

# UNIDAD 4. ELECTROMAGNETISMO, CORRIENTE ALTERNA Y SISTEMAS TRIFÁSICOS

## MAGNETISMO

Los imanes son materiales capaces de atraer a otros produciendo los llamados fenómenos magnéticos. Los imanes tienen la peculiaridad de orientarse, siempre que se muevan libremente, siguiendo la línea norte-sur geográfica. Hecho de gran aplicación en la fabricación de brújulas y compases marinos.

Algunos imanes existen en la naturaleza (como la magnetita, que es una roca que en la antigüedad se conocía que era abundante en la región griega de Magnesia), otros, los artificiales, adquieren propiedades magnéticas a partir de ciertos materiales, sometiéndolos a campos magnéticos. El efecto magnético sobre los imanes artificiales puede ser permanente, o temporal.

### Polos de un imán

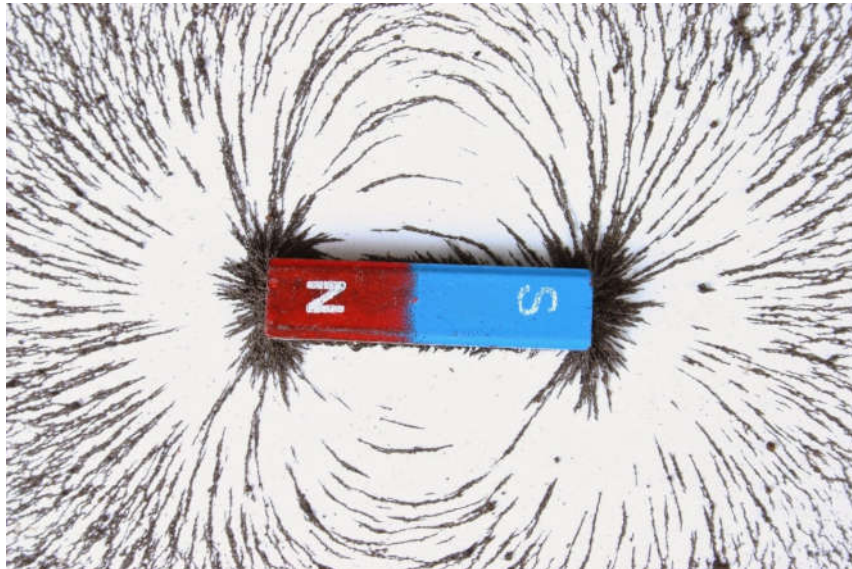
En un imán se distinguen dos zonas bien determinadas, y donde se producen efectos contrarios, estas zonas son los polos. Uno se llama polo norte y el otro polo sur. Si suponemos una barra imantada, en ella se aprecian dos polos magnéticos, próximos a los extremos y la zona que los une, denominada zona neutra. Los polos de igual nombre se repelen y los de nombre contrario se atraen.

### Campo magnético

Se llama campo magnético al espacio que rodea un imán y en el que se manifiestan fuerzas magnéticas. Para comprobar la existencia del campo magnético, podemos valernos de la siguiente experiencia:

Si sobre un imán colocamos una hoja de papel y encima espolvoreamos limaduras de hierro, veremos que las limaduras de hierro se reparten siguiendo unas líneas curvas regulares que parecen nacer en uno de los polos para ir a morir al otro. Estas líneas reciben el nombre de líneas de fuerza, y la forma adquirida por las limaduras, en la hoja de papel, espectro magnético. El espectro magnético proporciona una visión aproximada de la dirección que siguen las líneas de fuerza en el espacio, y muestran como el campo magnético va disminuyendo en intensidad a medida que aumenta la distancia al imán que

lo produce. El sentido de las líneas de fuerza se ha convenido en admitir que están dirigidas del polo Norte al polo Sur, por el exterior del imán, y que estas líneas se cierran por el interior del imán del polo Sur al polo Norte, recibiendo el nombre de líneas de inducción.



Líneas de fuerza del campo magnético de un imán

### Tipos de materiales

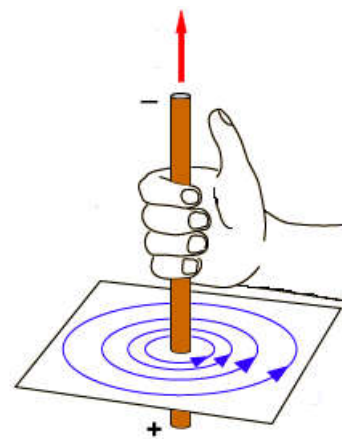
Según su comportamiento ante un campo magnético, los materiales pueden ser **ferromagnéticos** (cuando sus estructuras moleculares se orientan en la misma dirección que el campo, como el hierro), **paramagnéticos** (aquellos que no se alteran bajo la influencia de un campo magnético, como el aluminio o el titanio) o **diamagnéticos** (cuando sus estructuras moleculares se orientan en dirección contraria al campo).

Curiosidad: algunos de los aceros más comunes en la construcción naval, como el 304 o el 316, son prácticamente paramagnéticos

## ELECTROMAGNETISMO

### Campo magnetico creado por un conductor

Cuando una corriente atraviesa un conductor, alrededor de éste se crea un campo magnético. Oersted fué el primero en observar

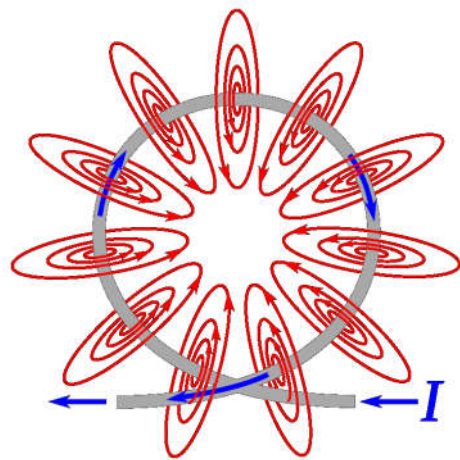


este fenómeno por casualidad: se dió cuenta de que la aguja de una brújula cercana bailaba, cuando estaba montando un circuito eléctrico experimental.

Las líneas de fuerza son concéntricas con el conductor y su dirección es sencilla de recordar mediante la regla de la mano derecha. Es fácil entender que el campo magnético a lo largo del cable tiene forma cilíndrica. Este campo magnético es descrito matemáticamente por la ley de Biot-Savart.

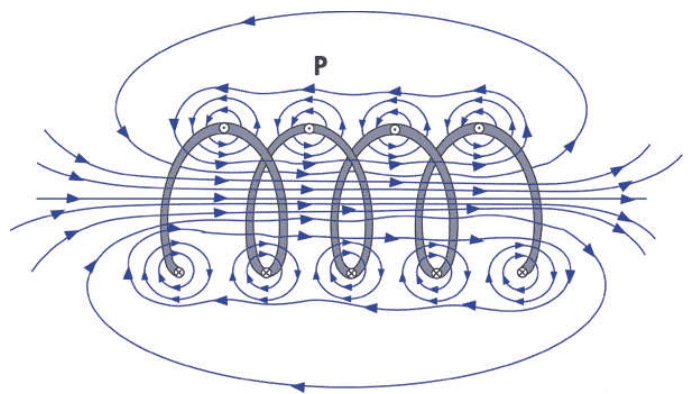
#### Campo magnético creado por una espira

Si doblamos el conductor y le hacemos dar una vuelta, o espira, el campo magnético adopta forma de toroide (donut)



#### Campo magnético creado por una bobina

Una bobina es un conductor enrollado en forma de espiral. Por tanto está formada por muchas espiras seguidas. Cuando los campos magnéticos de cada espira se combinan en uno solo, se genera un campo magnético muy intenso y uniforme en su interior, y muy débil en el exterior.



Recuerda que en física, un campo es una ecuación que permite conocer el valor de un fenómeno físico en cualquier punto del espacio, y puede ser escalar (como los campos que describen las presiones o las temperaturas) o vectorial (como los campos de fuerzas, en el caso que estudiamos ahora, el campo magnético)

La cantidad de magnetismo que se genera dentro de la bobina viene definida por la expresión del campo magnético inducido en ella, al que llamamos **Inducción magnética**. La representamos por la letra griega  $\beta$  ("beta") y su magnitud es el Tesla [T]

$$\beta = \mu \cdot \frac{N \cdot I}{l}$$

N=número de espiras

I=intensidad [A]

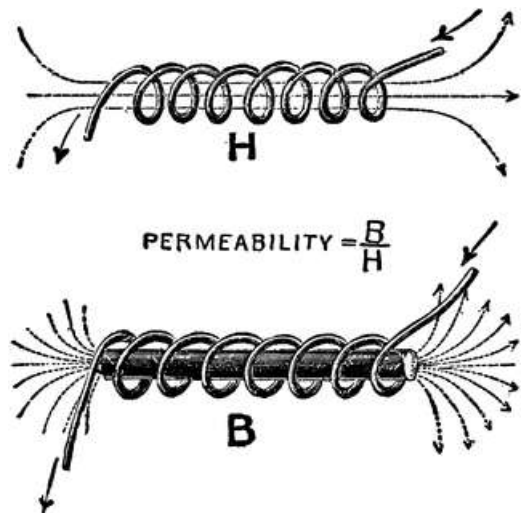
l=longitud de la bobina

A esta expresión matemática se la conoce como **Ley de Ampère**. Nos indica que la inducción es mayor cuanto mayor sea el número de espiras N, y la intensidad de la corriente I. Por el contrario, cuanto más larga sea la bobina, menor será la inducción que en ella se genere.

A la última parte de la ecuación anterior la llamamos **Intensidad del campo magnético** (H) y se mide en Amperios·vuelta/metro [A·v/m]. Esta parte describe sólo las características de la bobina en si, sin tener en cuenta el núcleo

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

A la variable  $\mu$  ("mu") la llamamos **permeabilidad magnética**. Se incluye para describir el medio en el que se encuentra el campo. Cuanto mayor es la permeabilidad magnética de una sustancia, mejor es su comportamiento magnético. Si en el interior de la bobina, hasta ahora ocupado por el aire, introducimos un núcleo de algún material ferromagnético observaremos que el campo magnético aumenta muy notablemente.



La permeabilidad de cada material ferromagnético se expresa como la mejora del campo magnético de una bobina, respecto al mismo campo si el núcleo hubiera sido de aire o vacío. Es decir, cada material tiene una permeabilidad relativa. Esto se puede expresar como  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$

$\mu_r$ =permeabilidad relativa

$\mu$ =perm. Absoluta

$\mu_0$ =permeabilidad del aire/vacío  $= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$

## Flujo magnético

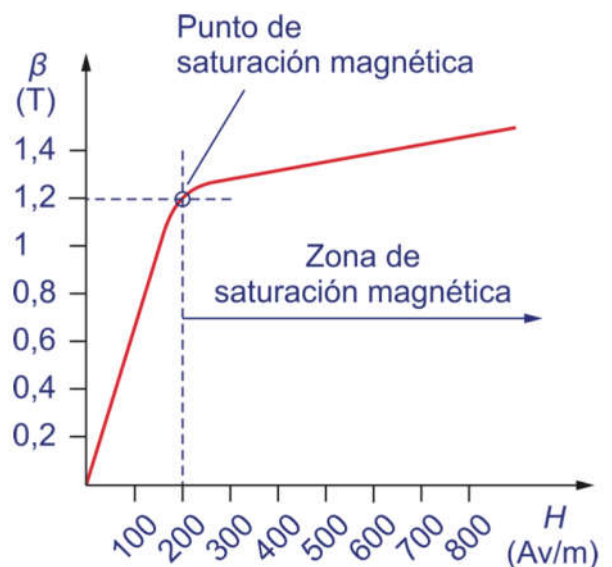
Una vez descrito el campo magnético en el interior de una bobina, es interesante describir la cantidad de magnetismo que atraviesa una superficie en concreto, dentro de ese campo. A esta magnitud la llamamos **flujo magnético**. Lo representamos por la letra griega  $\Phi$  ("fi") y se mide en Weber [Wb]. El flujo se calcula multiplicando el campo inducción ( $\beta$ ), por la superficie que estemos considerando.

$$\phi = \beta \cdot S$$

Entender el concepto de flujo magnético es fundamental para comprender el funcionamiento de las máquinas eléctricas, en lo que se refiere a la generación de corriente eléctrica a partir del movimiento (generadores), y a la generación de movimiento a partir de corrientes eléctricas (motores). La mejor manera de visualizarlo es pensar en la cantidad de líneas de fuerza

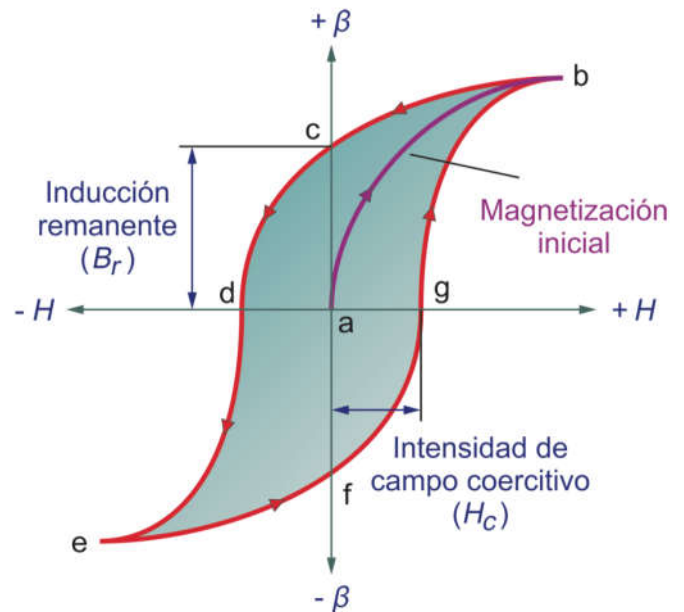
## MAGNETIZACIÓN

Cuando se somete un material ferromagnético a un campo magnético de intensidad creciente, se observa que la inducción (recordemos, la densidad del flujo magnético inducido en el material) aumenta, aunque no lo hace de manera constante. Al principio muchas de sus estructuras moleculares (que se comportan como mini-ímanes y se llaman dipolos) se orientan rápidamente en la dirección del campo, pero a medida que aumentamos la intensidad del campo, van quedando menos dipolos sin orientar, y se observa que la inducción aumenta cada vez menos. Se dice entonces que el material ha llegado a su punto de saturación magnética.

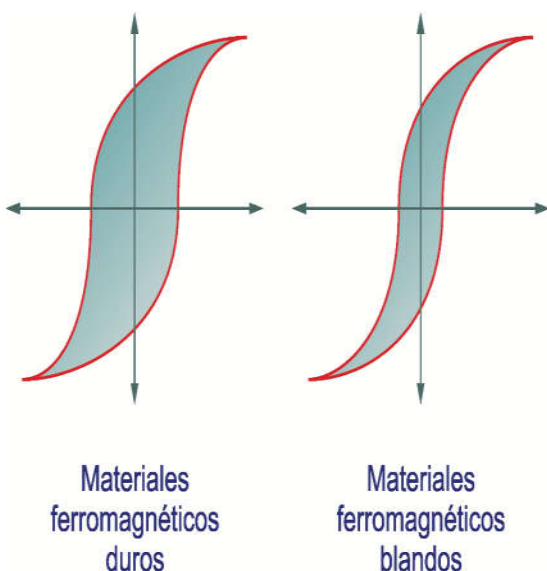


## El ciclo de histéresis magnética

Una vez que un material ha alcanzado su punto de saturación magnética, si eliminamos el campo eléctrico al que estaba sometido, observaremos que la inducción en el material no vuelve a cero, sino que hay una **inducción remanente** que permanece en el material. Si vamos más allá e intentamos contrarestar esta inducción remanente aplicando una intensidad de campo en sentido contrario, observaremos



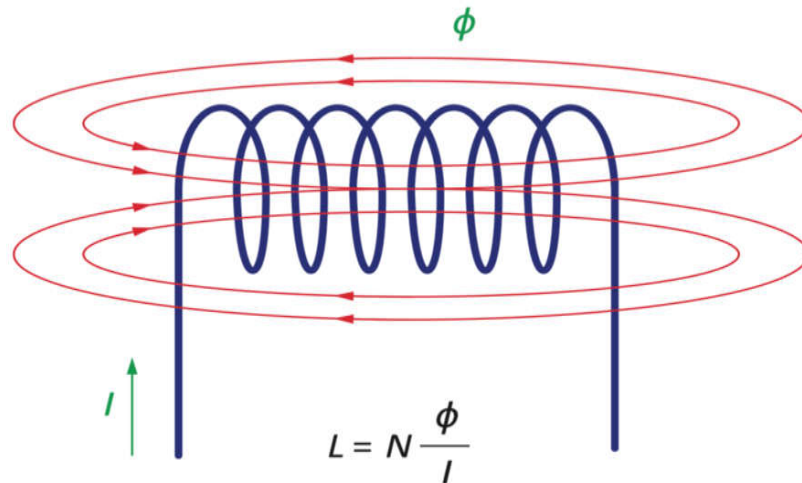
que necesitaremos un cierto valor de intensidad para devolver la inducción a cero. Esta intensidad se llama **intensidad de campo coercitivo**. Si seguimos aumentando la intensidad de campo, volveremos a alcanzar un punto de saturación, y al invertir de nuevo el campo magnético hasta cancelarlo, volveremos a observar una inducción remanente (esta vez en sentido contrario), y será necesaria una nueva intensidad de campo coercitivo para anular la inducción. Este ciclo se llama de Histéresis Magnética, y puede repetirse sucesivamente, observando que ya nunca volveremos a pasar por el punto inicial, donde la inducción era nula si la intensidad de campo era nula.



Para la fabricación de imanes permanentes, interesa utilizar materiales para los que la superficie delimitada por su ciclo de histéresis sea lo más grande posible. Estos materiales se llaman **ferromagnéticos duros** (como el neodimio). Sin embargo, para la fabricación de máquinas eléctricas se utilizan materiales **ferromagnéticos blandos**, puesto que la intensidad de campo coercitivo de su ciclo de histéresis es menor, y ello se traduce en menores pérdidas por calor, y por tanto en mejores rendimientos.

## LA AUTOINDUCCIÓN O INDUCTANCIA

Es la capacidad que tienen las bobinas de **oponerse a los cambios de corriente que circula por ellas**. Su magnitud es el Coeficiente de Autoinducción. Se representa por la letra  $L$  y su unidad es el Henrio [H]. Relaciona la intensidad de la corriente con el flujo magnético generado y el número de espiras de la bobina



Otra manera más práctica de expresar el coeficiente de autoinducción, ya que tiene en cuenta las características físicas de la bobina, es la expresión:

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l} \quad (\text{para el aire})$$

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l} \quad (\text{para nucleo ferromagnético})$$

## CIRCUITOS ELECTROMAGNÉTICOS

Un circuito magnético es aquel camino cerrado, generalmente de algún material electromagnético, por el cual actúa una fuerza magnetomotriz. Muchas máquinas eléctricas, especialmente las rotativas, deben ser calculadas electromagnéticamente. Calcular circuitos magnéticos es complejo porque generalmente son de formas geométricas complejas. Además, en las separaciones (entrehierros), aparecen dispersiones del flujo que deben ser tenidas en cuenta.

Aún así es posible calcular los circuitos magnéticos más simples, como los que se encuentran en electroimanes y transformadores. En general, bastará con calcular la fuerza magnetomotriz necesaria en cada parte del circuito.



## ELECTROIMANES

Un electroimán es una máquina electromagnética muy simple, compuesta generalmente de una parte en forma de herradura, a la que llamamos núcleo, sobre la cual enrollamos una bobina. Al hacer pasar corriente por la bobina aparece un campo magnético que atrae a la otra parte del electroimán, que se llama armadura. Es decir, imantamos el núcleo a voluntad cuando hacemos pasar una corriente, y lo desimantamos cuando la desconectamos.

Las aplicaciones de los electroimanes son muy variadas. Destacan las siguientes:

- Frenos magnéticos
- Electroválvulas
- Timbres
- Relés y contactores

## INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La inducción electromagnética es la generación de electricidad por la acción de un campo magnético cambiante. Esto puede darse de diferentes maneras:

- Un cable conductor moviéndose bajo la influencia de un campo magnético fijo
- Un cable conductor fijo rodeado por un campo magnético móvil
- Un cable conductor fijo rodeado por un campo magnético de intensidad variable.

En cualquiera de estos casos aparece una fuerza electromotriz en el cable, que se manifiesta como una tensión eléctrica entre los extremos del conductor.

### Leyes de Faraday y Lenz

La ley de Faraday expresa que la fuerza electromotriz ( $\varepsilon$ ) que se induce en el conductor, cuando se le somete a un campo magnético variable, es función de cuanto varía el flujo magnético que percibe el conductor, por unidad de tiempo.

$$\varepsilon = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad \text{Si se trata de una bobina de } N \text{ espiras, la fórmula sería } \varepsilon = - N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

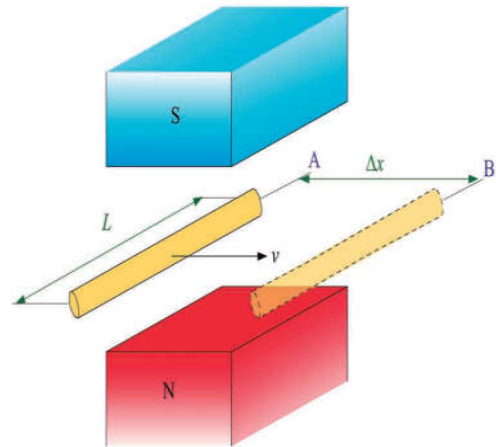
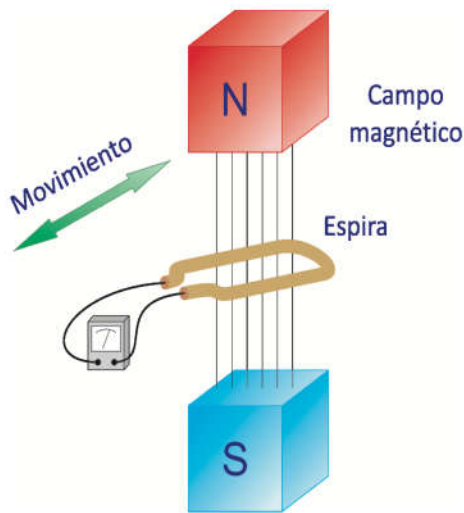
El signo negativo se debe a la ley de Lenz. Según esta ley, la corriente inducida en el conductor genera a su vez un nuevo campo magnético, y la dirección de este campo secundario es contraria al campo principal. Esto define el





sentido de la corriente que aparece en el conductor, que puede recordarse con la regla de Fleming de la mano derecha.

La fuerza electromotriz puede expresarse también en función de la inducción, la longitud y la velocidad a la que se mueve el conductor dentro del campo.  $\varepsilon = \beta \cdot l \cdot v$



### Fuerza de Laplace sobre un conductor

De la misma manera que al mover un conductor en un campo magnético aparece una fuerza electromotriz (voltaje), se observa que si se hace circular una corriente por un conductor que se encuentra bajo la influencia de un campo magnético, lo que aparece es una fuerza, que puede llegar a ocasionar que el conductor se mueva. Este fenómeno es el principio de funcionamiento de los motores eléctricos.

Para recordar en qué dirección apunta esta fuerza, se utiliza la regla de Fleming de la mano izquierda.

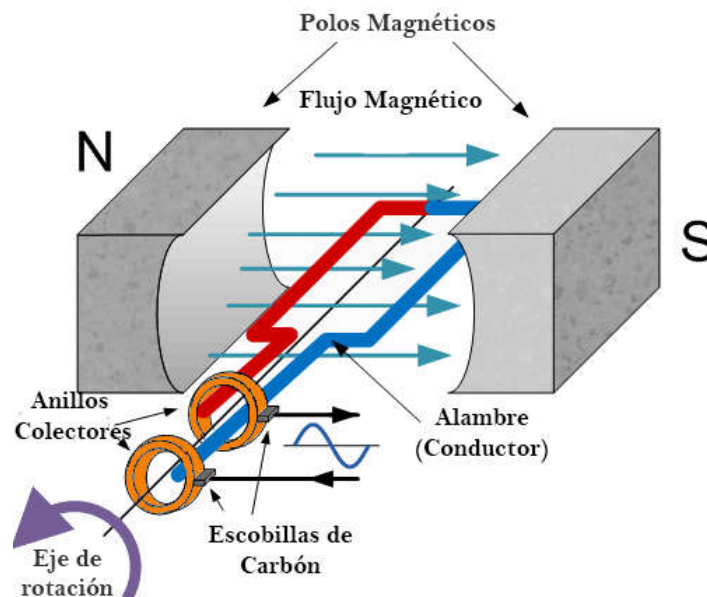
El valor de la fuerza de Laplace lo da la siguiente fórmula:

$$F = \beta \cdot l \cdot I$$



## LA CORRIENTE ALTERNA

La corriente alterna (CA) se obtiene principalmente a través de generadores eléctricos en plantas de energía. Estos generadores transforman la energía mecánica en energía eléctrica mediante el principio de la inducción electromagnética. En este proceso, un conductor se mueve girando dentro de un campo magnético, generando una corriente eléctrica que oscila entre un valor máximo y otro valor máximo en sentido contrario. Por lo tanto, la corriente cambia de dirección periódicamente.

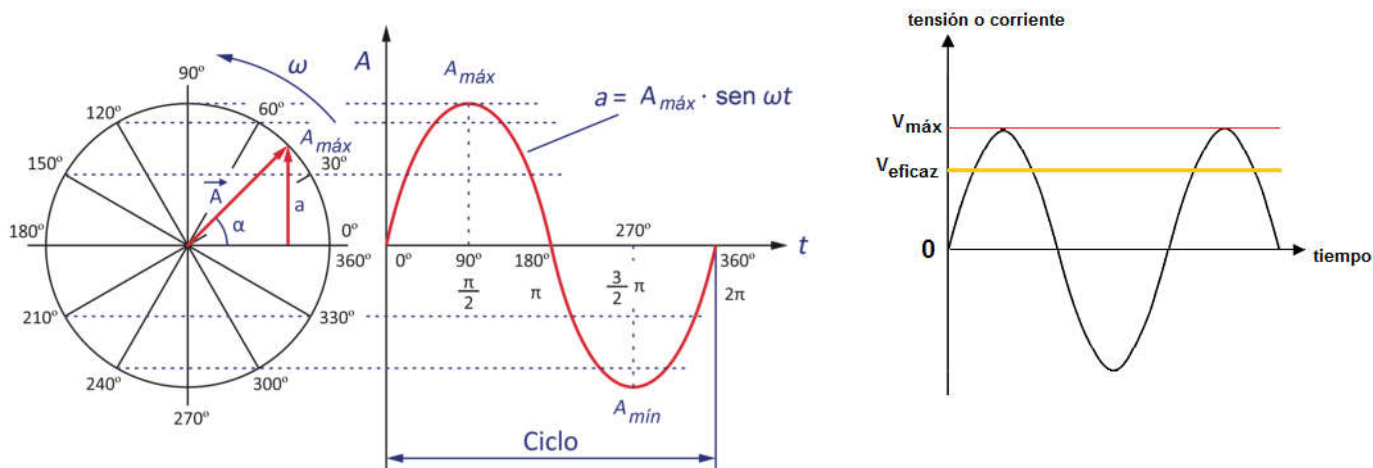


### Tipos de corriente alterna. La corriente senoidal

La corriente alterna puede tomar diversas formas, pero la más común es la corriente senoidal. Esta forma se caracteriza por variar de manera continua y suave, siguiendo una función senoidal con respecto al tiempo. La corriente senoidal es preferida por sus propiedades beneficiosas para la transmisión y distribución de energía.

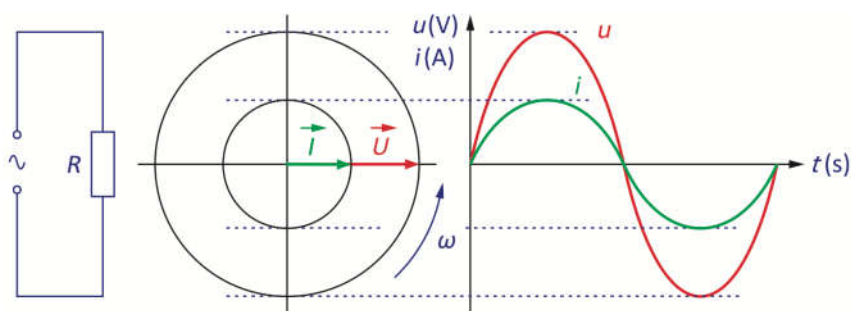
Valores característicos de la corriente alterna: frecuencia y período, valor máximo y valor eficaz

- Frecuencia ( $f$ ): Número de ciclos completos de la corriente alterna que ocurren en un segundo, medida en hercios (Hz).
- Valor máximo ( $V_m$ ): Máximo valor instantáneo de la tensión o corriente.
- Valor eficaz ( $V_{ef}$  o  $I_{ef}$ ): Valor que produce el mismo efecto de calentamiento en una resistencia que una corriente continua de igual magnitud. Para una corriente senoidal, es igual a  $V_m/\sqrt{2}$ .



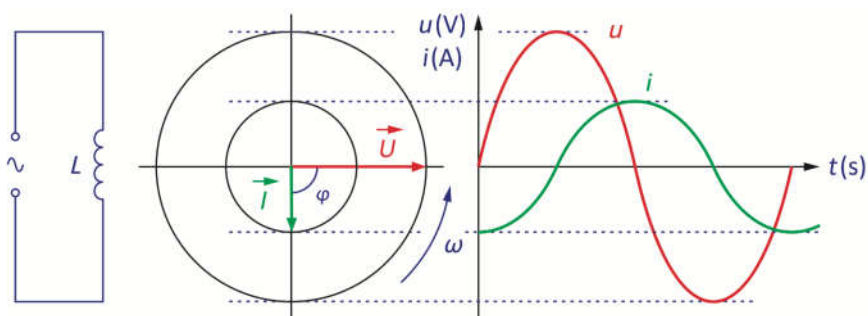
### La resistencia en corriente alterna

En corriente alterna, la resistencia se comporta de manera similar a la corriente continua. La resistencia ofrece una oposición constante al flujo de la corriente, independientemente de la frecuencia.



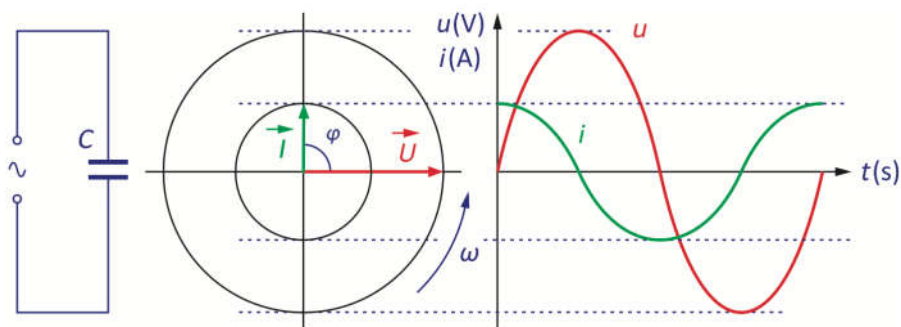
### La bobina en corriente alterna

Una bobina en corriente alterna presenta inductancia, creando una oposición al cambio de corriente. Esta oposición se denomina reactancia inductiva ( $X_L$ ) y depende de la frecuencia de la corriente y la inductancia de la bobina ( $X_L = 2\pi fL$ ).



## El condensador en corriente alterna

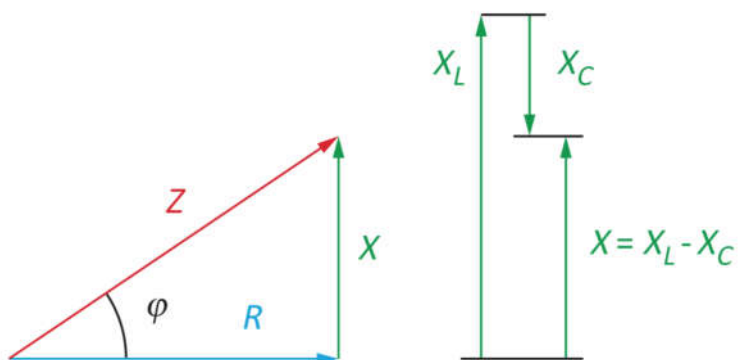
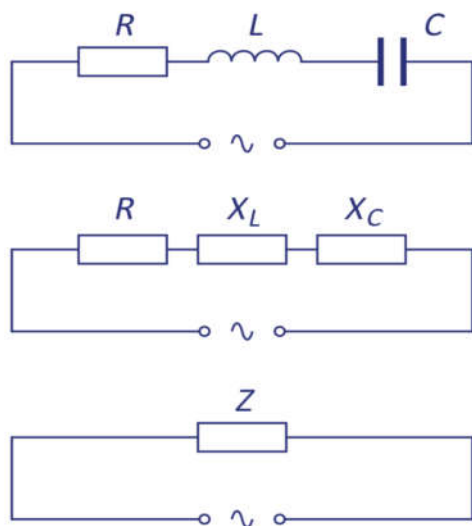
El condensador en corriente alterna introduce reactancia capacitiva ( $X_C$ ), que se opone al cambio de voltaje. La reactancia capacitiva depende de la frecuencia y la capacitancia del condensador ( $X_C = 1/(2\pi fC)$ ).



## La ley de Ohm en corriente alterna. Reactancia inductiva y capacitiva

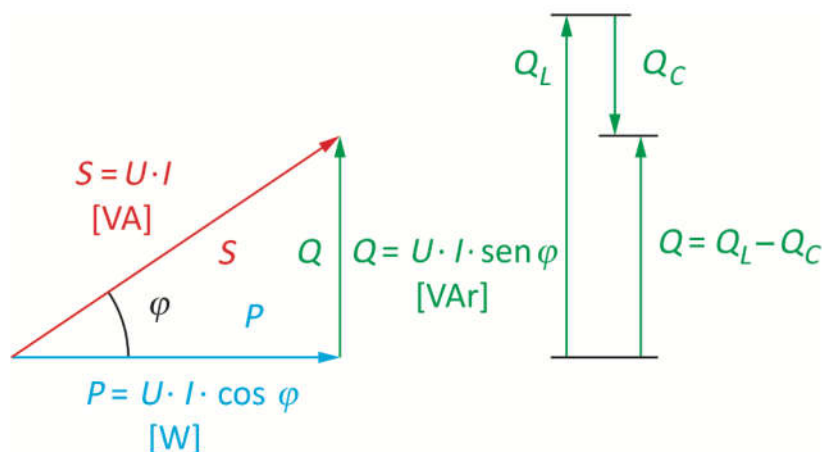
Prácticamente en todos los circuitos hay presencia de bobinas y condensadores. La ley de Ohm en corriente alterna se aplica considerando un término nuevo, la impedancia ( $Z$ ), que combina resistencia ( $R$ ) y reactancias ( $X_L$  y  $X_C$ ).

La impedancia se calcula fácilmente por trigonometría o por pitágoras, teniendo en cuenta los desfases explicados anteriormente, y el llamado triángulo de impedancias:



## El triángulo de potencias

Partiendo del triángulo de potencias, puesto que la potencia es el producto de la resistencia (ahora impedancia), por la intensidad al cuadrado, es fácil entender que las potencias en alterna se representan también con su propio triángulo



Este triángulo se utiliza para representar las relaciones entre la potencia activa (P), potencia reactiva (Q) y potencia aparente (S).

La potencia activa, también conocida como potencia real, es la cantidad de energía que se convierte en trabajo útil en un sistema eléctrico. Se mide en vatios (W) y representa la energía consumida por los dispositivos eléctricos para realizar funciones como mover motores o iluminar luces.

La potencia reactiva es la energía que alterna entre la fuente y el dispositivo sin ser convertida en trabajo útil. Es necesaria para mantener los campos magnéticos y eléctricos en inductores y condensadores, respectivamente. Se mide en voltamperios reactivos (VAR).

La potencia aparente es la combinación vectorial de la potencia activa y la potencia reactiva. Representa la potencia total demandada por un sistema eléctrico y se mide en voltamperios (VA).

Es posible calcular la relación entre estas potencias usando simple trigonometría y el teorema de pitágoras, como veremos en algunos ejercicios.

$$S = U \cdot I$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

### El factor de potencia. Mejora del factor de potencia

De la explicación anterior se puede entender que hay un tipo de potencia que, pese a ser necesaria, no se transforma en trabajo: la potencia reactiva. En cualquier sistema eléctrico industrial es deseable reducir esta potencia, puesto que ello redundará en una reducción de la potencia aparente, que es la que se consume de la red eléctrica, o de nuestros propios generadores.

Para cuantificar la eficiencia de una instalación se define el Factor de Potencia, que es el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente ( $\cos \varphi$ ). Un factor de potencia cercano a 1 indica eficiencia en el uso de la energía. En general se buscan valores superiores a 0'8

$$\text{Factor potencia} = \cos \varphi = P/S$$

Como en general la potencia reactiva es de tipo inductivo (por la masiva presencia de bobinas en los motores eléctricos que hay en cualquier instalación industrial, lo que se suele hacer es acoplar baterías de condensadores para compensar. Así pues, la mejora del factor de potencia se puede lograr mediante la instalación de bancos de condensadores.

Conocido el factor de potencia de una instalación, y sabiendo el valor del mismo que se quiere conseguir, se puede calcular el condensador necesario para corregirlo mediante la siguiente expresión:

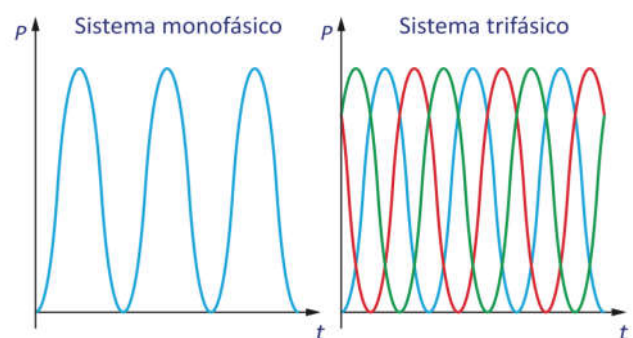
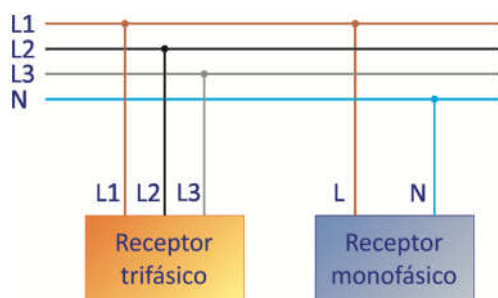
$$C = \frac{P \cdot (\tan(\varphi) - \tan(\varphi'))}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2}$$

## LA CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

La industria pronto se dió cuenta de que sería ventajoso incluir más de un devanado en las máquinas generadoras de corriente, de manera que en un solo alternador se obtuviera más de una corriente alterna. Se probaron sistemas pentafásicos, heptafásicos, pero finalmente se impusieron los sistemas trifásicos. La corriente alterna trifásica se genera utilizando generadores con tres devanados separados 120 grados entre sí.

### Ventajas de los sistemas trifásicos:

- Son sistemas de doble tensión: Los receptores pueden conectarse entre dos fases o entre fase y neutro, obteniendo dos valores de tensión diferentes.
- Los sistemas trifásicos pueden generar tres sistemas monofásicos independientes
- La potencia suministrada es más uniforme en comparación con un sistema monofásico (es menos pulsatoria). Esto hace que los motores funcionen de manera más suave
- Reducción del cableado. A igual potencia, un sistema trifásico necesita un 25% menos de cableado
- Volumen: para una misma potencia, los equipos trifásicos son menos voluminosos que los monofásicos
- Arranque: los equipos trifásicos, puesto que generan campos magnéticos giratorios, presentan arranques menos problemáticos





## Equilibrio en los sistemas trifásicos

En función de las cargas conectadas a cada fase, los sistemas pueden ser.

-Equilibrados: si circula la misma corriente por cada fase

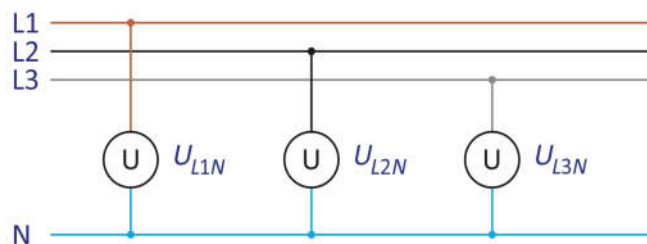
-Desequilibrados: si la corriente es diferente en cada fase. La mayoría de sistemas son desequilibrados, pero debe procurarse que las diferencias entre fases sean las mínimas.

## Neutro

En un sistema trifásico, en cualquier instante, la suma de los valores de la tensión que hay en cada fase es cero, puesto que están desfasadas  $120^\circ$  entre sí. De esta manera, si unimos las tres fases, obtenemos un punto de potencial nulo. Es decir, obtenemos un punto de cero voltios, al que normalmente se conecta el conductor que llamamos Neutro.

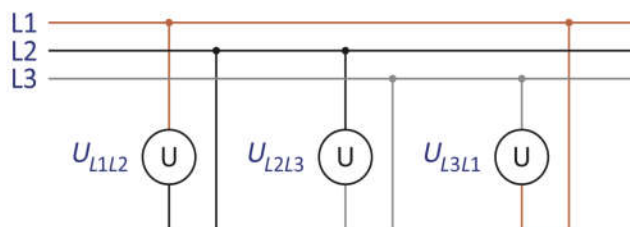
## Tensión de fase

Cuando un receptor monofásico se conecta a una de las fases del sistema trifásico y al neutro, la diferencia de potencial que experimenta se llama tensión de fase



## Tensión de línea

Cuando un receptor monofásico se conecta entre dos fases del sistema trifásico, la diferencia de potencial que experimenta se llama tensión de línea



La relación entre la tensión de fase y la de línea es  $\sqrt{3}$  :

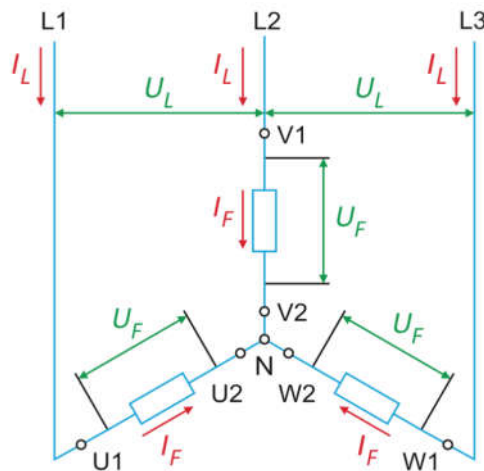
$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_F$$

Por ejemplo, en un sistema trifásico de 690V, la tensión de fase es 400V y la tensión de línea es  $400 \cdot \sqrt{3} = 690V$

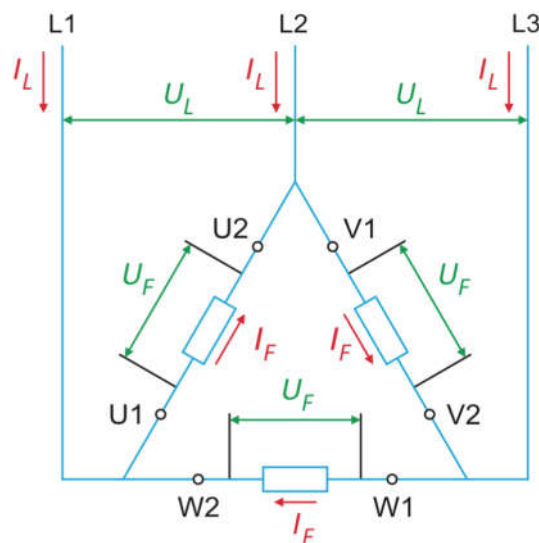
### Conexiones de los receptores trifásicos

Hasta ahora se ha considerado la conexión de receptores monofásicos en sistemas trifásicos. Pero cuando el receptor es trifásico, por ejemplo, un motor, o un calefactor, se tienen 3 receptores en uno, es decir dos polos por cada receptor (un total de 6) que deben ser configurados de alguna de las siguientes maneras:

- **Conexión en estrella (Y):** Cada receptor está conectado a un punto común (neutro), y a una de las fases. Por tanto cada receptor está sometido a la tensión de fase (la menor del sistema)



- **Conexión en triángulo ( $\Delta$ ):** Cada receptor está conectado al siguiente, y cada uno de los tres puntos de conexión entre receptores está conectado a una de las tres fases del sistema. Por tanto cada receptor está sometido a la tensión de línea (la mayor del sistema)



### Potencia en los sistemas trifásicos.

En los sistemas trifásicos, igual que en los monofásicos, se tiene Potencia Activa, Reactiva y Aparente, pero sus expresiones son ahora:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

### Corrección del factor de potencia en los sistemas trifásicos

En los sistemas trifásicos, la corrección del factor de potencia es también deseable, puesto que ello reducirá el consumo de nuestros grupos auxiliares. La fórmula es la misma:

$$C = \frac{P \cdot (\tan(\varphi) - \tan(\varphi'))}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2}$$

Pero en este caso hacen falta tres condensadores o tres grupos de condensadores, que como el lector intuirá, deben ser también conectados en estrella o en triángulo.

Si la conexión se hace en estrella, la capacidad de cada condensador es igual a la calculada con la fórmula, y la tensión nominal de los condensadores será la tensión de fase  $U_F$

Si la conexión se hace en triángulo, la capacidad de cada condensador será un tercio de la calculada, y la tensión nominal de los condensadores será la tensión de línea  $U_L$

