgando, con el tiempo el polo norte del imán girará hasta el polo norte geográfico. 2. Acercarlo a una brújula o a otro imán, cuyos polos fueron previamente identificados. 3. Fabricar un electroimán enrollando un cable y una batería, y luego acercar el imán; podremos verificar que un polo será atraído, y el otro, repelido.

- ♦ La fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos es directamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa las cargas magnéticas.

Por estos motivos, la mayoría de los equipos utiliza imanes en forma de herradura debido a que los polos están más cercanos entre sí, por lo que generan un campo mucho más intenso que el que daría una barra del mismo material.

A su vez, no se conoce ningún material aislante que impida el paso de las líneas magnéticas, ya que se ha comprobado que las líneas de flujo pasan a través de todos los materiales, aunque hay algunos que hacen más fácil este pasaje de líneas a través de él.



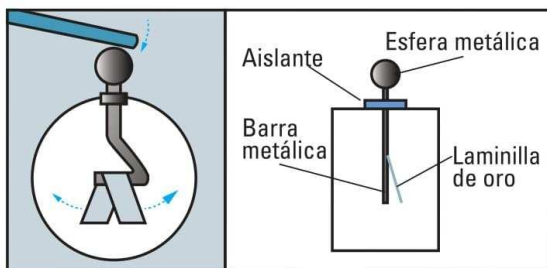
En esta imagen se puede apreciar, en la parte A, cómo quedan las líneas de fuerza entre dos imanes que se atraen y, en la parte B, las líneas de fuerza de dos imanes que se repulsan.



La atracción o repulsión de dos imanes depende de la fuerza de los campos magnéticos.

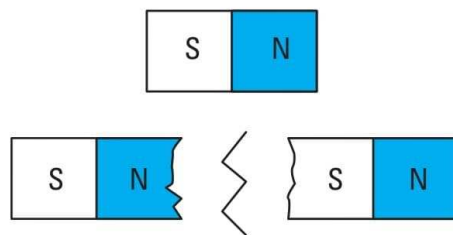
Ruptura de los imanes

No existen materiales o imanes que posean monopolos magnéticos. La ley de Gauss, que es una de las leyes fundamentales del electromagnetismo, nos describe que el flujo magnético que atraviesa una superficie cerrada siempre es cero, en otras palabras, hay tanto flujo hacia afuera como hacia adentro. Esto nos indica, con fines prácticos, que las líneas de fuerza son cerradas, por lo que van de un polo a otro. Por eso, al generarse una ruptura en el material (imán), debido a la ley de Gauss estas partes generadas poseerán dos polos magnéticos.



En esta ilustración se puede apreciar el electroscopio fabricado por Gilbert.

La ley de Gauss, que es una de las leyes fundamentales del electromagnetismo, nos describe que el flujo magnético que atraviesa una superficie cerrada siempre es cero.



En esta imagen se puede ver una ejemplificación de lo que pasa cuando un imán se parte al medio y, de esta manera, se forman dos imanes.

Otra forma que hay de interpretar esta ley de Gauss es afirmando que las líneas de campo no se generan en polos aislados.

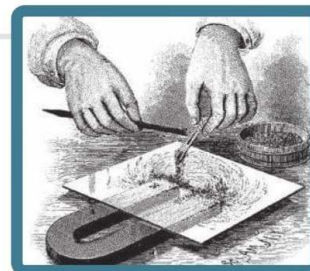
Teoría de Weber

Esta teoría es una de las más populares del magnetismo e, incluso, algunos la consideran como fundamental. Esto se debe a que esta teoría afirma que todas las sustancias magnéticas se basan en pequeños imanes moleculares. De acuerdo a lo anterior, se deduce que cualquier material no magnetizado o que no está o no fue expuesto a un campo magnético tiene las fuerzas magnéticas de cada uno de esos pseudoimanes microscópicos neutralizadas debido a los imanes moleculares adyacentes, con lo cual de esta manera se anula cualquier tipo de efecto magnético. A diferencia de esto, un material magnetizado tendrá la mayoría de los imanes moleculares alineados de tal manera que el polo norte de cada microimán apuntará hacia una dirección, en tanto que el polo sur de estas moléculas apuntará hacia el lado contrario. En conclusión, un material con todas sus moléculas alineadas (magnetizado) presentará un polo norte y un polo sur físicos.

Gracias a los aportes de Weber, se ha podido determinar junto con otros especialistas años después que el **magnetismo** es el resultado del movimiento de los electrones en los átomos de las sustancias. Este fenómeno, según la teoría clásica de la polaridad magnética de los átomos se basa principalmente en el **spin de los electrones** (dirección en

Brújula magnética de Gilbert

William Gilbert experimentó con un imán esférico y una aguja que se mueve libremente. De esta manera, se enteró de que es posible crear imanes a partir de materiales comunes; observó que las fuerzas magnéticas producen movimientos circulares y los relacionó con el movimiento de rotación de la Tierra. Esto condujo al descubrimiento del propio magnetismo de nuestro planeta y allanó el camino hacia la ciencia del geomagnetismo.



Aquí se puede ver un experimento realizado por W. Gilbert con brújulas.



la que gira el electrón) y depende solo en parte de sus movimientos orbitales, que se producen alrededor del núcleo. A su vez, los campos magnéticos que se generan en todas las partículas tienen que estar causados por las cargas en movimiento. Como habíamos dicho antes, cada sustancia posee microimanes, y estos a su vez están agrupados en regiones magnéticas microscópicas. Estas regiones se llaman **dominios**. En ellos se especula que todos los átomos que contienen están polarizados magnéticamente, y estos mismos dominios, en sustancias que no están magnetizadas, se orientan en direcciones al azar.

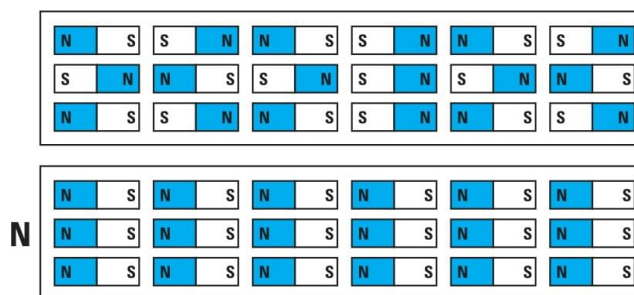
Para identificar esto, se utiliza un punto para indicar que una flecha está dirigida hacia afuera del plano, y una cruz para indicar la dirección hacia adentro del plano, tal como vemos en la imagen que muestra la distribución de los dominios.

El magnetismo es el resultado del movimiento de los electrones en los átomos de las sustancias. La polaridad magnética de los átomos se basa principalmente en el spin de los electrones.

El proceso por el cual se pasa un imán por una barra de hierro para transformarlo en otro imán se llama **inducción magnética**. El magnetismo inducido puede ser solo temporal y, cuando se deja de inducir el campo magnético, estos dominios vuelven gradualmente a su posición de reposo, pero en algunos casos, si estos permanecen alineados en cierto grado luego de exponerlo al campo magnético, se dice que el material está permanentemente magnetizado.

Definición de campo magnético

Al no ser tangible, un **campo magnético** solo puede llegar a visualizarse mediante un modelo. Por esta razón, se dice que el campo magnético es una descripción matemática de la influencia magnética de la corriente eléctrica y de los materiales magnéticos que ya fueron comentados antes. Este modelo matemático está definido en cada punto por

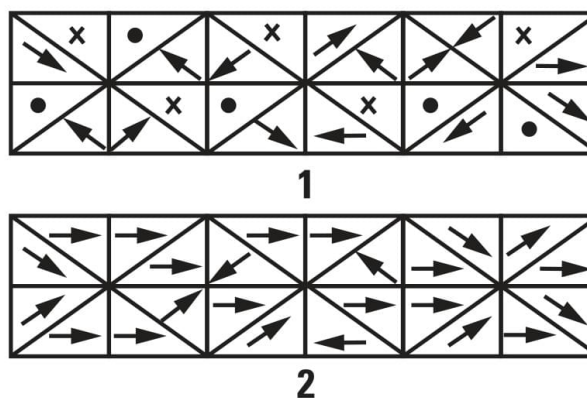


En esta imagen se puede ver la diferencia de la posición de los microimanes en un material no magnetizado, de uno magnetizado donde se forman un polo norte y un polo sur físicos.

dos valores que son: la dirección y el sentido. Estos dos parámetros forman el campo vectorial, por lo que nos permite manipular al campo magnético como un vector. Consideremos que también es comúnmente definido en términos de lo que se conoce como la **fuerza de Lorentz**, que es ejercida en cargas eléctricas.

El nombre de campo magnético se aplica a dos magnitudes que detallaremos a continuación. Estas son las siguientes: la excitación magnética o el campo H y la inducción magnética o el campo B .

Desde el punto de vista físico, ambos términos son equivalentes en el vacío, y solo se diferencian por una constante de proporcionalidad llamada **permeabilidad magnética**, cuyo símbolo está representado por μ_0 . Esta constante en sistema SI equivale a $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$. Pero, en medios materiales distintos, esta constante se ve modificada debido al fenómeno de la magnetización. En conclusión $B = \mu H$. Para caracterizar H y B , se ha recurrido a diferenciarlas, por lo que H describe cuán intenso es el campo magnético en la región que está afectada por el campo magnético, mientras que



Distribución de los dominios. Aquí vemos un material antes y después de magnetizar; en la figura 1 se ve cómo los dominios tienen una distribución aleatoria, en tanto que, en la figura 2, están alineados hacia un mismo lado.

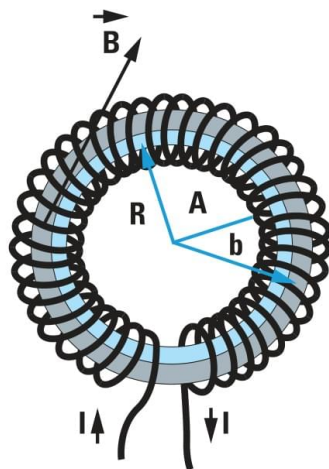
B es la cantidad de flujo magnético por unidad de superficie o área que interviene en esa región expuesta al campo magnético. Otra distinción que se puede hacer sobre estos dos parámetros es que el campo H se refiere al campo en función de sus fuentes (las corrientes eléctricas), en tanto que el campo B se refiere en función de sus efectos (fuerzas sobre la carga). Mucho tiempo se consideró como campo principal al campo H, pero, luego de las llegadas de las teorías del electrón de Lorentz y de la relatividad de Einstein, se pudieron realizar ciertos experimentos para dilucidar cuál de estos campos era el principal. Se llegó a la conclusión que el campo principal era el campo B a diferencia de lo que se creía tradicionalmente.

El campo magnético es una descripción matemática de la influencia magnética de la corriente eléctrica y de los materiales magnéticos.

Fuerza de Lorentz

Esta fuerza es el efecto generado por una corriente eléctrica o un imán sobre una región del espacio en la que existe una carga puntual cuyo valor está representado por q y que se desplaza a una velocidad V . Esta fuerza es perpendicular y proporcional tanto a la velocidad como al campo B, por lo que dicha fuerza quedará descrita matemáticamente por la siguiente ecuación $F = qV \times B$, donde F será la fuerza magnética, V es la velocidad, y B, el campo magnético; tanto V, como F o incluso B son magnitudes vectoriales, por lo que el producto vectorial dará como resultado un vector que esté perpendicular tanto a V como a B.

En esta figura se pueden apreciar las relaciones entre los vectores perpendiculares, como la fuerza magnética, la velocidad y el campo B.



Intensidad del campo magnético

La **intensidad del campo magnético**, comúnmente llamada **inducción magnética**, se presenta con la letra B como ya hemos visto y, a su vez, es un vector tal que, en cada punto, coincide en dirección y sentido con los de la línea de fuerza magnética. La intensidad de campo magnético se podrá cuantificar midiendo la cantidad de líneas de inducción magnética que atraviesan una determinada superficie. El número de líneas de inducción magnética que atraviesan una superficie es el weber, y las superficies se miden en metros cuadrados y da como resultado que la unidad de la intensidad de campo sea Wb/m^2 . Su equivalencia en el Sistema Internacional (SI) es el tesla.

Cuando estos campos magnéticos pasan a través de materiales magnéticos, estos contribuyen con sus propios campos magnéticos internos, y surgen dificultades para determinar qué parte del campo proviene por las corrientes externas y qué parte corresponde al material.

Por eso se define otro parámetro de cantidad de campo magnético llamado **intensidad de campo magnético** y se identifica por la letra H. Su relación es la siguiente:

$$H = B/\mu_0 = B/\mu_0 - M$$

El término M tiene las mismas unidades que la intensidad de campo H que es amper/metro. De esta manera, la relación del campo B se puede escribir de forma equivalente como

$$B = \mu_0(H + M)$$

Es muy común confundir el campo B con el campo H, por lo que, a veces, en muchos libros de referencia se denomina al campo B como densidad de flujo magnético o inducción magnética, al campo H como intensidad de campo magnético, y al término M se lo denomina como magnetización del material.

La regla de la mano derecha

Comúnmente llamada la **regla del tirabuzón** o el **sacacorchos**, no es más que una regla nemotécnica para poder orientarse y orientar en el espacio un producto vectorial o, incluso, un sentido de giro (por eso lleva estos nombres). Se emplea con objetivos para direcciones y movimientos vectoriales, y para movimientos y direcciones rotacionales. Se utiliza por ejemplo para indicar el sentido y la dirección de la corriente en un conductor y el sentido del campo magnético. Para esto se procede de la siguiente manera: se estira la mano con el dedo pulgar hacia arriba y los restantes dedos cerrando el puño; el dedo pulgar indicará el sentido y la dirección de la corriente eléctrica, y el resto de los dedos nos indicará el sentido del campo magnético.

Otra variación de la regla de la mano derecha nos permite obtener la dirección y el sentido de la fuerza aplicada sobre una carga en movimiento dentro de un campo magnético.

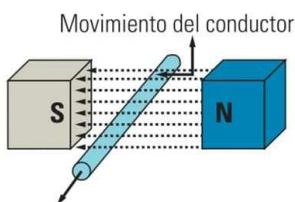


La intensidad del campo magnético se podrá cuantificar midiendo la cantidad de líneas de inducción magnética que atraviesan una determinada superficie.

Dicha fuerza se regirá por la ley de Lorentz, que mencionamos y detallamos antes como la fuerza de Lorentz, que no es más que un producto vectorial $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, donde q es la carga de la partícula, v es su velocidad, y b es el campo magnético. Como bien dijimos, al ser un producto vectorial, podemos concluir que F será perpendicular al plano que forma el vector q y el vector v .

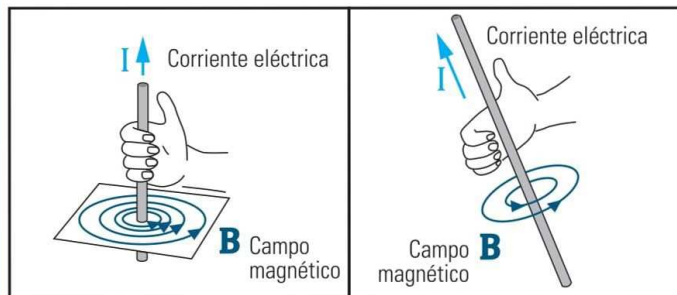
Para determinar el sentido de la fuerza de Lorentz, utilizaremos lo que denominamos la **variante 2** de la regla práctica de la mano derecha. Por lo que el dedo índice indicará, como se ve en la figura a la derecha, la dirección de la corriente (v); el dedo medio, el segundo término correspondiente al campo B , y el dedo pulgar, la dirección y el sentido de la fuerza magnética. En el caso de la figura, tendrá un sentido hacia arriba. Hay que tener en cuenta que este caso de la regla de la mano derecha indica el sentido de la carga positiva, en tanto que, si la carga es negativa, el sentido de la fuerza (F) es el inverso, por lo que el pulgar apuntará hacia abajo.

También, la regla práctica de la mano derecha se utiliza para calcular la fem (fuerza electromotriz) inducida por el campo magnético y el movimiento del conductor. En esta aplicación, el pulgar se utiliza para representar el movimiento del conductor, el dedo índice representa la dirección del campo magnético, y, por último, el dedo del medio para representar la dirección de la fem.



Movimiento del conductor
Movimiento del conductor
Campo magnético
Dirección de la f.e.m inducida

En esta imagen se puede ver cómo es la disposición de los dedos para calcular la fem inducida por un campo magnético.



En esta ilustración se puede ver claramente un ejemplo de utilización de la regla de la mano derecha aplicada a un conductor eléctrico.

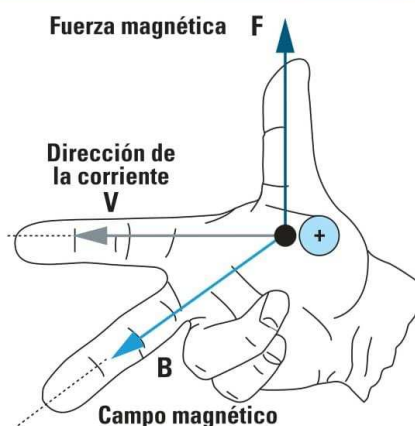
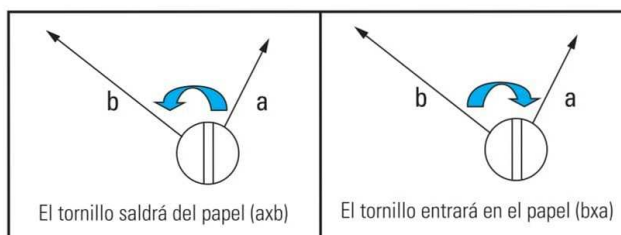


Ilustración de la variante 2 de la regla práctica de la mano derecha para hallar la dirección y el sentido de la fuerza de Lorentz.

La regla del tornillo

La regla del tornillo es una alternativa a la regla de la mano derecha. Nos ayuda a realizar el cálculo del producto vectorial ya que, si poseemos dos vectores definidos con su dirección y sentido respectivos, gracias a esta regla podremos hallar rápidamente el sentido y la dirección del vector resultante. Si nos desplazamos del vector a al b , tendremos un vector saliente a la hoja, si nos desplazamos desde b hasta a , será entrante al papel.



En esta imagen se puede apreciar la descripción gráfica de la regla práctica del tornillo sobre productos vectoriales.



EFFECTOS DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS

Los campos magnéticos ejercen ciertos efectos que conoceremos y analizaremos en estas páginas; además veremos en detalle la ley de Gauss y la ley de Ampère.

Si tenemos un conductor atravesado por una corriente eléctrica, diremos que sus cargas poseen un movimiento continuo y, si lo sometemos a un campo magnético, estas cargas sufrirán el efecto de las fuerzas magnéticas en su interior. Teniendo esto en cuenta, conoceremos la fuerza ejercida sobre espiras de corriente.

Fuerza sobre espiras de corriente

Podemos darnos cuenta de que, en la figura que muestra el **Ejemplo 1**, tenemos un conductor sumergido en el campo magnético de un imán, el conductor está representado con la línea A B, y veremos que, si no hay corriente, no tendremos ninguna acción ejercida por el campo magnético sobre el conductor.

En el segundo ejemplo, colocaremos una batería al conductor para que circule corriente por él, y veremos que el conductor sufrirá un movimiento hacia arriba, provocado por el campo magnético.

Teniendo en cuenta que utilizamos una batería, en el circuito tenemos una polaridad y, por ende, una corriente circulando en un sentido.

Si invertimos esta polaridad, tendremos la corriente circulando en sentido inverso y, como resultado, veremos que el conductor experimentará un movimiento en sentido contrario (para abajo).

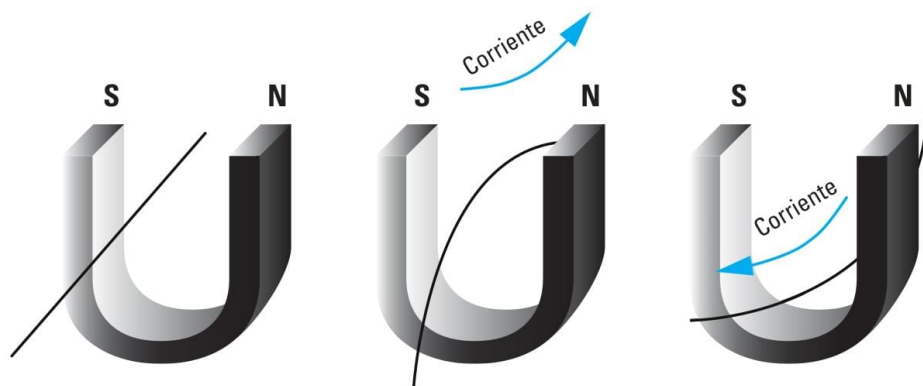
Utilizando las conclusiones anteriormente vistas, tomaremos esta espira rectangular y la sumergiremos en las fuerzas magnéticas de un imán.

A nuestra espira, le conectaremos una batería para generar una circulación de corriente eléctrica (para esto utilizaremos un conector móvil formado por escobillas que nos permitan conectar nuestra espira dejándola libre de movimientos).

Podemos ver que el lado AB de la espira (recorrido por la corriente de B hacia A) queda bajo la acción de una fuerza magnética F dirigida hacia arriba.

Vemos también que, sobre el lado CD, actúa una fuerza magnética F dirigida hacia abajo. Es fácil percibir, entonces, que esas dos fuerzas harán girar la espira en el sentido mostrado en la imagen **Ejemplo 2**.

Como detalle, vemos que el anillo donde se apoyan las escobillas está formado en realidad por arcos separados, que al girar junto a la espira cambian de escobilla, manteniendo las fuerzas en el mismo sentido del gráfico y, así, completan el giro de la espira. De esta forma, lograremos un movimiento continuo mientras esté conectada la batería.



Ejemplo 1.
Un conductor recorrido por una corriente I , sumergido en un campo magnético producido por un imán, sufrirá la acción de la fuerza magnética, perpendicular al alambre.

Un campo magnético se genera debido a cargas eléctricas en movimiento, y ese campo actúa solamente sobre otras cargas, ejerciendo fuerzas sobre ellas, si dichas cargas también están en movimiento.

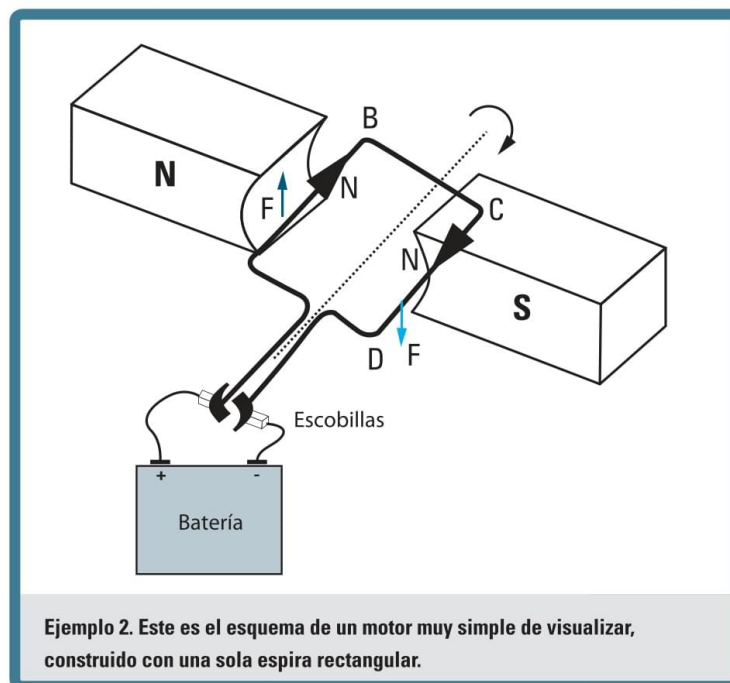
Campos magnéticos creados por corrientes eléctricas

El magnetismo es un fenómeno físico que despierta mucha admiración y curiosidad, quizás por el hecho de que se trata de una fuerza invisible.

Durante siglos, los fenómenos magnéticos intrigaron a la humanidad, pero en la actualidad sabemos muy bien su origen. Estos son producidos por un campo magnético que surge cuando existe carga en movimiento en una corriente eléctrica. De esta forma, el magnetismo se observa siempre que partículas cargadas eléctricamente están en movimiento, por ejemplo, el movimiento de electrones en una corriente eléctrica o en el caso del movimiento orbital de los electrones alrededor del núcleo atómico.

El campo magnético es producido por una corriente eléctrica; cuando la corriente eléctrica se encuentra fluyendo, se produce un campo magnético, pero cuando esta deja de fluir, desaparece el campo.

Hoy sabemos que, cuando las cargas eléctricas circulan a través de un cable, crean a su alrededor un campo magnético cuyas líneas son circunferencias concéntricas al cable. Como hemos visto, al pasar la corriente eléctrica por un cable se crea un campo magnético. Si ahora el hilo por el que pasa la corriente se enrolla en forma de hélice (recordemos



que cada una de las vueltas de alambre se denomina **espira**), se forma un solenoide, llamado también, **bobina**.

Al circular la corriente por este solenoide o bobina, el campo producido por las distintas espiras se sumará para crear un campo siguiendo el eje del solenoide, o sea, de las espirales de cable, dando como resultado una fuerza paralela al eje.

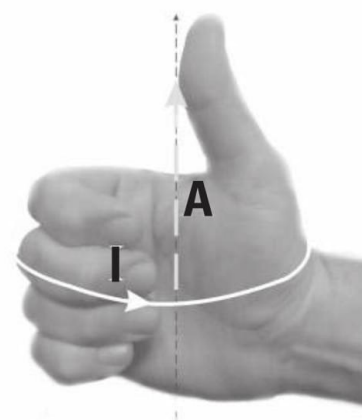
Si introducimos dentro de la bobina una barra de hierro utilizada como núcleo, la fuerza magnética de la bobina se transmitirá a través de ella, transformándola en un imán mientras esté pasando la corriente eléctrica. Cuando se interrumpe la corriente, desaparece la imantación, aunque el núcleo permanezca levemente imantado, ya que las partículas de ferrita que lo componen quedarán orientadas en el sentido de un imán: norte/sur. Si prolongamos el efecto de la corriente sobre el hierro, este fenómeno de memoria se verá incrementado.

Sentido de las fuerzas magnéticas

Para conocer el sentido de la fuerza que producen las espiras al ser atravesadas por una corriente eléctrica, utilizaremos la **regla de la mano derecha**.

Notaremos en la imagen que se trata de un concepto simple de comprender.

El **vector A** nos indica el sentido de la fuerza del campo magnético y está en línea con el dedo pulgar, y los dedos restantes indican el sentido de giro de la corriente eléctrica. Así que, si la corriente gira en un sentido, la fuerza va para arriba (valor positivo); si la corriente gira en sentido contrario, giraremos la mano y veremos que la fuerza se ejerce hacia abajo (valor negativo).

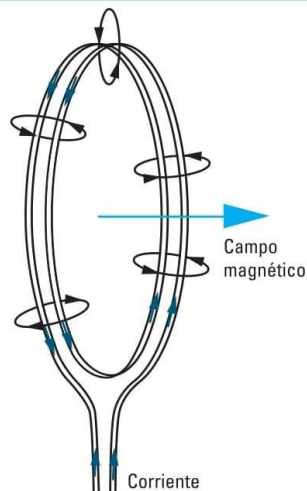


Esta regla es una forma simple de comprender el sentido de las fuerzas. No está de más recordar que esta regla se relaciona solo con la mano derecha.

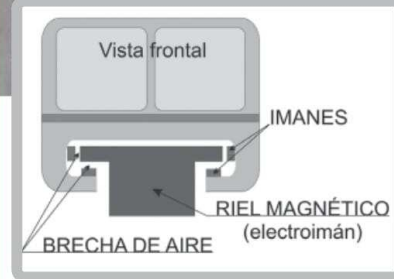
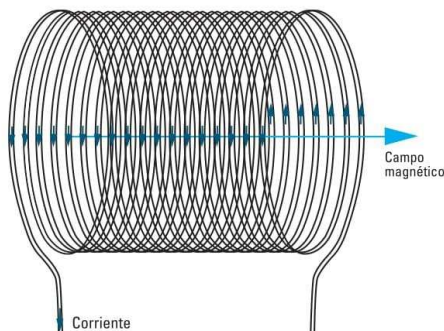
El electroimán se comporta igual que un imán, con la diferencia de que su intensidad puede controlarse cambiando la intensidad de la corriente que circula o el número de espiras de la bobina.

Pero lo importante es ver que, cuando hacemos circular la corriente, tenemos un imán, que llamaremos **electroimán**. El electroimán se comporta igual que un imán, con la diferencia de que su intensidad puede controlarse cambiando la intensidad de la corriente que circula o el número de espiras de la bobina. Además, cuando se des-

Vemos que el campo magnético se representa en forma de círculos concéntricos al cable.



Como vemos, el campo producido por las distintas espiras se suma, produciendo una fuerza magnética en el sentido del eje de la bobina.



Vemos que entre el riel, que es un electroimán, y los imanes colocados en el vehículo queda una brecha de aire, que lo libera del rozamiento.

conecta la batería y con ello se corta la corriente, desaparece el magnetismo.

La fórmula para obtener el campo magnético en un conductor es la siguiente:

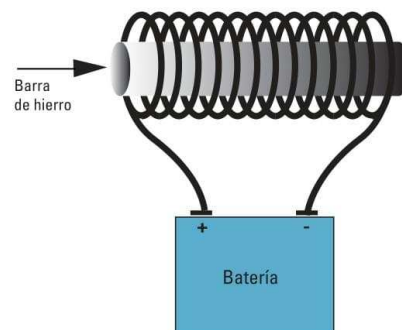
$$B = \mu I / (2 \pi D)$$

Donde:

- ♦ **B** es el campo magnético.
- ♦ **μ** es la permeabilidad del aire.
- ♦ **I** es la corriente que circula por el cable.
- ♦ **π** es 3,1416.
- ♦ **D** es la distancia desde el cable.

Si tenemos varios cables o espiras juntas donde N es la cantidad de espiras, el campo magnético resultaría:

$$B = N \mu I / (2 \pi D)$$



Ahora, la fuerza magnética de la bobina se transmitirá a través del núcleo de hierro.



Fabricar un electroimán

Necesitaremos una pequeña batería de 9 voltios, 1 metro de cable de 0,50 mm², cinta adhesiva, y un clavo o un tornillo grande y largo. Primero pelamos el cable unos 2 o 3 centímetros, quitando el aislamiento de PVC en los extremos y, luego, lo enrollamos alrededor del tornillo o del clavo, sujetamos los dos extremos con cinta adhesiva para que no se desenrolle. Luego, conectamos los extremos del cable a la batería, y ya está. El tornillo actuará como un imán atrayendo cualquier objeto metálico.

El clavo se convertirá en un imán cuando le conectemos la batería, y podremos interactuar con cualquier objeto metálico que contenga partículas de hierro.



Fuerza sobre cables paralelos con circulación de corriente

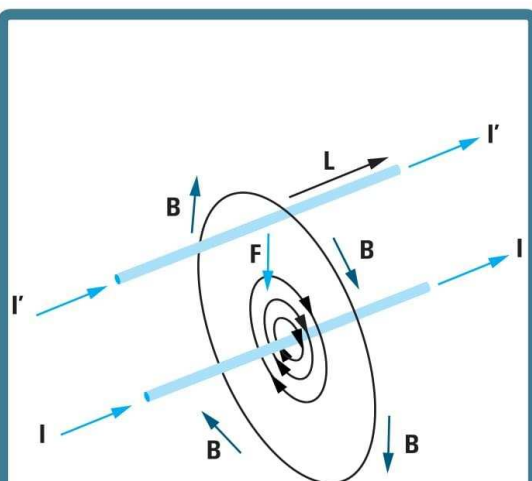
Vimos que las corrientes eléctricas al circular por un conductor generan fuerzas magnéticas, y que ellas dependen de la corriente que hacemos circular y de las características del conductor. De modo que dos corrientes eléctricas suficientemente próximas experimentarán entre sí fuerzas magnéticas de una forma parecida a lo que sucede con dos imanes.

Así tendremos que la fuerza de un conductor interactuará con la fuerza del otro, provocando un efecto entre ambos conductores.

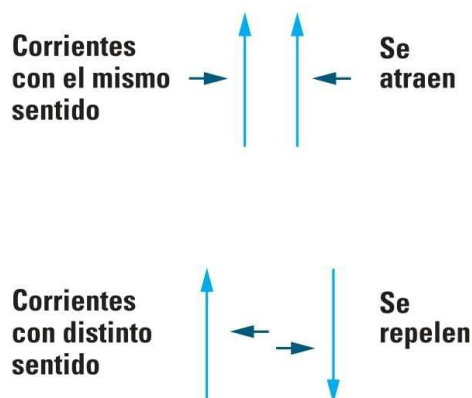
La experimentación con conductores dispuestos en paralelo y que mantienen una distancia próxima de separación pone de manifiesto que estos se atraen cuando las corrientes respectivas tienen el mismo sentido, y se repelen cuando sus sentidos de circulación son opuestos.

Además, esta fuerza magnética entre corrientes paralelas es directamente proporcional a la longitud del conductor L y al producto de las intensidades de corriente, e inversamente proporcional a la distancia D que las separa, dependiendo además de la permeabilidad del aire.

Si las corrientes tienen el mismo sentido, los conductores se atraen; en cambio, si las corrientes tienen distinto sentido, los conductores se repelen.



Tenemos dos segmentos paralelos de largo L , que conducen a las corrientes I (conductor 1) e I' (conductor 2).



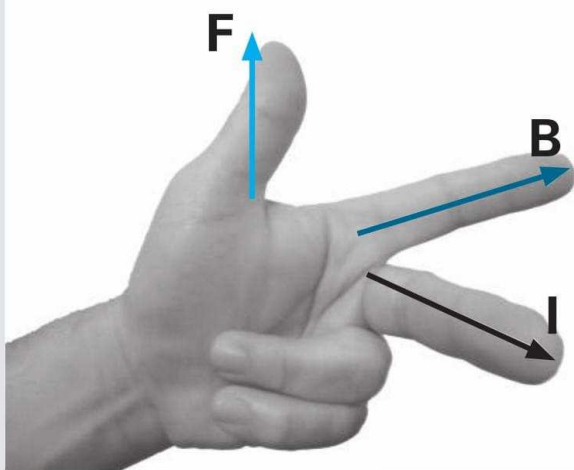
Vemos cómo se comportan dos conductores en paralelo según el sentido de las corrientes que los circulan.



Ley de la mano izquierda

Es la que determina hacia dónde se mueve un conductor o en qué sentido se genera la fuerza dentro de él. En un conductor que está dentro de un campo magnético y por el cual se hace circular una corriente, se crea una fuerza cuyo sentido dependerá de cómo interactúen ambas cosas (corriente y campo magnético). Se colocan perpendicularmente entre sí los tres primeros dedos de la mano izquierda, de modo que el índice señale el sentido del campo magnético, el medio indique el sentido de la corriente y el pulgar señale el sentido del movimiento del conductor o la desviación que experimentan las cargas.

Vimos con anterioridad la ley de la mano derecha, como en aquel caso, cabe resaltar que en este será siempre la mano izquierda, es muy importante no confundirse.



Ley de Gauss

La **ley de Gauss** es esencialmente una ecuación matemática que relaciona el campo eléctrico sobre una superficie con la carga eléctrica del interior de la superficie, es decir, nos permite estudiar el comportamiento de un campo eléctrico producido por cargas puntuales.

Gracias a ella, podemos calcular de forma simple el campo eléctrico debido a una distribución simétrica de cargas. Si tenemos identificadas dos cargas determinadas y podemos aislarlas aplicando la ley de Gauss, es posible determinar y calcular el campo eléctrico producido debido a ellas.

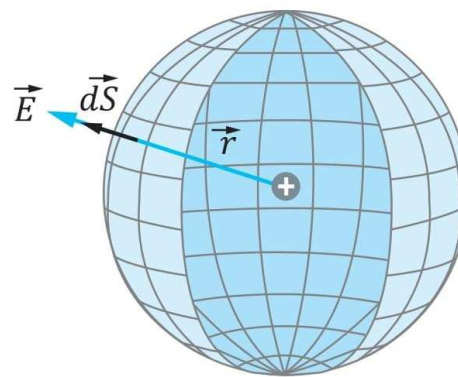
Se considera una ley básica del electromagnetismo en general y es parte de las ecuaciones de Maxwell que estudiaremos más adelante.

La ley de Gauss puede interpretarse cualitativamente de forma simple usando el concepto de **líneas de campo**. Si imaginamos que, a partir de una carga parte un infinito número de líneas cuyo origen es la misma carga, podemos decir que esta posee una infinita carga. En otras palabras, las líneas de campo que parten de la carga serán proporcionales a ella: mayor carga, mayor número de líneas de campo.

Si bien el número de líneas de campo es proporcional a la carga contenida en una superficie cerrada imaginaria (denominada **superficie Gaussiana**), estas deben ser independientes de la superficie.

El número de líneas de campo que atraviesan una superficie cerrada es directamente proporcional a la carga dentro de la superficie.

Para analizar el campo eléctrico que fluye a través de la superficie del cuerpo cargado, debemos analizar el flujo de campo de manera diferencial (en una porción infinitesimalmente pequeña de la superficie) y de manera integral (sumando todas las partes diferenciales de la superficie, es decir, integrar todos los diferenciales campos).

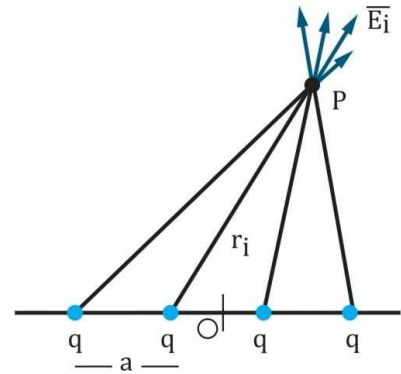


El campo eléctrico tiene dirección radial, su módulo es constante en todos los puntos de una superficie esférica.

Campo eléctrico por dos o más cargas

Si colocamos dos cargas y medimos el campo eléctrico en un punto determinado a una distancia fija de estas, obtendremos una medida de su magnitud. Si a su vez sumamos más cargas y volvemos a medir el campo eléctrico, evidenciaremos el incremento del campo; esto es debido a la contribución de cada uno. Si utilizamos una carga de prueba, cargada positiva o negativamente, el campo ejercerá una fuerza de atracción o repulsión resultante mayor o menor según la cantidad de campos involucrados.

Sobre una carga de prueba, el campo resultante será producto de la influencia de las cargas generadoras de campo.



Campo diferencial

El flujo eléctrico $d\Phi$ (diferencial flujo de campo) a través de una superficie elemental (diferencial área) se define como el producto escalar del vector campo $\mathbf{E}$ en dicho punto por:

$$d\phi = \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$$

lo tanto, el flujo eléctrico a través de una superficie arbitraria S es igual a la integral de superficie del campo $\mathbf{E}$ sobre la superficie del cuerpo cargado. Si la superficie es cerrada, la integral de superficie se suele designar como:

$$\phi = \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$$

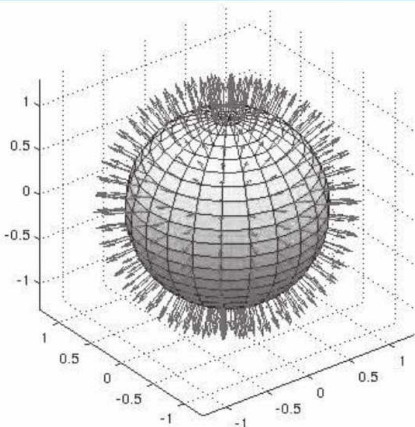
Campo integral

El flujo total a través de una superficie total S se calcula sumando las porciones infinitesimales de flujo de campo, es decir, tomamos el flujo del campo en pequeños elementos de superficie ΔA . Si $\mathbf{E}$ se puede suponer uniforme, se suma el flujo a través de cada uno de estos elementos de superficie.

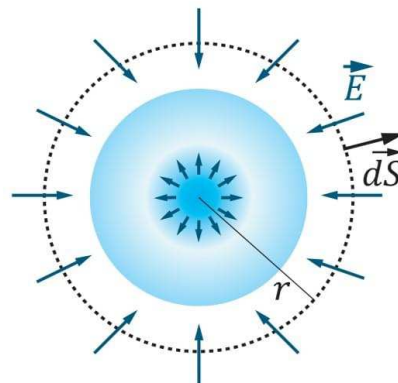
$$\phi = \sum \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{A} = \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$$

La suma de flujos infinitesimales se denomina **integral**, en nuestro caso, integral de superficie de flujo eléctrico. Por

Los diferenciales: flujo de campo, área y campo son expresiones de porciones infinitesimalmente pequeñas.



Campo eléctrico total generado por todas las atribuciones de las cargas en sus elementos diferenciales de superficie.



El flujo resultante del campo eléctrico se calcula como la suma o resta de las cargas que ingresan o egresan de la superficie de cálculo.



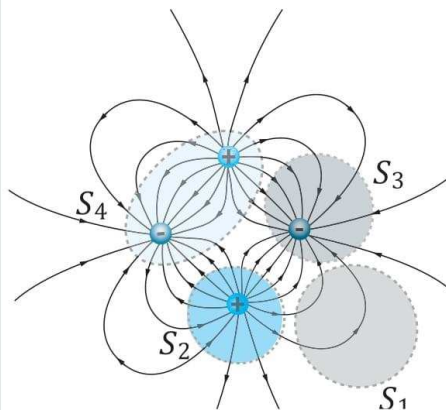
Esta es la definición clásica de integral de superficie cerrada. El flujo eléctrico a través de una superficie será la medida del número de líneas de campo que atraviesan una superficie determinada. Para una superficie cerrada, las líneas de campo que fluyen desde la carga al exterior (son repelidas) a través de la superficie originan un flujo positivo, mientras que las líneas que ingresan del medio a la carga (son atraídas) originan un flujo negativo.

Las cargas que ingresan o fluyen a través de la superficie cerrada determinan el signo del flujo del campo eléctrico.

El flujo eléctrico a través de una superficie cerrada es una medida del número total de líneas que pasan a través de dicha superficie, en otras palabras, el flujo de número de líneas que salen menos el número de líneas que entran. Por desarrollo físico y utilizando pasos matemáticos, podemos determinar que el flujo eléctrico depende de la carga. Si desarrollamos matemáticamente el campo eléctrico, podemos llegar a la expresión:

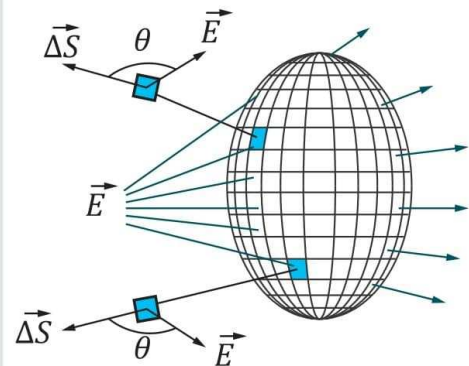
$$\begin{aligned}\phi &= \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{A} = \oint_S \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0} \cdot dA = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0} A = \\ &= \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0} 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}\end{aligned}$$

Contribución de distintas cargas a un campo eléctrico resultante.



Superficie cerrada

Sin importar la forma de la superficie, que puede ser esférica, elíptica o amorfa, debemos intentar conseguir una superficie lo más uniforme y simétrica para poder realizar los cálculos del flujo de campo. En caso de no considerar una superficie perfectamente simétrica, cada elemento de la superficie debe poseer un flujo perpendicular a ella. Diferenciar y segmentar los elementos diferenciales de superficie es lo que dificultará el cálculo del flujo.



El flujo del campo eléctrico total se mide, siempre, como la suma del campo eléctrico a través de cada elemento diferencial.

Podemos leerla como que el flujo eléctrico depende de la carga Q , que encierra la superficie, y de la permisividad del medio. El flujo será positivo o negativo dependiendo de si la carga que ingresa o egresa a la superficie es positiva o negativa. Estas cargas determinarán el signo del flujo de cargas.

Ley de Ampère

La **ley de Ampère** se le reconoce a André-Marie Ampère, físico francés que influenció el nacimiento y el desarrollo del electromagnetismo. Esta ley nos habla de una generación de un campo magnético debido al movimiento de cargas y tiene sus similitudes con la ley de Gauss que estudiamos antes, ya que ambas dependen del movimiento de estas cargas.

Ampère se inspiró en la ley de Biot y Savat, que establecía la relación entre la intensidad de corriente I (constante y de valor fijo) y el campo magnético que depende de ella.



Empleando la ley de Ampère, puede calcularse el campo creado por distintos tipos de corriente.

La ley de Ampère definió que el campo magnético producido por el flujo de una corriente es proporcional a la corriente eléctrica que circula por un conductor cerrado (llamado **fuentes de campo magnético**). A su vez, si multiplicamos la suma de los tramos de longitud del conductor por el campo magnético, el resultado será igual a la permeabilidad magnética por la corriente eléctrica dentro del conductor cerrado.

Podemos escribir en primera instancia, como hicimos con la ley de Gauss, el flujo del campo magnético que posee una similitud matemática. Escribimos:

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

Y

$$\phi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

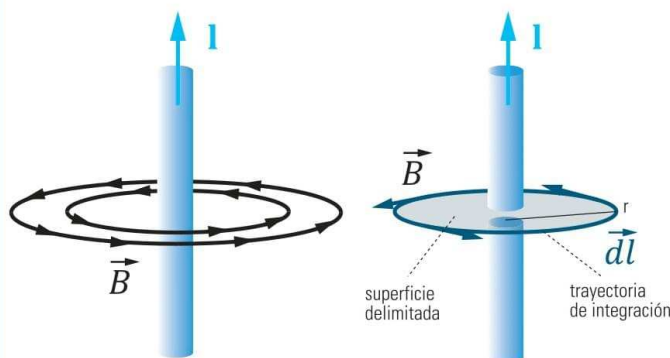
La segunda expresión nos dice que, de considerar una superficie cerrada, el flujo total de campo magnético a través de una superficie es igual a 0, lo que significa que las líneas de flujo magnético que salen son igual a las que entran.

Lo que nos enuncia Ampère es el flujo magnético que produce un conductor de corriente. Para entenderlo mejor, la corriente que circula por un conductor (un cable de cobre como los que están en todas las instalaciones eléctricas) genera un campo magnético a su alrededor. Ampère lo define como:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu \cdot I$$

Si lo leemos, entendemos que la corriente I que circula por un conductor de permeabilidad μ se calcula utilizando el campo magnético B y la longitud del conductor dl .

Para calcular el valor del campo B en un punto P a una distancia r de un conductor, escogeremos una línea que pase por P ; utilizamos una línea recta como conductor para facilitar los cálculos. Si medimos el campo, este será una



El hilo Ampère se conoce como el conductor de longitud infinita con una superficie delimitada donde se calcula el campo magnético producido por el conductor.

circunferencia de radio r con centro en el conductor de modo que todos sus puntos estarán a la misma distancia del conductor y, por lo tanto, tendrán el mismo valor alrededor de la circunferencia de igual radio. Leyéndola con la ley de Ampère:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B \cdot 2\pi \cdot r = \mu_0 \cdot IB = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

El flujo magnético a través de una superficie cerrada es nulo; todas las líneas que salen reingresan.

Ley de Ampère en un solenoide

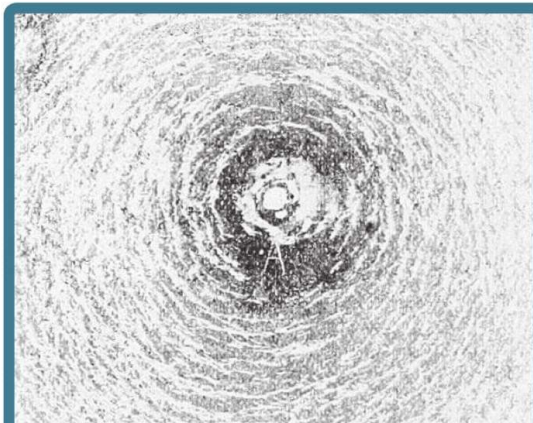
Debemos considerar que en un solenoide ideal, el largo de la bobina es mayor al radio que separa sus espiras. Esto produce que el campo magnético sea paralelo y uniforme en su eje. Esto, además, produce que el campo en su exterior se anule. Para analizarlo, utilizamos una superficie de estudio que contemple el interior y el exterior de la bobina, donde n es el número de espiras. Para un solenoide, el campo magnético será mayor, cuando mayor sea el número de espiras.



La permisividad es el cociente que resulta de dividir el valor de la inducción por el de la intensidad, en el campo eléctrico.

El campo magnético depende de la corriente y la permisividad, y es inversamente proporcional al radio. Si ahora tomamos una circunferencia mayor (mayor radio), el campo magnético será menor.

El campo es tangente a la longitud y de módulo constante en toda la trayectoria.



Si ubicamos limaduras de un material ferromagnético alrededor de un conductor de cobre, observaremos el efecto de la ley de Ampère.

Ley de Ampère en un toroide

Un toroide es similar a un solenoide. Es un solenoide curvado con sus extremos unidos. Las líneas del campo magnético, que en el solenoide son rectas, en el toroide son curvas y tangentes a las espiras. Si analizamos el campo magnético como radio r al centro del toroide, todo el campo magnético estará confinado dentro del toroide y tangente a la circunferencia. Matemáticamente tendrá la forma de:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}$$



No hay que olvidar que las fuentes del campo magnético son las cargas en movimiento, es decir, la corriente. Si bien el flujo de corriente es la dinámica de las cargas por circular, la corriente es estable y no se incrementa o disminuye (siempre y cuando mantengamos fijo el valor de la corriente); el flujo magnético será el mismo. Podemos realizar un experimento para demostrar esto: ponemos alrededor de un cable de cobre un papel, lo llenamos de limadura de hierro (material ferromagnético) y le hacemos circular una corriente I_1 , veremos cómo se orientan en forma de círculos concéntricos al cable. Ahora hacemos circular una corriente I_2 y cambiarán estas circunferencias de mayor o menor diámetro, pero, al modificarse, permanecerán constantes. Una vez fija la corriente, el campo magnético se mantendrá fijo.

Concepto de permeabilidad

Hubo un tiempo, al comienzo del estudio de los fenómenos electromagnéticos, en que la electricidad y el magnetismo fueron considerados fenómenos independientes uno del otro.

Sin embargo, en el siglo XIX, el físico danés **Hans Christian Oersted** observó la desviación de una brújula cuando la acercaba a un material ferromagnético (alambre de cobre) por donde circulaba una corriente eléctrica, y descubrió que existen elementos con una alta permeabilidad magnética y que estos fenómenos estaban íntimamente relacionados. Gracias a esto, hemos podido desarrollar múltiples inventos, como los motores y los generadores eléctricos, que son tan útiles en nuestra vida diaria.

En el ámbito de la física, se entiende por **permeabilidad magnética** a la capacidad que presenta una sustancia o material para atraer y hacer pasar a través de ella a los campos magnéticos.

Esta magnitud axial, propia de los materiales, aparte de estar influenciada por una corriente eléctrica sobre una

región del espacio, viene dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material.

No obstante, vale aclarar que la permeabilidad magnética es un fenómeno presente y que se halla de forma elevada solo en algunos materiales, como por ejemplo el hierro, y para ello se emplea la letra griega mu (μ). En cambio, dicha permeabilidad magnética es muy baja en el aire y en el vacío, y su valor internacional es representado de la siguiente forma:

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$$

Finalmente, la permeabilidad magnética de un material queda representada por la siguiente fórmula:

$$\mu = H / B$$

Donde:

- ♦ μ = permeabilidad magnética de un material.
- ♦ H = intensidad del campo magnético.
- ♦ B = densidad de flujo.

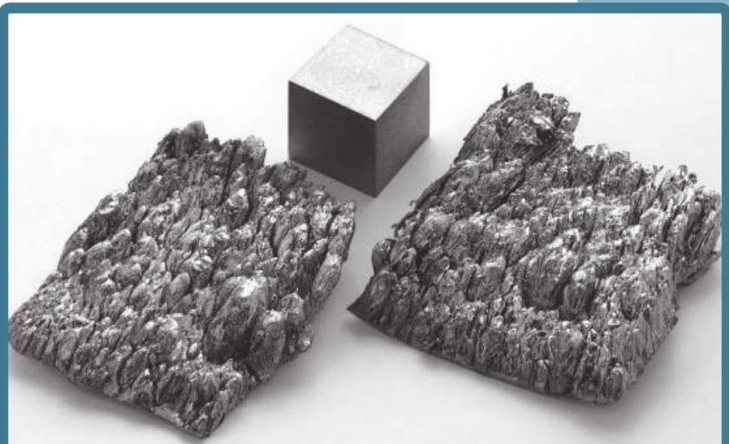
La permeabilidad relativa es propia de cada material; denominada por el símbolo μ_r , es el cociente entre la permeabilidad absoluta del medio específico y la permeabilidad del vacío μ_0 . Por lo tanto es adimensional:

$$\mu_r = \mu : \mu_0$$

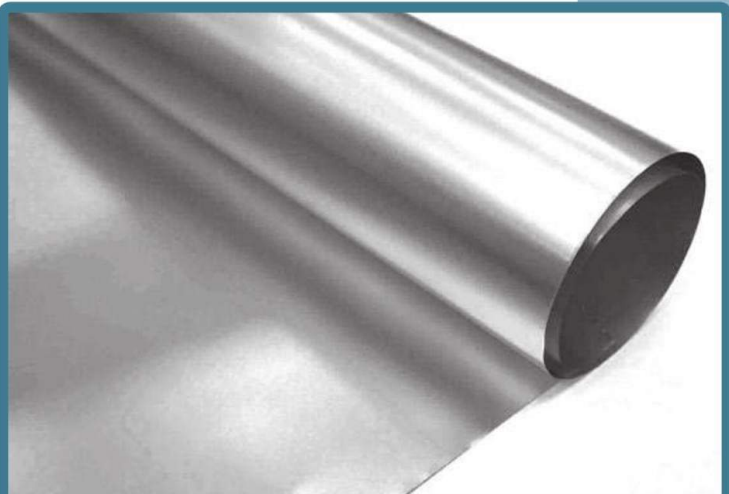
La permeabilidad del vacío, conocida también como una constante magnética, se representa mediante el símbolo μ_0 y según el Sistema Internacional se define como:

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$$

La permeabilidad magnética es un fenómeno presente y que se halla de forma elevada solo en algunos materiales.



Algunos materiales, como el níquel, poseen una permeabilidad elevada, por ello, en presencia de un imán son atraídos y magnetizados por este.



El cobre respecto del níquel posee una permeabilidad baja, por ello, frente a un campo magnético o imanes son repelidos por ellos.

Diamagnetismo

Este fenómeno fue descubierto y denominado por primera vez en septiembre de 1845 por Michael Faraday cuando observó que existían materiales, como el cobre, que eran repelidos por un polo cualquiera de un imán o campo magnético cuando se los acercaba. Esta cualidad de ciertos materiales es la capacidad opuesta de aquellos, como los de elevada permeabilidad, que son atraídos por los campos magnéticos.



Michael Faraday fue el pionero del estudio sobre todo lo relacionado con el electromagnetismo.

MATERIALES MAGNÉTICOS Y CIRCUITOS

Algunos materiales como el níquel, el hierro, el cobalto y sus aleaciones, presentan propiedades magnéticas que son fácilmente detectables, aquí analizaremos sus propiedades.

Todos los **materiales magnéticamente permeables** son afectados, en mayor o menor medida, por la presencia de un campo magnético.

Entonces, podemos llegar a la conclusión de que habrá materiales que, debido a fenómenos eléctricos tales como la **distorsión** y **alineación**, presenten distintos comportamientos frente a la acción de un campo magnético.

Tipos de materiales

Podemos clasificar a los materiales, de acuerdo a su comportamiento frente a líneas de campos magnéticos, en:

◆ **Ferromagnéticos:** estos materiales, cuando son expuestos a un campo magnético, distorsionan en demasía las líneas de flujo. Esto se debe a que se produce un ordenamiento de los momentos magnéticos del material en la misma dirección y sentido que el campo exterior. Si retiramos el material de la acción del campo, conservará durante un tiempo las propiedades mag-

néticas adquiridas. Aquí la permeabilidad magnética es claramente superior a la del vacío, por ello estos materiales se caracterizan por pegarse a los imanes. Estos materiales se subdividen en: **dominios magnéticos** y **paredes de Bloch**. Los tres materiales ferromagnéticos por excelencia son hierro, cobalto y níquel.

◆ **Diamagnéticos:** este tipo de materiales fue descubierto y nombrado por **Michael Faraday**. Cuando un material diamagnético es sometido a la acción de un campo magnético, las líneas de fuerza de este son repelidas hacia el exterior, o dicho de otro modo, un material diamagnético sería repelido permanentemente por cualquier polo de un imán porque el flujo magnético, a diferencia de los paramagnéticos, disminuye notablemente. Se magnetizan débilmente en sentido opuesto al campo magnético aplicado y son repelidos levemente por los imanes. Su magnetismo no se mantiene si el campo magnético es retirado, y su permeabilidad magnética es inferior que la del vacío, pues ofrecen mayor resistencia que este a la propagación del campo magnético. Son diamagnéticos el bismuto, el hidrógeno, los gases nobles, cloruro de sodio, germanio, grafito, etcétera.

◆ **Paramagnéticos:** estos materiales son los que comúnmente utilizamos con más facilidad en nuestra vida cotidiana (algodón, plástico, entre otros). Se caracterizan por ser levemente atraídos por los campos magnéticos, es decir, si colocamos un material paramagnético cerca de un campo magnético, atraerá hacia sí las líneas de fuerza del campo. Si retiramos el cuerpo de la acción del campo, a diferencia de los ferromagnéticos, estos no retendrán sus propiedades magnéticas. La permeabilidad magnética en estos materiales es superior a la del vacío y a la del aire, respectivamente. Por otra parte, los materiales paramagnéticos tienen una cualidad destacablemente particular del resto de los demás materiales expuestos a campos magnéticos, que es la de manifestar el mismo tipo de atracción y repulsión que los imanes normales cuando son impulsados por un campo magnético. Sin embargo, al retirar el campo magnético,



Los materiales magnéticos metálicos, como el acero, se suelen emplear en electroimanes, para poder variar en ellos el flujo magnético y controlar así la corriente inducida.



esta condición desaparece porque el alineamiento magnético no está más favorecido energéticamente.

Ejemplos de estos materiales son: aluminio, magnesio, titanio, wolframio, etcétera.

Es evidente que los materiales magnéticos son importantes para el ámbito comercial, pues sabemos que una corriente eléctrica que viaja a lo largo de un alambre conductor produce un campo magnético concéntrico. Por otra parte, así como una corriente eléctrica genera un campo magnético, un campo magnético puede generar una corriente eléctrica. Podemos distinguir estos materiales, desde el punto de vista comercial, de la siguiente forma:

♦ **Materiales magnéticos metálicos:** son los ferromagnéticos ya mencionados que se pueden clasificar en **blandos** y **duros**. Los materiales magnéticos blandos son aquellos que tienen una baja remanencia magnética, es decir, se pueden desmagnetizar con más facilidad y se suelen emplear en electroimanes, para poder variar en ellos el flujo magnético y controlar así la corriente inducida en bobinas, núcleos de transformadores, generadores, etcétera. Los más comunes son las aleaciones de hierro. Los materiales magnéticos duros son aquellos que presentan un campo magnético remanente grande, es decir, son los que conservan inicialmente un gran campo magnético y por lo tanto son aptos para imanes permanentes. Por ejemplo, aleaciones de Fe, Al, Ni, Co.

♦ **Materiales magnéticos cerámicos:** son los denominados materiales **ferromagnéticos**. Aunque su origen es cerámico, presentan algunas particularidades en su estructura atómica, de tal forma que tienen un emparejamiento particular de los spines de los electrones (propiedad física de las partículas, relacionada con su momento angular), por lo que se pueden magnetizar. Algunos de estos materiales son las denominadas **espinelas**, que son aleaciones de Mn, Ni, Zn, Mg y Co; se suelen utilizar como elementos pasivos para suprimir interferencias en circuitos electrónicos, como transpondedor en circuitos de radiofrecuencia, que pueden usarse para identificar animales o llaves de automóviles.

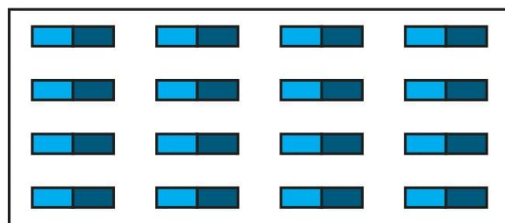
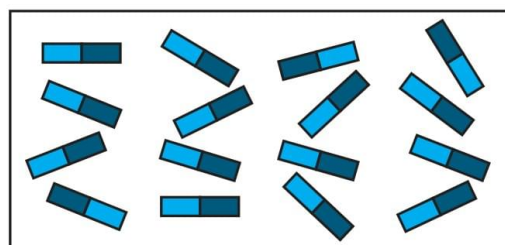
Todos los materiales magnéticamente permeables son afectados de mayor o menor forma por la presencia de un campo magnético.



El latón (aleación de cobre y zinc) es un material magnético cerámico muy utilizado para suprimir interferencias en circuitos electrónicos.

Comportamiento magnético

En ausencia de un campo magnético, la materia no manifiesta propiedades magnéticas; eso es debido a que, en su interior, los campos magnéticos generados por el movimiento de los electrones están compensados unos con otros. Sin embargo, al someter a un material, sea el que sea, a la acción de un campo magnético exterior, se produce una distorsión del movimiento electrónico, lo que provoca la aparición de un momento magnético opuesto al campo exterior. Además, se da el caso de materiales que poseen de antemano un momento magnético y, al ser sometidos a la acción del campo, se produce una alineación de dichos momentos, lo que favorece la propagación del campo magnético.



La figura muestra cómo se acomodan y distribuyen los momentos magnéticos cuando un material no es magnetizado (imagen superior) y cuando se halla magnetizado (imagen inferior).



La imagen muestra una manifestación real sobre cómo un material diamagnético es repelido permanentemente cuando se acerca hacia un polo cualquiera de un imán.

Curva primera magnetización

Los **materiales ferromagnéticos**, compuestos de hierro y sus aleaciones con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales, son los materiales magnéticos más comunes: se utilizan para el diseño y la constitución de núcleos de los transformadores y las máquinas eléctricas.

En un **transformador** se usan para maximizar el acoplamiento entre los devanados (conjuntos de espiras), así como para disminuir la corriente de excitación necesaria para la operación del transformador.

En las máquinas eléctricas se usan los materiales ferromagnéticos para dar forma a los campos, de modo que se logren hacer máximas las características de producción de par. Estos materiales han evolucionado mucho con el paso del tiempo lo que implica más eficiencia, reducción de volúmenes y costo en el diseño de transformadores y máquinas eléctricas. Los materiales ferromagnéticos poseen las propiedades que mencionamos a continuación:

- ♦ Aparece una gran inducción magnética al aplicarles un campo magnético.
- ♦ Los materiales de este tipo permiten concentrar con facilidad líneas de campo magnético, acumulando densidad de flujo magnético elevado.

- ♦ Se utilizan estos materiales para delimitar y dirigir los campos magnéticos en trayectorias bien definidas.
- ♦ Permite que las máquinas eléctricas tengan volúmenes razonables y costos menos excesivos.

En la figura **Zonas de la curva** vemos que, al principio, un pequeño aumento en la fuerza magnetomotriz produce un enorme aumento en el flujo resultante. Después, los aumentos en la fuerza magnetomotriz producen relativamente poco aumento en el flujo. Por último, un aumento en la fuerza magnetomotriz casi no produce cambio alguno. Si luego de la saturación aplicamos H en forma desmedida dañaremos las características magnéticas del material. La región de la curva de magnetización en que la curva se aplana se llama **región de saturación**, diremos entonces que el núcleo está saturado. En contraste, la región donde el flujo cambia muy rápido se llama **región no saturada de la curva**, y se dice que el núcleo no está saturado. La zona entre las regiones saturada y no saturada es el **codo de saturación**. Esta es la zona recomendada para trabajar tanto en potencia como en magnetización.

El núcleo debe hacerse funcionar en la región no saturada de la curva de magnetización debido a que el flujo resultante debe ser proporcional, o aproximadamente proporcional, a la fuerza magnetomotriz aplicada.

La permeabilidad está en función de la inducción magnética, por lo que nos interesará mucho conocer los valores de permeabilidad de los distintos materiales

Las máquinas modernas tienen permeabilidades relativas entre 2000 a 6000; esto quiere decir que, para una corriente dada, habrá de 2000 a 6000 veces más flujo que en el aire.

La permeabilidad relativa es la comparación entre la permeabilidad del material y el aire.

Circuitos magnéticos

Como sabemos de la ley de Ampère, si se considera el camino de integración como la longitud media del núcleo, la ley se expresará de la siguiente forma:

$$H L = N I$$

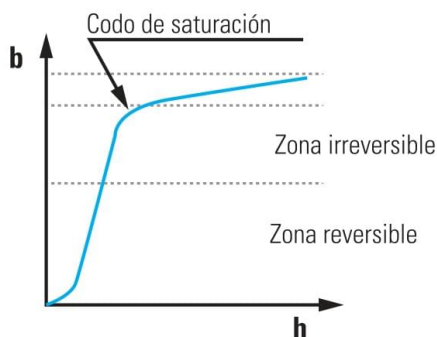
Donde N es el número de vueltas de la bobina y equivale a la sumatoria de corrientes, la cual es la misma en cada vuelta. Al despejar, tendremos la intensidad del campo magnético en función de N -número de vueltas, I -la corriente y L -longitud media. La magnitud del flujo será entonces:

$$B = \mu H = (\mu N I / L)$$

El flujo total que atraviesa el área del núcleo se considera constante y se expresa así:

$$\Phi = B A = (\mu N I A / L)$$

Zonas de la curva. Aquí vemos las diferentes zonas de la curva.





Para entender mejor estos fenómenos, podemos hacer una analogía entre un circuito eléctrico y uno magnético. En la analogía veremos que un circuito eléctrico genera fuerza electromotriz (fem), y en el magnético tenemos fuerza magnetomotriz y la denominamos **fmm**.

En el ejemplo magnético, la fuerza fmm presenta una polaridad asociada que depende de la entrada y salida del flujo; por donde el flujo entra a la fuente, diremos que es negativo y, por donde sale de la fuente hacia el circuito, diremos que es positivo. Como vimos antes, aquí aplicamos la ley de la mano derecha. Siguiendo con la analogía, si en un circuito eléctrico la fem produce una corriente, en uno magnético encontraremos que la fmm producirá un flujo Φ .

Aquí veremos entonces que estas relaciones son análogas a la ley de Ohm:

$$f_{mm} = \Phi R$$

Entonces estamos frente a una nueva magnitud, denominada **reluctancia**, cuya medida es amper-vuelta por weber, donde weber es la unidad de flujo magnético o flujo de inducción magnética.

Para establecer nuestra relación con los circuitos eléctricos, este valor sería la **resistencia del circuito**, donde veremos que la permeabilidad (μ) es el análogo de la resistividad. Es importante mencionar que las reluctancias responden a las mismas reglas que las resistencias.

De esta forma debemos tener en cuenta que para evitar saturación en determinadas inductancias, nos encontraremos con núcleos de estructuras compuestas, los que normalmente son llamados **entrehierros**. Como un ejemplo analizaremos el circuito magnético con entrehierro; para ello supondremos lo siguiente:

- ♦ En primer lugar no existirán pérdidas óhmicas que se presenten en el bobinado.
- ♦ La curva B-H es lineal.
- ♦ La longitud del recorrido del flujo magnético en el núcleo tiene que ser mayor que la longitud del entrehierro, y el área de la sección transversal debe ser mayor que el cuadrado de la longitud del entrehierro.
- ♦ No se considera el efecto marginal.

El efecto de saturación ocurre cuando ya prácticamente todos los dominios se encuentran alineados, por lo que cualquier incremento posterior en el campo aplicado no puede causar una mayor alineación.

Ciclo de histéresis

Reforcemos un poco lo visto en este tema diciendo que, si a un material ferromagnético se le aplica un campo magnético creciente, su imantación crece desde 0 hasta que se presente la saturación. Si luego nos encargamos de hacer descender el campo magnético hasta lograr la anulación, la imantación no decrece de la misma forma, ya que la orientación de los dominios no es completamente reversible, por esta razón quedará una imantación remanente en el material con el que estemos trabajando. Este efecto de no reversibilidad se conoce como **ciclo de histéresis**. Para poder conocer el ciclo de histéresis de un material determinado, se puede utilizar un instrumento conocido como magnetómetro de Köpsel.

RedUSERS PREMIUM

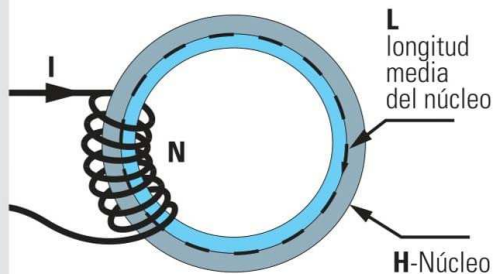
Acceso libre e ilimitado a todas las publicaciones digitales de nuestra editorial para leer online y offline.

Suscríbete: usershop.redusers.com





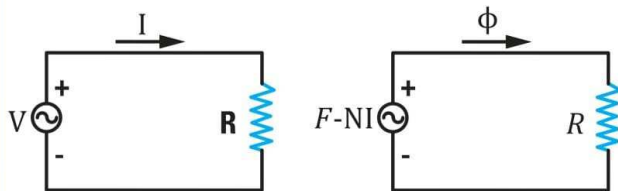
Aquí vemos con claridad la longitud media del núcleo.



Los cálculos que se obtienen utilizando el circuito magnético son aproximados. Para calcular la reluctancia de un núcleo, suponemos su sección transversal y su longitud media. El incremento en la sección transversal del flujo en el entrehierro no se tendrá en cuenta siempre que la longitud del entrehierro sea menor que la dimensión del núcleo. Para este núcleo compuesto, la ley de Ampère se expresa:

$$\sum H_k L_k = N I$$

Teniendo en cuenta que contamos con el medio del núcleo y el medio del aire tendremos:



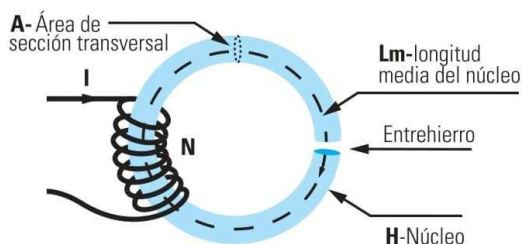
Vemos la analogía entre un circuito eléctrico y uno magnético.

Donde H_m es la intensidad del campo magnético del núcleo, H_g es la intensidad del campo magnético del entrehierro, L_m es la longitud media del núcleo, L_g es la longitud del entrehierro, N es el número de vueltas del bobinado, I es la corriente que circula por la bobina. Tenemos un flujo continuo; la densidad del flujo magnético por unidad de área del núcleo ($B_m A_m$) es igual a la del aire ($B_g A_g$).

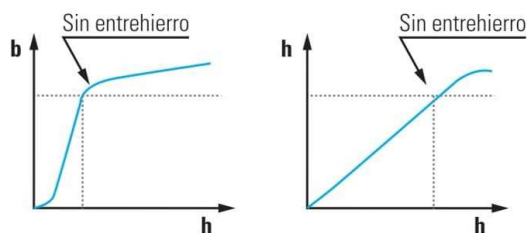
$$B_m A = B_g A = \Phi$$

Donde B_m es la densidad de flujo magnético del núcleo, y B_g , la del entrehierro.

Hasta aquí hemos revisado los conceptos y cálculos fundamentales del magnetismo y de esta forma podemos comprender su papel en la generación eléctrica. Por ejemplo para entender de mejor forma generadores eléctricos, los que son máquinas que entregan corriente eléctrica inducida mediante el movimiento de una o varias bobinas en un campo magnético



Como vimos, el entrehierro es un espacio de separación en el núcleo.



La mejor forma de ver los beneficios del entrehierro es mirar las curvas de magnetización, aplicando los conceptos que vimos en el texto.

Reluctancia

La palabra *reluctancia* se refiere a la resistencia en la electrostática y electromecánica, a la generación de campos magnéticos. Esta palabra debería derivar del verbo *reluctar*, pero este verbo no existe en el castellano. La unidad de reluctancia se llama **oersted** en honor al científico danés Hans Christian Oersted (1777-1851), quien probó en 1819 que había una relación entre la electricidad y el magnetismo mientras realizaba un experimento en una de sus clases. La palabra *reluctancia* viene del latín *reluctari*, formada por *re* ("repetición") y por *luctari* ("luchar") o sea 'relucha' o 'rechazo', que en términos físicos se refiere al rechazo de la materia al magnetismo.

EN ESTA CLASE VEREMOS...

4

La generación de corriente alterna y sus valores, las características de la fuerza electromotriz y de la corriente alterna, los efectos de inductancia y capacitor, entre otros temas.

En la clase anterior vimos el fenómeno del magnetismo para entender su relación en la generación de electricidad, analizamos las características de los imanes y la existencia de los polos magnéticos. También conocimos los principios de la ley fundamental del magnetismo, la teoría de Weber y las leyes de Gauss y Ampère. Vimos la intensidad y el comportamiento de los campos magnéticos, el detalle de aquellos creados por corrientes eléctricas y la fuerza sobre cables paralelos con circulación de corriente eléctrica.

Finalmente analizamos la permeabilidad, la curva de primera magnetización y la clasificación de los materiales de acuerdo a su comportamiento magnético.

En esta oportunidad, nos encargaremos de profundizar en la generación de corriente alterna y conoceremos los valores típicos de este tipo de corriente. Además, revisaremos las inductancias, los capacitores y la aplicación de la corriente alterna en estos componentes.

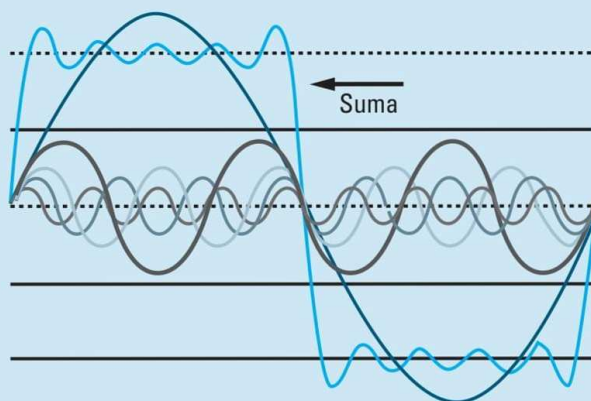
Para terminar, veremos los efectos propios de la corriente alterna, y caracterizaremos la resonancia y los armónicos.

Sumario

074 **Generación de corriente alterna y sus valores**
Características de la fuerza electromotriz y de la corriente alterna.

084 **Corriente alterna en elementos pasivos**
Aplicación de la corriente alterna sobre elementos pasivos.

093 **Efectos de la corriente alterna**
Análisis de los efectos de inductancia vs. capacitor, y características de la resonancia y los armónicos.



GENERACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA Y SUS VALORES

Veremos la fuerza electromotriz y la corriente alterna, también analizaremos los valores característicos y su representación vectorial.

En la mayoría de los equipos eléctricos que encontramos en nuestros hogares e industrias en general, la fuente de energía viene dada de plantas generadoras hidroeléctricas, termoelectricas, atómicas, etcétera., y su principio físico básico de funcionamiento es de acuerdo a un fenómeno llamado **inducción electromagnética**.

Fuerza electromotriz

La ley que relaciona el flujo magnético variable y la fuerza electromotriz inducida se denomina **ley de Faraday**. Otra ley importante es la ley de Lenz, que nos brinda el sentido de la fuerza electromotriz y las corrientes inducidas.

Debemos considerar que estos conceptos están relacionados con campos que tienen una dependencia con la variación en el tiempo.

Hay una relación entre el campo magnético y el campo eléctrico, dado que la existencia de uno requiere la presencia del otro, y viceversa. Esta relación forma parte de un conjunto de fórmulas llamadas **ecuaciones de Maxwell**, que describen el comportamiento de los campos magnéticos.

La inducción electromagnética es el principio en el que se basan las características de un generador eléctrico, un transformador y muchos otros dispositivos de uso diario. La ley de Faraday de la inducción nos dice que la fem inducida en un circuito es igual a la rapidez con signo negativo con la que varía, en función del tiempo, el flujo magnético en el circuito. La ley de Faraday en términos matemáticos es:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi B}{dt}$$

Donde:

- ♦ ε = fuerza electromotriz (fem).
- ♦ ϕB = flujo magnético.
- ♦ dt : diferencial de tiempo.

Si se tienen N espiras iguales de la bobina, entonces:

$$\varepsilon = -N * \frac{d\phi B}{dt}$$

El signo negativo se interpreta como que el sentido de la fem se opone al sentido que lo produce, es decir, toda fem inducida produce una corriente, de modo tal que su campo magnético se opone a la variación de flujo que lo origina.

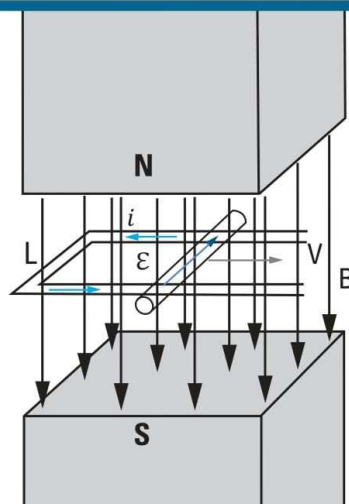
Recordemos la definición de flujo magnético:

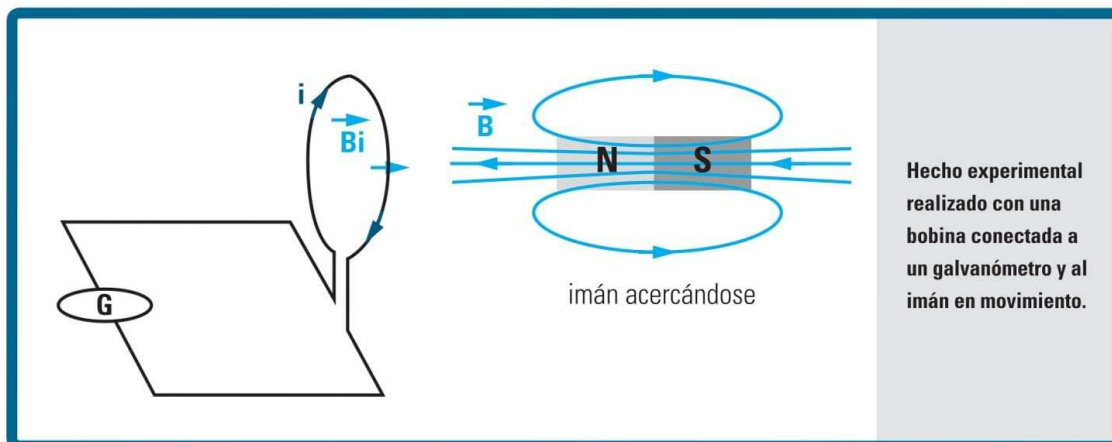
$$\phi B = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$

- ♦ S es una superficie arbitraria por donde el flujo pasa.
- ♦ $\mathbf{B}$ es el campo magnético.

Esta ley se basa en el descubrimiento casi simultáneo de Michael Faraday y Joseph Henry en 1930 aproximadamente, a pesar de que estaban trabajando en forma independiente. Consiste en que flujos magnéticos variables en el tiempo generan en los circuitos fuerzas electro-

Generador de conductor corridizo.
Se observa el campo magnético vectorial $\mathbf{B}$ como el área vectorial; al aumentar el área, aumenta el flujo magnético, induce fem y corriente.





motrices inducidas que, a su vez, determinan corrientes que crean campos magnéticos con sus flujos, cuya misión es oponerse a la variación del flujo inicial, en virtud de la tendencia natural que presenta cualquier sistema a permanecer en su situación actual. Podemos observar los siguientes hechos experimentales:

- ♦ Si un hilo metálico que constituye un circuito cerrado, conectado a un equipo de medición que nos permita medir pequeñas corrientes, se coloca próximo a un imán que se está moviendo, el equipo acusa que hay una corriente en la malla: es la **corriente inducida**.
- ♦ Si un hilo metálico que constituye un circuito cerrado, conectado a un equipo de medición de pequeñas corrientes, se mueve próximo a un imán que está en reposo, el equipo de medición demuestra que se produce una corriente en la malla.
- ♦ Si tenemos dos circuitos cerrados próximos, uno conectado a un equipo de medición de pequeñas corrientes que indica que no pasa corriente y el otro conectado a una batería mediante un interruptor cerrado por el que sí está pasando una corriente, al abrir el interruptor se cierra la corriente y se observa una fem inducida en el primero, que no se observaba cuando había una corriente estacionaria.
- ♦ Mientras mayor sea la variación del flujo magnético respecto del tiempo a través del circuito cerrado, mayor es la fem inducida.

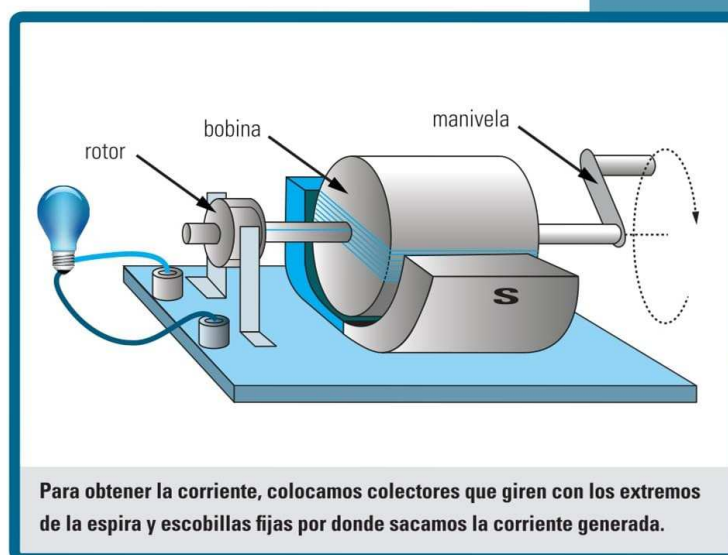
Principio del generador

Una espira gira con una velocidad angular constante ω y corta las líneas de fuerza producidas por un campo magnético, produce una fem en los extremos y, si se conecta una carga en los bornes extremos, circulará una corriente.

Una conclusión importante es que cuanto mayor sea la rapidez de variación del flujo, mayor va a ser la fuerza electromotriz inducida.

Ley de Lenz

En el año 1834, Heinrich F. Lenz publicó lo que hoy se conoce como **ley de Lenz**. Debemos considerar que con esta ley podemos determinar la dirección de la corriente o fem inducida en un circuito cerrado, conocido como malla. No es un principio independiente, ya que se puede obtener de la ley de Faraday.





La ley de Lenz establece que la fuerza electromotriz inducida se opone siempre a la causa que la origina ¿Cómo interpretar la ley de Lenz?

- ♦ Si acercamos un imán por su polo N (norte) a una malla o circuito eléctrico cerrado, le produce a esta una corriente inducida. La corriente inducida en la malla actúa de tal forma que se opone al acercamiento del imán, creando un polo N próximo al del imán.
- ♦ Si alejamos un imán de una malla por su polo N, le produce una corriente inducida. La corriente inducida se opone creando un polo S sobre la cara de la malla próxima al polo N del imán.
- ♦ Si acercamos o alejamos un imán hacia una malla, siempre se experimenta una fuerza de resistencia y tendremos que realizar un trabajo. Aplicando el principio de conservación de la energía, este trabajo debe ser exactamente igual a la energía térmica que aparece en el enrollamiento, ya que estas son las dos energías que existen en el sistema aislado (ignorando la energía radiada desde el circuito como onda electromagnética).

Consideremos un ejemplo para explicar un nuevo concepto: si tenemos un solenoide formado por N espiras de igual sección S , las distribuimos en forma uniforme a lo largo de una longitud determinada que llamaremos (l), dentro del solenoide el campo es prácticamente uniforme, por lo que podríamos considerar que:

$$\phi = N * B * S$$

Si N es el número de espiras por unidad de longitud, se tiene que:

$$N = n * l$$

Si B es igual a:

$$B = \mu_0 * I * n$$

μ_0 = momento magnético de la espira:

$$\mu_0 = I * S$$

Entonces:

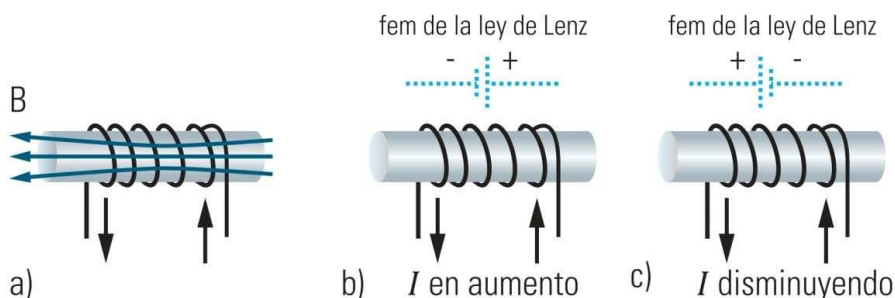
$$\phi = n * l * \mu_0 * I * n * S = (\mu_0 * n^2 * S * l) * I = L * I$$

L se llama **autoinductancia** o **coeficiente de autoinducción** y depende de la geometría del conductor. Entonces, aplicando Faraday:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d(L * I)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Donde la fem (fuerza electromotriz) es proporcional a la inductancia y a la velocidad con que varía la corriente y se opone a la causa que la genera. Recordemos que la resistencia es una medida de la oposición al paso de la corriente y la autoinductancia es la oposición al cambio de la corriente en un circuito. La unidad de medida en el sistema SI es el henry; una bobina tiene un henry de inductancia atravesada por una corriente de un amper y desarrolla un flujo de un weber.

Ejemplo de un circuito hidráulico con una fuente que eleva el flujo de agua mediante una bomba eléctrica, manteniéndolo constante.



Ejemplo de autoinducción. La figura muestra una bobina enrollada sobre un centro cilíndrico de hierro.



El fenómeno de inducción electromagnética es el principio básico por el que funcionan los generadores eléctricos, transformadores y otros equipos eléctricos.

Si observamos la imagen que nos muestra un ejemplo de autoinducción, veremos que la corriente de fuente en la bobina aumenta o disminuye con el tiempo. Cuando la corriente de fuente está en la dirección indicada en la figura, un campo magnético dirigido de derecha a izquierda se establece dentro de la bobina, como se muestra en la figura (a). Si la corriente de fuente cambia con el tiempo, el flujo magnético a través de la bobina también cambia e induce una fem en la bobina. A partir de la ley de Lenz, la polaridad de esta fem inducida debe ser tal que se oponga al cambio en el campo magnético de la corriente de fuente. Si la corriente de fuente está aumentando, la polaridad de la fem inducida es como está representada en la figura (b), y si la corriente de la fuente está disminuyendo, la polaridad de la fem inducida es como se muestra en la figura (c).

Definición de corriente alterna

La corriente eléctrica se define como un flujo de electrones que circulan a través de un conductor. En el caso de la corriente continua, el flujo tiene una sola dirección, y los polos positivos y negativos son siempre los mismos; es el caso de la energía que producen las baterías, paneles solares y celdas de combustible. En la corriente alterna, el flujo se produce en ambas direcciones, y se pierde la noción de positivo y negativo; en cambio los dos conductores que alimentan nuestros hogares se denominan **fase** y **neutro**. Es la energía que proviene de las generadoras eléctricas y alimenta los hogares.

Debemos recordar que la tensión en volts es la diferencia de potencial entre dos conductores, por lo tanto, para que la tensión cambie, solo uno de los potenciales debe cambiar (aunque también los dos pueden hacerlo).

En el sistema eléctrico utilizado en la Argentina y en la mayor parte del mundo, el neutro posee potencial 0 V (potencial cercano a tierra). Por lo tanto, si solo tocamos el conductor de neutro, no habrá diferencia de potencial y no circulará una corriente a través de nuestro cuerpo.

También es importante destacar que, si se intercambian la fase y el neutro, no se produce ningún problema en el funcionamiento del equipo que se esté alimentando, ya sean lámparas, heladeras, etcétera; ni se producirá una inver-

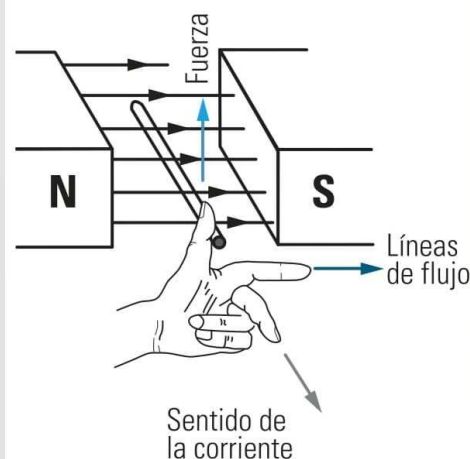
En un circuito de corriente alterna, la fem autoinducida actúa en la dirección que se opone al cambio en la intensidad de la corriente y hace que la intensidad vaya retrasada respecto a la fem.

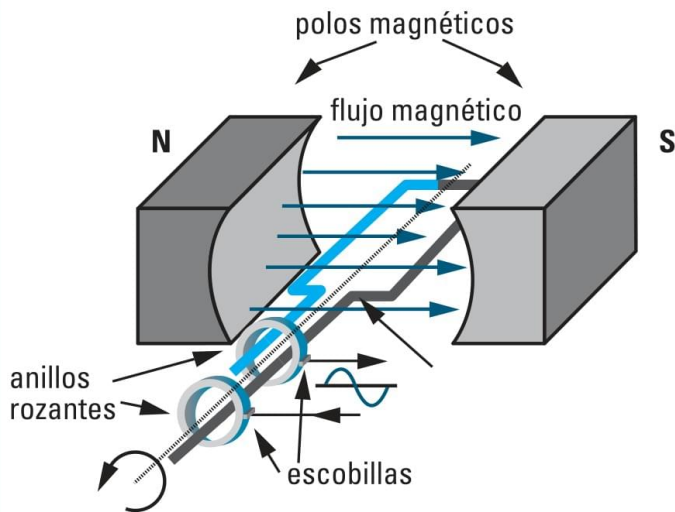
sión del giro de un motor, ya que esto depende de su construcción interna y no de la alimentación. Sin embargo, en un tomacorriente es importante identificar a qué terminal corresponde el conductor de fase y cuál es neutro, por una cuestión de seguridad. Como el peligro reside en tocar el conductor de fase, los interruptores de los distintos equipos y electrodomésticos se colocan en la fase, por lo que, si hay un problema en el cableado, esta es la manera más segura de cortar la alimentación.

Concepto de autoinducción

Si la corriente se incrementa ($dI/dt > 0$), la fuerza electromotriz autoinducida se opone a la corriente. Si la corriente decrece ($dI/dt < 0$), la fem autoinducida actúa en la misma dirección que la corriente. Por tanto, la fuerza electromotriz autoinducida actúa en la dirección que se opone al cambio en la corriente.

Si se aplica la regla de la mano derecha (para el funcionamiento de un generador), se observa que el sentido en que debe moverse el conductor para que en él se induzcan la fem y la corriente indicadas en la figura es hacia abajo, o sea, opuesto al del motor.





Esquema de un generador eléctrico elemental.

El uso de la energía eléctrica se empezó a popularizar a mediados de 1800 con sistemas de corriente continua, usada principalmente para encender lámparas. En Estados Unidos se produjeron los mayores avances en distribución de energía eléctrica, y allí se disputó la denominada **guerra de corrientes**, en la que Edison promovía los sistemas de corriente continua, y Westinghouse, los de corriente alterna con los diseños de Nikola Tesla.

Al final, el sistema que se popularizó y se sigue usando en la actualidad es CA, debido en especial a la facilidad de aumentar y disminuir la tensión de trabajo a través de transformadores, cosa que no es posible en los sistemas de CC. La posibilidad de aumentar el voltaje de manera simple es fundamental para la transmisión de energía. Pensemos en una planta eléctrica que produce 1.000 kW, teóricamente podríamos transmitir estos kW a una tensión de 1 V y una corriente de 1.000.000 A o a una tensión de 500.000 V y 2 A. La primera opción es económica pero impracticable, por lo que siempre se busca transmitir a la mayor tensión posible reduciendo la corriente y, de esta manera, utilizar cables de

menor sección; así, se reducen las caídas de tensión y las pérdidas por efecto Joule. De esta manera, es posible tener líneas eléctricas de cientos de kilómetros y poder alimentar cada punto de un país.

Otro hecho clave es que los motores de corriente alterna son mucho más simples que los de su contraparte de corriente continua, y más económicos.

Generación de corriente alterna

La generación eléctrica puede ser a gas o carbón, hidroeléctrica, por medio de generadores eólicos, etcétera., pero todas estas opciones tienen en común que poseen un **generador eléctrico** y deben hacerlo girar a través de otra máquina, que puede ser una turbina o un motor diesel.

La primera persona que observó el fenómeno de inducción magnética, clave en la generación de energía eléctrica, fue Michael Faraday, uno de los científicos más influyentes de la historia, en 1831.

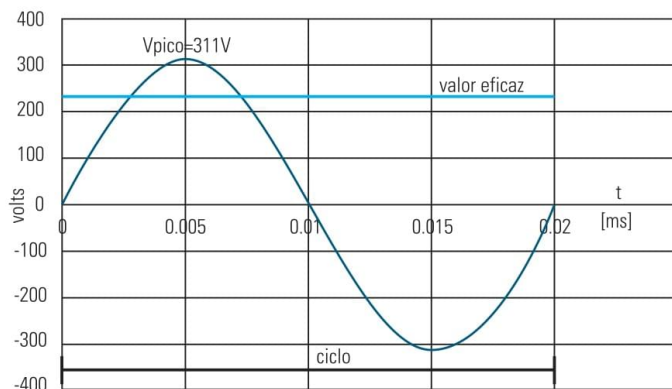
Generadores eléctricos

En la práctica, los generadores están contruidos como un paquete de bobinas colocadas longitudinalmente sobre un eje que rota, y los imanes son estáticos y se ubican a los costados.

Cada vez que una espira de la bobina se mueve a través del campo magnético generado por los imanes y corta las líneas de flujo, se induce una corriente y se genera energía eléctrica. La velocidad de la rotación dará la frecuencia de la tensión generada que, para el caso de la Argentina, es de 50 Hz y, en países como México y Estados Unidos, de 60 Hz.

Valores característicos

Como se mencionó en las secciones anteriores, la corriente alterna generada que utiliza el sistema eléctrico posee una forma senoidal y una frecuencia de 50 o 60 Hz. Esto es constante en los sistema eléctricos de cada país, y lo único que cambia es el voltaje en distintos puntos, desde alta tensión a 500.000 V hasta los 220 V que poseemos en nuestros hogares. Entonces, ¿qué significan estos valores? Si los representamos en un gráfico, lo que obtenemos es lo siguiente:



Representación de una onda de tensión de 220 V eficaces.

♦ La onda posee la forma de la función trigonométrica **seno**; esto lo podemos ver en la práctica a través de un osciloscopio, un instrumento que grafica en una pantalla lo que se está midiendo.

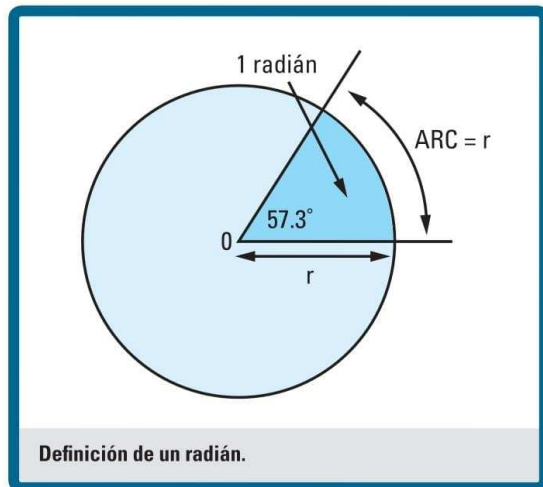
♦ La forma de la onda sinusoidal se debe a que la energía eléctrica es generada por la rotación del generador eléctrico, lo que hace que los cambios de los valores de la fuerza electromotriz inducida posean esta forma. Si bien esta es la forma que se estableció como la más práctica

y eficiente, se pueden generar ondas de distintas formas, como cuadradas y triangulares, que por lo general son utilizadas en el campo de la electrónica.

- ♦ La onda senoidal en la corriente alterna posee valores característicos que son: valor pico, valor eficaz, valor medio y frecuencia.

Radián

El **radián** (rad) es una forma de medir ángulos, como lo es el sistema sexagesimal al que estamos más acostumbrados. El radián es definido matemáticamente como un cuadrante de un círculo donde la longitud del arco es igual al radio.



Dado que la circunferencia de un círculo es 2π radio, tiene que haber 2π radianes alrededor de un círculo de 360° , por lo que usando radianes como unidad de medida para una onda sinusoidal, resulta en 2π radianes para un ciclo completo de 360° . Por lo tanto, medio ciclo es igual a 1π radián. Luego, sabiendo que π es aproximadamente igual a 3,142, la relación entre radianes y ángulos sexagesimales es:

$$\text{Radianes} = \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right) \times \text{grados}$$

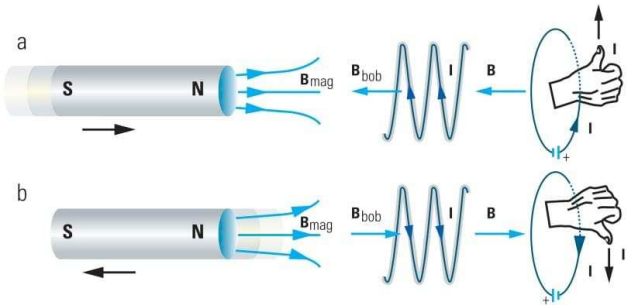
$$\text{Grados} = \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right) \times \text{radianes}$$

Valor instantáneo

La onda sinusoidal corresponde a la función $V = V_p \sin(\theta)$, donde V_p es el valor pico, y θ , el ángulo de rotación de la espira en el campo magnético. El ángulo se expresa como ωt , siendo $\omega = 2\pi f$, denominado **velocidad angular**, y t , el tiempo. En el gráfico que está a la derecha se puede ver cómo la onda es generada en función de la rotación de las espiras. Por ende, como podemos apreciar, el valor de la tensión cambia constantemente en función del tiempo y podemos calcularlo y graficarlo a través de su función matemática.

Representación de la ley de Lenz

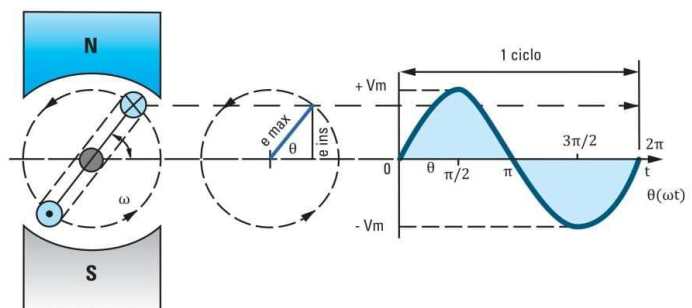
Cuando la barra magnética es empujada a través de la bobina, la fuerza del campo magnético se incrementa en la bobina. La corriente inducida crea otro campo de dirección opuesta a la del imán para oponerse al incremento. Este es un aspecto de la ley de Lenz, la inducción se opone a cualquier cambio de flujo. En el caso b, el imán es movido en dirección opuesta, por lo que cambia la dirección campo, y la corriente se induce en la dirección contraria.



Inducción de corriente por ley de Lenz.



Transformador de distribución de 20 MVA de 33 kV a 400 V.



Valores instantáneos y construcción de la onda senoidal.



Valor pico

El valor pico es el máximo valor que alcanza la onda; es un valor característico del diseño del generador y se produce cada vez que el ángulo toma el valor de un múltiplo impar de 90° y la función seno toma el valor 1 o -1 (en 90° , 270° , 450° , etcétera). Físicamente, esto se produce cuando la espira con los polos magnéticos y la inducción de la fuerza electromotriz es máxima.

Valor eficaz

El valor pico no es un dato práctico cuando se trabaja con corriente alterna, y lo que se usa es el valor eficaz (en Argentina los 220 V y en México 127 V).

El valor eficaz es un valor de corriente alterna que, en una resistencia, produce la misma potencia disipada que una corriente continua. Matemáticamente se define de la siguiente manera:

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_p \sin^2(\omega t) dt}$$

Resolviendo la integral resulta:

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

Y también se deduce que el valor eficaz es independiente de la frecuencia del sistema, por lo que esta solución sirve para sistemas de 50 o 60 Hz, o cualquier otra frecuencia, mientras que la onda sea senoidal.

Esta expresión es igual de válida para la corriente, ya que la forma de onda es la misma y lo único que difiere es que puede estar desfasada de la onda de tensión.

Valor medio

El valor medio es la media aritmética de todos los valores instantáneos de la onda medidos durante un período. Esto lo podemos interpretar como el promedio de los valores instantáneos o como el promedio de las áreas bajo la onda. La expresión matemática es:

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T V_p \sin(\omega t) dt$$

Como la onda de corriente alterna es simétrica con respecto a su eje, el valor medio es 0.

Existen instrumentos que miden el valor medio y, cuando la medición se aparta de 0, indica que hay alguna inyección de corriente continua en la red, lo que produce que la onda se desplace hacia arriba y pierda su simetría; por ende, el valor medio deja de ser 0.

Frecuencia

La frecuencia en cualquier señal periódica es la cantidad de veces que un ciclo se repite durante un segundo y es medido

en hertz. En el caso de un generador eléctrico, cuando la espira da una vuelta completa, se produce un ciclo completo; por lo tanto, si el generador rota a una velocidad constante, se producirá una cantidad constante de ciclos por segundo, dando como resultado una frecuencia fija. Por lo que podemos deducir que la frecuencia es directamente proporcional a la velocidad de rotación del generador. Otro factor que también afecta es la cantidad de polos que posee la máquina. En nuestro caso, el generador posee un par de polos, o sea un norte y un sur. Por lo general, se trabaja con 2 o 4 pares de polos, ya que proveen un mejor funcionamiento. Por lo tanto, la frecuencia está dada por:

$$frecuencia[hz] = \frac{pp \cdot N}{60}$$

Donde pp es la cantidad de pares de polo y N la velocidad de rotación en revoluciones por minuto (RPM).

Las representaciones vistas son interpretaciones físicas y matemáticas de los fenómenos electromagnéticos. En la práctica, cuando se diseña y construye, puede haber diferencias y correcciones con distintos factores de ajustes.

Representación vectorial

Representar vectores en sistemas de coordenadas implica un conocimiento tanto matemático como geométrico de todas las expresiones que puedan llegar a representarse. Los conocimientos matemáticos básicos presentan limitaciones, pues desde pequeños aprendimos que existen determinadas condiciones para realizar operaciones matemáticas, y una de ellas es que dependemos de un conjunto numérico determinado.

Para generalizar tenemos dos grandes grupos de números: los reales, con los que nos manejamos cotidianamente para cualquier operación, son utilizados por las calculadoras comunes al multiplicar, dividir, etcétera; y los números complejos. Los números complejos son aque-



llos que se utilizan para representar ciertos valores que, de otra manera, no tendrían resolución. Vamos a tratar a los números complejos como una extensión del conjunto de los reales, ya que un complejo es un número real, pero no viceversa. Para identificar un número complejo se le añade una letra i que, a su vez, se podrá representar en una forma polar. Se utilizan los números complejos para la clásica ecuación con números negativos:

$$\sqrt{-4}$$

Sabemos que esta respuesta no existe en números reales, por lo que se soluciona utilizando $2i$.

Para solucionar raíces cuadradas (o pares) de números negativos, usaremos la igualdad:

$$i = \sqrt{-1} \text{ e } i^2 = -1$$

Utilizando la primera ecuación tendremos que:

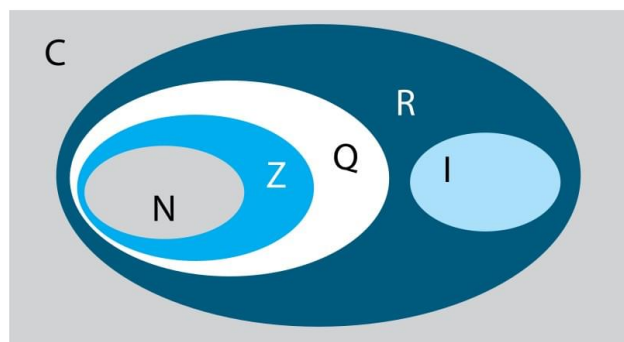
$$\sqrt{-4} = \sqrt{4} \cdot \sqrt{-1} = \sqrt{4} \cdot i = 2i$$

Es importante utilizar y comprender los números complejos, ya que serán nuestra herramienta de trabajo para analizar gráficos, representar vectores, fasores, electromagnetismo, entre otras tantas actividades relacionadas con nuestro trabajo. Nuestro principal uso en la electrónica será representar ondas electromagnéticas y también la corriente eléctrica en general.

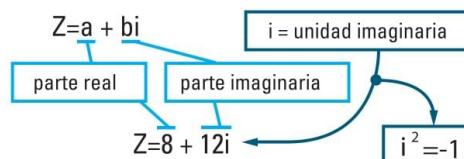
Su representación en el plano se realiza mediante puntos en los ejes de coordenadas. Mediante coordenadas, podemos diferenciar a los números reales como un par ordenado definido según:

$$(r, 0)$$

Donde un número real tendrá como primer componente un número de su conjunto y, como segundo componente, siempre tendrá un 0.



Conjuntos numéricos. De menor a mayor, reconoceremos todos los conjuntos ya que son de uso diario. Los imaginarios complementan a los complejos.



Esquema representativo de cómo se encuentran conformados los números complejos. Podemos ver su parte real y su parte imaginaria.

Un número complejo será la suma de un número real y un número imaginario que, en su conjunto, forman el complejo.

Graficadoras electrónicas

Si bien hemos explicado cómo realizar una representación gráfica de las ondas senoidales, existen calculadoras preparadas para realizar la misma tarea y ahorrarnos un cuantioso trabajo en algunos casos. Las graficadoras consisten en dispositivos que leen la forma de la onda y grafican punto a punto como si de fasores se tratase. Realizan un muestreo de diversos puntos y nos presentan el gráfico dado para las variables asignadas.

Las graficadoras son una herramienta muy útil en el momento de visualizar ecuaciones complejas. Aunque debemos asignarles variables definidas, las indefinidas nos otorgan interesantes respuestas.





Para un número complejo tendremos un par ordenado:

$$(R, C)$$

Su primer componente será cualquier número real, y el segundo también, pero acompañado por la letra **i**.

Así definimos a un número complejo que se representa binomialmente como: $z = a + bi$; **a** será su parte real, y **b**, su parte imaginaria.

En el eje de coordenadas, el valor de **a** es un número real y se representa sobre el eje de ordenadas **x**, mientras que el valor de **bi** pertenece a los números complejos y estará representado en las ordenadas de **y**; así, podremos representar el número complejo en el espacio del plano.

Ya tenemos el punto en el plano, ahora analizaremos varios factores. El primer factor será determinar a qué distancia está este punto del origen (establecido por nosotros) y qué ángulo forma entre el segmento que une el punto con el origen y el eje de abscisas (el eje **x**).

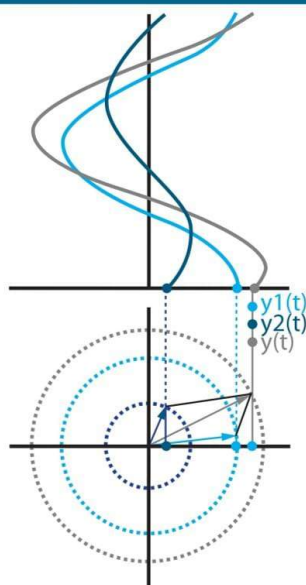
El módulo de **z** será la longitud del segmento que une a **z** y **0**, que se obtiene realizando:

$$z = \sqrt{a^2 + b^2}$$

El ángulo que forma este segmento y el eje de abscisas se denomina **argumento** y se calcula según:

$$\arg(z) = \tan^{-1} \frac{b}{a}$$

Con el ángulo determinado y el módulo, podremos representar cualquier vector gráficamente; de este modo podremos visualizar campos electromagnéticos, sentido de las corrientes y conceptos que, mientras avance la obra, iremos tocando con mayor profundidad.



Fasor de una onda senoidal.
Se representa cada fasor y su magnitud en un tiempo dado.
En cada punto sobre el eje de abscisas describe la onda.

Osciloscopio

En la electrónica, el instrumento para poder graficar el comportamiento de ondas variables es el osciloscopio, que nos marca en tiempo real el comportamiento de una onda sobre un componente. Por lo general, se usa para medir corrientes, tensiones, frecuencias y límites de componentes. A lo largo de toda esta obra, el osciloscopio representará nuestras ondas y fasores, dándonos ideas de los valores que estamos manejando.



Aprenderemos a utilizar el osciloscopio a medida que sea necesario, ya que posee funciones muy útiles a la hora de medir componentes.

Es importante poder comprender que los números complejos nos permitirán hacer las representaciones de la mayoría de las expresiones electrónicas que veremos a lo largo de esta obra. Con un número complejo, podremos dar dirección y sentido a magnitudes físicas que, al conocerlas, será posible predecir funcionamientos, fallos y nuevas aplicaciones. Una de las principales aplicaciones de los números complejos en la electrónica son los fasores, aquellos números complejos que representan oscilaciones. Esto quiere decir que es posible establecer la proyección instantánea de una suma de vectores de una función senoidal para así obtener un gráfico de oscilación. Los valores que obtendremos en un momento dado de una función senoidal coinciden con la proyección de la función seno del vector y, a medida que este vector continúe girando sobre el punto 0, este irá describiendo la onda completa. Estos vectores giratorios son los fasores.

Utilizando estos fasores, podremos representar las oscilaciones y los circuitos de corriente alterna en los circuitos que iremos estudiando. Tendremos que el módulo de los fasores será el valor de las magnitudes senoidales, y el ángulo entre fasores, el desfase de las ondas. Un fasor presentará matemáticamente la siguiente forma:

$$y = A * \sin(\omega t + \theta)$$

Un fasor será simplemente un segmento o vector rotacional, que se encuentra en distintas posiciones, en distintos momentos y en diferentes tiempos dados. Sus proyecciones tanto en el eje de ordenadas como de abscisas serán los valores de los módulos de las magnitudes en que estemos interesados. Cuando interactúen dos o más magnitudes físicas, el fasor principal será el resultante de la suma vectorial de ambos y se comportará de la misma manera que la suma de las componentes de las proyecciones en cada uno de los ejes.

ALTERNADOR

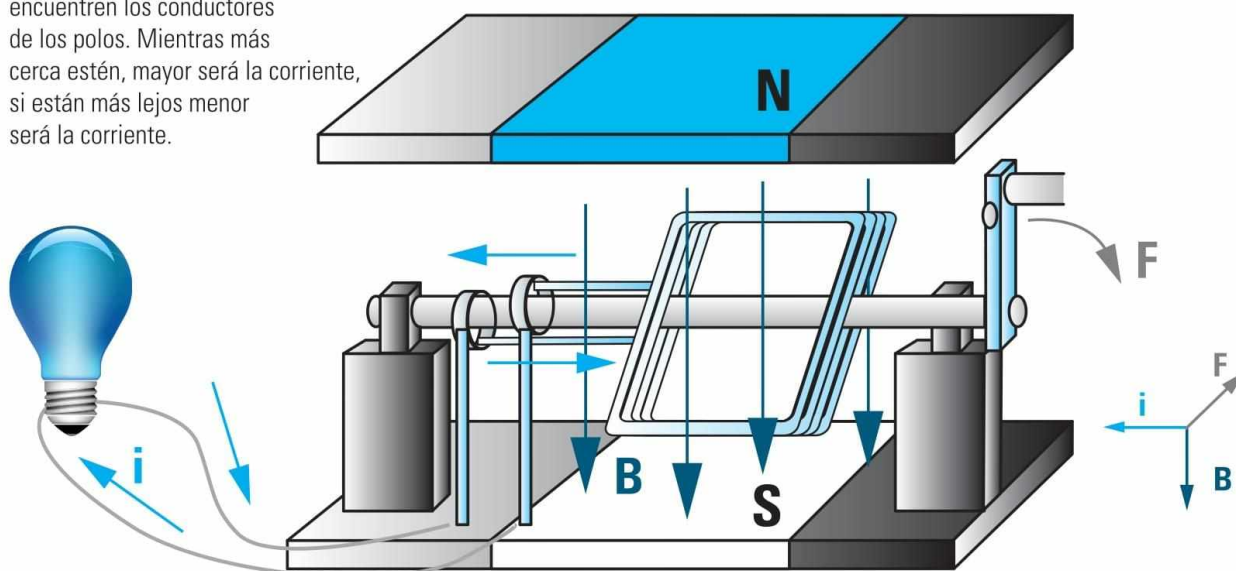
Un alternador es una máquina eléctrica que nos permite transformar la energía eléctrica. Para ello, genera una corriente alterna mediante la inducción electromagnética.

Salida de energía eléctrica

La corriente generada varía en función de lo lejos que se encuentren los conductores de los polos. Mientras más cerca estén, mayor será la corriente, si están más lejos menor será la corriente.

Entrada de energía mecánica

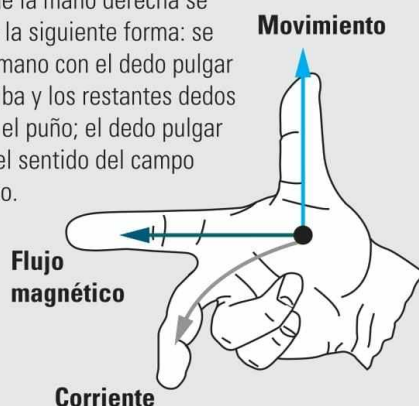
Cuando giran las espiras, la parte de arriba, pasa abajo y la de abajo arriba invirtiendo el sentido de la corriente sobre el receptor.



El sentido de la corriente se encuentra expresado teniendo en cuenta la regla de la mano derecha.

Regla de la mano derecha

Tal como vimos en la clase 3, la regla de la mano derecha se utiliza de la siguiente forma: se estira la mano con el dedo pulgar hacia arriba y los restantes dedos cerrando el puño; el dedo pulgar indicará el sentido del campo magnético.



Aspecto de la corriente generada por el alternador.



CORRIENTE ALTERNA EN ELEMENTOS PASIVOS

Si hablamos en términos de electrónica, una resistencia es el componente que genera una caída de tensión y controla la cantidad de corriente. En esta sección, veremos cómo se aplica la corriente alterna sobre estos elementos.

En los circuitos eléctricos sometidos a corriente continua o alterna, siempre nos encontraremos con resistencias. La función de este componente es, como ya vimos, oponerse al establecimiento del flujo de una corriente.

El comportamiento de una resistencia real es muy distinto al de una resistencia ideal que estudiamos hasta ahora. Si a un circuito le aplicamos una oscilación senoidal (corriente alterna en nuestro caso) a bajas frecuencias, no obtendremos diferencias apreciables con respecto a aquel circuito sometido a corriente continua. Sin embargo, si la sometemos a una fuente de corriente de alta frecuencia, el comportamiento de la resistencia real será distinto y mayor en cuanto aumente la frecuencia, debido a la aparición de efectos inductivos producidos en los materiales que componen a la resistencia real. Para corriente alterna, en la resistencia la tensión y la corriente están en fase. Analizando la tensión en corriente alterna, tendremos que:

$$u(t) = V \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$

Si aplicamos la ley de Ohm, circulará una corriente alterna de la forma de:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = \frac{V}{R} \text{sen}(\omega t + \beta) = I \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$



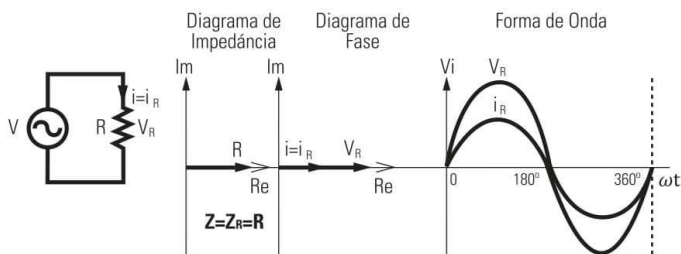
Resistencias fijas. Según sus elementos constitutivos presentan un impedimento al flujo de la corriente.

Esto significa que la corriente es función de la tensión (pico o máxima en corriente alterna) e inversamente proporcional a la resistencia en el circuito. De esta manera, podemos ver que la tensión en función del tiempo está en fase con la corriente. La principal diferencia que podremos observar es que el valor máximo de la corriente no podrá superar a la de la tensión a menos que se elimine toda resistencia del sistema. De la forma senoidal de la expresión de la corriente en función del tiempo, siempre se estará utilizando la corriente máxima. La definición a lo largo de todo el artículo tanto de la corriente como de la tensión será referida a los valores máximos o picos salvo aclaraciones.

Si tenemos en cuenta que siempre debemos medir la corriente en su valor eficaz ($A = \frac{A_0}{\sqrt{2}}$), veremos que la corriente podemos analizarla como:

$$I = \left(\frac{V}{R} \right)_{\beta} = \frac{V_{\beta}}{R_{0^{\circ}}}$$

Lo mismo sucederá si deseamos averiguar la corriente media, y los valores máximos y mínimos. El único valor que permanecerá siempre constante será el de la resistencia, que queda determinado exclusivamente por los materiales constitutivos. Si queremos averiguar los valores instantáneos, debemos tomar la ecuación inicial que es en función del tiempo, y me-



Esquema de una resistencia sometida a una fuente de energía de corriente alterna. Diagrama de fasores en fase.



dir la velocidad angular y el tiempo (o momento instantáneo en el que estamos interesados).

Podemos leer que la corriente depende de dos valores: la tensión, que es una magnitud vectorial (posee dirección y sentido), y la resistencia, que es una magnitud escalar (que no posee ni dirección ni sentido).

Gráficamente, si representamos por separado tanto la tensión como la corriente, observaremos que, en cuanto a amplitud, la corriente tendrá una magnitud menor a la de la tensión, pero ambas estarán en fase; esto significa que sus puntos de inflexión coincidirán en el eje de abscisas, sus ceros serán iguales. Si aumentamos la tensión, la corriente también aumentará en la misma medida. Sus máximos y mínimos siempre estarán en el mismo punto (con distinta magnitud, pero en fase).

La corriente y la tensión alterna en la resistencia siempre estarán en fase en alta frecuencia.

En un diagrama de fasores, si representamos tanto la tensión como la corriente en un plano mediante vectores bidimensionales como ya hemos estudiado, estos no estarán desfasados; cada fasor estará uno encima del otro sobre el mismo eje en 0° ; ninguno de los fasores tendrá rotación. Por lo que, sin importar en qué momento o período analicemos gráficamente, ambos fasores estarán marcados sin desfasaje solo modificando su magnitud entre el punto máximo y el mínimo.

Si representamos la caída de potencia en la resistencia como el vector V_r que forma en un instante dado un ángulo θ , su valor instantáneo será su proyección en el eje x. Tal proyección se obtendrá mediante el giro antihorario del fasor a una velocidad ω dada.

Estos valores se obtendrán de la forma sinusoidal de la onda de la corriente alterna. Tenemos la forma de:

$$i(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$

y

$$u(t) = V \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$

Tensión y corriente en forma vectorial que podemos traducir en forma fasorial como:

$$i(t) = I \cdot \text{sen}(\omega t + \beta) = \text{Fasor } A \ (\vec{A})$$

$$u(t) = V \cdot \text{sen}(\omega t + \beta) = \text{Fasor } V \ (\vec{V})$$

Circuitos resistivos

Los circuitos puramente resistivos no dependen de ninguna de las condiciones de la tensión o la corriente de entrada, sino de sus elementos constitutivos.

Estos circuitos se arman con resistencias y no poseen los efectos de acumulación presentes en la inductancia. Esto hace que, ante el corte de la tensión, el efecto desaparezca de inmediato.

En esta imagen vemos un ejemplo de circuitos resistivos.

Cuya resolución será dada por un vector resultante que se obtiene de:

$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{V}$$

Analizando el gráfico de la página anterior, vemos que los fasores (vectores giratorios) de longitud V e I que giran según ωt tendrá una componente en abscisas igual al voltaje en corriente alterna. Matemáticamente, comprobamos que los ángulos entre los fasores de voltaje y corriente son nulos por lo que no presentarán ni adelanto ni retraso el uno del otro, y comparten la misma dirección y sentido.

Como dijimos, la componente en abscisas se obtendrá a partir de la forma de:

$$u(t) = V \cdot \cos(\omega t + \beta) \quad (\text{proyección, eje x en adelanto}).$$

$$u(t) = V \cdot \cos(\omega t - \beta) \quad (\text{proyección, eje x en retraso}).$$

Como no tendremos ni adelantos ni retrasos entre la corriente y la tensión, el ángulo β (o fase) será siempre 0. Este caso de estudio siempre deberá ser entendido como un circuito donde solo existe la presencia de una sola resistencia.

Una resistencia real difiere de una ideal a alta frecuencia. A baja frecuencia, la diferencia es despreciable.



Tanto la tensión como la corriente estarán en fase. La tensión máxima está representada como V_m . La corriente máxima nunca superará la V_m .

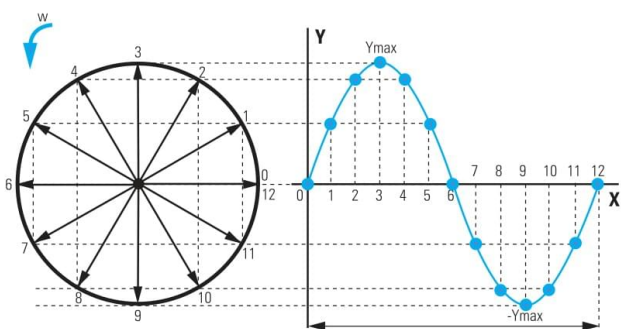
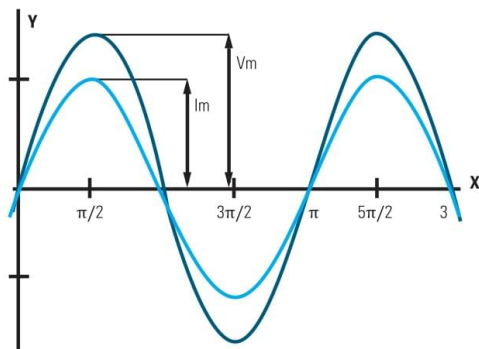


Diagrama fasorial del comportamiento de la tensión y la corriente en distintos puntos.

Inductancia

Cuando generamos una corriente en un conductor, sea cual sea este, estaremos generando un campo magnético por el simple hecho de que la corriente está en movimiento; alrededor de este conductor, el campo magnético generado será de mayor o menor intensidad dependiendo de qué corriente esté fluyendo. Además, sabemos que el campo magnético es un campo vectorial; si medimos en diferentes puntos de este campo, obtendremos dirección y sentido; sobre el conductor podremos determinar que el campo es circular y concéntrico al conductor. Ahora bien, si a este conductor lo enrollamos generando una espiral sobre otro conductor, produciremos un campo electromagnético interior de este segundo conductor, que producirá un efecto de

Ley de Ohm

En un circuito cerrado, la intensidad de la corriente es directamente proporcional a la tensión e inversamente proporcional a la resistencia. En un circuito cerrado con resistencia, la ley de Ohm se cumple perfectamente ya que tanto la tensión como la corriente están en fase, y la resistencia no depende de ninguna variable externa.

resistencia interna o lo que estudiaremos, una **inductancia** (una oposición al flujo de corriente).

El componente que realiza esta tarea es un inductor, que físicamente hablando es una bobina de conductor (por lo general es un hilo de cobre esmaltado, para impedir el contacto entre una espiral y la otra, o de aluminio) enrollado sobre un núcleo que es típicamente un material ferroso (con propiedades magnéticas).

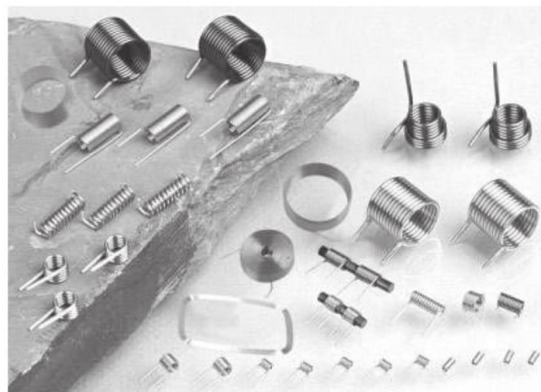
El inductor es el encargado de generar la inductancia, que es un efecto a modo de resistencia que depende tanto del flujo magnético como del material del componente y la longitud de este. Se utiliza este componente para diferenciar señales variables (las rápidas de las lentas).

La inductancia producida por el inductor afecta al circuito una vez puesta en funcionamiento. Esta requiere una fuerza inicial para producirse, pero una vez producida permanece activa por un largo periodo como un efecto de almacenamiento de energía similar al de los capacitores. Podemos decir que la inductancia posee una cierta inercia de corriente. Con una inercia presente en un circuito eléctrico, es posible pensar que a un circuito inductivo le llevará tiempo alcanzar una tensión alta instantáneamente y, por el contrario, le costará reducir su tensión luego de eliminada la fuente de energía.

Para poder medir la inductancia, debemos conocer su expresión matemática:

$$L = \frac{\Phi N}{I}$$

Se trata de la expresión que nos relaciona el flujo magnético en n cantidad de espirales y la corriente que fluye por el componente. La corriente que se analiza es simplemente la que atraviesa en ese momento el inductor y no las corrientes generadas por componentes externos al circuito, como otros inductores, imanes, campos electromagnéticos, etc. La expresión nos asegura que, a mayor tamaño del inductor, le permite aumentar el número de espiras y aumentar el campo magnético; si además se le suma el núcleo férreo (que mejora la conductividad del campo magnético), mejoramos significativamente el valor del campo magnético y la inductancia.



Bobinas inductoras de filamentos de cobre enrollados sobre un núcleo de aire o un núcleo ferroso.

Si podemos obtener las condiciones del componente inductor, es posible determinar su valor mediante sus características geométricas y su permeabilidad (propiedades físicas) utilizando las ecuaciones de Maxwell para determinar que:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$$

Dependerá de μ (permeabilidad magnética), N (número de espiras), A (área transversal del núcleo) y l (longitud de las líneas de flujo). Este último es complicado de calcular si la forma no es toroidal.

Como es dificultoso de calcular el flujo de inductancia, utilizamos una expresión equivalente con elementos más fáciles de medir, como lo es el cambio de tensión del circuito, esto es el voltaje. Utilizamos entonces una expresión que las relacione:

$$V = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

De esta forma, podremos pedir la inductancia en dos momentos dados, y la caída de tensión en el mismo.

Medimos la inductancia como un henry (H):

$$1H = 1 \frac{Wb}{A}$$

Así podemos diferenciar ciertos elementos que son denominados inductivos por presentar el mismo comportamiento. El capacitor es un elemento inductivo ya que sirve para almacenar carga y energía entre sus componentes internos. Los **sensores inductivos** se utilizan para detectar otros elementos conductores, como metales férricos, y con propiedades magnéticas. Al acercarse uno de estos sensores a un metal, se activa una señal que está compuesta por un analizador de campo magnético.

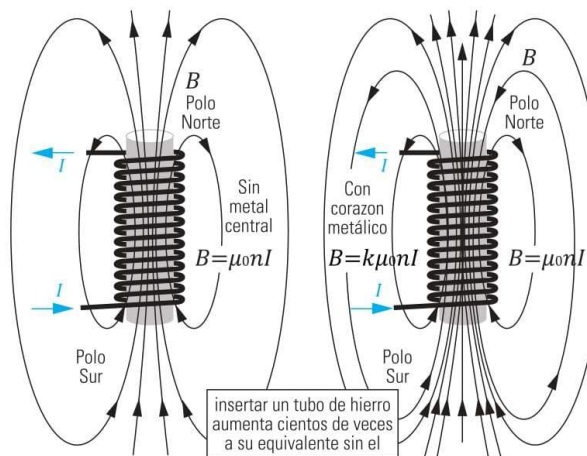
El sensor genera un campo magnético en sus espirales y, al acercarse un material férrico, este conduce parte de este campo disminuyendo la medición.

De esta manera, el sensor detecta el cambio de campo magnético debido a un material presente. Si se puede medir el cambio, puede determinarse el tipo de material gracias a su composición.

Podremos ver todos estos componentes en casi todos los componentes electrónicos, desde placas lógicas a equipos y maquinarias de gran envergadura. Al igual que las resistencias y los capacitores, los inductores están instalados para proteger otros componentes a modo de filtros o paredes de picos de tensión y corriente. Recordemos que muchos de estos están sometidos a corrientes variables y tensiones con valores pico y bajos con mucho margen. Al analizar distintos componentes, podremos ir observando su aplicación y su rol de protección o su rol de filtro en cada etapa de análisis.



Distintos tipos de inductores que están conformados en su interior principalmente por bobinas de cobre, aluminio u otras aleaciones aisladas entre sí.



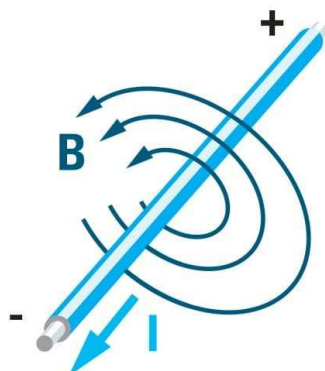
Podemos observar cómo mejora el efecto de inductancia si el núcleo es de ferrita. Se maximizan las líneas de campo magnético.

Fuerza contraelectromotriz

En el bobinado de un motor, al aplicarse una corriente, se produce un efecto eléctrico que genera un campo magnético que acciona la rotación del bobinado. Pero a su vez, al empezar a girar el bobinado, se generan nuevos campos magnéticos que cortan líneas del otro campo magnético y originan una fuerza contraelectromotriz en sentido opuesto al movimiento, que tiende a frenar el bobinado. Se produce este efecto cuando circula corriente.



Generación de campo magnético alrededor de un conductor de cobre. Cada espiral produce su propio campo magnético que, en conjunto, generan el efecto de inductancia.



Corriente alterna en una inductancia

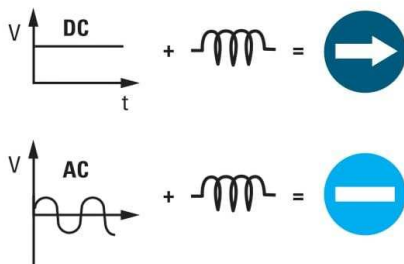
La **corriente alterna** presenta un efecto particularmente interesante sobre una bobina (inductor), ya que es una oscilación senoidal que va a presentar fase, periodicidad, amplitud y frecuencia. El estudio de la inductancia implica algunos efectos variables muy interesantes de conocer. Como sabemos, la corriente alterna presenta la forma matemática:

$$a(t) = A \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$

Recordemos que el inductor es uno de los principales elementos que encontraremos en casi todos los componentes electrónicos, por lo que debemos prestar mayor atención en el momento de estudiarlo.

En corriente continua

Frente a una corriente continua, los elementos inductores se comportan como si estuviesen en cortocircuito, ya que la corriente será constante. La bobina real en régimen permanente (funcionando) se comporta como una resistencia que depende exclusivamente del material del que esté fabricado.



Comportamiento de una bobina frente a la corriente continua y frente a la corriente alterna.

La inductancia es la propiedad de un elemento que se opone al cambio de una corriente eléctrica, muy similar a la resistencia. A diferencia de la resistencia, donde tanto la tensión como la corriente se encuentran en fase, este inductor estará completamente desfasado.

La tensión se encuentra desfasada 90° adelantada con respecto a la corriente. Esto significa que la corriente empieza antes que la tensión. Para entenderlo mejor, en el momento en el que la corriente tiene un valor de 0, la tensión está en un punto máximo; y a su vez, la tensión tendrá un punto mínimo en donde la corriente presente un punto máximo. Este efecto es el que vemos como la **inercia**.

La corriente alterna siempre estará oscilando entre valores positivos y negativos. Ante esto, el inductor presentará un efecto que intente oponerse al producido; mientras más brusco sea ese cambio, más fuerte será esta oposición.

En estos inductores tendremos la **reactancia inductiva**, que es la oposición a los cambios de corriente; será la misma para los inductores ideales o reales en forma de bobina, que se representa como:

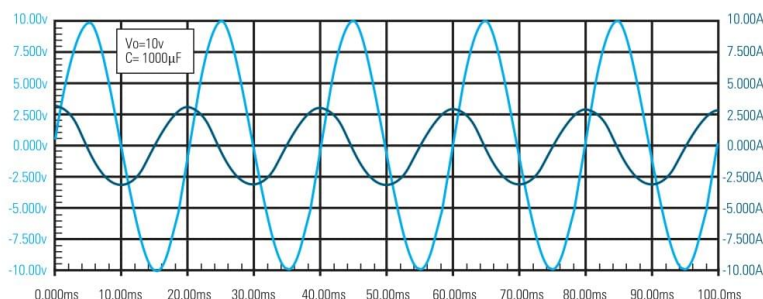
$$X = \omega \cdot L = 2\pi fL$$

Se leerá que la reactancia inductiva es el producto entre la frecuencia angular (o pulsación) y la inductancia. La reactancia depende tanto de la frecuencia de la onda sinusoidal como de la inductancia y poseerá la misma unidad que la resistencia, que es el ohmio (Ω), ya que su efecto es similar al de una resistencia. De acuerdo a la ley de Ohm, circulará una corriente alterna retrasada 90°.

Al ser el inductor un elemento que requiere un cambio de tensión para generar una inducción, existirá un desfase.

La reactancia inductiva se utiliza comúnmente para encender luces de fluorescencia por su efecto de impedimento a cambios bruscos de tensión.





En el gráfico, podemos apreciar el desfase entre la tensión y la corriente. Observamos los mínimos y los máximos coincidentes.

En el circuito con un inductor, se presentará la ley de Lenz que dice que todo conductor sometido a un campo magnético variable crea en sí mismo una corriente inducida opuesta a la corriente que la produce.

Si la corriente cambia de sentido con polaridades amplias y bruscas en un sentido y en el otro, en el inductor se encontrará con mayor resistencia y menos corriente debido a la mayor reactancia inductiva.

En estos circuitos inductivos nuestra fórmula para la corriente presentará la forma de:

$$V_L = I_L \cdot X_L$$

Cuando la corriente aumenta, disminuye como oposición a este incremento. Este efecto se producirá en todo el período, invirtiendo su efecto según la polaridad de la corriente. Si tenemos la expresión de la tensión según:

$$u(t) = V \cdot \text{sen}(\omega t + \beta)$$

Tendremos que la corriente, al estar retrasada (o adelantada) 90°, será:

$$i(t) = \frac{u(t)}{X_L} = I \cdot \text{sen}(\omega t + \beta - 90^\circ)$$

donde:

$$I_L = \frac{V_L}{X_L}$$

La reactancia inductiva se tomó como una magnitud compleja sin parte real solo con parte imaginaria positiva, donde tomaremos a la reactancia inductiva como jX_L .

Para poder representarlo gráficamente utilizaremos el par ordenado:

$$I = (V_L, X_L) = V_L + jX_L$$

Un circuito abierto no tendrá el mismo comportamiento que al cerrarlo. Cuando cerramos el circuito y por ende permitimos el paso de corriente a través del inductor, entonces presentará lo que se llama **propiedades de capacitancia parásitas** (que se representa como un capacitor en paralelo que es en sí parte propia del inductor, ya que depende del devanado del material que forma las espirales). Estas capacidades parásitas permiten cierta acumulación de corriente en su interior. Si a una inductancia le está circulando corriente en un momento

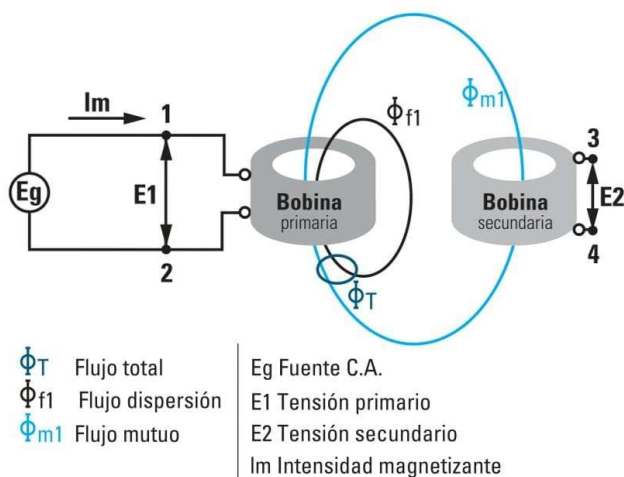
La reactancia inductiva existe en función de la corriente de funcionamiento: a mayor frecuencia, mayor inducción.

determinado, y esta se interrumpe, para que desaparezca totalmente deberíamos aplicarle una tensión infinita. Como esto no es posible, la corriente continúa circulando a través del bobinado y cargará negativamente las capacitancias parásitas. Estas corrientes irán desapareciendo del inductor debido a las pérdidas originadas por el propio material por el que está formado el inductor.

Distintos inductores pueden ser acoplados en serie, en paralelo o en forma mixta sumando sus valores o efectos dentro de los circuitos por medio de los principios de la ley de Lenz. Esta relaciona los cambios producidos por un campo eléctrico mediante la variación del campo magnético. La equivalencia de un inductor equivalente depende de la conexión de los componentes. Para poder analizar estos tipos de circuitos, siempre se debe reducir a componentes unitarios para entender su comportamiento en conjunto.

Receptor	Circuito Equivalente	Oposición a la corriente	Impedancia	Ángulo característico (desfase I con V)
Resistencia		Por resistencia	$Z=R$	0°
Bobina ideal		Por reactancia inductiva	$Z=X_L$	90° en retraso
Condensador		Por reactancia capacitiva	$Z=X_C$	90° en adelanto
Inductivo		Por reactancia y reactancia inductiva	$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{X_L}{R}$	φ° en retraso
Capacitivo		Por reactancia y reactancia capacitiva	$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ $\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{X_C}{R}$	φ° en adelanto

Cuadro comparativo de distintos componentes y sus fasores. Las impedancias equivalentes y su reacción de oposición.



Una bobina puede influir en una segunda por medio de una suma vectorial de campos magnéticos.

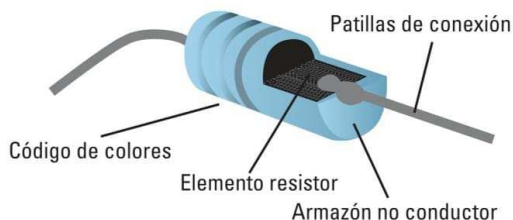
Capacitor

Un **capacitor** consiste básicamente en dos placas metálicas paralelas y separadas por un material dieléctrico. Al aplicar tensión entre las caras metálicas, luego de un cierto tiempo el capacitor se carga, dependiendo dicha carga de la tensión aplicada y del tiempo que esta se ha mantenido aplicada. La capacidad de un capacitor es un factor de proporcionalidad definido como la relación entre la carga adquirida y la tensión aplicada:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Resistencia vs. reactancia

Podemos decir que la resistencia es el valor de oposición al paso de corriente que tiene una resistencia, mientras que la reactancia es el valor de la oposición al paso de corriente de los inductores generados a partir de un campo magnético inducido. La resistencia en el mismo elemento depende del material constitutivo, mientras que la reactancia es un efecto producido por la generación de un campo magnético alrededor de un núcleo.



La resistencia presenta su efecto desde su material constitutivo, y la reactancia es un efecto de la circulación de corriente.

Q se expresa en coulombs (o amperes por segundo) y **V** en volts la capacidad **C** se expresa en farads. Esta unidad (el farad) es muy grande, por lo que generalmente se utilizan submúltiplos de ella tales como **μF**, **nF**, **pF**.

La unidad física de capacidad se define sobre una esfera en el espacio libre con respecto a un punto de referencia. La ley de Coulomb y las ecuaciones de campos de Maxwell proveen las derivaciones de las fórmulas de capacidad para las distintas geometrías. La fórmula fundamental para la capacidad de dos placas paralelas es:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

En donde:

- ♦ ϵ : permeabilidad del dieléctrico.
- ♦ **A**: área de las placas en metros cuadrados.
- ♦ **d**: distancia entre las placas en metros.
- ♦ **C**: capacidad en farads.

Se toma la permeabilidad del vacío ϵ_0 como nivel de referencia, y las permeabilidades de los diferentes materiales se refieren a la del vacío a través de una constante de proporcionalidad **k** (constante dieléctrica):

$$k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

La permeabilidad del vacío o del espacio libre es $8,85 \times 10^{-12}$ (coulomb²/newton m²) o lo que es lo mismo (farad/metro).

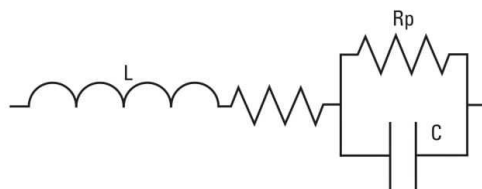
La habilidad de un material dieléctrico para retener cargas almacenadas es lo que llamamos **permeabilidad del material** y la relación de la permeabilidad con la del espacio libre (ϵ_0) es la constante dieléctrica **k**.

La tensión de trabajo de un capacitor es la tensión para la cual el capacitor ha sido diseñado. La tensión de ruptura es aquella tensión que provoca el pasaje de cargas eléctricas a través del dieléctrico; estableciendo una corriente a través de él, se crea un arco entre las placas a través del dieléctrico.

La **rigidez dieléctrica** es la habilidad del dieléctrico de un capacitor para permanecer con la tensión continua aplicada sin que se produzca la ruptura (descarga por arco). Normalmente se especifica para un material dieléctrico a una temperatura dada, en volt/mm.

El valor de capacidad de un capacitor podrá variar principalmente de acuerdo a tres factores que son:

- ♦ **Tensión**: los capacitores electrolíticos y ciertos tipos de cerámicos son afectados por el cambio en el valor y la polaridad de la tensión aplicada.
- ♦ **Frecuencia**: cuando cambia la frecuencia, cambia la constante dieléctrica en decremento con el aumento del valor de la frecuencia.
- ♦ **Temperatura**: al cambiar la temperatura, cambia la constante dieléctrica y el valor de la capacidad.



Circuito eléctrico equivalente de un capacitor.
Se lo utiliza para analizar su comportamiento con la frecuencia y la corriente.



Diferentes modelos de la Jarra de Leyden, capacitor elemental del año 1747.

Corriente alterna en un capacitor

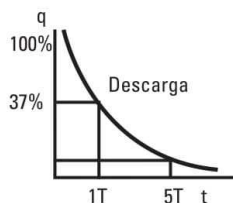
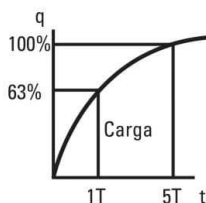
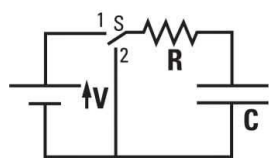
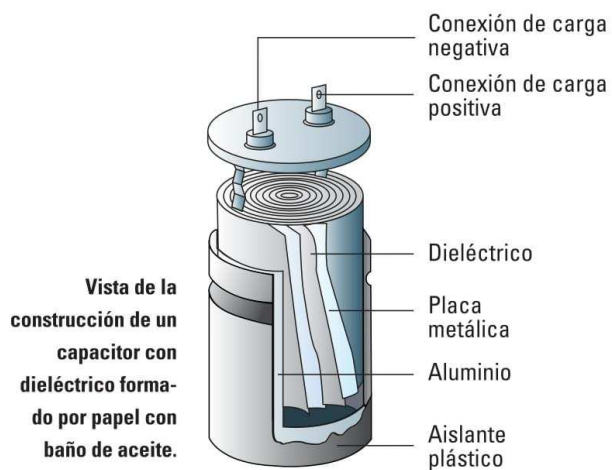
Un capacitor en serie con una resistencia, al serle aplicada una tensión, se carga a un ritmo determinado por la constante de tiempo $T = RC$, la que está determinada por el valor de la capacidad y de la resistencia serie del circuito, la que incluye a las resistencias serie y paralelo (R_s y R_p) del capacitor, y la resistencia de los cables y conectores. Si luego el conjunto resistencia-capacitor es desconectado de la fuente de alimentación y se lo cortocircuita, queda un lazo cerrado formado por la resistencia y el capacitor; esto provoca la descarga del capacitor el cual lo hará a un ritmo determinado por la misma constante de tiempo $T = RC$ anterior.

Este principio de funcionamiento desarrollado sobre la base de la aplicación de una tensión continua sobre un capacitor se repite al aplicarle una tensión de alterna, con una frecuencia f .

Las principales aplicaciones de los capacitores cuando se trabaja con tensiones de alterna son: la de filtro (puede ser sintonizado o no), acoplamiento de señales (con aislación de la continua entre las etapas) o corrección de factor de potencia.

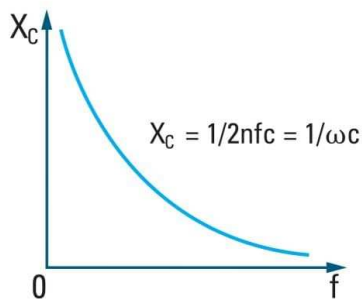
Capacitor en aceite

Un capacitor en aceite está básicamente compuesto por un arrollado de dos hojas de papel de aluminio separadas por un material dieléctrico absorbente (en general papel), el cual está impregnado de aceite (mineral o de castor).

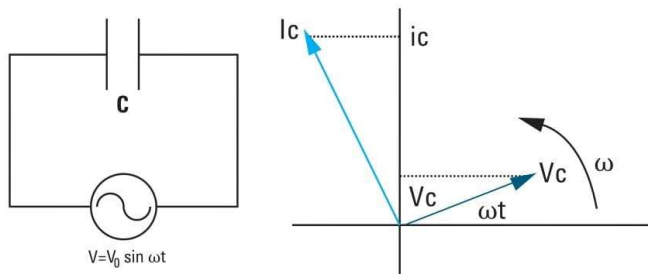


El capacitor, con la llave S en 1, se carga y, en 2, se descarga, tal como se muestra en la figura inferior.

Diferentes tipos de capacitores.

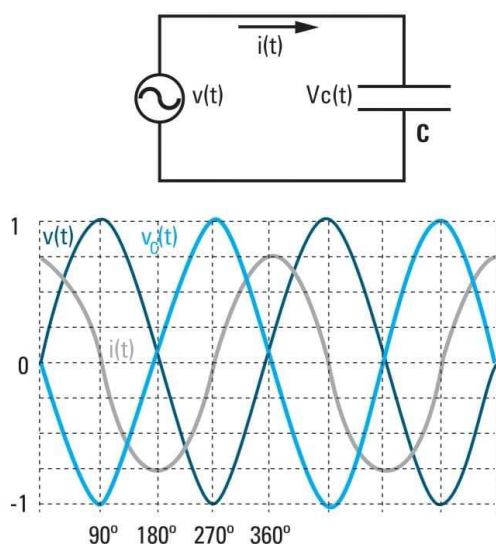


Variación de la impedancia capacitiva X_c de un capacitor con la frecuencia.



Representación en forma vectorial del desfase de la tensión alterna y la corriente que circula por un capacitor.

Cuando se aplica una tensión de alterna a un capacitor, la corriente se halla adelantada 90° respecto a la tensión sobre este.



Un capacitor es un elemento de impedancia reactiva, por lo que la corriente y la tensión están desfasadas.

El ejemplo clásico para el empleo de un capacitor como filtro es el de las fuentes de alimentación donde, después del proceso de rectificado, se filtra la señal para reducir el **ripple** u ondulación de la señal de continua.

En este caso, el capacitor empleado es generalmente electrolítico de aluminio de alta capacidad para lograr así un mejor filtrado y menor ondulación de la señal de continua. Recordemos que:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Asimismo:

$$I_c = \frac{dQ}{dt} = I_o \cos \omega t$$

Por lo cual:

$$Q = \int I_o \cos \omega t dt = \frac{I_o}{\omega} \sin \omega t$$

Vemos que la tensión atrasa 90° respecto de la corriente o, lo que es lo mismo, la corriente adelanta 90° respecto de la tensión sobre el capacitor.

Arranque de motores

Los motores eléctricos, especialmente los monofásicos, cuentan con dos bobinados, uno de marcha y otro de arranque que posee un capacitor en serie. Este conjunto de arranque provee la corriente adicional necesaria para poner al rotor del motor en movimiento, venciendo la inercia durante el período de arranque. Una vez que el motor ha alcanzado el régimen de vueltas de funcionamiento, el interruptor centrífugo se abre y queda conectado únicamente el bobinado de marcha.

EFECTOS DE LA CORRIENTE ALTERNA

Para terminar esta clase, conoceremos los efectos de inductancia vs. capacitor, y también analizaremos la resonancia y los armónicos.

Cuando en un circuito tenemos inductores y capacitores, podemos analizar el comportamiento de las tensiones y las corrientes en forma separada y, luego, analizar el conjunto en forma vectorial.

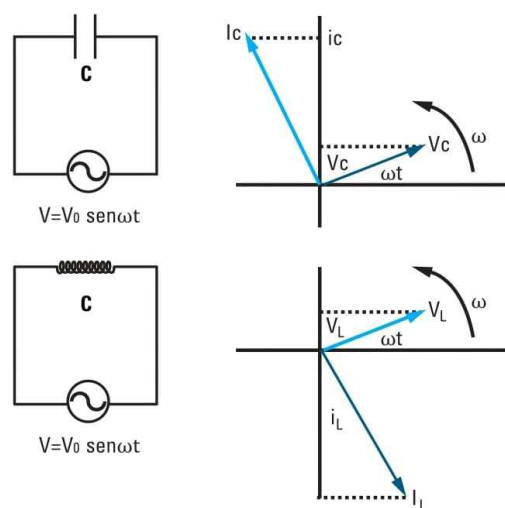
Efecto de inductancia vs. capacitor

En el caso de los capacitores, la corriente se encuentra adelantada 90° respecto a la tensión y, en el caso de los inductores, la corriente se hallará atrasada 90° respecto de la tensión. Aplicando las ecuaciones de combinaciones de series y paralelos, podemos reducir el circuito a un único capacitor y a un único inductor, en serie o en paralelo, de acuerdo a cómo sea la topología del circuito.

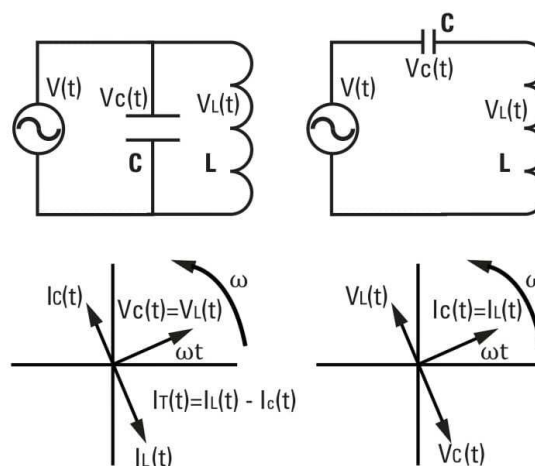
En el caso de un **circuito LC paralelo**, la tensión es igual para ambos componentes, por lo que la corriente será la suma vectorial de las corrientes a través del capacitor y del inductor, y se encuentra desfasada 90° respecto de la tensión. El signo del desfase dependerá de cuál de ambas corrientes sea mayor. La corriente que circula por el capacitor estará a $+90^\circ$ respecto de la tensión aplicada a ambos elementos, y la corriente que circula por el inductor estará a -90° respecto de la misma tensión, por lo cual, ambas corrientes son opuestas y colineales. La corriente resultante será la suma vectorial de ambas y mantendrá el desfase correspondiente a aquella corriente de mayor valor absoluto.

En el caso de un **circuito LC serie**, la corriente es la misma para ambos componentes, por lo que la tensión será la suma vectorial de las tensiones aplicadas a cada componente en particular, y se encuentra desfasada respecto de la corriente en 90° . El signo del desfase dependerá de cuál de ambas tensiones sea mayor.

En los elementos reactivos, la corriente presentará siempre un desfase de 90° respecto de la tensión aplicada.



Comparación del desfase entre la corriente y la tensión en un capacitor y en un inductor.



Circuito LC serie y paralelo. Estudio de las tensiones y corrientes en cada caso.



Resonancia

Con el término **resonancia** nos estamos refiriendo a un conjunto de fenómenos relacionados con los movimientos periódicos (o cuasiperiódicos) en que se produce (se amplifica) el reforzamiento de una oscilación al someter el sistema a oscilaciones de una frecuencia determinada.

En electrónica, la resonancia eléctrica es el fenómeno que se produce al coincidir la frecuencia propia de un circuito con componentes reactivos, con la frecuencia de una excitación externa.

Si tenemos un circuito LC (serie o paralelo), la frecuencia de resonancia del circuito es:

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

La presencia de una resistencia en él logra únicamente agregar una atenuación del pico en corriente en la frecuencia de resonancia.

Por debajo de la frecuencia de resonancia, el circuito se comporta como capacitivo y, por encima, se comporta como inductivo, pero, a la frecuencia de resonancia, el circuito se comportará como resistivo puro.

Analicemos ambos casos (serie y paralelo) calculando las impedancias sin considerar efectos resistivos.

Para un circuito en serie consideremos un circuito serie formado únicamente por capacitores e inductores, por lo que lo podremos reducir a un único capacitor en serie con un único inductor. La impedancia (reactiva pura) será:

$$Z_s = jL\omega - j\frac{1}{\omega C} = j\left(L\omega - \frac{1}{\omega C}\right) = jX_s$$

Entonces la reactancia pura será:

$$X_s = L\omega - \frac{1}{\omega C}$$

En resonancia, los efectos capacitivos e inductivos se anulan, y el circuito se comporta como resistivo puro.

Tal como hemos visto, en la frecuencia de resonancia ambos componentes (capacitiva e inductiva) se anulan entre sí, por lo que deberá existir un valor de $\omega = \omega_0$ que permita que esto se realice:

$$L\omega_0 = \frac{1}{\omega_0 C}$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Para un circuito paralelo, consideremos un circuito serie formado únicamente por capacitores e inductores, por lo que lo podremos reducir a un único capacitor en paralelo con un único inductor. La impedancia (reactiva pura) será:

$$Z_p = \frac{jL\omega \frac{1}{\omega C}}{jL\omega + \frac{1}{\omega C}} = \frac{jL\omega}{1 - \omega^2 LC} = jX_p$$

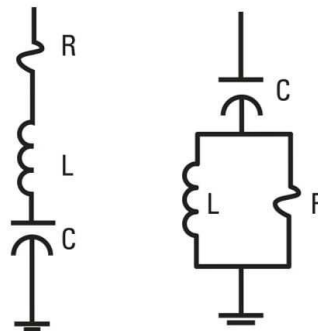
Entonces la reactancia pura será:

$$X_p = \frac{L\omega}{1 - \omega^2 LC}$$

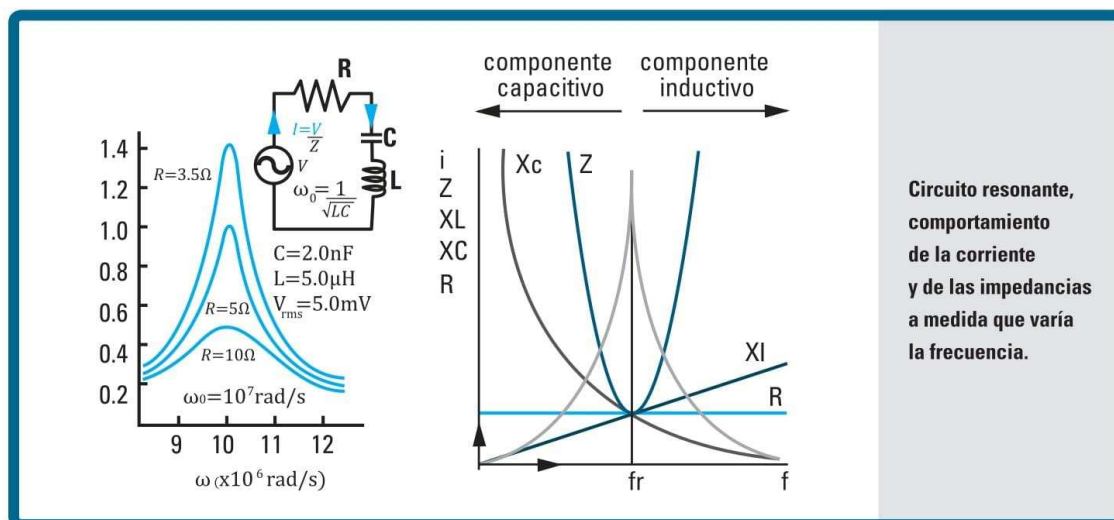
Independientemente de que el circuito sea serie o paralelo, la ω_0 es la misma y se calcula como la inversa de la raíz cuadrada del producto de L y C.

Corrientes y tensiones en circuitos LC

La corriente en el capacitor tendrá siempre un desfase de 180° respecto de la corriente sobre el inductor. Esto se produce debido a que la corriente sobre el capacitor tiene un desfase de $+90^\circ$ sobre la tensión en el capacitor, y la corriente sobre el inductor tiene un desfase de -90° sobre la tensión en el inductor. Como la tensión es común a ambos componentes, el desfase entre corrientes es de 180° .



A la izquierda, tenemos un circuito sintonizado RLC y, a la derecha, un filtro pasaaltos.



Armónicos

Analicemos en primer lugar qué son los **armónicos** y, luego, quiénes los producen y qué problemas pueden acarrear. Los armónicos los tendremos presentes en sistemas eléctricos de corriente alterna y son frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema, y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.

Esta reducción de amplitud no es directamente proporcional al múltiplo considerado, es decir, la amplitud de la segunda armónica (frecuencia doble de la fundamental) no tiene por qué poseer la mitad de la amplitud de esta. Lo que sí sabemos es que las amplitudes de los armónicos disminuyen a medida que aumenta el orden de la armónica; en general, las armónicas de orden igual o mayor a 5 son prácticamente despreciables.

$$a_0 > a_1 > a_2 > a_3 > a_4 > a_5 > a_6 \dots$$

$$b_0 > b_1 > b_2 > b_3 > b_4 > b_5 > b_6 \dots$$

Toda instalación de energía eléctrica puede tener presencia de armónicos. Los armónicos de corriente son los más preocupantes, puesto que generan efectos negativos.

Al analizar el comportamiento de los armónicos en un circuito, no podemos estudiar armónico por armónico, lo habitual es trabajar únicamente con valores correspondientes a la distorsión armónica total (THD), la que sí puede establecerse.

Q de un circuito serie

El factor Q de un circuito también es conocido como factor de selectividad o factor de calidad del circuito. Cuanto menor sea la resistencia R del circuito, más selectivo será, o sea, su factor de calidad Q será mayor. A Q lo podemos calcular como:

$$Q = \frac{L\omega_0}{R}$$

Se buscan, en general, valores de Q entre 10 y 100.

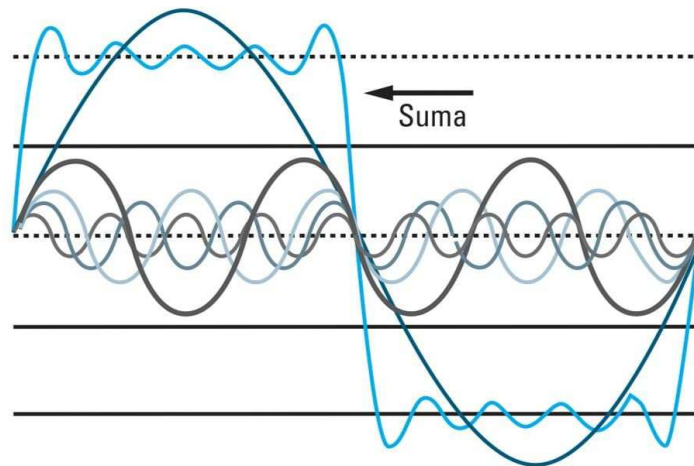
Por debajo de la frecuencia de resonancia, el circuito se comporta como capacitivo y, por encima, como inductivo.

¿TE RESULTA ÚTIL?

Lo que estás leyendo es el fruto de trabajo de cientos de personas que ponen todo de sí para lograr un mejor producto. Utilizar versiones "pirata" desalienta la inversión y da lugar a publicaciones de menor calidad.

**NO ATENTES CONTRA LA LECTURA.
NO ATENTES CONTRA TI.
COMPRA SOLO PRODUCTOS ORIGINALES.**

Si tenés alguna duda, comentario o querés saber más sobre nuestros productos, puedes contactarte con nuestro Servicio de atención al lector: usershop@redusers.com



Distorsión armónica total, la señal sinusoidal pura (fundamental) se ha deformado por haberse sumado a ella las armónicas presentes en la línea.

Tipos de equipos que generan armónicos:

- ◊ Fuentes de alimentación conmutadas o también fuentes de switching (SMPS).
- ◊ Estabilizadores electrónicos adecuados para entregar iluminación fluorescente.
- ◊ Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS).
- ◊ Motores eléctricos.

Finalmente, podemos mencionar los métodos para reducir los armónicos:

- ◊ Filtros pasivos.
- ◊ Transformadores de aislación.
- ◊ Soluciones activas.

Problemas producidos por los armónicos:

- ◊ Sobrecarga de los capacitores de corrección del factor de potencia.
- ◊ Ruido y posibles daños en circuitos electrónicos.
- ◊ Alteraciones en la forma de onda de la línea.
- ◊ Vibraciones excesivas y sobrecalentamiento en motores de inducción.

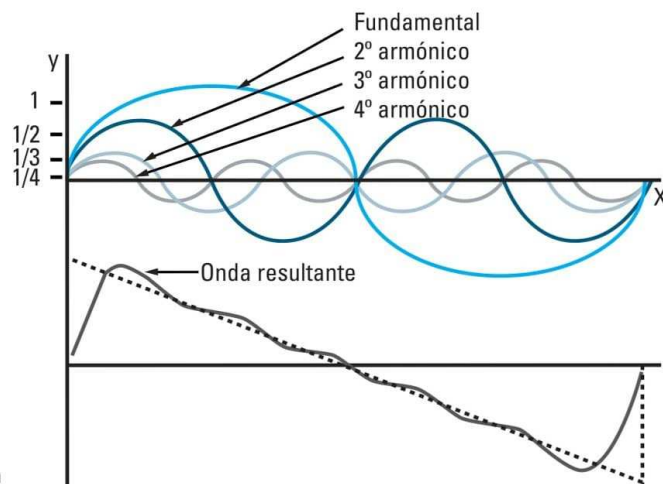
Los armónicos deben ser evitados en todo circuito eléctrico u electrónico a fin de mejorar su rendimiento.

Serie de Fourier

En el estudio de las ondas, se aplica la serie de Fourier. Esta expresa que cualquier forma de onda se puede obtener como la suma de senos y cosenos de la frecuencia fundamental y sus múltiplos (armónicos), multiplicando cada término por un coeficiente (a_n o b_n) más un término a_0 el cual representa la componente de tensión continua que puede estar presente en la forma de onda considerada.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

La forma de onda final se obtiene como la suma de la fundamental y sus armónicas, afectadas cada una de ellas por un coeficiente, dando así las diferentes amplitudes.



EN ESTA CLASE VEREMOS...

5

Características de los circuitos RL, RC y RLC, tanto serie como paralelos. También aplicaremos la resonancia en circuitos de tipo RLC.

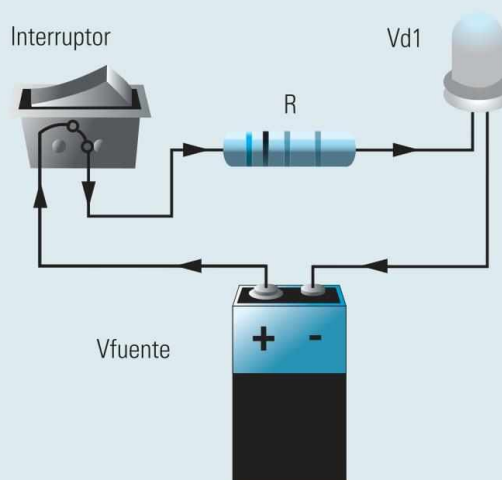
En la clase anterior conocimos la forma en que se genera la corriente alterna y analizamos sus valores normales. También revisamos la aplicación de la corriente alterna en elementos pasivos, caracterizamos las inductancias y capacitores, y vimos la aplicación de la corriente alterna en estos componentes. Para terminar, analizamos los efectos propios de la corriente alterna, y conocimos qué son la resonancia y los armónicos.

En esta clase conoceremos los circuitos serie, determinaremos la impedancia, la caída de tensión y veremos la respuesta natural de los circuitos denominados RL, RC y RLC.

Asimismo, caracterizaremos los circuitos paralelos, analizando la corriente de cada rama, la suma vectorial y el ángulo de desfase, tanto para circuitos RL como para circuitos RC y RLC. Para terminar, obtendremos la resonancia en los circuitos RLC tanto serie como paralelos.

Sumario

- 098 Circuitos serie**
Características y análisis de diversos circuitos serie.
- 112 Circuitos paralelos**
Aplicación de la corriente alterna sobre elementos pasivos.
- 120 Resonancia**
Aplicación del fenómeno de la resonancia en circuitos RLC serie y paralelo.



CIRCUITOS SERIE

En esta sección analizaremos diversos circuitos serie, conoceremos elementos tales como la impedancia total, la caída de tensión en cada componente y la corriente que circula, entre otros.

Un **circuito serie** es una configuración de conexión en la que podemos ver que los bornes o las terminales de los dispositivos (ya sean generadores, resistencias, condensadores, interruptores u otros) se conectan en forma secuencial. De esta forma, la terminal de salida de un dispositivo se conecta a la terminal de entrada del siguiente dispositivo.

En donde:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

$$Z_L = jX_L = j\omega L = j2\pi fL$$

$$Z_T = R + Z_L = R + jX_L$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

Circuito RL serie

Un **circuito RL serie** es aquel que incluye una resistencia y una bobina conectadas en serie. La corriente en ambos elementos es la misma.

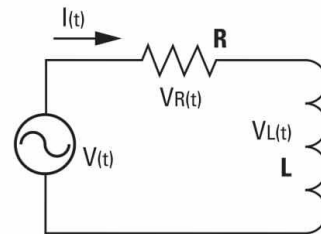
En un circuito RL serie, la impedancia (oposición que presenta un circuito a una corriente al aplicar un voltaje) total Z_T será la suma de las impedancias de cada componente:

La tensión del generador $V(t)$ es la suma de las caídas de tensión en la resistencia $V_R(t)$ y en el inductor $V_L(t)$.

$$V(t) = V_0 \sin \omega t = V_R(t) + V_L(t)$$

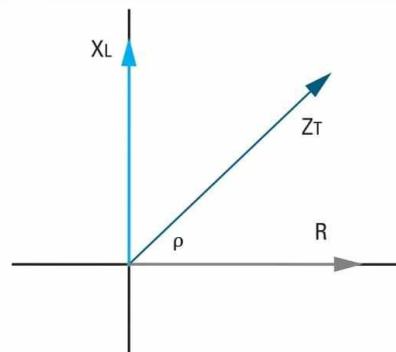
Circuitos RL

Los **circuitos RL** son aquellos que contienen una **resistencia** y una **bobina** (inductor) que tiene autoinductancia. Esto quiere decir que evita cambios instantáneos en la corriente del circuito, puesto que se considera mucho menor a la del inductor.



Circuito RL serie. La corriente que circula por el circuito es única y atraviesa tanto a la resistencia como al inductor.

Diagrama vectorial de la impedancia total Z_T en un circuito RL serie.



Si aplicamos la ley de Ohm, podemos calcular las tensiones en la resistencia $V_R(t)$ y en el inductor $V_L(t)$:

En la resistencia:

$$V_R(t) = RI(t)$$

En el inductor:

$$V_L(t) = -L \frac{dI(t)}{dt}$$

Si consideramos que en un circuito inductivo la corriente se atrasa 90° respecto de la tensión, tenemos:

$$I_L(t) = I_{0L} \text{sen}(\omega t - 90^\circ)$$

$$V_L(t) = -\omega L I_{0L} \cos(\omega t - 90^\circ) = V_{0L} \text{sen} \omega t$$

O, lo que es lo mismo, podemos expresar que:

$$I_L(t) = I_{0L} \text{sen} \omega t$$

$$V_L(t) = V_{0L} \text{sen}(\omega t + 90^\circ)$$

Tal como sabemos, la corriente que circula por el circuito es única, por lo tanto:

$$I_L(t) = I_R(t) = I_0 \text{sen} \omega t$$

Asimismo, en la resistencia, la tensión y la corriente están en fase, por lo cual:

$$V_R(t) = R I_R(t) = V_{0R} \text{sen} \omega t$$

Por lo tanto, la tensión $V(t)$ será la suma vectorial de $V_R(t)$ y de $V_L(t)$, resultando:

$$V(t) = V_{0L} \text{sen}(\omega t + 90^\circ) + V_{0R} \text{sen} \omega t = V_0 \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

V_0 se calcula como:

$$V_0 = \sqrt{V_{0R}^2 + V_{0L}^2}$$

Y el ángulo φ se calcula como:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V_{0L}}{V_{0R}}$$

Si en lugar de considerar a la corriente como:

$$I(t) = I_0 \text{sen} \omega t$$

Establecemos que la tensión es:

$$V(t) = V_0 \text{sen} \omega t$$

Tenemos que la corriente será entonces:

$$I(t) = I_0 \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

En un inductor, la corriente siempre estará atrasada 90° respecto de la tensión aplicada.

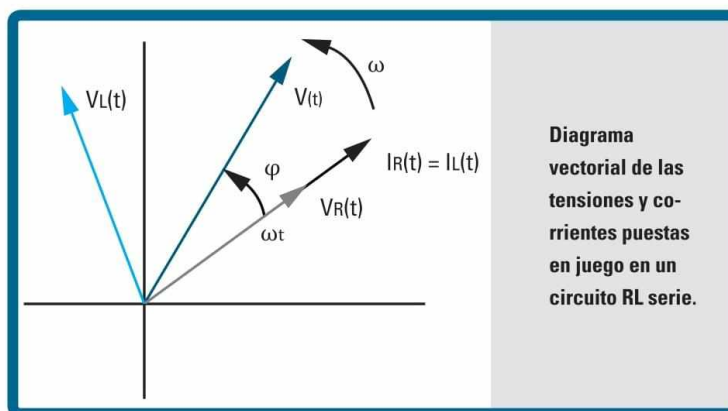
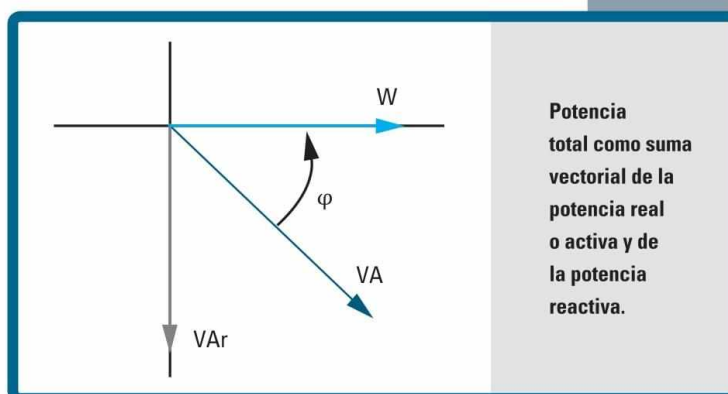


Diagrama vectorial de las tensiones y corrientes puestas en juego en un circuito RL serie.

El **factor de potencia** o $\cos \varphi$ es la relación que existe entre la potencia activa o real del circuito y la potencia total en el mismo circuito RL serie.

$$\text{Factor de Potencia} = \frac{\text{Potencia real}}{\text{Potencia total}} = \frac{W}{VA} = \cos \varphi$$

La potencia real o activa es la que produce trabajo, mientras que la potencia total es la suma vectorial de la potencia real o activa y de la potencia reactiva, que no produce trabajo.



Potencia total como suma vectorial de la potencia real o activa y de la potencia reactiva.

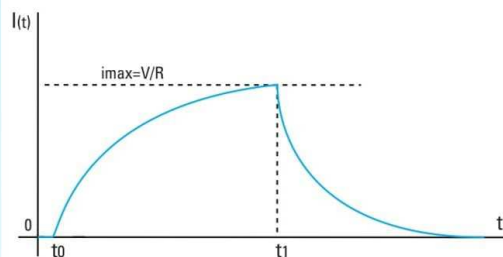
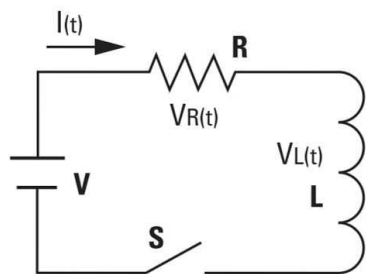
La potencia reactiva (VAr) estará atrasada 90° respecto de la potencia activa (W), por lo cual la potencia total (VA) también estará atrasada respecto de la potencia real, pero en un ángulo φ menor a 90° .

Esto es importante pues a nivel industrial y en consumos eléctricos domiciliarios, se busca que el factor de potencia o $\cos \varphi$ sea lo más cercano a 1 pues, de esa manera, el circuito se comportará como resistivo puro.

La forma de corregir el $\cos \varphi$ de un circuito, es decir, acercar su valor al ideal, consiste en reducir la potencia reactiva de origen inductivo; para ello se instalan capacitores en el circuito.

Recordemos que la corriente en un capacitor se adelanta 90° respecto de la tensión, mientras que la corriente en el inductor se atrasa 90° respecto de la tensión. Por eso, la potencia reactiva del capacitor será opuesta a la potencia reactiva del inductor, y la potencia reactiva total será la suma vectorial de ambas, que por ser colineales da como resultado la diferencia algebraica.

Circuito RL con un interruptor para conectar la batería V en t_0 .



Transitorio de carga a partir de t_0 y de descarga a partir de t_1 .

Si tenemos un circuito RL serie y en el instante t_0 le conectamos una batería (cerramos el interruptor S), la corriente no se establece en forma inmediata en su valor máximo, igual a V/R , sino que **crece en forma exponencial** hasta su valor máximo.

Sucede de esta manera por la presencia del inductor, en el que aparece un campo electromagnético que crece en forma proporcional con la corriente que circula. Este campo de autoinducción presenta una **fuerza electromotriz** que se opone a la tensión aplicada y a la corriente que lo originó. Por lo tanto, el establecimiento del valor máximo de la corriente en el circuito insuere un tiempo mayor, el que resulta completamente necesario para que se alcance el estado estable del circuito.

Similar condición ocurre al desconectar el circuito (abrir el interruptor S): la corriente en el circuito no es nula instantáneamente, sino que **decrece en forma exponencial**.

La curva que describe la corriente durante la descarga es similar a la que describe durante la carga, pero en sentido opuesto.

Lo expresado en los párrafos anteriores puede ser visualizado en forma matemática. Supongamos que, antes de t_0 (instante en el cual se cierra el interruptor S), el circuito está en reposo (en el circuito no se encuentran corrientes ni tensiones aplicadas a los elementos R o L):

$$-V + V_R(t) + V_L(t) = 0$$

$$-V + I(t)R + L \frac{dI(t)}{dt} = 0$$

$$+I(t) \frac{R}{L} + \frac{dI(t)}{dt} = \frac{V}{L}$$

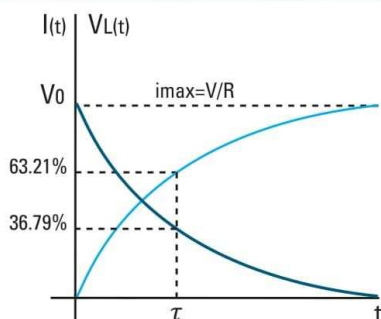
Resolviendo esta ecuación diferencial e integrando, se llega a establecer la corriente en función del tiempo en el circuito:

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

En esta ecuación, la constante es la relación entre el inductor y la resistencia:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

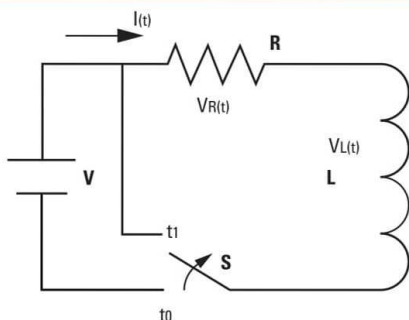
Variación de la corriente y la tensión en un inductor a medida que transcurre el tiempo en un circuito RL serie.



La unidad es el **segundo**, y se la denomina **constante de tiempo del circuito RL**. Desde que se cierra el interruptor S, en el tiempo t la corriente alcanza el 63,21 % de su valor máximo y, en aproximadamente cinco veces más, o $5t$, se alcanza el valor máximo V/R . A partir de este punto, la respuesta natural del circuito ha sido sobrepasada.

En el momento en que se produce la apertura de S luego de que el circuito está en situación estable, es decir, la tensión sobre el inductor es prácticamente nula y la corriente en el circuito es máxima e igual a V/R , se produce el efecto inverso al descrito durante la carga. En el tiempo t , la corriente ha descendido hasta el 36,79 % de su valor máximo sobre L; pasado un tiempo de $5t$ la corriente será nula.

Circuito RL serie que permite realizar la descarga del inductor a partir de t_1 .



En un circuito RL serie, la corriente y la tensión varían sobre el inductor a medida que transcurre el tiempo.



Resistencia R en un circuito RL serie

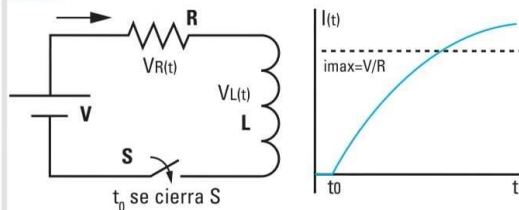
En el momento t_0 en el que se cierra el interruptor S, vemos que la corriente en el inductor comienza a crecer, y la tensión aplicada en él empieza a disminuir. La velocidad de crecimiento de la corriente y de disminución de la tensión está determinada por la constante de tiempo, que depende de la relación entre L y R:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Como la constante de tiempo es inversamente proporcional a R, a medida que R aumenta, la constante de tiempo disminuye, por lo que el crecimiento de la corriente en el inductor es más rápido y llega antes al valor de la corriente máxima. Por otro lado, se debe tener en cuenta que la corriente máxima es la relación entre la tensión aplicada y la resistencia R:

$$I_{\text{máx}} = \frac{V}{R}$$

Por lo tanto, si R aumenta, $I_{\text{máx}}$ disminuye.



1. Comencemos calculando la impedancia:

$$Z_T = R + Z_L = R + jX_L$$

En donde:

$$X_L = \omega L = 100 \Omega$$

$$Z_T = R + Z_L = (100 + j100) \Omega$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{100^2 + 100^2} = 141,421 \Omega$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} = 45^\circ$$

2. Para calcular la corriente y las caídas de tensión, recordemos que:

$$I_0 = \frac{V_0}{Z_T} = \frac{100V}{141,421\Omega} = 0,707A$$

$$V_{0R} = I_0 R = 70,7V$$

$$V_{0L} = I_0 X_L = 70,7V$$

$$V_0 = \sqrt{V_{0R}^2 + V_{0L}^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V_{0L}}{V_{0R}} = 45^\circ$$

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t - \varphi) = 0,707 \sin(\omega t - 45^\circ)$$

3. La constante de tiempo del circuito es:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{1Hy}{100\Omega} = 0,01s$$

Ejemplos numéricos

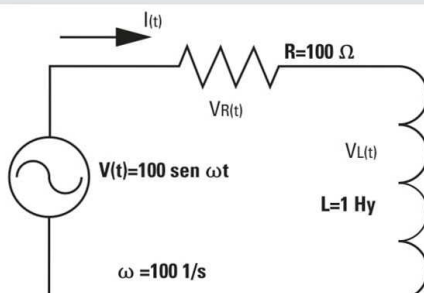
Para el **primer ejemplo numérico** suponemos que estamos frente a un circuito RL serie con $R = 100 \Omega$; $L = 1 Hy$, la frecuencia angular $\omega = 100 \text{ 1/s}$, se pide calcular:

1. La **impedancia total** del circuito.
2. La **corriente que circula** por el circuito, y las caídas de tensión en la resistencia y en el inductor.
3. La **constante de tiempo** del circuito.

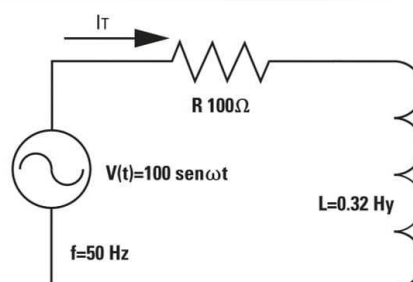
En el **segundo ejemplo numérico** supongamos un circuito RL serie con $R = 100 \Omega$ y $L = 0,32 Hy$, la frecuencia $f = 50 Hz$, se pide calcular:

1. La **impedancia total** del circuito.
2. La **corriente que circula** por el circuito, y las caídas de tensión en la resistencia y en el inductor.
3. La **constante de tiempo** del circuito.

Primer ejemplo numérico, circuito RL serie por resolver.



Segundo ejemplo numérico, circuito RL serie por resolver.





1. Comencemos calculando la impedancia:

$$Z_T = R + Z_L = R + jX_L$$

En donde:

$$X_L = \omega L = 2\pi f 0,32 \Omega = 100,53 \Omega$$

$$Z_T = R + Z_L = (100 + j100,53) \Omega$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{100^2 + 100,53^2} = 141,797 \Omega$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R} = 45^\circ 09'$$

2. Para calcular la corriente y las caídas de tensión recordemos que:

$$I_0 = \frac{V_0}{Z_T} = \frac{100V}{141,797 \Omega} = 0,7052A$$

$$V_{0R} = I_0 R = 70,52V$$

$$V_{0L} = I_0 X_L = 70,89V$$

$$V_0 = \sqrt{V_{0R}^2 + V_{0L}^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V_{0L}}{V_{0R}} = 45^\circ 09'$$

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t - \varphi) = 0,707 \sin(\omega t - 45^\circ)$$

3. La constante de tiempo del circuito es:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0,32Hy}{100\Omega} = 3,2ms$$

Circuito RC serie

En un **circuito RC serie**, la impedancia total Z_T será la suma de las impedancias de cada componente:

$$Z_T = R + Z_C = R - jX_C$$

En donde:

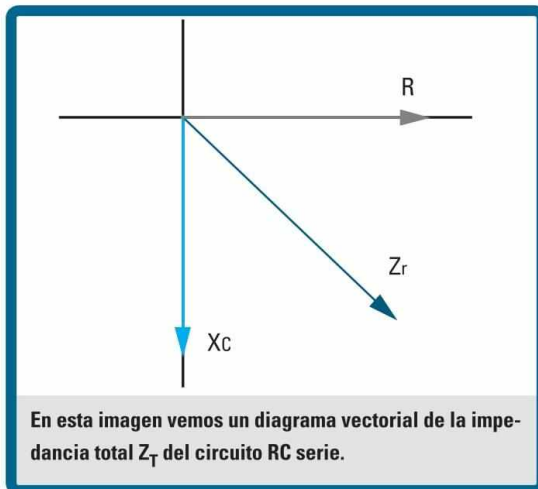
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$Z_C = -jX_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi f C}$$

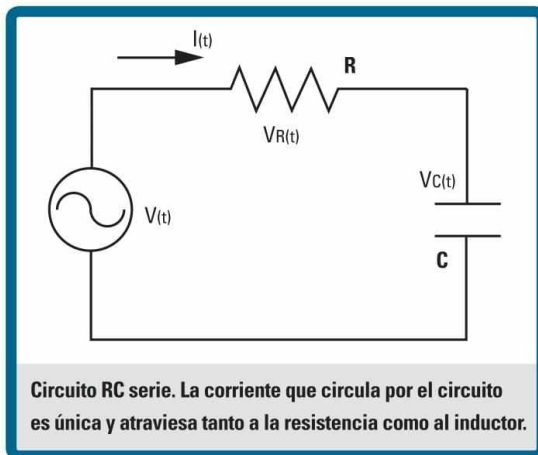
$$Z_T = R + Z_C = R - jX_C$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$\varphi = -\tan^{-1} \frac{X_C}{R}$$



En un circuito RC serie, la corriente que circula por la resistencia es la misma que circula por el capacitor.



La tensión del generador $V(t)$ es la suma de las caídas de tensión en la resistencia $V_R(t)$ y en el capacitor $V_C(t)$:

$$V(t) = V_0 \sin \omega t = V_R(t) + V_C(t)$$

Si aplicamos la ley de Ohm, podemos calcular las tensiones en la resistencia $V_R(t)$ y en el capacitor $V_C(t)$, con lo que nos queda en la resistencia:

$$V_R(t) = RI(t)$$

En el capacitor:

$$I_C(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$$

Circuitos RC

Los **circuitos RC** están compuestos por una **resistencia** y un **condensador**. Se caracterizan porque la corriente puede variar con el tiempo. Cuando el tiempo es igual a cero, el condensador está descargado; en el momento que empieza a correr el tiempo, el condensador comienza a cargarse ya que hay una corriente en el circuito.



Sabemos que la corriente $I(t)$ es la misma que $I_R(t)$ y que $I_C(t)$; asimismo, sabemos que la corriente en el capacitor está adelantada 90° a la tensión aplicada al capacitor.

En un capacitor, la corriente siempre se encontrará adelantada 90° respecto de la tensión aplicada.

Si consideramos que en un circuito capacitivo la corriente adelanta 90° respecto de la tensión, tenemos:

$$I_C(t) = I_{0C} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$I_C(t) = C \frac{dV_{0C} \sin \omega t}{dt} = \omega C V_{0C} \cos \omega t = \omega C V_{0C} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

O, lo que es lo mismo, asumiendo que la tensión se atrasa respecto de la corriente en el capacitor, podemos expresar:

$$I_C(t) = C \frac{dV_{0C} \sin(\omega t - 90^\circ)}{dt} = \omega C V_{0C} \cos(\omega t - 90^\circ) = \omega C V_{0C} \sin \omega t$$

Siendo:

$$I_{0C} = \omega C V_{0C}$$

Tal como sabemos, la corriente que circula por el circuito es única, por lo tanto:

$$I_C(t) = I_R(t) = I_0 \sin \omega t$$

Asimismo, en la resistencia, la tensión y la corriente están en fase, por lo cual:

$$V_R(t) = R I_R(t) = V_{0R} \sin \omega t$$

Por lo tanto, la tensión $V(t)$ será la suma vectorial de $V_R(t)$ y de $V_C(t)$, resultando:

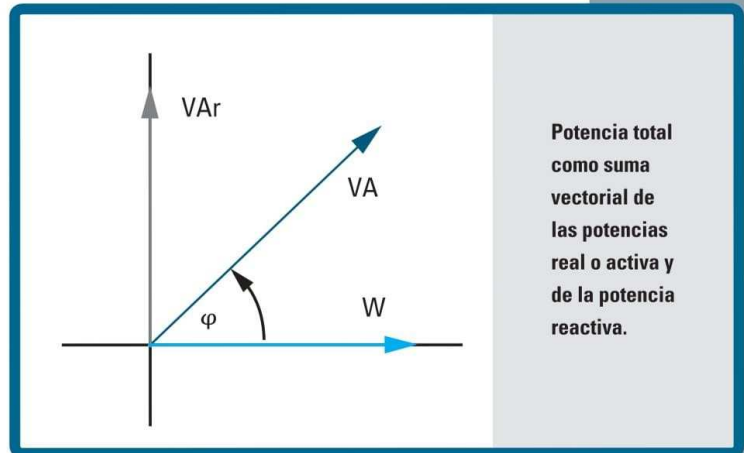
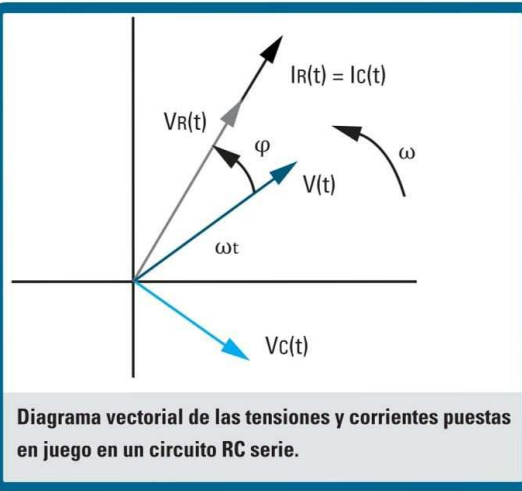
$$V(t) = V_{0C} \sin(\omega t - 90^\circ) + V_{0R} \sin \omega t = V_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

V_0 se calcula como:

$$V_0 = \sqrt{V_{0R}^2 + V_{0C}^2}$$

Y el ángulo φ se calcula como:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V_{0C}}{V_{0R}}$$



La potencia reactiva (VAR) estará adelantada 90° respecto de la potencia activa (W), por lo que la potencia total (VA) también estará adelantada respecto de la potencia real, pero en un ángulo φ menor a 90° .

Tal como hemos visto en circuitos RL serie, en los que la potencia reactiva estaba atrasada respecto de la potencia activa en 90° , disponer de elementos que producen una potencia reactiva opuesta, o sea, adelantada 90° nos permite corregir el factor de potencia.

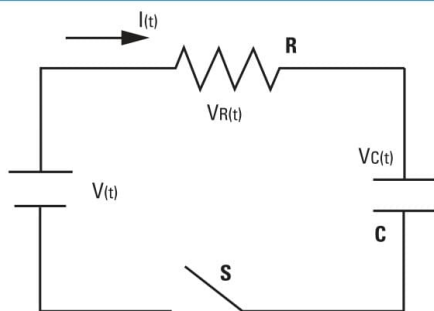
La forma de corregir el $\cos \varphi$ de un circuito, es decir, acercar su valor al ideal (solo potencia activa presente) consiste en reducir la potencia reactiva de origen inductivo. Para ello se instalan capacitores en el circuito.

Recordemos que la corriente en un capacitor se adelanta 90° respecto de la tensión, mientras que la corriente en el inductor se atrasa 90° respecto de la tensión. Por eso, la potencia reactiva del capacitor será opuesta a la potencia reactiva del inductor y la potencia reactiva total será la suma vectorial de ambas, que por ser colineales, dan como resultado la diferencia algebraica.

En un circuito RC serie, la corriente estará adelantada respecto de la tensión en un ángulo φ menor a 90° .



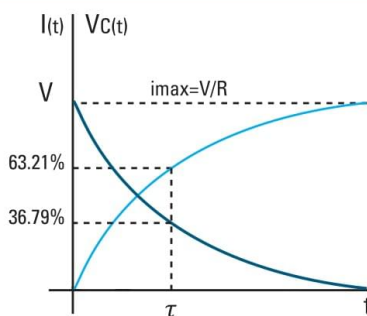
Circuito RC con un interruptor para conectar la batería V en t_0 .



Si tenemos un circuito RC serie y en el instante t_0 le conectamos una batería (cerramos el interruptor S), la tensión aplicada sobre el capacitor no se establece en forma inmediata en su valor máximo, igual a V , sino que esta crecerá en forma exponencial hasta su valor máximo.

Ello es así pues en el capacitor las cargas se van acumulando por la presencia de la corriente. Esta acumulación de cargas se opone a la circulación de la corriente, que disminuye a medida que la tensión aumenta, por lo tanto, el establecimiento del valor máximo de la tensión sobre el capacitor insinúa un tiempo de aproximadamente cinco veces, que es el necesario para que el circuito alcance un estado estable.

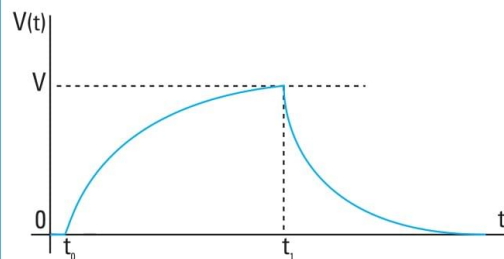
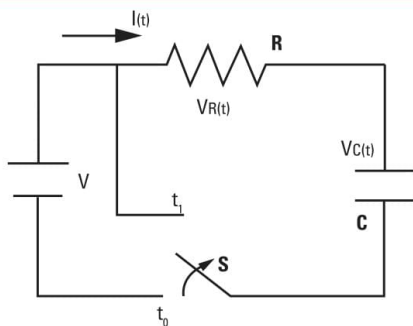
Variación de la corriente y la tensión en un capacitor a medida que transcurre el tiempo en un circuito RC serie.



Similar condición ocurre al desconectar el circuito (abrir el interruptor S): la tensión sobre el capacitor no es nula instantáneamente, sino que decrece en forma exponencial.

La curva que describe la tensión sobre el capacitor durante la descarga es similar a la que describe durante la carga, pero en sentido opuesto.

Circuito RC serie que permite efectuar la descarga del capacitor a partir de t_1 .



Transitorio de carga a partir de t_0 y de descarga a partir de t_1 .

Lo expresado en el apartado anterior puede ser visualizado en forma matemática. Supongamos que antes de t_0 (instante en el cual se cierra el interruptor S), el circuito está en reposo (en el circuito no se encuentran corrientes ni tensiones aplicadas a los elementos R o C):

$$I_R(t) + I_C(t) = 0$$

$$\frac{V}{R} + C \frac{dV(t)}{dt} = 0$$

Resolviendo esta ecuación diferencial e integrando, se llega a establecer la corriente en función del tiempo en el circuito:

$$V(t) = V(e^{-t/\tau})$$

En esta ecuación, la constante τ está determinada por el capacitor y la resistencia:

$$\tau = RC$$

La unidad es el **segundo**, y se la denomina **constante de tiempo del circuito RC**. Desde que se cierra el interruptor S, en el tiempo t la tensión alcanza el 63,21 % de su valor máximo, y en aproximadamente $5t$ se alcanza el valor máximo V . A partir de este punto, la respuesta del circuito ha sido sobrepasada.

En el momento en que se produce la apertura de S, luego de que el circuito se encuentra en estado estable, es decir, la tensión sobre el capacitor es prácticamente la tensión V de la batería y la corriente en el circuito es casi nula, se produce el efecto inverso al descrito durante la carga. En el tiempo t , la tensión ha descendido hasta el 36,79 % de su valor máximo; pasado nuevamente un tiempo de $5t$, la tensión será nula.

En un circuito RC serie, la corriente y la tensión varían sobre el capacitor a medida que transcurre el tiempo.



Resistencia R en un circuito RC serie

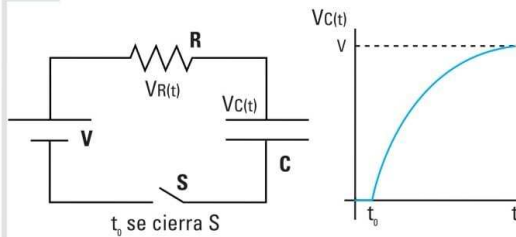
En el momento t_0 en que se cierra el interruptor S, vemos que la tensión en el capacitor comienza a crecer, y la corriente que circula por él empieza a disminuir. La velocidad de crecimiento de la tensión y de disminución de la corriente está determinada por la constante de tiempo, que depende de R y de C:

$$\tau = RC$$

Como la constante de tiempo es directamente proporcional a R, a medida que R aumenta, la constante de tiempo también lo hace, por lo que el crecimiento de la tensión en el capacitor será más lento y demorará más en llegar al valor de la tensión de la batería V. Además, se debe tener en cuenta que la corriente máxima que circula al principio, cuando S es cerrada, es la relación entre la tensión aplicada y la resistencia R:

$$I_{\text{máx}} = \frac{V}{R}$$

Por lo cual, si R aumenta, $I_{\text{máx}}$ disminuye. Esta relación de menor corriente es lo que aumenta el tiempo de establecimiento de las cargas en el capacitor.

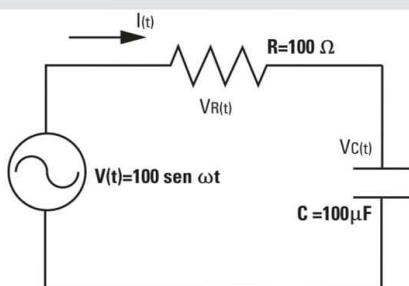


Ejemplo numérico

Supongamos un circuito RC serie con $R = 100 \Omega$, $C = 10 \mu\text{F}$ y la frecuencia angular $\omega = 100 \text{ 1/s}$, se pide calcular:

1. La **impedancia total** del circuito.
2. La **corriente que circula por el circuito**, y las caídas de tensión en la resistencia y en el capacitor.
3. La **constante de tiempo** del circuito.

Circuito RC serie por resolver.



1. Comencemos calculando la impedancia:

$$Z_T = R + Z_C = R - jX_C$$

En donde:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{100 * 10^{-4}} \Omega = 100 \Omega$$

$$Z_T = R + Z_C = (100 - j100) \Omega$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{100^2 + 100^2} = 141,421 \Omega$$

$$\rho = -\tan^{-1} \frac{X_C}{R} = 45^\circ$$

2. Para calcular la corriente y las caídas de tensión recordemos que:

$$I_0 = \frac{V_0}{Z_T} = \frac{100V}{141,421 \Omega} = 0,707A$$

$$V_{0R} = I_0 R = 70,7V$$

$$V_{0C} = I_0 X_C = 70,7V$$

$$V_0 = \sqrt{V_{0R}^2 + V_{0C}^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V_{0C}}{V_{0R}} = 45^\circ$$

$$I(t) = I_0 \text{sen}(\omega t - \varphi) = 0,707 \text{sen}(\omega t - 45^\circ)$$

3. La constante de tiempo del circuito es:

$$\tau = RC = 100 * 10^{-4} = 0,01s$$

Circuito RLC serie

En un **circuito RLC serie**, la impedancia total Z_T será la suma de las impedancias de cada componente:

$$Z_T = R + Z_L + Z_C = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C)$$

En donde:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

$$Z_L = jX_L = j\omega L = j2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$Z_C = -jX_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC}$$

$$Z_T = R + Z_L + Z_C = R + jX_L - jX_C$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

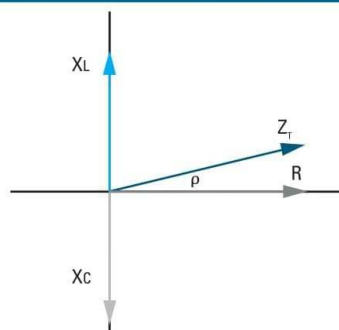
$$\varphi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R}$$



Circuito RLC

Un **circuito RLC** es aquel que tiene como componentes una **resistencia**, un **condensador** y un **inductor** conectados en serie. En un tiempo igual a cero, el condensador tiene una carga máxima ($Q_{\text{máx}}$). Después de un tiempo igual a cero, la energía total del sistema está dada por la ecuación: $U = [Q^2/(2C)] + (LI^2/2)$.

Diagrama vectorial de la impedancia total Z_T del circuito RLC serie.



En un circuito RLC serie, la corriente que circula por la resistencia es la misma que circula por el inductor y por el capacitor mientras que la corriente que circula por el circuito es única, y atraviesa tanto a la resistencia como al inductor y al capacitor.

La tensión del generador $V(t)$ es la suma de las caídas de tensión en la resistencia $V_R(t)$, en el inductor $V_L(t)$ y en el capacitor $V_C(t)$.

$$V(t) = V_0 \sin \omega t = V_R(t) + V_L(t) + V_C(t)$$

Si aplicamos la ley de Ohm, podemos calcular las tensiones en la resistencia $V_R(t)$, en el inductor $V_L(t)$ y en el capacitor $V_C(t)$, con lo que nos queda:

En la resistencia:

$$V_R(t) = RI(t)$$

En el inductor:

$$V_L(t) = -L \frac{dI(t)}{dt}$$

En el capacitor:

$$V_C(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$$

Si consideramos que, en un circuito inductivo, la corriente atrasa 90° respecto de la tensión y, en un circuito capacitivo, adelanta 90° respecto de la tensión, tendremos:

En el inductor:

$$I_L(t) = I_{0L} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$V_L(t) = -\omega L I_{0L} \cos(\omega t - 90^\circ) = V_{0L} \sin \omega t$$

En un circuito RLC serie, la corriente tendrá un ángulo de desfase respecto de la tensión aplicada, que dependerá de la relación de las impedancias inductivas y capacitivas.

O, lo que es lo mismo, podemos expresar que:

$$I_L(t) = I_{0L} \sin \omega t$$

$$V_L(t) = V_{0L} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Siendo:

$$I_{0L} = \frac{V_{0C}}{\omega L}$$

En el capacitor:

$$I_C(t) = I_{0C} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$I_C(t) = C \frac{dV_{0C} \sin \omega t}{dt} = \omega C V_{0C} \cos \omega t = \omega C V_{0C} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

De igual manera, asumiendo que la tensión atrasa respecto de la corriente en el capacitor, podemos expresar que:

$$I_C(t) = C \frac{dV_{0C} \sin(\omega t - 90^\circ)}{dt} = \omega C V_{0C} \cos(\omega t - 90^\circ) = \omega C V_{0C} \sin \omega t$$

Siendo:

$$I_{0C} = \omega C V_{0C}$$

Como sabemos, la corriente que circula por el circuito es única, por lo tanto:

$$I_L(t) = I_C(t) = I_R(t) = I_0 \sin \omega t$$

Si es mayor la tensión en el inductor, el ángulo ϕ será positivo, y la tensión adelanta a la corriente, por lo que el circuito se comportará como inductivo.



Asimismo, en la resistencia, la tensión y la corriente están en fase, por lo cual:

$$V_R(t) = RI_R(t) = V_{0R} \sin \omega t$$

Por lo tanto, la tensión $V(t)$ será la suma vectorial de $V_R(t)$, de $V_L(t)$ y de $V_C(t)$, por lo que resulta:

$$V(t) = V_{0L} \sin(\omega t + 90^\circ) + V_{0C} \sin(\omega t - 90^\circ) + V_{0R} \sin \omega t$$

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

V_0 se calcula como:

$$V_0 = \sqrt{V_{0R}^2 + (V_{0L} - V_{0C})^2}$$

Y el ángulo φ se calcula como:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V_{0L} - V_{0C}}{V_{0R}}$$

Si en lugar de considerar a la corriente como:

$$I(t) = I_0 \sin \omega t$$

Establecemos que la tensión es:

$$V(t) = V_0 \sin \omega t$$

Tenemos que la corriente será entonces:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

El ángulo φ dependerá de la diferencia entre las tensiones sobre el capacitor y sobre el inductor.

La potencia reactiva (VAR) estará atrasada 90° respecto de la potencia activa (W) si es origen inductivo (VAR_L) o adelantada 90° si es origen capacitivo (VAR_C), por lo que la potencia total (VA) también estará atrasada o adelantada respecto de la potencia real, en un ángulo φ menor a 90° , dependiendo de la diferencia entre VAR_L y VAR_C .

Recordemos que la corriente en un capacitor adelanta 90° respecto de la tensión, mientras que la corriente en el inductor atrasa 90° respecto de la tensión, por lo tanto, la potencia reactiva del capacitor será opuesta a la potencia reactiva del inductor, y la potencia reactiva total será la suma vectorial de ambas, que por ser colineales, se presenta como la diferencia algebraica. Si en un circuito RLC se han establecido las siguientes condiciones de carga:

$$\begin{aligned} V_C &= V_0 \\ I_L &= I_0 \end{aligned}$$

Estas serán nuestras condiciones iniciales para $t < t_0$. En el instante t_0 se conmuta el interruptor S y comienza a descargarse la energía almacenada. En ese momento, aparece una corriente $I(t)$, y tendremos tensiones sobre cada

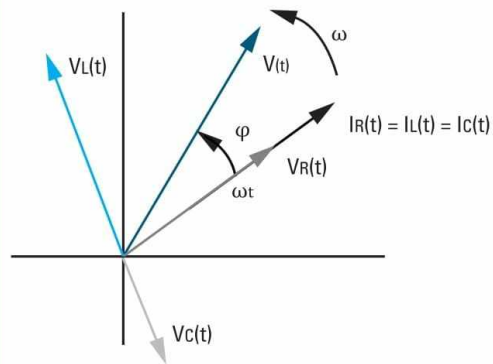
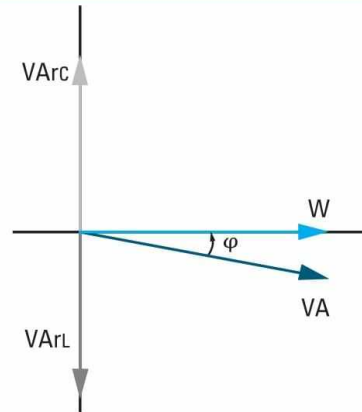


Diagrama vectorial de las tensiones y corrientes puestas en juego en un circuito RLC serie.



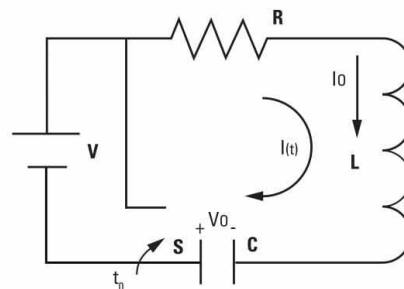
Potencia total como suma vectorial de las potencias real o activa y de las potencias reactivas, de origen inductivo y capacitivo.

elemento del circuito: $V_R(t)$, $V_L(t)$ y $V_C(t)$. Aplicando la ley de Kirchhoff para las tensiones en la malla así definida (sin la batería), queda:

$$V_R + V_L + V_C + V_0 = 0$$

O lo que es lo mismo:

$$RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt + V_0 = 0$$



Establecimiento de las condiciones iniciales para el estudio de la respuesta natural.



Si es mayor la tensión en el capacitor, el ángulo ϕ será negativo, y la corriente adelanta a la tensión, por lo cual el circuito se comportará como capacitivo.

A los efectos de la integral, se calcula entre 0 y t, siendo 0 el instante t, en el que se tiene establecido el régimen estacionario ya indicado previamente, y la llave S pasa a la nueva posición en la que desconecta la batería y cierra el circuito RLC sobre sí mismo.

Dividiendo por L y derivando respecto de t, se tiene:

$$\frac{d^2 I(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{LC} I(t) = 0$$

Esta ecuación diferencial de segundo orden tiene una solución del tipo:

$$I(t) = Ke^{St}$$

Reemplazando y operando se tiene:

$$KS^2 e^{St} + \frac{R}{L} KSe^{St} + \frac{1}{LC} Ke^{St} = 0$$

$$Ke^{St} \left(S^2 + \frac{R}{L} S + \frac{1}{LC} \right) = 0$$

Buscaremos las soluciones de los valores de S que hacen posible la ecuación, descartando por supuesto la trivial, en la que K = 0.

$$S_1 = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$S_2 = -\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

En donde denominamos al cociente de R con 2L como factor de amortiguamiento α y a la raíz cuadrada de la inversa de LC como ω_0 , o frecuencia de resonancia.

$$\alpha = \frac{R}{2L} = \text{Factor de amortiguamiento}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \text{Frecuencia de resonancia}$$

De acuerdo a los valores que se obtengan de este par de elementos, estaremos en presencia de alguna de las siguientes respuestas:

$$\alpha > \omega_0 \text{ Respuesta sobreamortiguada}$$

En este caso, tendremos dos raíces reales y negativas $S_1 = -A_1$ y $S_2 = -A_2$. Donde A es el valor real que asume S al reemplazar los valores de R, L y C en las ecuaciones anteriores.

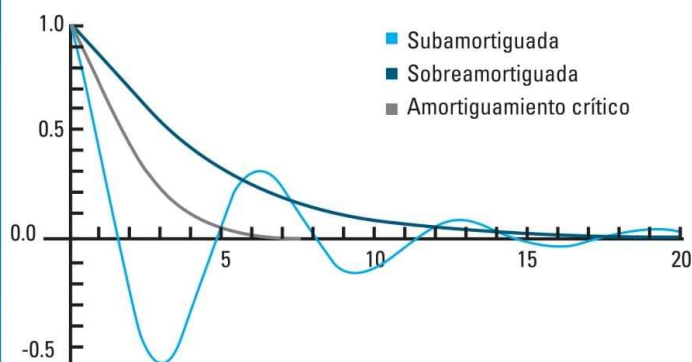
$$\alpha = \omega_0 \text{ Respuesta con amortiguamiento crítico}$$

En este caso, tendremos dos raíces reales e iguales $S_1 = -B_1$ y $S_2 = -B_1$. Donde B es el valor real que asume S al reemplazar los valores de R, L y C en las ecuaciones anteriores.

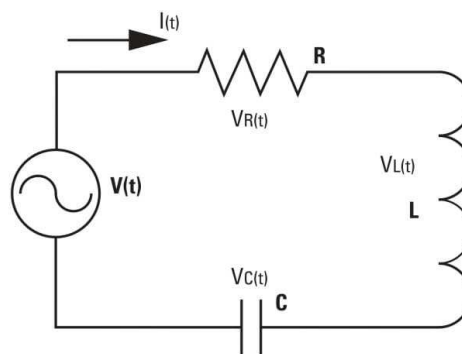
$$\alpha < \omega_0 \text{ Respuesta subamortiguada}$$

Debemos tener en cuenta que si nos encontramos en este caso tendremos dos raíces complejas

$$S_1 = \alpha + j\omega_0 \text{ y } S_2 = \alpha - j\omega_0$$



Respuestas sobreamortiguada, subamortiguada y con amortiguamiento crítico.



Circuito RLC serie al que se le aplica una señal de alterna de frecuencia variable.

La respuesta del circuito depende únicamente de la relación existente entre α y ω_0 .

Si a un circuito RLC serie le aplicamos una señal de alterna, el comportamiento del circuito dependerá de la frecuencia de la señal aplicada.

Hemos visto que:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \text{Frecuencia de resonancia}$$

En esta frecuencia, los efectos inductivos y capacitivos desaparecen, y el circuito se comporta como resistivo puro. Para esta frecuencia se determina el factor Q, al que se denomina **factor de calidad** o **factor de selectividad del circuito**.

Este factor se calcula como:

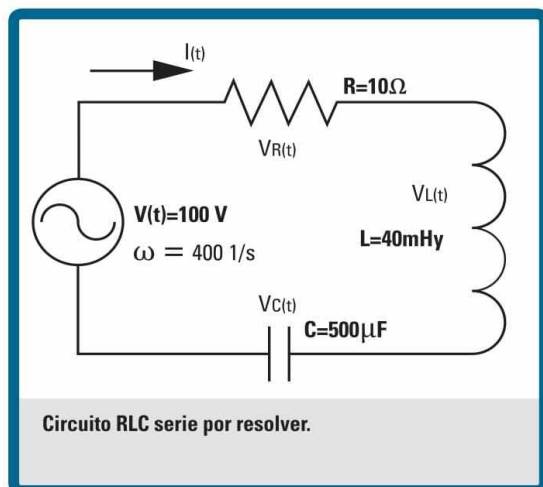
$$Q = \frac{L\omega_0}{R}$$

Normalmente se busca que los circuitos resonantes tengan un valor de Q alto, entre 10 y 100.

Ejemplo numérico

En un circuito RLC serie tenemos que $R = 10 \Omega$, el inductor es de 40 mHy y el capacitor es de 500 μF . Por lo tanto la tensión aplicada es de 100 V y la frecuencia angular ω es 400 1/s. Para resolver esto se pide calcular:

1. La **impedancia total** del circuito.
2. La **corriente que circula por el** circuito y las caídas de tensión en la resistencia, en el inductor y en el capacitor.



3. El **factor de amortiguación** y la **frecuencia de resonancia** del circuito.
4. El **factor de calidad Q** del circuito.

1. Calcularemos la impedancia total del circuito:

$$Z_T = R + Z_L + Z_C = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C)$$

En donde:

$$X_L = \omega L = 400 * 40mH = 16 \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{400 * 500\mu F} = 5 \Omega$$

$$Z_T = R + Z_L + Z_C$$

$$Z_T = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z_T = \sqrt{10^2 + (16 - 5)^2} = 14,866 \Omega$$

$$\rho = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = \tan^{-1} \frac{16 - 5}{10} = 47,726^\circ$$

El circuito se comportará como inductivo.

2. Para calcular las tensiones y la corriente recordemos que:

$$I_0 = \frac{V_0}{Z_T} = \frac{100V}{14,866\Omega} = 6,727A$$

$$V_{0R} = I_0 R = 67,27V$$

$$V_{0C} = I_0 X_C = 33,63V$$

$$V_{0L} = I_0 X_L = 107,63V$$

$$V_0 = \sqrt{V_{0R}^2 + (V_{0L} - V_{0C})^2} = 100V$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{V_{0L} - V_{0C}}{V_{0R}} = 65,56^\circ$$

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t - \varphi) = 6,727 \sin(\omega t - 65,56^\circ)$$

3. El **factor de amortiguación** y la **frecuencia de resonancia** se calculan:

$$\alpha = \frac{R}{2L} = 125$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = 223,6071/s$$

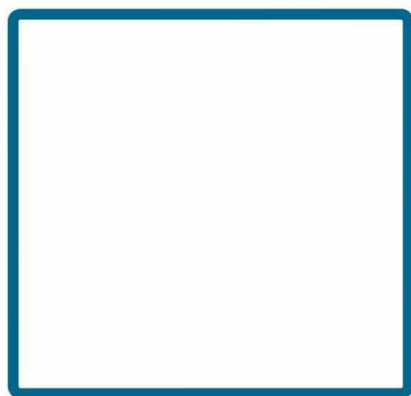
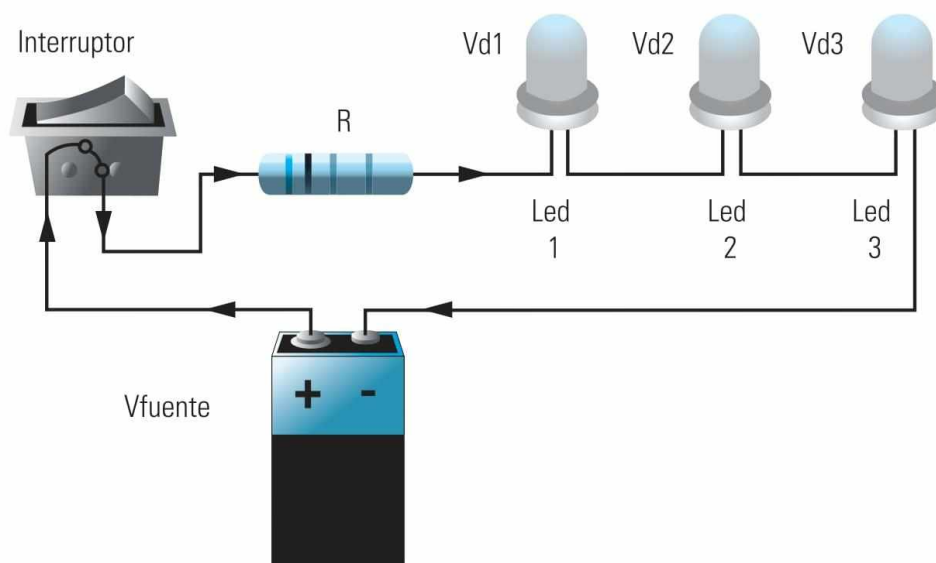
4. El **factor de calidad Q** se calcula como:

$$Q = \frac{L\omega_0}{R} = 0,894$$

CIRCUITO SERIE BÁSICO

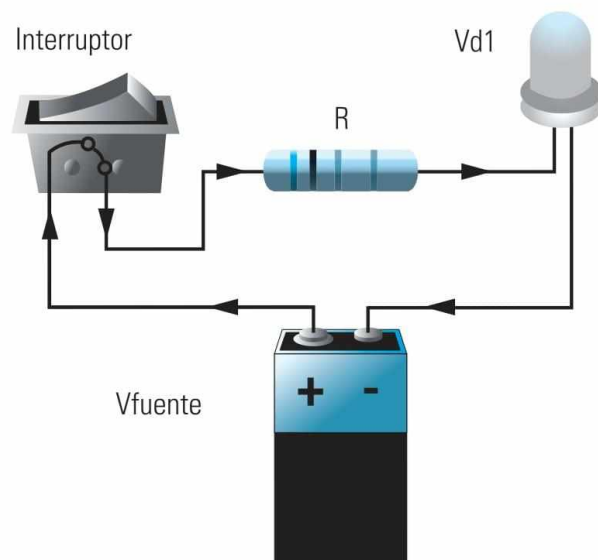
Un circuito en serie presenta los receptores instalados uno a continuación de otro en la línea eléctrica, por esta razón la corriente que atraviesa el primero de los elementos conectados será la misma que la que atraviesa el último.

Circuito básico de polarización directa varios LED's

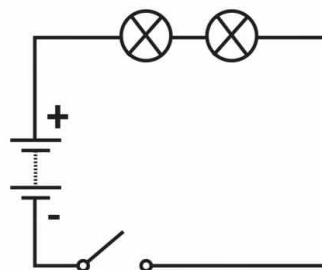
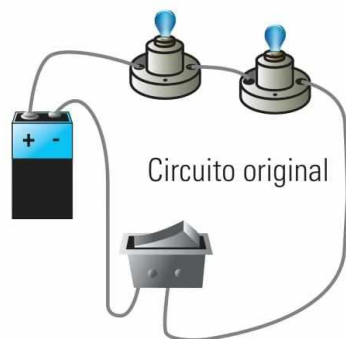


Un ejemplo de circuito conectado en serie son algunas luces navideñas. Se conocen como circuitos cerrados, en ellos la corriente va de forma pareja hacia cada bombilla por lo que si se quema una bombilla se apagaría la línea.

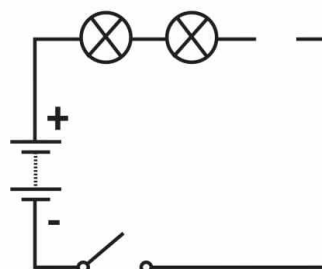
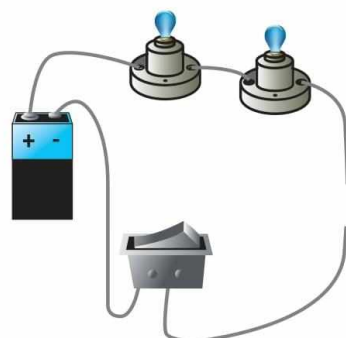
Circuito básico de polarización directa de un LED



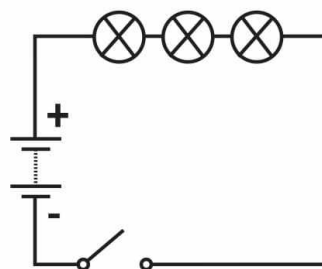
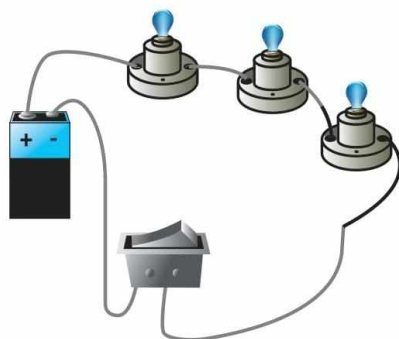
Instalar nuevo elemento en serie



Paso 1: Es necesario cortar el cable conductor



Paso 2: Conectamos el nuevo elemento



Efectos

Es importante saber que en los circuitos que se encuentran en serie podemos observar una serie de efectos, los cuales mencionamos a continuación

- ♦ Mientras aumentamos el número de elementos que conectamos (para este ejemplo una bombilla eléctrica), podremos observar como baja la intensidad luminosa.
- ♦ Cuando por cualquier causa, una de las bombillas deja de funcionar (por avería, desconexión, etcétera), los elementos restantes también dejarán de funcionar. Así podemos verificar que cada bombilla se comporta como un interruptor.

Condiciones

Los circuitos en serie cumplen con las siguientes condiciones:

- ♦ La intensidad que circula por el circuito siempre es la misma.
- ♦ La resistencia total del circuito es la suma de las resistencias de los receptores.
- ♦ El voltaje total del circuito es la suma de los voltajes de cada receptor.

CIRCUITOS PARALELOS

En esta sección conoceremos y analizaremos diferentes tipos de circuitos paralelos. Veremos la corriente en cada rama, la suma vectorial y el ángulo de desfase, entre otros aspectos importantes.

El **circuito eléctrico paralelo** se presenta como una conexión donde los puertos de entrada y de salida de los dispositivos conectados (ya sean generadores, resistencias o condensadores, entre otros) coinciden entre sí.

Circuito RL paralelo

Recordemos que, en un circuito conformado por componentes pasivos en paralelo, la impedancia total (Z_T) del circuito será la inversa de la suma de las inversas de las impedancias de los diferentes componentes. Es decir, si tenemos un circuito formado por una resistencia (R) y un inductor (L) cuya impedancia es X_L , se tiene:

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{Z_L}} = \frac{1}{\frac{R+Z_L}{R \cdot Z_L}} = \frac{R \cdot Z_L}{R + Z_L}$$

Si tenemos un circuito formado por el paralelo de una resistencia y un inductor, la tensión del generador es aplicada a ambos elementos, por lo tanto, tendremos:

$$V(t) = V_R(t) = V_L(t)$$

En donde:

$$V(t) = V_0 \sin \omega t$$

Las corrientes que circularán por cada uno de los componentes serán:

En la resistencia:

$$I_R(t) = I_{0R} \sin \omega t$$

En el inductor:

$$V(t) = -L \frac{dI(t)}{dt}$$

Si consideramos que:

$$I_L(t) = I_{0L} \sin (\omega t - 90^\circ)$$

$$V(t) = -\omega L I_{0L} \cos (\omega t - 90^\circ) = V_0 \sin \omega t$$

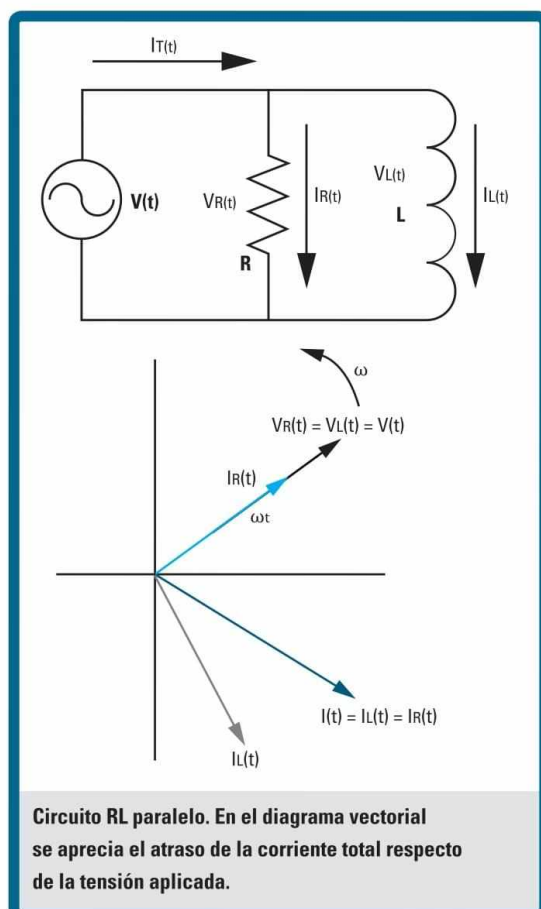
La corriente que circula en la resistencia estará en fase con la tensión aplicada, por otra parte, la corriente que circula en el inductor estará atrasada respecto de la tensión en 90° .

El valor de las componentes I_0 de cada corriente puede ser calculado mediante la ley de Ohm; recordemos que para la resistencia es:

$$I_{0R} = \frac{V_0}{R}$$

Y para el inductor es:

$$I_{0L} = \frac{V_0}{X_L}$$





La tensión $V(t)$ puede ser calculada como:

$$V(t) = V_R(t) = I_R(t)R = 0,6 \times 200\Omega = 120V$$

El valor de impedancia inductiva se puede calcular como:

$$X_L = \frac{V}{I_L} = \frac{120V}{1,04A} = 115,4\Omega$$

Sabiendo que la relación entre X_L y L es $2\pi f$, se tiene que:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{115,4\Omega}{2\pi 100} = 0,184H$$

El ángulo de desfase φ de la corriente total respecto de la tensión aplicada es:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_L}{I_R} = \tan^{-1} \frac{1,04A}{0,6A} = 60^\circ$$

Como sabemos, este desfase estará atrasado respecto de la tensión.

Circuito RC paralelo

Como hemos visto, en un circuito conformado por componentes pasivos en paralelo, la impedancia total (Z_T) del circuito será la inversa de la suma de las inversas de las impedancias de los diferentes componentes. Es decir, si en este caso tenemos un circuito formado por una resistencia (R) y un capacitor (C) cuya impedancia es X_C , se tiene:

$$Z_T = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{Z_C}} = \frac{1}{\frac{R+Z_C}{R \cdot Z_C}} = \frac{R \cdot Z_C}{R + Z_C}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Si tenemos un circuito formado por el paralelo de una resistencia y un capacitor, la tensión del generador es aplicada a ambos elementos, por lo tanto, tendremos:

$$V(t) = V_R(t) = V_C(t)$$

En donde:

$$V(t) = V_0 \sin \omega t$$

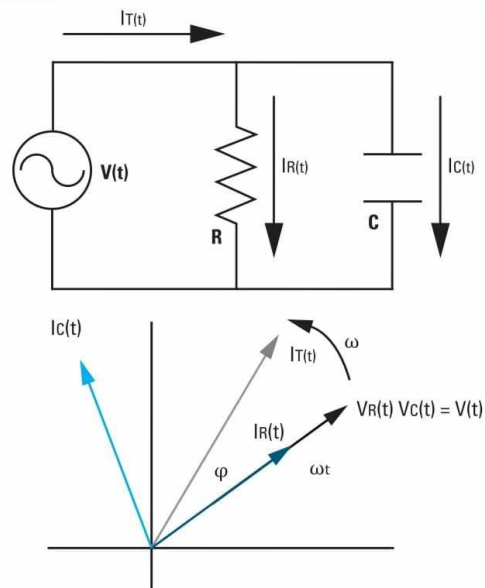
Las corrientes que circularán por cada uno de los componentes serán:

En la resistencia:

$$I_R(t) = I_{0R} \sin \omega t$$

En el capacitor:

$$I_C(t) = C \frac{dV(t)}{dt} = C \frac{dV_0 \sin \omega t}{dt} = \omega C V_0 \cos \omega t = \omega C V_0 \sin(\omega t + 90^\circ)$$



Circuito RC en paralelo. En el diagrama vectorial se aprecia el adelanto de la corriente total respecto de la tensión aplicada.

Siendo:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Será:

$$I_{0C} = \frac{V_0}{X_C} = \omega C V_0$$

Por lo tanto:

$$I_C(t) = I_{0C} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

La corriente que circula en la resistencia estará en fase con la tensión aplicada, en cambio, la corriente que circula en el capacitor estará adelantada en 90° respecto de la tensión. El valor de las componentes I_0 de cada corriente puede ser calculado mediante la ley de Ohm. Recordemos que para la resistencia es:

$$I_{0R} = \frac{V_0}{R}$$

Y para el capacitor es:

$$I_{0C} = \frac{V_0}{X_C}$$

En donde:

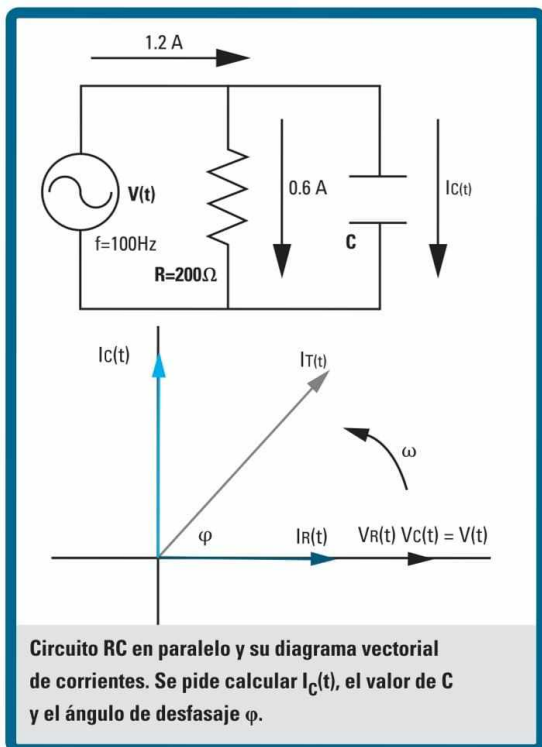
$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

La corriente total será de la forma:

$$I(t) = \left[\sqrt{I_{0C}^2 + I_{0R}^2} \right] \sin(\omega t + \varphi)$$

En donde:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{0C}}{I_{0R}} \right)$$



En un circuito de resistencias y capacitores en paralelo, la corriente siempre se encontrará adelantada a la tensión aplicada.

Veamos un ejemplo numérico (*imagen superior*):
Conocida la corriente total ($I_T = 1,2 \text{ A}$), la corriente en la resistencia ($I_R = 0,6 \text{ A}$), el valor de la resistencia ($R = 200 \Omega$) y la frecuencia del generador ($f = 100 \text{ Hz}$), se solicita calcular la corriente en el capacitor, el valor del capacitor C y el ángulo de desfase entre la corriente total y la tensión aplicada:

$$I_C = \sqrt{(I^2 - I_R^2)}$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$I_C = \sqrt{(1,2^2 - 0,6^2)} = 1,04A$$

La tensión $V(t)$ puede ser calculada como:

$$V(t) = V_R(t) = I_R(t)R = 0,6 \times 200\Omega = 120V$$

El valor del inductor se calcula como:

$$X_c = \frac{V}{I_c} = \frac{120V}{1,04A} = 115,4 \Omega$$

Sabiendo que la relación entre X_C y C es **2f**, se tiene que:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi 100 \times 115,4 \Omega} = 13,8 \mu F$$

El ángulo de desfase φ de la corriente total respecto de la tensión aplicada es:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{I_L}{I_R} = \tan^{-1} \frac{1,04 \text{ A}}{0,6 \text{ A}} = 60^\circ$$

Como sabemos, este desfase será un adelanto respecto de la tensión.

Circuito RC: corriente total

Al aplicar una tensión común a los elementos que conforman el circuito en paralelo, las corrientes que circularán por los diferentes componentes pasivos puestos en paralelo son:

$$I_R(t) = I_{0R} \sin \omega t = \frac{V_0 \sin \omega t}{R}$$

$$I_C(t) = \frac{V_0 \sin \omega t}{jX_C} = I_{0C} \sin (\omega t + 90^\circ)$$

Sumando ambas, tenemos:

$$I(t) = I_R(t) + I_C(t)$$

O lo que es lo mismo:

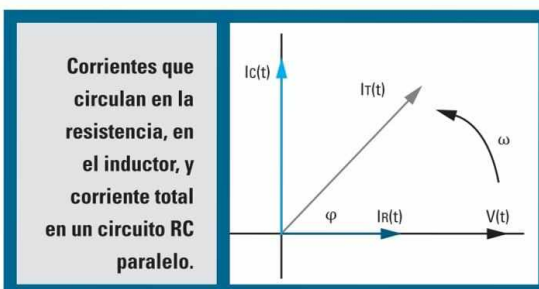
$$I(t) = I_{0R} \sin \omega t + I_{0C} \sin (\omega t + 90^\circ)$$

Operando matemáticamente, se llega a:

$$I(t) = \left[\sqrt{I_{0L}^2 + I_{0R}^2} \right] \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

En donde:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{0C}}{I_{0R}} \right)$$





Circuito RLC paralelo

Este tipo de circuitos se puede encontrar en los sintonizadores de equipos de comunicaciones, entre otros. Si el circuito RLC en paralelo tiene algún elemento variable (inductor o capacitor), puede ser sintonizado a diferentes frecuencias. Así, se logra establecer la frecuencia de operación necesaria en cada caso. Analizaremos en este punto el comportamiento general de un circuito RLC paralelo.

En un circuito RLC en paralelo, la impedancia total será la combinación de las impedancias de los tres elementos, a saber: La impedancia de la resistencia R , la impedancia del inductor L y la impedancia del capacitor C serán:

♦ Resistencia: R

♦ Inductor: $X_L = \omega L$

♦ Capacitor: $X_C = \frac{1}{\omega C}$

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_C}$$

$$\frac{1}{Z_T} = \frac{Z_L Z_C + R Z_C + R Z_L}{R Z_L Z_C}$$

Operando matemáticamente y reemplazando cada elemento Z por su correspondiente valor, se obtiene:

$$Y_T = \frac{1}{Z_T} = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = \frac{1}{R} + j\left(\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega L}\right)$$

Siendo Y_T la admitancia del circuito.

El módulo de la impedancia es:

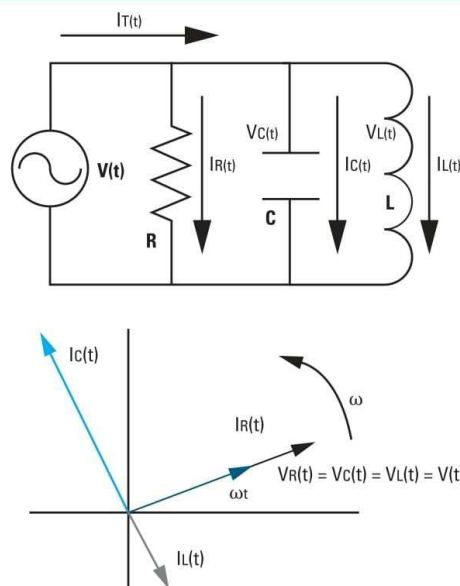
$$Z_T = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$$

Y el ángulo de la impedancia es:

$$\rho = \tan^{-1} \left[-\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) R \right]$$

Vemos que esta impedancia así definida es compleja, tendrá una parte real y una parte imaginaria. La parte real $\frac{1}{R}$ se encontrará siempre en fase con la tensión aplicada al circuito, y la parte imaginaria $\left(\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega L}\right)$ se hallará desfasada respecto de la tensión aplicada. Su ángulo de desfase variará de acuerdo con qué componente tenga más peso en el término.

Si $\omega^2 LC$ es mayor a 1, tendremos un adelantamiento por efecto de la capacidad; si es menor a 1, encontraremos un atraso por efecto de la inductancia. En el caso de la igualdad con cero, el desfase no existe y, entonces, el circuito



Circuito RLC en paralelo y configuración de las corrientes que circulan por cada elemento respecto de la tensión aplicada.

se comporta como resistivo puro. Calcularemos ahora las corrientes en el circuito:

$$V(t) = V_R(t) = V_C(t) = V_L(t)$$

En donde:

$$V(t) = V_0 \sin \omega t$$

Las corrientes que circularán por cada uno de los componentes serán:

En la resistencia:

$$I_R(t) = I_{0R} \sin \omega t$$

En el inductor:

$$V(t) = -L \frac{dI(t)}{dt}$$

Si consideramos que:

$$I_L(t) = I_{0L} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$V(t) = -\omega L I_{0L} \cos(\omega t - 90^\circ) = V_0 \sin \omega t$$

En el capacitor:

$$I_C(t) = C \frac{dV(t)}{dt} = C \frac{dV_0 \sin \omega t}{dt} = \omega C V_0 \cos \omega t = \omega C V_0 \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Siendo:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Encontramos:

$$I_{0C} = \frac{V_0}{X_C} = \omega C V_0$$

El término $\omega^2 LC$ determinará si existe adelanto o atraso de la corriente respecto de la tensión aplicada.

Corrientes en un circuito RLC paralelo

En el circuito RLC paralelo tendremos una única tensión aplicada por igual a todos los elementos (R, L, C), la que determinará, de acuerdo a cada uno, la corriente que circula por el circuito. La corriente total será la suma vectorial de las tres corrientes presentes y presentará un cierto grado de desfase φ respecto de la tensión aplicada. Este dependerá del carácter inductivo, capacitivo o resistivo del circuito.

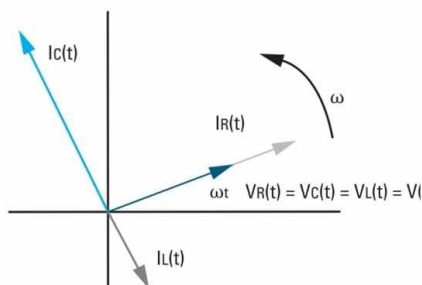
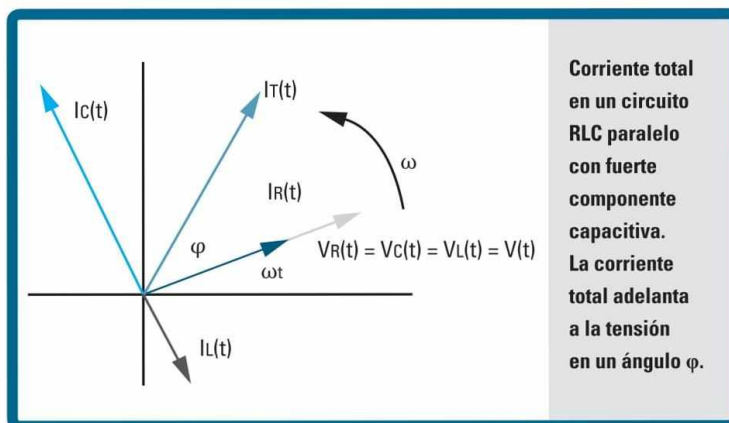
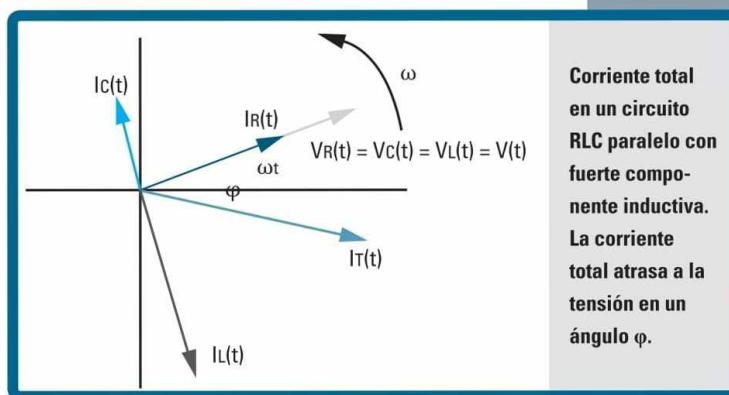


Diagrama polar de las corrientes presentes en un circuito RLC paralelo.



Corriente total en un circuito RLC paralelo con fuerte componente capacitiva. La corriente total adelanta a la tensión en un ángulo φ .



Corriente total en un circuito RLC paralelo con fuerte componente inductiva. La corriente total atrasa a la tensión en un ángulo φ .

Por lo tanto:

$$I_C(t) = I_{0C} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Las tres corrientes serán entonces:

$$I_R(t) = I_{0R} \sin \omega t$$

$$I_C(t) = I_{0C} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$I_L(t) = I_{0L} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

La corriente total $I_T(t)$ será la suma vectorial de las tres.

$$I(t) = \left[\sqrt{(I_{0C} - I_{0L})^2 + I_{0R}^2} \right] \sin(\omega t + \varphi)$$

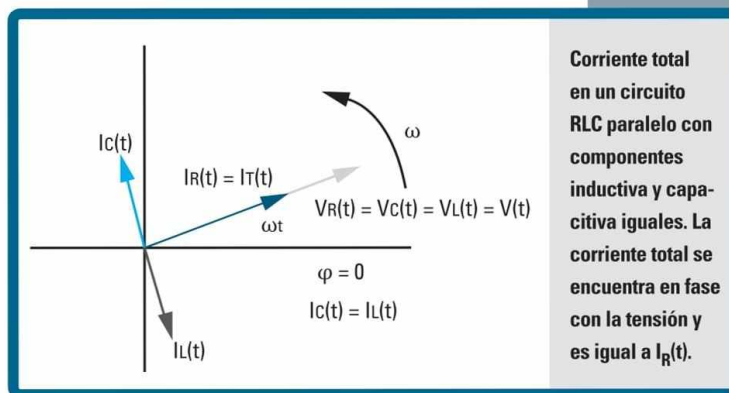
En donde:

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{0C} - I_{0L}}{I_{0R}} \right)$$

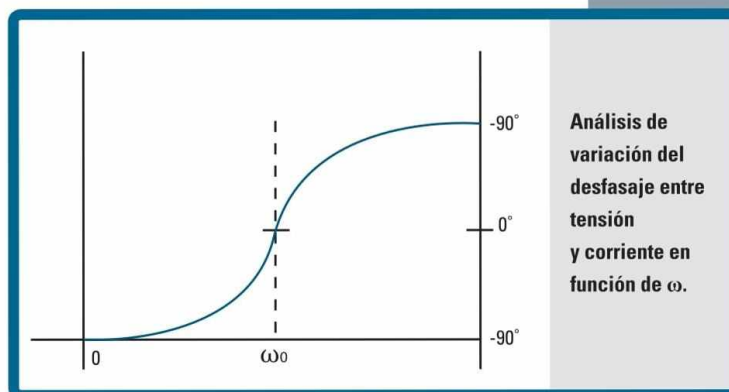
La corriente total $I_T(t)$ en un circuito RLC en frecuencias inferiores a ω_0 se halla adelantada respecto de la tensión y, por encima de ω_0 se halla atrasada respecto de la tensión.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Resolvamos un problema: en un circuito RLC paralelo, tenemos un generador cuya velocidad angular ω es de 100 rad/s, una resistencia R de 200 Ω , un capacitor C de 20 μF



Corriente total en un circuito RLC paralelo con componentes inductiva y capacitiva iguales. La corriente total se encuentra en fase con la tensión y es igual a $I_R(t)$.

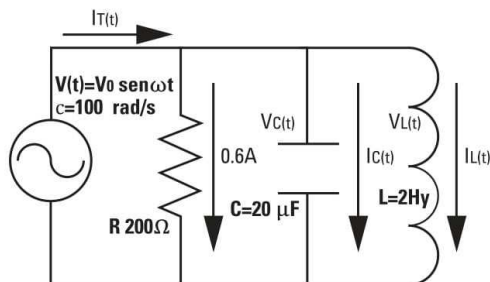


Análisis de variación del desfase entre tensión y corriente en función de ω .



y un inductor L de 2 Hy. La corriente que circula en la resistencia es de 0,6 A, se pide calcular las corrientes que circulan en el capacitor, en el inductor, la corriente total y el ángulo de desfase respecto de la tensión $V(t)$.

Circuito RLC en paralelo. Se pide calcular $I_T(t)$, $I_L(t)$, $I_C(t)$ y el ángulo de desfase φ .



Como conocemos $R = 200 \Omega$ y la corriente $I_{OR} = 0,6$ A, por la ley de Ohm tenemos:

$$V_0 = RI_{OR} = 200 \cdot 0,6 = 120V$$

Por lo que la tensión aplicada (en fase con la corriente que circula en el resistor) es:

$$V(t) = V_0 \text{sen} \omega t = 120 \text{sen} \omega t$$

La corriente I_{OC} en el capacitor será entonces de acuerdo a lo ya visto:

$$I_{OC} = \frac{V_0}{X_C} = \omega C V_0 = 100 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 0,24A$$

Y la corriente I_{OL} en el inductor será entonces de acuerdo a lo ya visto:

$$I_{OL} = \frac{V_0}{X_L} = \frac{V_0}{\omega L} = \frac{120}{100 \cdot 2} = 0,6A$$

La corriente total será:

$$I(t) = \left[\sqrt{(I_{OC} - I_{OL})^2 + I_{OR}^2} \right] \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

$$I(t) = \left[\sqrt{(0,24 - 0,6)^2 + 0,6^2} \right] \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

$$I(t) = \left[\sqrt{(-0,36)^2 + 0,6^2} \right] \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

$$I(t) = \left[\sqrt{0,1296 + 0,36} \right] \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

$$I(t) = \left[\sqrt{0,4896} \right] \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

$$I(t) = 0,7 \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

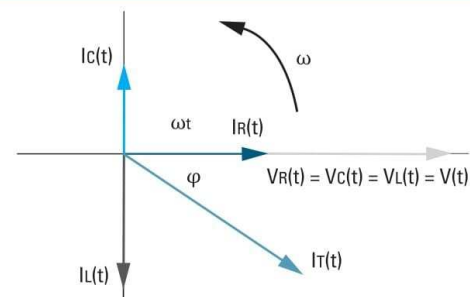


Diagrama vectorial de las corrientes puestas en juego en el problema planteado.

Debemos calcular ahora el ángulo de desfase. Sabemos que este será de atraso, pues la componente reactiva de la corriente resultante (que depende del capacitor y del inductor) está retrasada respecto de la tensión.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{OC} - I_{OL}}{I_{OR}} \right)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{0,24 - 0,6}{0,6} \right) = -31^\circ$$

De esta forma, hemos resuelto el problema antes planteado calculando las corrientes en juego, y el desfase existente entre la corriente total y la tensión aplicada.

RedUSERS
COMUNIDAD DE TECNOLOGIA

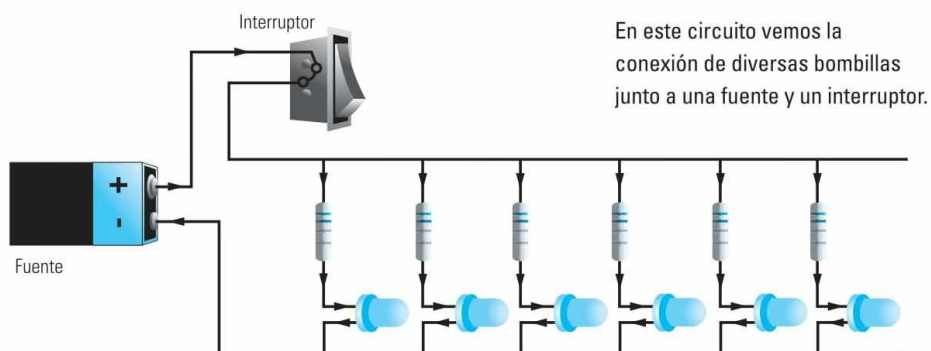
Noticias a diario.



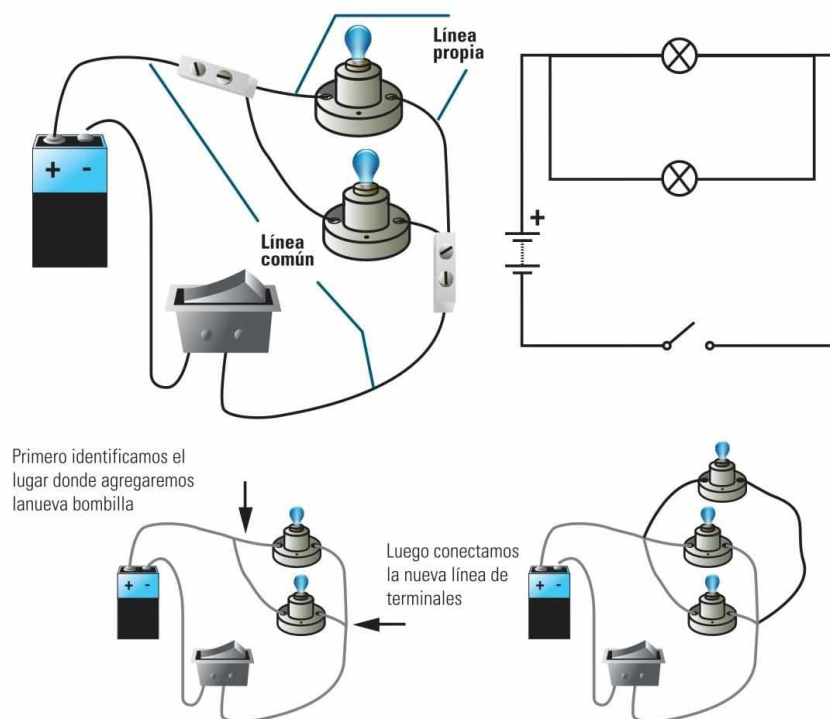
CIRCUITO PARALELO BÁSICO

Los circuitos paralelos presentan los receptores conectados a la fuente de alimentación en forma independiente; es decir, cada uno posee su propia línea, aunque parte de esta línea es común a los demás elementos.

Conexión de circuitos paralelos



Conectar un nuevo elemento en un circuito paralelo



EN ESTA CLASE VEREMOS...

6

La generación de energía eléctrica trifásica y sus características, sistemas desequilibrados y factor potencia en las conexiones trifásicas.

En la clase anterior vimos los circuitos serie, analizamos la impedancia, la caída de tensión y la respuesta natural de los circuitos RL, RC y RLC.

También caracterizamos los circuitos paralelos, mediante el análisis de la corriente de cada rama, la suma vectorial y el ángulo de desfase, tanto para circuitos RL como para circuitos RC y RLC. Finalmente, vimos la resonancia en los circuitos RLC tanto serie como paralelos.

En esta clase nos dedicaremos a profundizar en los sistemas trifásicos. Veremos las características de estos sistemas y conoceremos el generador elemental. También analizaremos los sistemas de conexión estrella y triángulo.

Conoceremos los sistemas equilibrados y desequilibrados, la variación de tensión de neutro, su corriente y los problemas en el corte del conductor de neutro. Para terminar, veremos en detalle la potencia trifásica. Para ello, nos encargaremos de efectuar el cálculo de la potencia en sistemas trifásicos, conoceremos los detalles relacionados con el factor de potencia y entregaremos algunos ejemplos numéricos importantes.

Sumario

- 122 La generación trifásica**
Características de la generación trifásica y de los sistemas de conexión relacionados.
- 130 Sistemas desequilibrados**
Análisis de los sistemas de energía equilibrados y desequilibrados. Importancia del neutro y los problemas que se pueden presentar.
- 136 Potencia trifásica**
Detalles de la potencia trifásica y características del factor de potencia.



LA GENERACIÓN TRIFÁSICA

Profundizaremos en las características de la generación trifásica y en los sistemas de conexión relacionados con ella.

La **generación trifásica** de energía es la forma más común de los conductores y la que provee un uso más eficiente de la electricidad. La utilización de electricidad en forma trifásica se aprovecha mayoritariamente en industrias donde muchas de las máquinas funcionan con motores adaptados para esta tensión.

Las **corrientes trifásicas** se generan mediante alternadores que presentan tres bobinas o grupos de bobinas, que están enrollados sobre tres sistemas de piezas polares equidistantes entre sí. En este sentido, debemos saber que el retorno de cada uno de estos circuitos o fases se acopla en un punto, denominado **neutro** –si el sistema está equilibrado, es cero–, por lo que el transporte puede ser efectuado usando solamente tres cables.

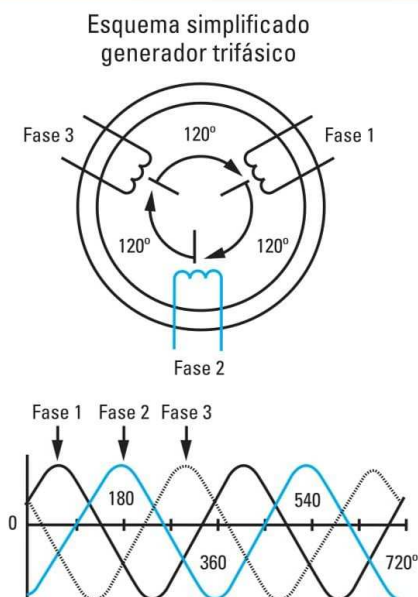
Las ventajas de utilizar un sistema alterno trifásico son las siguientes:

- ♦ Ahorro en los costos de materiales en líneas de transmisión y distribución eléctrica.
- ♦ Generación de campos giratorios.
- ♦ Potencia instantánea constante.

Las máquinas eléctricas de generación trifásica tienen los devanados de las fases desplazados aproximadamente 120° eléctricos en el espacio del entrehierro.

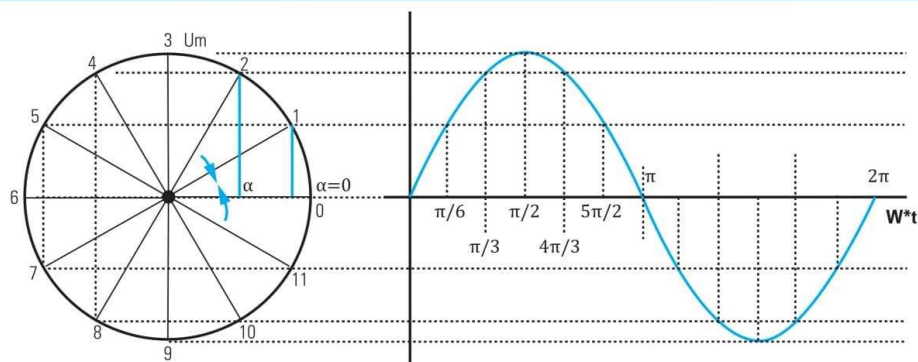
Es decir, un **sistema trifásico** es el conjunto de tres fases monofásicas que se encuentran desfasadas en 120° . En el esquema simplificado del generador trifásico, vemos los valores instantáneos de cada fase: estos valores pueden ser positivos o negativos, cuando el valor se hace cero se anula la fase. En los motores trifásicos, no disminuye la velocidad de giro, sino que se mantiene constante la velocidad de rotación.

Esquema simplificado de generador trifásico. Las ondas sinusoidales básicas espaciales se desplazan 120° eléctricos en el espacio.



FEM de una máquina sincrónica

En aplicaciones industriales, se exige que la forma de onda sea prácticamente sinusoidal. Esto concierne en especial a los generadores o alternadores, ya que los armónicos más altos afectan desfavorablemente no solo al propio generador y a los consumidores por el aumento de las pérdidas, sino también a las líneas de transmisión, al producir sobretensiones en varias secciones, que pueden crear interferencias inductivas en las líneas de comunicación próximas.



Como sabemos, se denomina **ciclo** al conjunto de onda positiva y negativa. El tiempo T correspondiente a un ciclo se denomina **período**. El número de ciclos por segundo se denomina **frecuencia**.

En una **máquina de corriente alterna**, la fuerza electromotriz se caracteriza por los siguientes parámetros:

- ♦ Magnitud
- ♦ Frecuencia
- ♦ Forma de curva

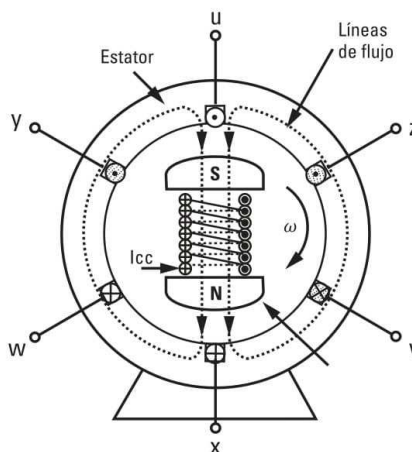
Generador elemental

Este tipo de sistema está conformado por una pieza móvil llamada **rotor**, que se ubica dentro de la parte fija de la máquina llamada **estator**. El giro del rotor se puede realizar de distintas maneras: con un motor diésel, turbina de vapor, eólica, etcétera, que mantiene la velocidad constante. El rotor es un electroimán alimentado por corriente continua. Este consiste en un acoplamiento de chapas de acero, que forma un cilindro solidario con el eje del rotor.

La parte fija o estator está constituida por un paquete de chapas magnéticas que forman un cilindro con ranuras longitudinales donde estarán implantadas las bobinas de la máquina. Los lados de la bobina se ubicarán en las ranuras que serán iguales en su construcción y cuya distribución geométrica será tal que sus ejes magnéticos formen 120° .

El principio de funcionamiento del generador elemental nos dice que la máquina sincrónica está compuesta mediante una pieza giratoria, el rotor, cuya bobina es excitada con corriente continua, y otra pieza, el estator o armadura, por cuyas bobinas circulan corrientes alternas. La **corriente alterna** que circula por el estator produce un campo magnético rotatorio que gira en el entrehierro de la máquina con la frecuencia angular de las corrientes de armadura. El rotor gira a la misma velocidad del campo magnético rotatorio producido por el estator. El rotor gira mecánicamente a la misma frecuencia que la del campo magnético rotatorio del estator durante el régimen permanente. La velocidad del rotor es igual a la velocidad angular del campo magnético producido por el estator.

Luego se inyecta corriente mediante una fuente externa para producir una **fuerza magnetomotriz** en el rotor; de esta forma vamos a tener dos campos magnéticos rotatorios: uno generado por el estator y otro por el rotor. Estos campos interactúan y dan como resultado un par eléctrico que produce la conversión de la energía.



Esta imagen muestra un generador elemental que está formado por ranuras donde van alojadas las bobinas por fase.

Una de las características de las máquinas generadoras sincrónicas es que la velocidad depende de la frecuencia de la red de alimentación eléctrica del sistema.

La máquina giratoria sincrónica puede trabajar como motor, generador o compensador.

La forma de onda de la FEM del conductor con respecto al tiempo corresponde exactamente a la curva de distribución de la densidad de flujo magnético en el entrehierro.

El principio de operación de un generador síncrono o alternador se basa en la ley de Faraday, de inducción electromagnética. La generación de la fuerza electromotriz (fem) se obtiene por medio del movimiento relativo entre conductores y un flujo magnético. Al colocar una espira dentro de un campo magnético al que se lo hacer girar,



sus lados cortarán las líneas de fuerzas del campo, induciéndose entonces una fem que se puede verificar entre los extremos del conductor en forma de espira, y se comprueba que la fem es alterna. Las dos partes básicas de una máquina síncrona son: la estructura del campo magnético, que lleva un devanado excitado por corriente continua, y la armadura.

La **armadura** tiene con frecuencia un devanado trifásico en el que se genera la fem de corriente alterna. Casi todas las máquinas síncronas modernas tienen armaduras estacionarias y estructuras de campo giratorias. El devanado de corriente continua sobre la estructura giratoria del campo se conecta a una fuente externa por medio de anillos deslizantes y escobillas.

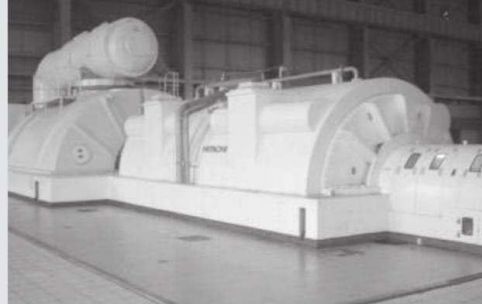
Sistemas estrella

En un sistema trifásico, los tres bobinados pueden ser conectados para formar una conexión en estrella, uniendo en un punto común los tres principios o finales de las bobinas. A ese punto común lo llamamos **centro de estrella o neutro**, y lo designaremos con la letra **o**.

Cada bobinado produce una fem alterna monofásica que podría ser aprovechada por separado, sin embargo, el empleo por separado de las tres fem no produce ninguna ventaja práctica en el aprovechamiento de la energía eléctrica, ya que sería necesario disponer de seis conductores en las redes trifásicas. Cada uno de los conductores se denomina **fase del generador**.

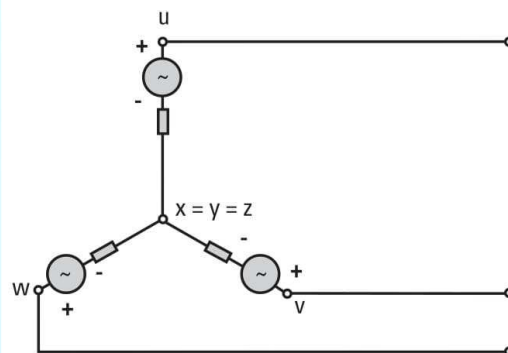
La representación de un generador trifásico en estrella se puede ver como la unión en un punto común de tres generadores monofásicos cuyas tensiones están desfasadas 120° . Los principios de los arrollamientos del generador se conectan a la línea de alimentación de las cargas. Debemos considerar que en el caso que las impedancias de la carga sean iguales:

$$Z_R = Z_S = Z_T$$



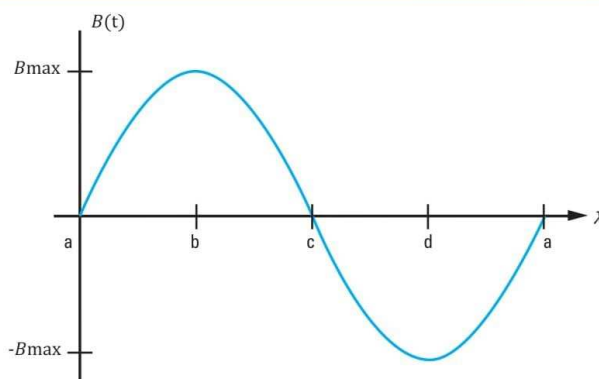
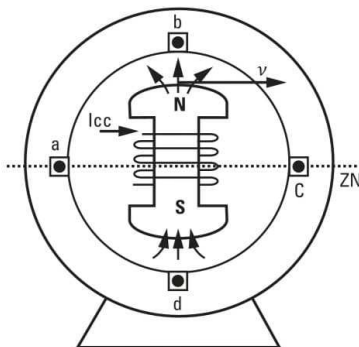
Sistema de excitación en máquinas síncronas

La función del **sistema de excitación** es realizar el ajuste automático de la corriente de campo del generador síncrono, para que se mantenga el voltaje de salida de acuerdo a los valores especificados. Desde el punto de vista de los sistemas de potencia, el sistema de excitación contribuye a lograr un control efectivo de voltaje y, por ello, es ampliamente utilizado para mejorar la estabilidad del sistema.



Esquema de tres generadores en configuración estrella, al punto central se denomina neutro.

El campo será máximo cuando un conductor esté debajo de uno de los polos, y mínimo cuando esté en la zona neutra del campo magnético.



Se denominan corrientes de fase a las que circulan por cada una de las cargas, y corrientes de línea a las que circulan por la línea.

De esta forma, tendremos que la suma de las corrientes que circulan por el conductor de neutro es nula:

$$IR + IS + IT = \frac{UR}{Z} = \frac{US}{Z} = \frac{UT}{Z} = \frac{UR + US + UT}{Z} = 0$$

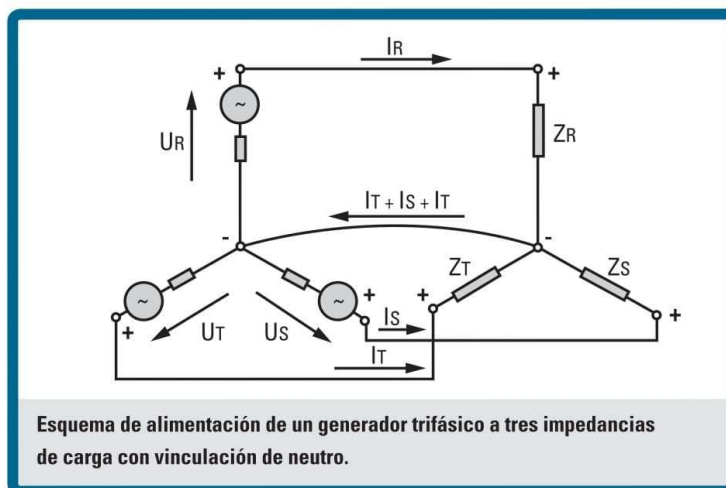
$$IR + IS + IT = \frac{U\angle 90^\circ + U\angle 330^\circ + U\angle 210^\circ}{Z\angle \phi} = 0$$

Como se observa, al ser las tres tensiones del generador del mismo módulo, pero desfasadas entre sí en 120° , la suma es igual a cero. A partir de aquí, se concluye que por el conductor de neutro no circula corriente, por lo tanto, en este caso particular se puede prescindir de él. Concluimos que con solo tres conductores podemos alimentar un sistema trifásico de impedancias, la mitad de lo que necesitaríamos con tres sistemas monofásicos equivalentes.

En las aplicaciones prácticas reales, las tres impedancias no son exactamente iguales, pero se trata de lograr dicho efecto repartiendo la gran cantidad de usuarios en las distintas fases, de forma de obtener un sistema lo más equilibrado posible.

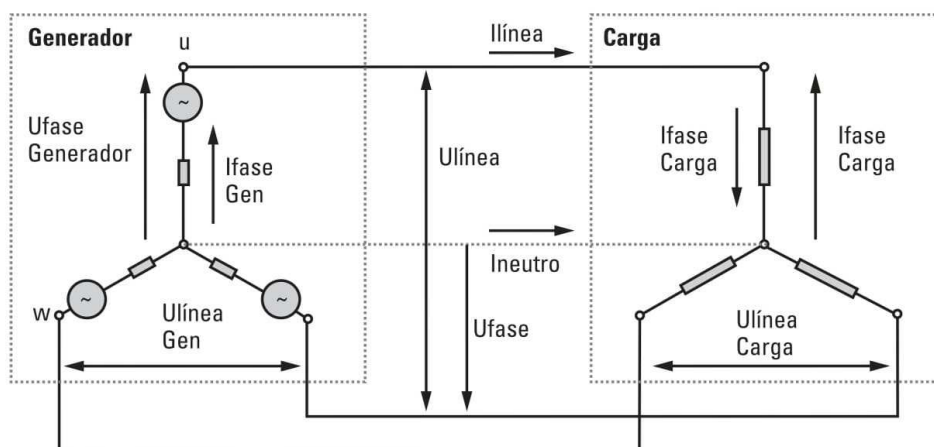
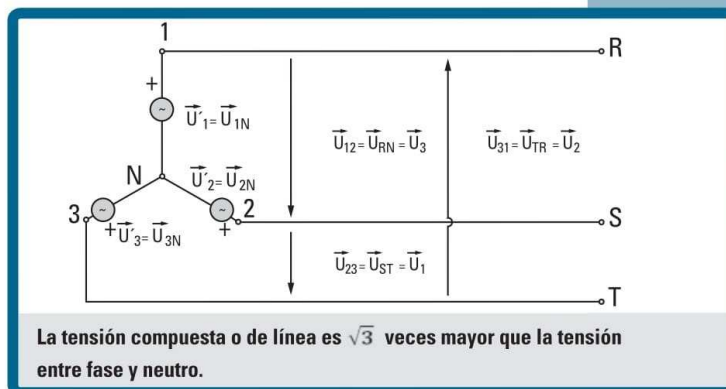
Esto hace que no se prescinda del conductor de neutro, pero su sección resultará menor que la de los otros tres de fase, ya que la corriente que transporta es de menor intensidad que las demás fases.

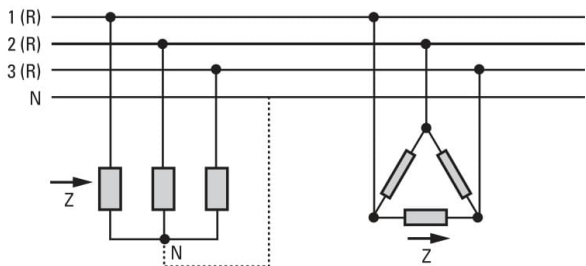
En el caso de la iluminación y otros equipos eléctricos, solo usarán una de las fases del sistema eléctrico, por lo que nunca tendremos un sistema perfectamente balanceado, ya que algunos equipos estarán en servicio y otros saldrán por mantenimiento, perturbando la condición ideal de sistema balanceado. El neutro es necesario para llevar la corriente resultante de regreso al generador.



Conexión de transformadores

La conexión de los transformadores depende de la aplicación industrial necesaria. Para la distribución de iluminación en una planta industrial, se hace una distribución en 380 V y, en cajas de conexión, se conectan las luminarias en 220 V accediendo a una fase y al neutro.





Carga trifásica conectada en estrella cuyo neutro está unido al neutro del sistema.

El nivel de tensión que define a un sistema trifásico es la tensión entre fases o compuesta. En este sentido, si en un proyecto eléctrico nos dicen que la tensión del sistema trifásico es 380 V, deberemos entender que la tensión que nos están informando es la tensión entre fases o la tensión de línea.

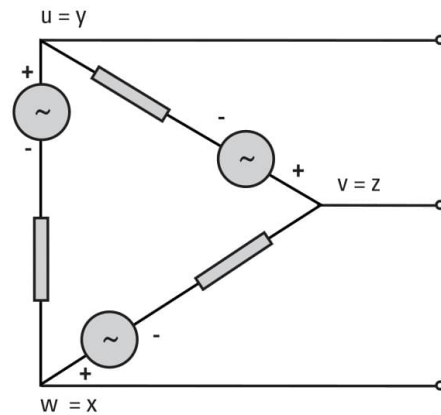
Se generalizan en los sistemas los niveles de tensión, por ejemplo: 400/220 V, es decir 400 V de tensión compuesta y $\frac{400\text{V}}{\sqrt{3}} = 230\text{ V}$ de tensión simple o tensión de fase.

Finalmente, debemos saber que un sistema trifásico de cuatro hilos nos permitirá la conexión de cargas entre:

- ♦ fase-neutro.
- ♦ fase-fase.
- ♦ cargas trifásicas.

Conexión de motores en estrella

Es importante mencionar que podemos conectar un motor en conexión estrella. Existen fabricantes que ofrecen motores de inducción configurables en la bornera externa. En este caso de motores trifásicos, se pueden conectar a la línea ya sea en estrella o en triángulo. Cuando se conectan en estrella, el voltaje que se imprime al devanado es de aproximadamente el 57,8 % del voltaje de línea.



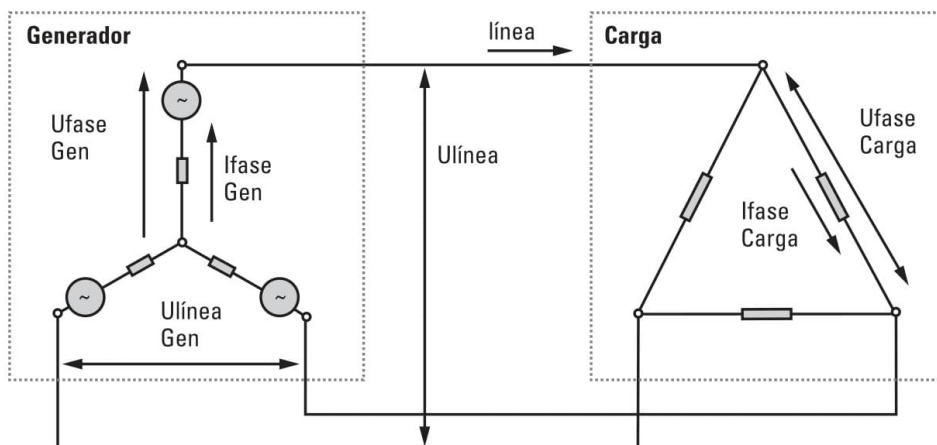
Esquema de tres generadores monofásicos conectados en triángulo. El punto común de los arrollamientos se conecta a las líneas de alimentación.

Sistemas triángulo

Los generadores o consumidores de corriente trifásica pueden conectarse no solo en estrella, sino también en conexión triángulo. Juntando por pares los conductores de un sistema independiente hexafilar y uniendo las fases, pasamos a un sistema trifásico trifilar conectado en triángulo.

La representación de la conexión del sistema triángulo se puede interpretar por medio del enlace de los arrollamientos de fase en serie uniendo el principio de uno con el final del otro. En esta conexión no existe punto neutro. De los tres puntos de unión que resultan de este montaje, se saca un conductor de fase.

La tensión compuesta y la tensión simple coinciden en un sistema conectado en triángulo, en forma independiente de la secuencia de fases del sistema.



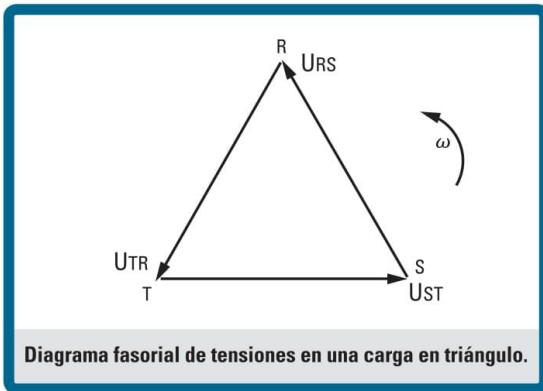
Esquema de conexión entre estrella generador y triángulo carga.



Si los devanados del generador están conectados en triángulo, cada devanado de fase crea una tensión compuesta. El consumidor conectado en triángulo tiene la tensión compuesta a los bornes de la impedancia de fase. Por consiguiente, la tensión compuesta es igual a la tensión de fase. Las impedancias de la carga son consideradas iguales:

$$Z_{RS} = Z_{ST} = Z_{TR}$$

Por lo tanto, las corrientes en cada fase estarán de acuerdo con el diagrama fasorial que presentamos en la imagen.



$$\begin{aligned} U_{RS} &= U_L = U_L \angle 120^\circ \\ U_{TR} &= U_L = U_L \angle 240^\circ \\ U_{ST} &= U_L = U_L \angle 0^\circ \end{aligned}$$

La carga o receptor para este tipo de configuración para generador está compuesto por un sistema de tres cargas, a las que representamos por sus impedancias equivalentes que son las fases del receptor. Estas se pueden unir de forma tal de quedar conectadas en una configuración de conexión del tipo estrella o triángulo, según convenga o según el esquema eléctrico que necesitemos para la instalación eléctrica:

$$\begin{aligned} I_{RS} &= \frac{U_{RS}}{Z_{RS}} = \frac{U_L \angle 120^\circ}{Z \angle \phi} = \frac{U_L}{Z} \angle 120^\circ - \phi \\ I_{ST} &= \frac{U_{ST}}{Z_{ST}} = \frac{U_L \angle 240^\circ}{Z \angle \phi} = \frac{U_L}{Z} \angle 240^\circ - \phi \\ I_{TR} &= \frac{U_{TR}}{Z_{TR}} = \frac{U_L \angle 0^\circ}{Z \angle \phi} = \frac{U_L}{Z} \angle 0^\circ - \phi \\ I_R &= I_{RS} - I_{TR} \\ I_S &= I_{ST} - I_{RS} \\ I_T &= I_{TR} - I_{ST} \end{aligned}$$

En este caso particular, encontramos que las corrientes de fase son desfasadas entre sí un ángulo de 120°; la relación existente entre estas y las corrientes propias de línea en lo que a módulo se refiere puede ser expresada de la siguiente manera:

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f$$

En el caso de un sistema trifásico con carga conectada en triángulo desequilibrado, las impedancias de la carga no son iguales. El método por desarrollar para la obtención del valor de las corrientes es de similares características al utilizado en el caso particular del sistema equilibrado, ya que existe la relación entre las tensiones de fase de la carga y las de línea, que son coincidentes:

$$\begin{aligned} Z_{RS} &= Z_{RS} \angle \phi_{RS} \\ Z_{ST} &= Z_{ST} \angle \phi_{ST} \\ Z_{TR} &= Z_{TR} \angle \phi_{TR} \\ I_{RS} &= \frac{U_{RS}}{Z_{RS}} = \frac{U_L \angle 120^\circ}{Z_{RS} \angle \phi_{RS}} = \frac{U_L}{Z_{RS}} \angle 120^\circ - \phi_{RS} \\ I_{ST} &= \frac{U_{ST}}{Z_{ST}} = \frac{U_L \angle 0^\circ}{Z_{ST} \angle \phi_{ST}} = \frac{U_L}{Z_{ST}} \angle 0^\circ - \phi_{ST} \\ I_{TR} &= \frac{U_{TR}}{Z_{TR}} = \frac{U_L \angle 240^\circ}{Z_{TR} \angle \phi_{TR}} = \frac{U_L}{Z_{TR}} \angle 240^\circ - \phi_{TR} \end{aligned}$$

Para obtener las corrientes de línea, se realiza la sumatoria de corrientes en cada uno de los nodos:

$$\begin{aligned} I_R &= I_{RS} - I_{TR} \\ I_S &= I_{ST} - I_{RS} \\ I_T &= I_{TR} - I_{ST} \end{aligned}$$

Transformación de Kennelly

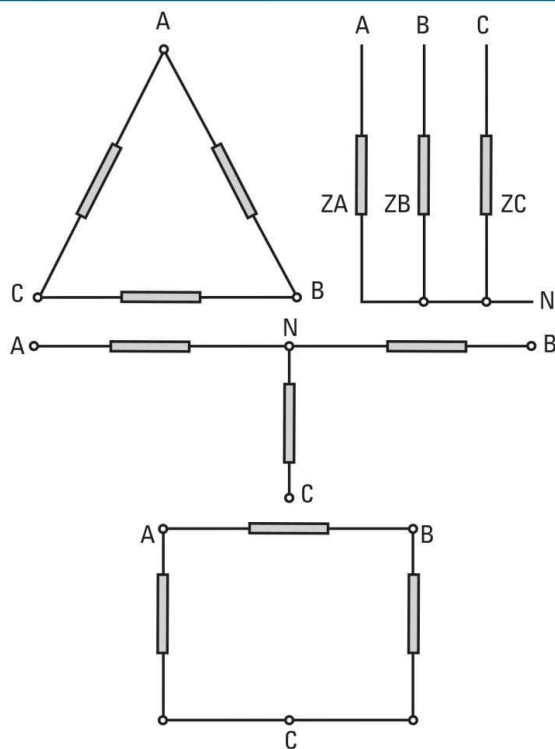
Muchas veces, en nuestra vida profesional, necesitamos realizar un cálculo para transformar un grupo de impedancias conectadas en estrella a una conexión en triángulo, o viceversa. El teorema de **transformación de Kennelly** es el que nos permite, mediante un desarrollo matemático, transformar circuitos eléctricos en forma de estrella a triángulo, y viceversa. Es un método muy útil para realizar el análisis de circuitos eléctricos complejos, ya que permite transformarlos de tal manera que dichos circuitos se puedan convertir en otros circuitos equivalentes en forma de estrella o de triángulo.

El método para pasar un sistema estrella a triángulo es el desarrollado a continuación:

$$\begin{aligned} Z_{AB} &= Z_{AN} + Z_{BN} + \frac{Z_{AN} \cdot Z_{BN}}{Z_{CN}} \\ Z_{BC} &= Z_{CN} + Z_{BN} + \frac{Z_{CN} \cdot Z_{BN}}{Z_{AN}} \\ Z_{AC} &= Z_{CN} + Z_{AN} + \frac{Z_{CN} \cdot Z_{AN}}{Z_{BN}} \end{aligned}$$

Para convertir de un sistema en triángulo a otro sistema de configuración en estrella, debemos proceder de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Z_{AN} &= \frac{Z_{AB} \cdot Z_{AC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}} \\ Z_{BN} &= \frac{Z_{AB} \cdot Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}} \\ Z_{CN} &= \frac{Z_{AC} \cdot Z_{BC}}{Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{AC}} \end{aligned}$$



Comparación entre la conexión en triángulo y la conexión en estrella.

La **impedancia** que concurre a un vértice de la estrella es igual al producto de las dos que concurren al mismo vértice en el triángulo, dividido por la suma de las tres impedancias del triángulo.

En la mayoría de los casos, los circuitos conectados en estrella pueden transformarse en triángulo, y viceversa. Este cambio de conexión supone una variación de tensión y de corriente; también se modificará el consumo de potencia eléctrica. Una carga de consumo conectada en triángulo consume el triple de potencia que una carga conectada en estrella, considerando que tenemos cargas equilibradas, o sea, que las impedancias son iguales.

Caso de aplicación

Si consideramos como ejemplo un sistema de generación configurado en estrella y una carga configurada en triángulo, y tenemos en cuenta la línea como impedancia real propia, con el método de Kennelly visto antes podemos convertir el sistema triángulo a uno estrella, de manera que nos queden las impedancias en serie para tener una resolución más conveniente y sencilla.

Componentes simétricas

Un sistema de fasores de tensiones (o intensidades), sea equilibrado o desequilibrado, puede expresarse como combinación línea de las componentes simétricas que son:

1. componentes de secuencia cero o secuencia homopolar;
2. componentes de secuencia directa o secuencia positiva;
3. componente de secuencia inversa o secuencia negativa.

En este caso, pasamos de un sistema real a un sistema ficticio, ya que la estrella no existe en la realidad dado que se ha convertido matemáticamente. Si las cargas son equivalentes entre sí, las corrientes en las líneas debido a la fuente tendrán que ser iguales tanto para la carga real como para la carga ficticia. En algunos elementos conviene conectar en estrella un lado del transformador cuando hay una elevada tensión de cortocircuito y cuando se precise una conexión simétrica de neutro para poner a tierra o alimentar cargas monofásicas. La conexión **triángulo-estrella** es usual cuando tenemos transformadores elevadores en la salida de línea de transmisión de energía de alta tensión, y por la misma razón, en el extremo receptor, suelen estar conectados estrella-triángulo. El neutro de la estrella del lado de alta tensión se suele poner rígido a tierra para asegurar una distribución equilibrada de tensiones entre fase y tierra, como también para reducir las tensiones existentes entre la bobina de los transformadores y el núcleo.

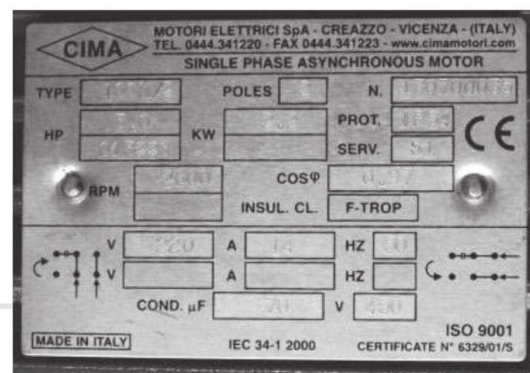
A veces se conecta el neutro a tierra mediante una impedancia cuyo fin consiste en limitar la corriente de cortocircuito entre fase y tierra; el valor de la impedancia se calcula para obtener un valor de cortocircuito esperado.

Según la norma internacional, en la placa característica de los motores trifásicos se debe indicar la tensión nominal y la conexión a que corresponde. Hay motores que permiten la conexión de los bobinados del motor tanto en estrella como en triángulo. Los extremos de cada fase constituyen los terminales ubicados en la caja de conexión del motor.

¿Dónde se efectúa el cambio de conexión? Este se realiza directamente en la caja de bornes del motor con ayuda de puentes iguales.

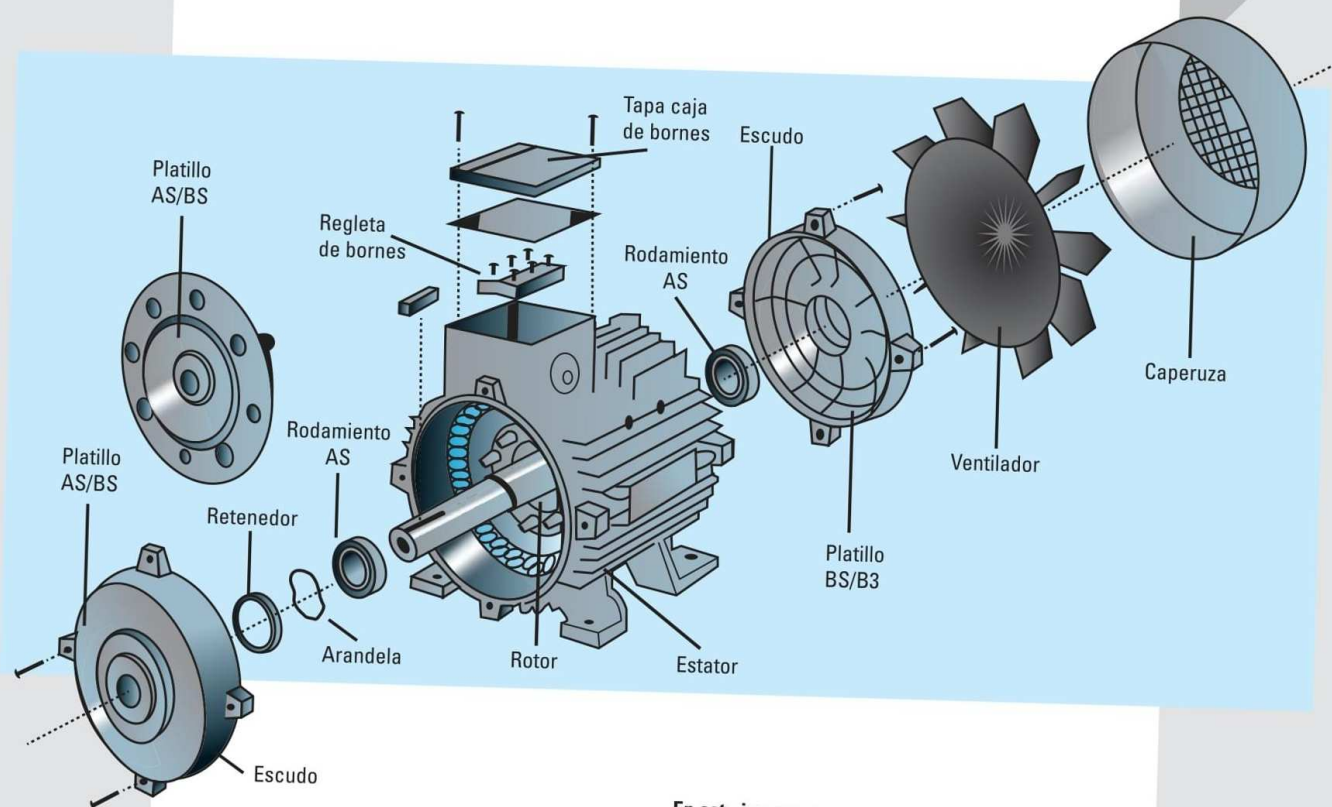
Indicación en la placa característica

La placa característica de un motor nos arroja información muy importante a la hora de realizar la tarea de precomisionado o puesta en marcha del equipo. En este caso, podemos observar los distintos tipos de conexionado que nos ofrece el motor y las tensiones a las que estarán sometidos.



MOTOR TRIFÁSICO

Cuando necesitemos conectar un motor trifásico, tendremos que tener en cuenta algunos datos antes de elegir el adecuado: carga de trabajo (potencia), clase de servicio, temperatura del medio refrigerante, curso de ciclo de trabajo, procesos de arranque, frenado e inversión, la regulación de la velocidad de rotación y variaciones de la red.



Partes de un motor eléctrico trifásico

Como sabemos, los motores trifásicos se encargan de convertir la energía en mecánica. Están compuestos de las siguientes partes fundamentales:

- 1. Estator:** se trata del enchapado ranurado de hierro, introducido a presión entre una carcasa de hierro colado. Aquí se insertan las bobinas.
- 2. Rotor:** es la parte móvil del motor trifásico. Se forma por el eje, el enchapado y unas barras (cobre o aluminio) que están unidas con tornillos. Este rotor se conoce como jaula de ardilla o en cortorcueto.
- 3. Escudos:** generalmente se construyen con hierro colado. Poseen cavidades en las que se incrustan cojinetes sobre los que descansa el eje del rotor.

En esta imagen vemos un motor trifásico para movimiento constante, con un rango de potencia de 0,06 hasta 45 KW.



SISTEMAS DESEQUILIBRADOS

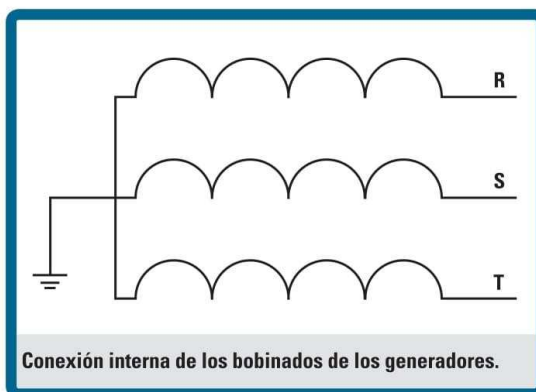
Conoceremos los sistemas de energía equilibrados y desequilibrados, también veremos la importancia del neutro y los problemas que se pueden presentar.

Los **sistemas desequilibrados** son aquellos en los que las corrientes de las fases no son iguales entre sí y, por lo tanto, crean desbalances tanto en la distribución como también en los consumos, y demandan conductores de mayor sección que la requerida si el sistema fuese equilibrado.

Sistemas equilibrados y desequilibrados

Recordemos que los sistemas de generación de electricidad son en su mayoría trifásicos. Un generador elemental consiste en un **estator** (cuerpo fijo) que contiene los bobinados de los tres campos y un **rotor** (cuerpo móvil) con el bobinado correspondiente para generar el campo electromagnético necesario para que se induzcan las corrientes adecuadas en los campos fijos y así generar la electricidad en un sistema trifásico. Los campos se hallan ubicados a 120° uno del otro. La generación y distribución se hace en alta tensión, reduciéndola antes de llegar a los consumos (casas de familia, comercios, industrias, etcétera) en baja tensión.

Debemos tener en cuenta que en los generadores, los extremos de los bobinados de los campos se conectan entre sí y el otro extremo queda conectado a la red de distribución. Igual procedimiento se sigue en la transformación a lo largo de la red de distribución. De la misma forma, el centro de esta estrella tanto en la generación como en la transformación se conecta a tierra.



Ahora veamos qué ocurre con las cargas. Las tenemos de dos tipos: equilibradas y desequilibradas. Las **cargas equilibradas** son cargas trifásicas que presentan las tres impedancias iguales. Cuando se deben conectar a la red, las tres impedancias lo hacen en estrella o en triángulo.

Las cargas trifásicas son cargas equilibradas, ya sea que se conecten en estrella o en triángulo.

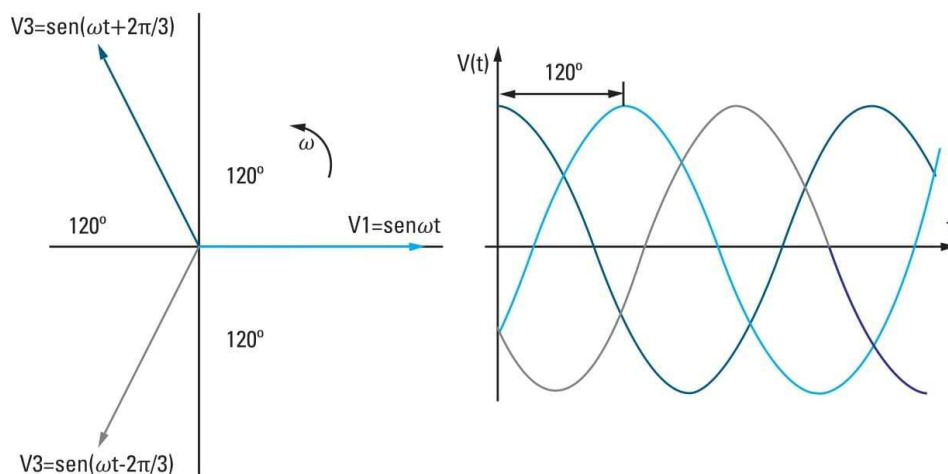


Diagrama vectorial de la salida del generador y diagrama temporal donde se aprecian las tres señales senoidales desfasadas 120° .



Las corrientes que se presentan en las cargas equilibradas son las mismas para cada fase; se hallarán desfasados entre sí los mismos 120° que teníamos de desfase entre las tensiones del sistema trifásico.

En el caso de cargas en conexión en estrella, las corrientes se pueden calcular directamente aplicando la ley de Ohm, es decir, la tensión de fase dividida por la impedancia nos da la corriente por cada una de las impedancias.

En el caso de cargas en conexión en triángulo, las corrientes por cada una de las cargas son calculadas también por la ley de Ohm, pero, en lugar de la tensión de fase, utilizaremos la tensión de línea y la dividimos por la impedancia de la carga. La corriente de línea será una suma vectorial de corrientes; en forma análoga a lo visto para las tensiones, tendremos que la corriente en cada una de las líneas será:

$$I_L = \sqrt{3} I_F$$

Ejercicio de análisis

Analicemos la siguiente situación: tenemos tres cargas exactamente iguales, las conectamos primero en estrella y, luego, en triángulo.

En el caso de la conexión en estrella, la corriente de línea será:

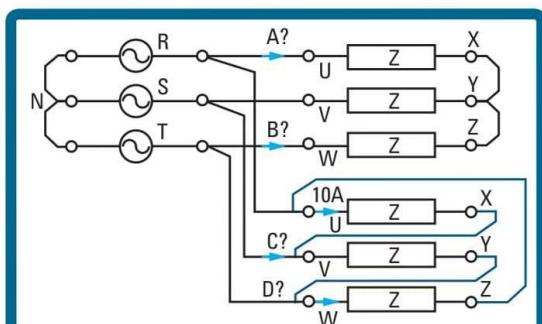
$$I_L(Y) = I_F(Y) = \frac{V_F}{Z} = \frac{\frac{V_L}{\sqrt{3}}}{Z} = \frac{V_L}{\sqrt{3}Z}$$

En el caso de la conexión en triángulo, la corriente de línea será:

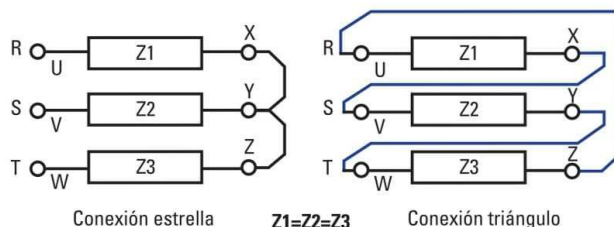
$$I_L(\Delta) = \sqrt{3} I_F(\Delta) = \sqrt{3} \frac{V_L}{Z}$$

Por lo cual, la corriente de línea en conexión estrella es tres veces mayor a la corriente de línea en conexión triángulo.

$$I_L(\Delta) = 3 I_L(Y)$$



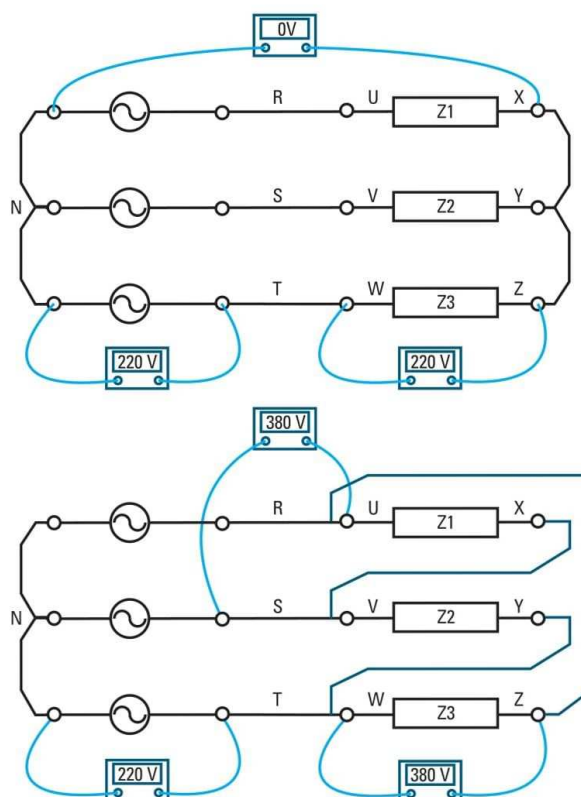
Circuito por resolver. En este ejercicio se pide calcular las corrientes de línea.



Conexión equilibrada de cargas. Conexión en estrella y conexión en triángulo.

Tensiones en sistemas equilibrados

En un sistema en estrella, las tensiones sobre cada una de las cargas en forma individual será de 220 V y, si medimos las tensiones entre los centros de las estrellas (tanto la existente en el centro de estrella del generador como en el centro de la estrella de cargas), la tensión medida será de 0 V. En un sistema en triángulo, del lado generador la situación no cambia, pero del lado cargas, sí. La tensión sobre cada una de las cargas será de 380 V. En el caso de estrella, estamos midiendo tensión de fase; en el caso de triángulo, medimos tensión de línea.



Tensiones medidas en sistemas equilibrados estrella y triángulo.



Sabemos que todas las impedancias Z son iguales; la tensión de línea es de 380 V (tensión entre fases) y la tensión de fase es de 220 V (tensión entre fase y neutro). El dato adicional que tenemos es que la corriente por una de las impedancias en triángulo es de 10 A. Por analogía, la corriente D será la misma, es decir, 10 A.

Por las relaciones vistas en la conexión triángulo, la corriente de línea será:

$$I_L = \sqrt{3}I_F$$

Por lo cual, la corriente C será de 17,3 A.

Si la tensión de línea es de 380 V y en la conexión triángulo circula por cada impedancia una corriente de 10 A, la impedancia vale 38 Ω .

Las corrientes A y B serán iguales entre sí y valen la tensión de fase dividida la impedancia, es decir, 220 V dividido 38 Ω . Por lo tanto, las corrientes A y B valen 5,79 A cada una.

Cargas desequilibradas

Si bien las tensiones en la etapa de generación y distribución se hallan equilibradas, cuando las cargas no son iguales se producen desequilibrios.

Cuando ocurre este caso, en general, todos los sistemas trifásicos se presentan para la empresa distribuidora como desequilibrados. Pensemos por ejemplo en un consumo trifásico típico (oficina grande, fábrica, etcétera), la provisión es trifásica y se la supone equilibrada (las tres fases presentan las tensiones correspondientes).

Ahora bien, cuando vemos las cargas dentro de la instalación del cliente, luego del medidor de consumo eléctrico, veremos que hay cargas trifásicas (motores por ejemplo) que son equilibradas y cargas que son monofásicas. Las cargas monofásicas pueden dar lugar a que aparezcan cargas trifásicas desequilibradas (luces o equipos que no se encienden); si bien toda la instalación puede haber sido pensada como equilibrada, basta que un artefacto de ilumi-

nación o cualquier equipo monofásico no esté encendido, para que se produzcan cargas trifásicas desequilibradas.

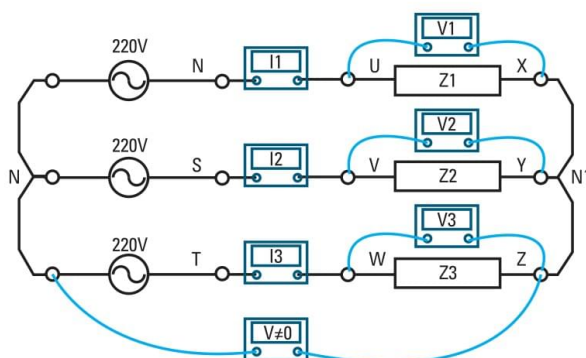
En un sistema trifásico desequilibrado conectado en estrella, las impedancias serán todas diferentes $Z1 \neq Z2 \neq Z3$. El centro de la estrella de cargas será ahora N' , y las tensiones que aparecen sobre cada impedancia serán diferentes entre sí y distintas de la tensión de fase. Lo mismo ocurre con las corrientes, las que serán diferentes. Tenemos que pensar que cada par de impedancias está sometido a tensiones de línea y no de fase. Por este motivo, el centro N' tendrá una tensión respecto del centro de estrella del generador diferente de cero.

El sistema así planteado crea muchos problemas; entre ellos, presenta sobretensiones en las impedancias $Z1$, $Z2$ y $Z3$ que pueden dañar los equipos.

La forma de solucionar este problema aquí presentado (sobretensiones en las cargas y diferencia de tensión entre los puntos N y N') consiste en interconectar los puntos N y N' con un cable conductor, al que denominaremos **conductor de neutro**. El conductor de neutro tiene por función establecer y fijar la tensión entre N y N' en 0 V; de esta forma, las tensiones sobre las cargas serán todas iguales a 220 V, y las corrientes por cada fase serán la relación entre la tensión de fase y el valor de la impedancia Z .

El conductor de neutro asegura que la diferencia de tensión entre los puntos N y N' sea 0 V.

No se analiza el caso de cargas desequilibradas en triángulo, pues los equipos monofásicos no son apropiados para soportar tensiones de línea de 380 V, lo que les produciría un daño importante por las sobretensiones planteadas.



Sistema trifásico desequilibrado conectado en estrella.

Importancia del conductor de neutro

Si tenemos un sistema desequilibrado de cargas, a fin de evitar la presencia de sobretensiones en ellas, se debe obligatoriamente instalar un conductor que una los centros de estrella de la generación con el de cargas. Este conductor se denomina **neutro**, y por él circulará la corriente que se origina por las diferencias de las impedancias de las cargas.



Tratamiento del neutro

Hemos visto que el conductor de neutro es imprescindible para evitar sobretensiones sobre las cargas desequilibradas y, además, permite la circulación de corriente entre N y N', asegurando así que ambos puntos tengan entre sí una diferencia de tensión de 0 V.

Tal como se dijo al principio de esta nota, en el centro de estrella de generación y en los centros de estrella de transformación, las empresas generadoras conectan el punto a tierra mediante la instalación adecuada de jabalinas y mallas de puesta a tierra. Esto se realiza así pues, de esta forma, se aseguran de que la terna generada está fija a un potencial de referencia de 0 V (tierra). El conductor de neutro se instala recién en la última etapa de distribución, en baja tensión, para asegurar la llegada de este potencial de referencia a todas las cargas existentes. Las empresas distribuidoras toman como inicio de este conector el punto en el que conectan el centro de la estrella del transformador con salida 3 x 380 V a la tierra.

Ahora bien, para la instalación domiciliaria, no es lo mismo el conductor de neutro que el conductor de puesta a tierra de seguridad. Ambos conductores deben existir en la instalación y deben ser diferentes: el de neutro conectado al neutro provisto por la empresa distribuidora, y el de tierra realizada mediante jabalinas.

Si, por problemas de instalación, el conductor de neutro se corta, se plantea el caso de no poder asegurar que no se presenten sobretensiones sobre las cargas, con el consecuente daño para ellas.

Por otra parte, aunque las cargas por sus características soporten las sobretensiones presentes, las corrientes que circulan son mayores; esto provoca sobrecalentamiento de los conductores y podría dañarlos.

La existencia del conductor de neutro nos permite tener instalaciones desequilibradas sin sobretensiones en las cargas, pues, aunque las corrientes de cada fase sean diferentes, por el conductor de neutro circulará la corriente resultante.

Tal como puede apreciarse, la no existencia del conductor de neutro crea un sistema de tensiones respecto del centro de estrella del generador y otro sistema respecto del centro de estrella de la carga. Entre ambos centros de estrella existe una diferencia de tensión $V_{NN'}$ no nula, que es la encargada de presentar luego las sobretensiones sobre las cargas con el consiguiente daño para ellas.

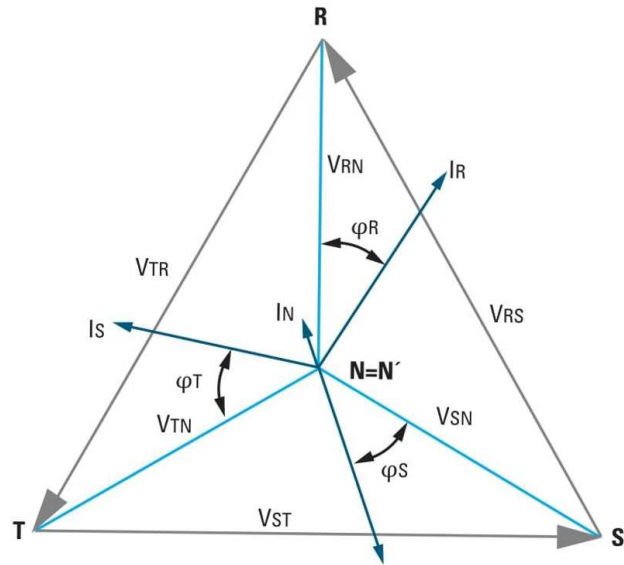
Diagramas de secuencia

La secuencia de giro de los generadores eléctricos determina la secuencia de las fases, esta es R – S – T. La secuencia directa de fases es:

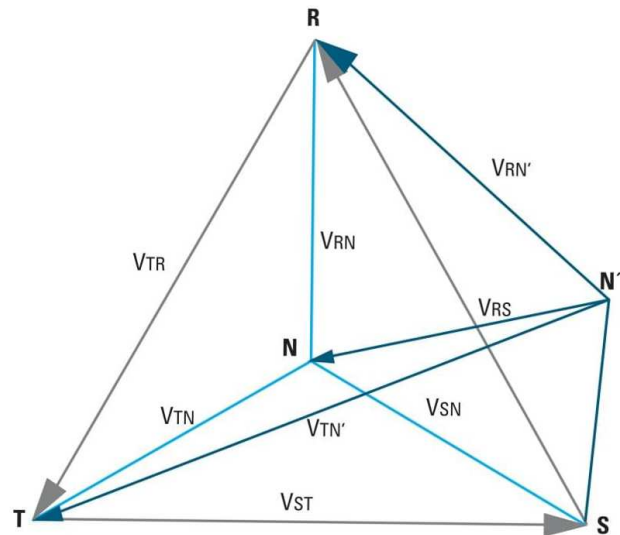
$$V_R = V_0 \sin \omega t$$

$$V_S = V_0 \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_T = V_0 \sin(\omega t - 240^\circ)$$



Sistema vectorial de las tensiones de línea, de fase y las corrientes en una instalación con cargas desequilibradas.



Sistema vectorial de las tensiones sin conductor de neutro.

Al dimensionar una instalación, se debe considerar a la corriente de neutro igual a la mayor corriente de fase.



La secuencia inversa de fases es:

$$V_R = V_0 \sen \omega t$$

$$V_T = V_0 \sen(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_S = V_0 \sen(\omega t - 240^\circ)$$

La secuencia de fases directa asegura que, al ser conectado un motor trifásico, este gire en el sentido correcto. De esta forma, si se produce una inversión de fases (intercambio de fases), se tiene una secuencia de giro inversa, por lo que los motores trifásicos girarán en sentido contrario al normal de funcionamiento.

Como podemos apreciar, un intercambio de fases produce una secuencia inversa en cómo se presentan las fases a las cargas. En caso de cargas monofásicas, no tendrán problemas, pero, en el caso de cargas trifásicas, la secuencia de operación se invierte.

En 1918, **Charles LeGeyt Fortescue** estableció el **Teorema de las Componentes Simétricas** que se aplica a la resolución de sistemas polifásicos. En especial, se puede utilizar en cualquier sistema trifásico desequilibrado para descomponer los fasores relacionados entre sí y obtener igual cantidad de sistemas de fasores equilibrados.

De acuerdo a esto, tres fasores desbalanceados de un sistema trifásico se pueden descomponer en tres sistemas balanceados de fasores. Estos son:

- ♦ Tres fasores de secuencia directa, de igual magnitud con un desfase de 120° entre ellos, con igual secuencia de fase que los originales.
- ♦ Tres fasores de secuencia inversa, de igual magnitud con un desfase de 120° entre ellos, con secuencia de fase inversa que los originales.
- ♦ Tres fasores de secuencia cero (homopolares), de igual magnitud con desfase de 0° entre ellos.

En instalaciones trifásicas, las fases en bornes de entrada deben presentar secuencia directa a fin de prevenir problemas en las cargas trifásicas.

La transformación de Fortescue clásica define el operador a (vectorial) como:

$$a = e^{j120}$$

Las componentes simétricas respecto de la fase A (VA) son:

$$V^0 = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \text{ Homopolar (Secuencia cero)}$$

$$V^+ = \frac{1}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C) \text{ Directa (Secuencia positiva)}$$

$$V^- = \frac{1}{3}(V_A + a^2V_B + aV_C) \text{ Inversa (Secuencia negativa)}$$

Por lo tanto:

$$V_A = V^0 + V^+ + V^- = V_A^0 + V_A^+ + V_A^-$$

$$V_B = V^0 + a^2V^+ + aV^- = V_B^0 + V_B^+ + V_B^-$$

$$V_C = V^0 + aV^+ + a^2V^- = V_C^0 + V_C^+ + V_C^-$$

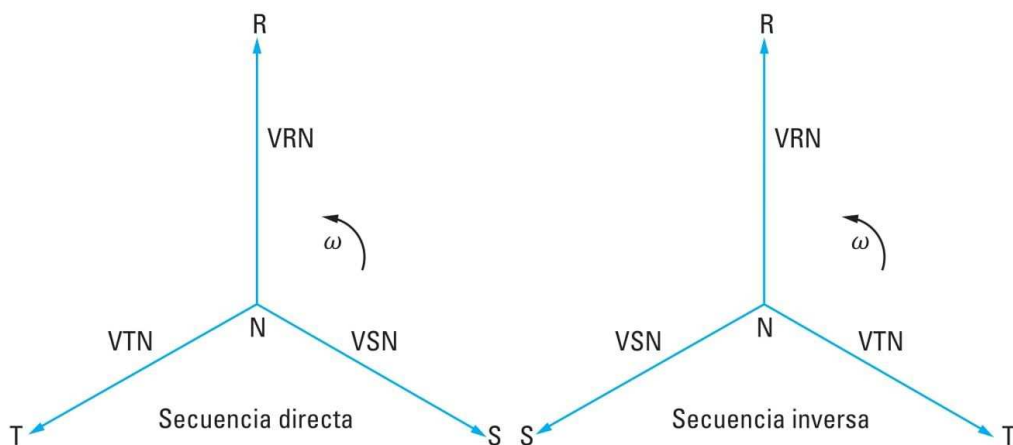
Viéndolo en forma matricial será:

$$(V') = [S]^{-1}(V)$$

En donde V' son las variables nuevas y V , las originales. La transformación inversa de Fortescue es:

$$\begin{bmatrix} V^0 \\ V^+ \\ V^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

Diagramas vectoriales de tensiones en secuencia directa y en secuencia inversa.



La transformación directa de Fortescue es:

$$[V'] = [S][V]$$

$$\begin{bmatrix} V^0 \\ V^+ \\ V^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

De esta forma, hemos descompuesto un sistema asimétrico en tres simétricos, por lo que solo es necesario definir los componentes de una fase pues las otras dos, al ser simétrico, estarán desfasadas 120° en más y en menos.

A cada fasor lo hemos denominado con la letra **V**, pero esto no significa que solo sea válido para tensiones, de la misma forma lo aplicamos a corrientes. El método así desarrollado permite dimensionar las protecciones adecuadas en las plantas de generación para que actúen en caso de falla en la red, por ejemplo, si se produce un cortocircuito.

En el caso de un cortocircuito monofásico a tierra a través de una impedancia Z_F se tiene (se supone I_A la falla):

$$I_B = I_C = 0$$

$$V_A = Z_F I_A$$

Las componentes simétricas son:

$$\begin{bmatrix} I^0 \\ I^+ \\ I^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

$$I_A^0 = I_A^+ = I_A^- = \frac{1}{3} I_A$$

Para las componentes simétricas de la tensión se tiene:

$$\begin{bmatrix} V^0 \\ V^+ \\ V^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

Por lo cual se tiene:

$$V_A^0 + V_A^+ + V_A^- = V_A = Z_F I_A$$

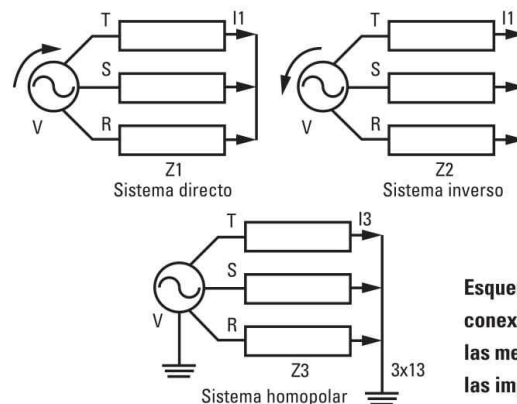
O bien:

$$V_A^0 + V_A^+ + V_A^- = 3Z_F I_A^0 = 3Z_F I_A^+ = 3Z_F I_A^-$$

Cálculo de las corrientes de cortocircuito

Para realizar el cálculo de las corrientes puestas en juego durante un cortocircuito, se deben conocer la tensión del generador y las impedancias de las líneas intervinientes.

1. El primer paso es determinar las impedancias Directa ($Z1$), Inversa ($Z2$) y Homopolar ($Z3$), como se indica en la imagen. La impedancia Directa ($Z1$) de un equipo eléctrico es el cociente entre la tensión entre fase y neutro, y la corriente de fase en un sistema equilibrado de secuencia directa. La impedancia Inversa ($Z2$) de un equipo eléctrico es el cociente entre la tensión entre fase y neutro, y la corriente de fase en un sistema equilibrado de secuencia inversa. La impedancia Homopolar ($Z3$) de un equipo eléctrico es el cociente entre la tensión entre fase y neutro, y la corriente de fase en un sistema monofásico.
2. El segundo paso consiste en calcular las corrientes en servicio normal y la tensión en el punto de falla.
3. El tercer paso consiste en calcular, para el mismo circuito, las corrientes, luego de anular los efectos de todas las fuentes (cortocircuito de las fuentes de tensión y apertura de las de corriente), aplicando en el punto de falla una tensión opuesta a la tensión de falla calculada en el segundo paso.
4. Por último, se suman las corrientes calculadas en los pasos segundo y tercero, y se obtiene así la corriente de cortocircuito.



Esquema de conexiones para las mediciones de las impedancias $Z1$, $Z2$ y $Z3$.

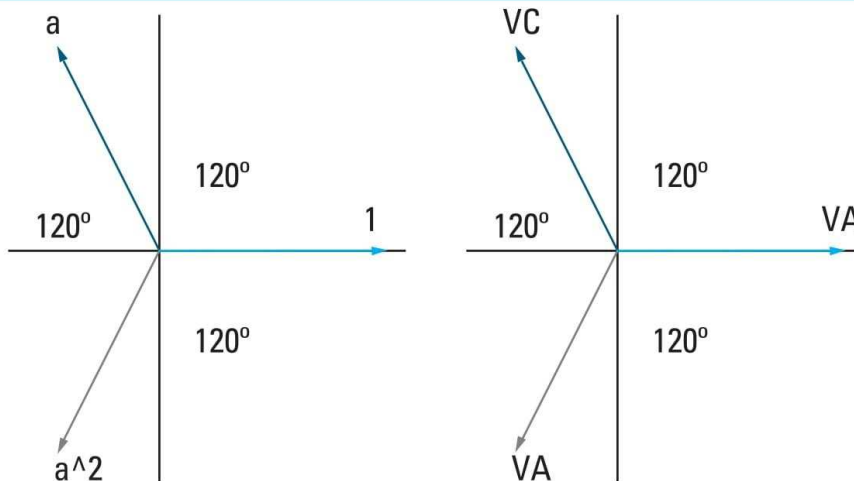


Diagrama fasorial del operador a , y de las tensiones entre fase y neutro en sistemas trifásicos.



POTENCIA TRIFÁSICA

Generalmente utilizado en depósitos, almacenes y negocios, el sistema trifásico permite alimentar distintos establecimientos cuando la potencia supera los límites convencionales.

Para introducirnos en el tema, debemos recordar la diferencia entre los sistemas monofásicos y los trifásicos. Cada **sistema monofásico** posee un valor de tensión en sus terminales; el **sistema trifásico** entrega la misma tensión con un determinado desfase en tres cables conductores diferentes.

Los sistemas trifásicos se pueden observar en los tendidos de baja, media y alta tensión, y son físicamente reconocibles en media tensión por cuatro cables entrelazados; cada cable posee un diámetro de sección que será variable dependiendo de cada pérdida de carga.

Cuando mencionamos la **potencia trifásica**, debemos recordar que estamos hablando del paso de corriente por unidad de tiempo, es decir, de un trabajo. La potencia generada por un sistema trifásico corresponde al trabajo que debe realizar el sistema para realizar determinada tarea. A diferencia del trabajo que debe realizar un sistema monofásico, veamos al sistema trifásico como el mismo trabajo del monofásico, pero por triplicado. Es decir, si tomamos como

Cuando se utiliza un cableado trifásico, los cables usados están entrelazados entre sí. A mayor corriente requerida, mayor diámetro de sus conductores.



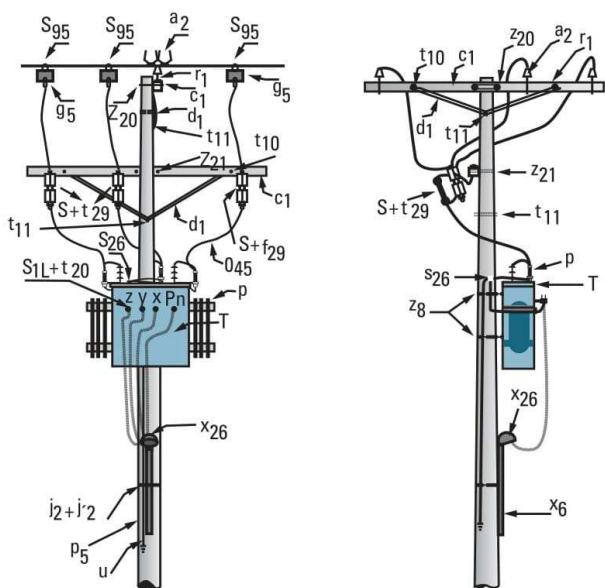
ejemplo a una persona que realiza una tarea, como la de levantar una caja del suelo (sistema monofásico), una potencia trifásica correspondería a tres personas idénticas que levanten la misma caja (sistema trifásico).

Al igual que la potencia eléctrica, la potencia trifásica utilizará como unidad de medición el **watt** y será una medida del consumo que realice nuestro sistema o la producción de este.

En una casa o en una industria, el consumo no distinguirá un sistema del otro, no le importará si la instalación usa un sistema monofásico o trifásico, solo medirá la cantidad de corriente consumida en él, y por lo general se mide en **kWh**.

Un sistema trifásico es una asociación de tres sistemas monofásicos equilibrados.

Si asumimos que un sistema trifásico es la combinación de tres sistemas monofásicos, la potencia total trifásica será considerada como la suma de la potencia individual de cada fase. Para el sistema total, tendremos como elementos del sistema: tensión de línea, impedancias o carga, y las corrientes de línea. Cuando tenemos todos los datos conocidos, denominaremos a cada elemento como:



Podemos apreciar cómo es el conexionado en una línea trifásica hacia un transformador, para poder ser utilizado en las líneas hogareñas.



- ♦ Tensión instantánea de fase: $u_1(t), u_2(t), u_3(t)$.
- ♦ Impedancias o carga de fase: z_1, z_2, z_3 .
- ♦ Corriente que circula por las impedancias: $i_1(t), i_2(t), i_3(t)$.

Si recordamos que la potencia se calcula como:

$P_n(t) = u_n(t) \cdot i_n(t)$ para nuestro sistema trifásico, nos quedará como la suma de las tres potencias individuales:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = u_1(t) \cdot i_1(t) + u_2(t) \cdot i_2(t) + u_3(t) \cdot i_3(t)$$

Esta es la expresión general para el cálculo de la potencia trifásica en forma independiente de que la carga sea equilibrada o desequilibrada.

Teniendo los valores eficaces de la tensión U y la corriente I del sistema equilibrado, obtendremos además las expresiones de:

Para la tensión:

$u_{1(t)} = U_0 \text{sen}(\omega t - 0)$, desfasada 120° la segunda tensión.
 $u_{2(t)} = U_0 \text{sen}(\omega t - \frac{2}{3}\pi)$, y la tercera tensión nuevamente desfasada 120° con respecto a la anterior.

$$u_{3(t)} = U_0 \text{sen}(\omega t - \frac{4}{3}\pi)$$

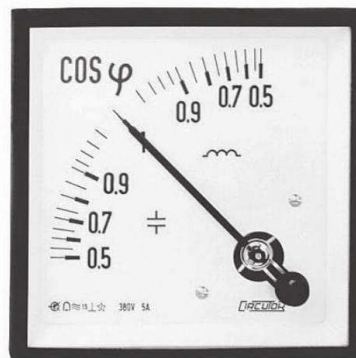
Para la corriente:

$i_{1(t)} = I_0 \text{sen}(\omega t - 0 - \varphi)$, desfasada 120° la segunda tensión.
 $i_{2(t)} = I_0 \text{sen}(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi)$, y la tercera tensión nuevamente desfasada 120° con respecto a la anterior.

$$i_{3(t)} = I_0 \text{sen}(\omega t - \frac{4}{3}\pi - \varphi)$$

Siempre recordemos que el ángulo φ es el que está formado por la corriente y la tensión.

En este punto debemos definir las potencias según sus componentes. De esta forma tenemos lo siguiente:



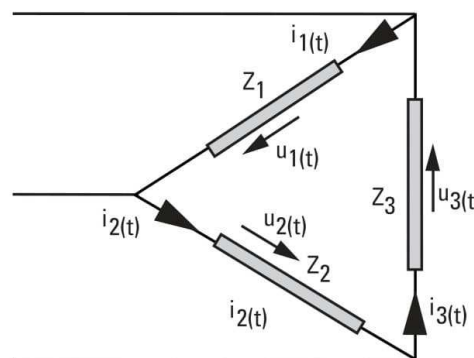
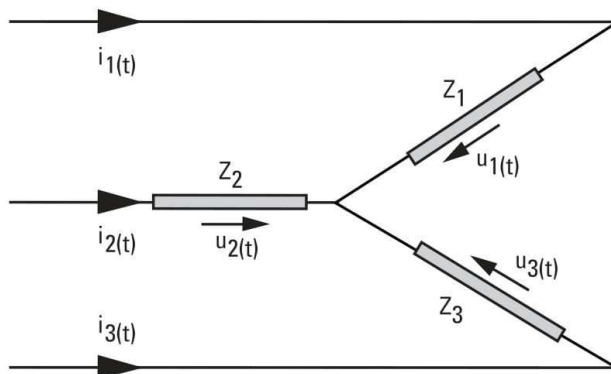
Medidor de cos φ en instalaciones. Este dispositivo suele instalarse en los medidores de corriente en instalaciones industriales, para tener un control adecuado.

Potencia contratada

Tener presente cuánta potencia puede contratar un cliente o una empresa es fundamental para controlar los costos que insumiremos. El primer paso en nuestro análisis es contar con información certera del factor de potencia presentada en nuestro distribuidor de energía; el segundo es reducir al mínimo los equipos que generen potencia reactiva. Con todos los aparatos controlados, podremos realizar un consumo eficaz de nuestras instalaciones.

♦ **Potencia reactiva:** es una parte de la potencia que no se transforma en trabajo útil, como calor o energía mecánica. Además, debemos saber que no se puede eliminar. Su existencia implica la aparición de un trabajo no aprovechable. Aparece en las instalaciones donde existen condensadores y bobinas (en las que tendremos corrientes inducidas), donde tiende a generar campos magnéticos y eléctricos. Está representada por la letra **Q** y se simboliza como **volt-amperios reactivos** (Var). En el triángulo de potencias, la **Q** está representada por la proyección en ordenadas ($\text{sen} \varphi$) de la potencia aparente.

♦ **Potencia activa:** se conoce como tal a la potencia capaz de transformar efectivamente la energía en trabajo útil,

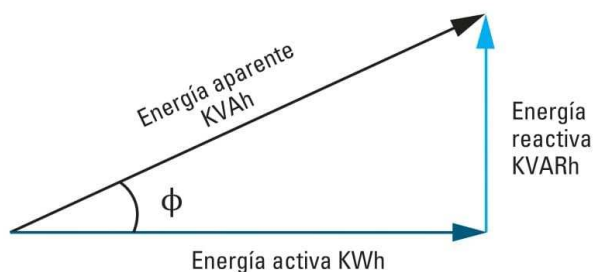


Para el cálculo de potencia nos enfrentaremos a dos sistemas de conexionado trifásico: en estrella y en triángulo.



como trabajo mecánico, térmico, químico, entre otros. En nuestras instalaciones eléctricas, lo que consumirán nuestros componentes o maquinarias será este tipo de potencia y, mientras mayor sea su magnitud y más cercana a la aparente, más eficiente será nuestra instalación. Se representa por la letra **P** y se mide en **watts (W)**. En nuestro triángulo de potencias, será la representación en eje de abscisas y se maximizará cuanto menor sea la desviación ($\cos\phi$).

♦ **Potencia aparente:** es la resultante de la interacción entre la potencia reactiva y la activa; es la suma vectorial de cada una de sus magnitudes. En los planos de las instalaciones se utiliza para establecer la potencia total que tendremos, considerando el factor de potencia que provee la distribuidora de energía eléctrica. Está representada por la letra **S** y se mide en **volt-amperios**.



Composición de triángulo de componentes de cada una de las energías y sus respectivas potencias.

De este modo, podremos calcular la potencia requerida. Si hemos calculado toda la potencia que necesitaremos (dispositivos electrónicos, maquinaria, luminaria, etcétera), habremos determinado toda la potencia activa que requeriremos. Si en nuestro sistema encontramos la aparición de sistemas reactivos, tendremos mayor potencia reactiva y, por lo tanto, requeriremos mayor potencia aparente, que en última instancia es la que contratamos a nuestro distribuidor.

La energía consumida domiciliar es la potencia activa y se mide en kWh.

Si en un sistema tenemos mayor potencia reactiva, circulará más corriente de la que necesitaremos y se producirá una pérdida de potencia activa. Las pérdidas producidas por la aparición de esta potencia influyen por efecto joule, caída de tensión en los conductores y recalentamiento en su interior. Los transformadores están diseñados para fun-

cionar con determinada carga de potencia activa máxima, por lo que una sobrepotencia reactiva recargaría los transformadores con energía que no podrá ser aprovechada. Si calculamos cada potencia individualmente en un sistema trifásico equilibrado en estrella, veremos que se trata de la suma de las potencias individuales de cada potencia monofásica:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 3P(t)$$

También determinamos que la potencia reactiva **Q** es la componente de la potencia aparente en el eje de ordenadas; tendremos que:

$$Q(t) = \sqrt{3}U_L \cdot I_L \cdot \text{sen}\phi$$

Retomando conceptos de conexiones en triángulo, tendremos el análisis matemático análogo, donde la principal diferencia será que:

$$U = U_L \cdot \sqrt{3} = \sqrt{3}U_L$$

Si desarrollamos la expresión, esta será la misma que en el caso del conexionado en estrella; para resumir, tendremos lo siguiente:

$$P(t) = \sqrt{3}U_L \cdot I_L \cdot \cos\phi \text{ y } Q(t) = \sqrt{3}U_L \cdot I_L \cdot \text{sen}\phi$$

Para cualquier conexionado, el cálculo será el mismo. Como la potencia aparente se determina como la suma vectorial, aplicamos el teorema de Pitágoras y queda:

$$S = P + Q = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Compensar energía reactiva

La energía reactiva está presente en las instalaciones que incluyen, principalmente, bobinas o inductores. Para compensar este desequilibrio, se usan baterías de condensadores que compensan estas energías. La aparición de condensadores en estos sistemas tiende a disminuir los efectos inductivos que trae aparejado un aumento en la capacidad de las líneas y los transformadores, mejora la tensión de la red y disminuye las pérdidas de tensión en los cables. Pero el principal beneficio será el económico, ya que se aprovechará mejor la potencia activa total.



Los principales efectos de un $\cos\phi$ serán:

- ♦ La sobrecarga en las instalaciones.
- ♦ Mayor costo para las distribuidoras, ya que por las instalaciones circula más corriente que la que efectivamente facturan.
- ♦ Mayores caídas de tensión.

Para expresarlo cuantitativamente, analizamos la expresión de la potencia:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\phi$$

La potencia es directamente proporcional a la tensión de la línea, a la corriente y al factor de potencia. Si aumenta cualquier valor, aumentará la potencia total. Si analizamos la expresión de la corriente:

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos\phi}$$

En el sistema, a medida que disminuye el $\cos\phi$, aumenta la corriente, por lo que se concluye que, para factores de potencia muy bajos, tendremos valores muy altos de corriente en el sistema.

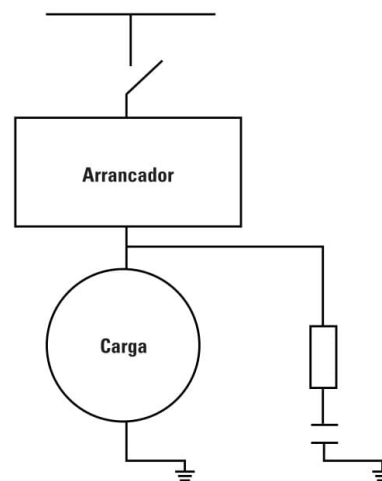
Recordemos otra vez que, para que se presente el desfase, el circuito debe poseer elementos inductivos, esto retrasará la fase o la tensión con respecto a la corriente. Si además introducimos en el sistema elementos capacitivos, estaremos adelantando la tensión con respecto a la corriente.

Este procedimiento se utiliza para corregir los desfases o compensar un sistema inductivo con uno capacitivo. Esta carga capacitiva aportará un efecto de adelantamiento de onda inverso al efecto de retraso de las cargas inductivas, en otras palabras, se busca anular un efecto con otro.

Para poder instalar los elementos capacitivos, es necesario entender cómo estos elementos afectan al equipo que funcione con energía reactiva. Si instalamos capacitores paralelos a la carga, estaremos anulando en parte los efectos de las cargas inductivas y, por lo tanto, reduciremos la potencia reactiva.

Si analizamos el triángulo de potencias, veremos que, como la potencia activa no se modifica, el elemento capacitivo reduce el desfase de la tensión y la corriente (se reduce el ángulo ϕ); por ende, la potencia reactiva se ve disminuida. También debemos tener en cuenta que la corriente que es necesaria para la magnetización de las cargas inductivas no se puede eliminar, pues queda circulando entre el capacitor y la carga, y no entre la fuente y la carga.

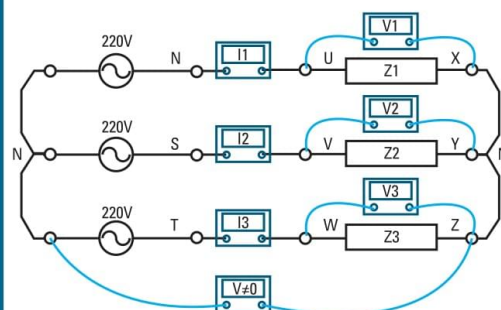
Un banco capacitivo permite compensar el desfase por efectos inductivos.



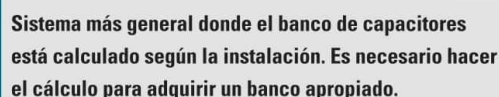
Compensación individual de una carga individual con su protección. Útil para aislar circuitos y analizarlos, pero muy costoso.

Existen tres métodos para compensar en paralelo:

- ♦ **Compensación individual:** cada capacitor es instalado en las cargas inductivas individuales como un sistema único para que los capacitores solo trabajen cuando los motores estén en funcionamiento. Cuando se detiene el motor, se interrumpe el funcionamiento de los capacitores. Este método es el más costoso, pues se instala un capacitor por cada carga inductiva y, cuando esta carga no esté en funcionamiento, el capacitor estará desaprovechado.
- ♦ **Compensación en grupo:** cuando hay varias cargas de las mismas características trabajando paralelamente y funcionando en forma simultánea, se instalan los capacitores en los extremos del grupo, abarcando a todas las cargas inductivas en su conjunto. Es un método más económico que el anterior, pero inconveniente si existen otros ramales de equipos inductivos. Se utiliza este sistema para controlar grupos individuales y como medida de seguridad para prevenir sobrecargas en el grupo y no en el sistema en general.



Podemos visualizar la instalación de un capacitor para un grupo de cargas inductivas que funcionan simultáneamente. Sus características deben ser similares.



Para entender cuál es el efecto buscado para reducir el efecto reactivo, observemos el caso en el que tenemos el triángulo de potencias normal. Al someterlo a los elementos capacitivos, aparece una potencia capacitiva que se contrapone a la inductiva. Por lo que tendremos una nueva potencia reactiva según:

Y si tenemos que:

$$Q_c = P. (\tan \varphi_1 - \tan \varphi)$$

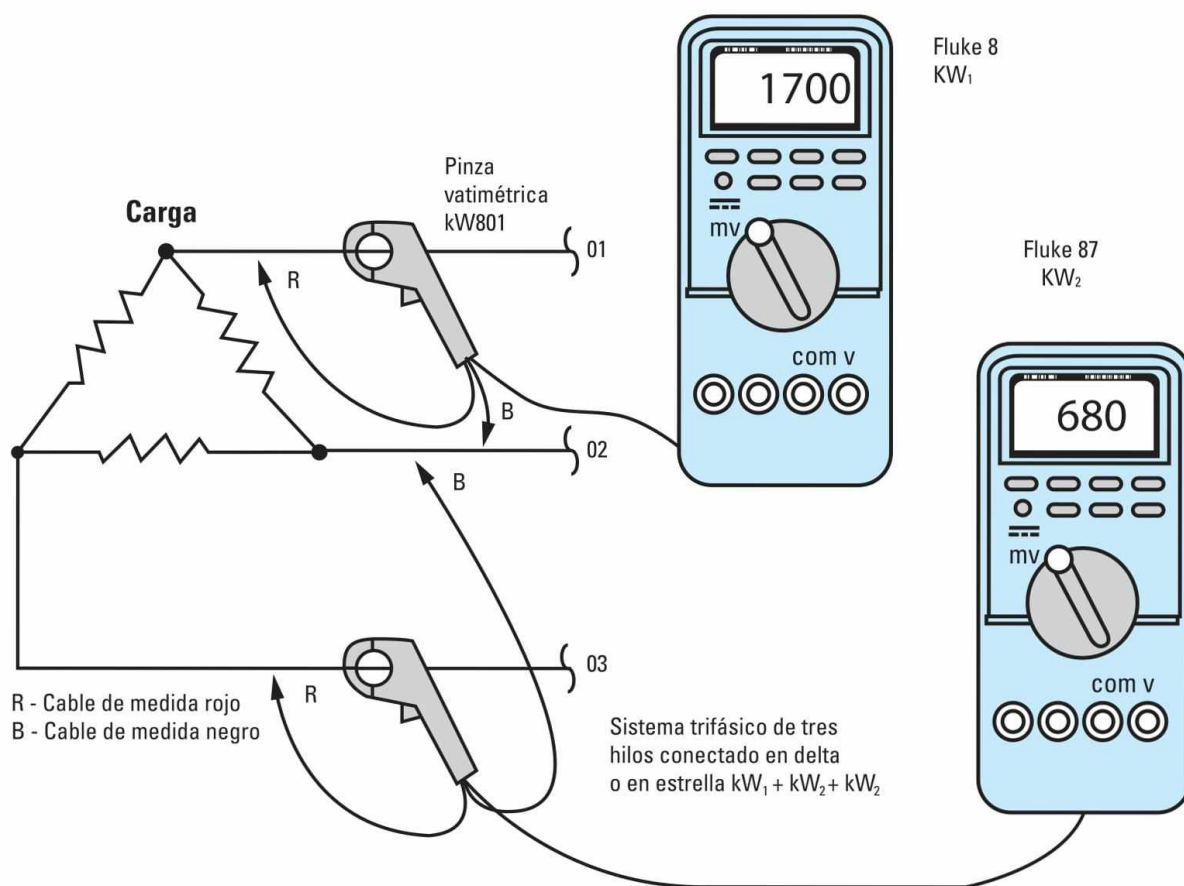
$$Q_c = P \cdot k$$
$$P_{\text{kVAr recomendado}} = 95 \text{ kVAr}$$

Continúa en la página 144

MEDICIÓN DE POTENCIA

La medición de potencia en sistemas trifásicos depende del sistema que necesitamos evaluar, es decir, si estamos frente a un sistema de tres o de cuatro hilos.

Sistema de tres hilos



En estos sistemas debemos realizar dos mediciones con la pinza vatimétrica, y obtendremos la potencia mediante la fórmula:

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2$$

En ella vemos que:

$P_{3\phi}$ = Potencia trifásica, en kW

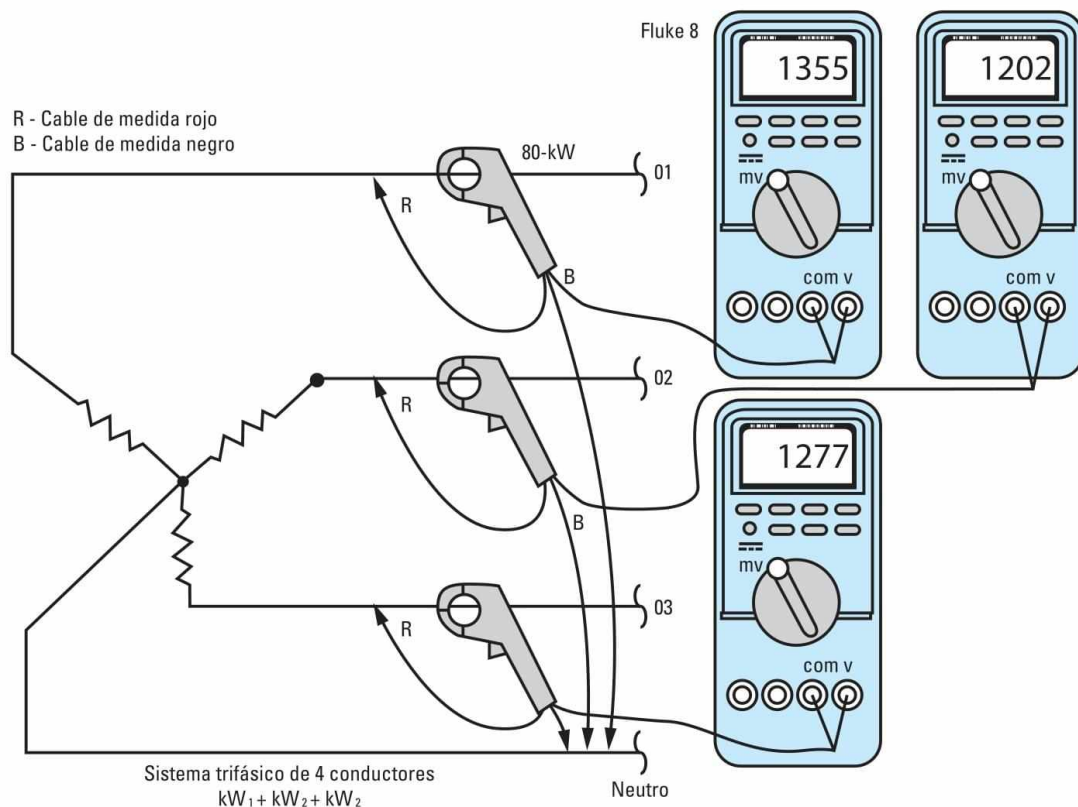
P_1 = Potencia de medida en la posición 1

P_2 = Potencia de medida en la posición 2

Ejemplo de la pinza vatimétrica, se trata del modelo HT9022TRMS, que se presenta como una combinación entre un analizador de calidad de energía, comprobador de la rotación de fases, pinza amperimétrica y también un eficiente detector de tensión sin contacto.



Sistema de cuatro hilos



En estos sistemas debemos realizar dos mediciones con la pinza vatimétrica, y obtendremos la potencia mediante la fórmula:

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 + P_3$$

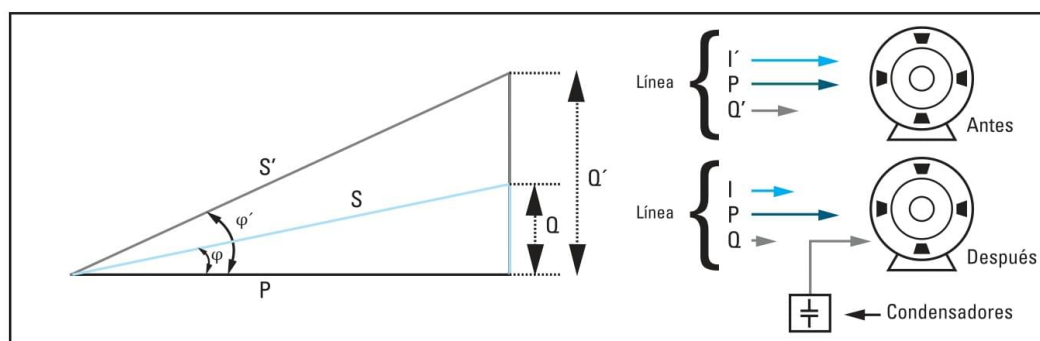
En ella vemos que:

$P_{3\phi}$ = Potencia trifásica, en kW

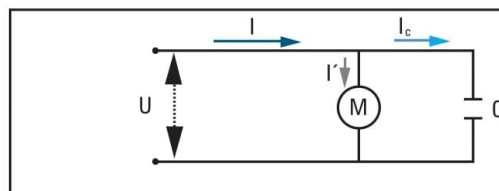
P_1 = Potencia de medida en la posición 1

P_2 = Potencia de medida en la posición 2

P_3 = Potencia de medida en la posición 3



De la figura siguiente se deduce que la potencia reactiva del condensador ha de ser:



$$Q_c = Q' - Q = P \cdot (\tan \varphi' - \tan \varphi)$$

$$\text{Como } Q_c = U \cdot I_c = U^2 \cdot \omega \cdot C$$

$$U^2 \cdot \omega \cdot C = P \cdot (\tan \varphi' - \tan \varphi)$$

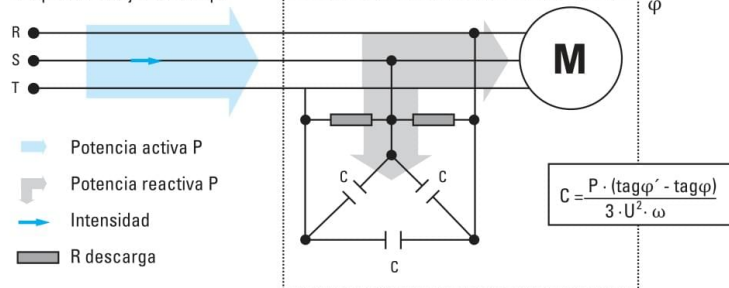
$$C = P \cdot (\tan \varphi' - \tan \varphi) / U^2 \cdot \omega$$

El triángulo de potencias antes y después de la compensación. La potencia capacitiva que aparece se contrapone a la inductiva.

Antes de mejorar el f.d.p.



Después de mejorar el f.d.p.



Podemos observar cuál es la función del capacitor cuando se mejora el factor de potencia. El cálculo nos ayuda a entender cuál es la mejora real.

Para traducir todo a un ejemplo práctico, podemos pensar en un local comercial que consume 300 kWh con un factor de potencia de 0.7 inductivo, y requiere una potencia reactiva de 327 kWh. Hacemos el cálculo como:

$$P = 300 \text{ kW}$$

$$Q = 327 \text{ kVAR}$$

$$\cos \varphi = 0.7$$

$$= 444 \text{ kVA}$$

Si corrige $\cos \varphi = 0.95$:

$$P = 300 \text{ kW}$$

$$S = 316 \text{ kVA}$$

Obtendremos una $Q = 99 \text{ kVAR}$.

Como vemos, si mejoramos a 0.95 el factor de potencia, requeriremos menor potencia aparente, lo que implica un menor consumo para entregar la misma potencia activa.

RedUSERS PREMIUM

Acesso libre e ilimitado a todas las publicaciones digitales de nuestra editorial para leer online y offline.

Suscríbete: usershop.redusers.com



USERS

CURSO VISUAL Y PRÁCTICO

TÉCNICO ELECTRICISTA

Copyright © MMXVII. Es una publicación de Six Ediciones. Hecho el depósito que marca la ley 11723. Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en todo ni en parte, por ningún medio actual o futuro, sin el permiso previo y por escrito de Six Ediciones. Su infracción está penada por las leyes 11723 y 25446. La editorial no asume responsabilidad alguna por cualquier consecuencia derivada de la fabricación, funcionamiento y/o utilización de los servicios y productos que se describen y/o analizan. Todas las marcas mencionadas en este libro son propiedad exclusiva de sus respectivos dueños. Impreso en Argentina. Libro de edición argentina. Primera impresión realizada en Sevagraf, Costa Rica 5226, Grand Bourg, Malvinas Argentinas, Pcia. de Buenos Aires en V, MMXVII.

Balenzuela, Guillermo

Técnico electricista 1: segunda edición / Guillermo Balenzuela.

2a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Six Ediciones, 2017.

144 p.; 28 x 20 cm. - (Técnico electricista; 1)

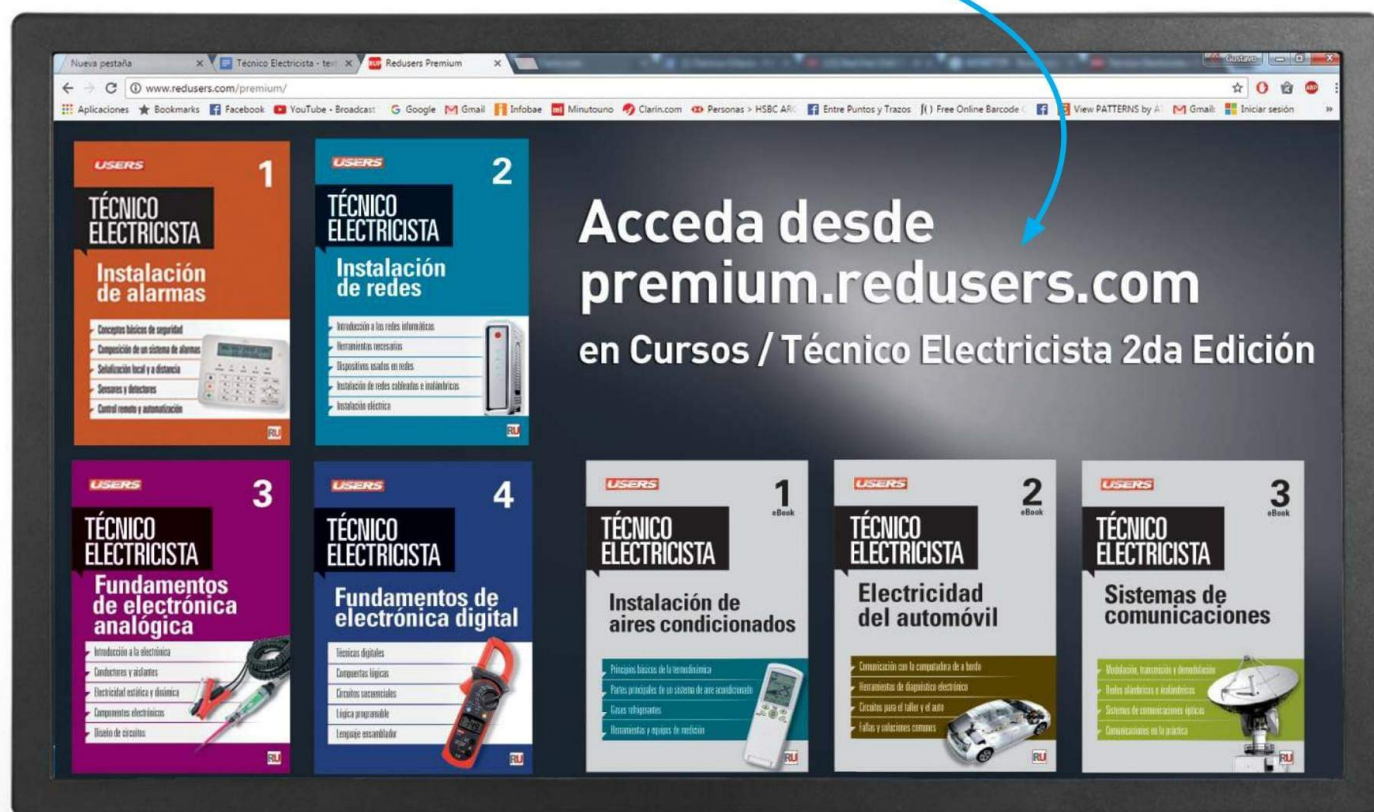
ISBN 978-987-46518-1-5

1. Electricidad Domiciliaria. 2. Electricidad. 3. Electricidad del Automóvil. I. Título.

CDD 621.3

PARA EXPLORAR AÚN MÁS:

¡Este curso incluye 7 e-books gratuitos!



TÉCNICO ELECTRICISTA

Este libro forma parte
de un completo curso
de 24 clases en 4 volúmenes.
¡Adquiera toda la colección en
usershop.redusers.com!



> **CLASE 1**

Fundamentos de electrotecnia

Presentación de la obra, energía eléctrica y energía potencial, efectos de la corriente eléctrica en los materiales.

> **CLASE 2**

Corriente continua

Caída de potencial, leyes de tensión y corriente, conexión de resistencias.

> **CLASE 3**

Magnetismo Campo magnético, efectos de los campos magnéticos, materiales y circuitos magnéticos.

> **CLASE 4**

Corriente alterna

Fuerza electromotriz, corriente alterna en elementos pasivos, efectos de la corriente alterna.

> **CLASE 5**

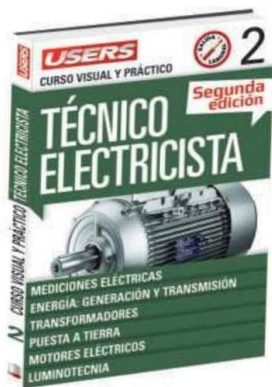
Circuitos serie y paralelos

Circuitos en serie, circuitos en paralelo, resonancia.

> **CLASE 6**

Sistemas trifásicos

Generación trifásica, sistema triángulo, diagramas de secuencia, potencia.



> **CLASE 7**

Mediciones eléctricas

Sistemas de medición, instrumentos de medida, medidores de energía.

> **CLASE 8**

Generación, transmisión y difusión

Tipos de fuentes de energía, fundamentos de transformación de tensión.

> **CLASE 9**

Transformadores

Fundamento del transformador, pérdidas, tipos de transformadores.

> **CLASE 10**

Puesta a tierra

Concepto, criterios de diseño, mantenimiento de sistemas de puesta a tierra.

> **CLASE 11**

Motores eléctricos

Motores asíncronos, motores trifásicos, motores monofásicos, motor universal.

> **CLASE 12**

Luminotecnia

Iluminación, tipos de lámparas, determinación del nivel de iluminación.



> **CLASE 13**

Seguridad eléctrica

Parámetros de riesgo, influencias en el cuerpo humano, tipos de contacto.

> **CLASE 14**

Protecciones eléctricas y tableros

Fusibles, interruptores termomagnéticos, tableros eléctricos.

> **CLASE 15**

Canalización y conductores

Clasificación, tipos de conductores aprobados, dimensionamiento de conductores.

> **CLASE 16**

Circuitos en instalaciones eléctricas

Líneas, armónicos, corriente de cortocircuitos.

> **CLASE 17**

Reglamentación de instalaciones eléctricas

Planos y croquis, materiales normalizados, grado de electrificación para viviendas, clasificación de zonas.

> **CLASE 18**

Reglamentación de instalaciones eléctricas en locales especiales

Locales comerciales, establecimientos educacionales, locales de ambiente peligroso.



> **CLASE 19**

Proyecto de instalación en viviendas

Planillas del proyecto de instalación, de esquema de tableros, de distribución ambiental de bocas y cajas.

> **CLASE 20**

Ejemplo de proyecto de instalación

Memoria descriptiva, especificaciones técnicas, reglas de instalación.

> **CLASE 21**

Normativas

Introducción a la normalización, tipos de normas, control de calidad.

> **CLASE 22**

Instalación de portones eléctricos y CCTV

Instalación y mantenimiento de portones automatizados, instalación de circuito CCTV y cámaras IP.

> **CLASE 23**

Instalación de centrales telefónicas y porteros eléctricos

Conceptos básicos de telefonía, montaje de equipos, mantenimiento y reparación.

> **CLASE 24**

Generación alternativa

Energía solar, clasificación de sistemas fotovoltaicos, grupos electrógenos.



PROFESORES EN LÍNEA
profesor@redusers.com

**SERVICIOS
PARA LECTORES**
usershop@redusers.com

ISBN 978-987-46518-1-5



9 789874 651815 >