

# PRINCIPIOS ELÉCTRICOS



# 1. INTRODUCCIÓN

La electricidad es la forma de energía más utilizada

Presenta 3 características importantes: generación, transporte y transformación

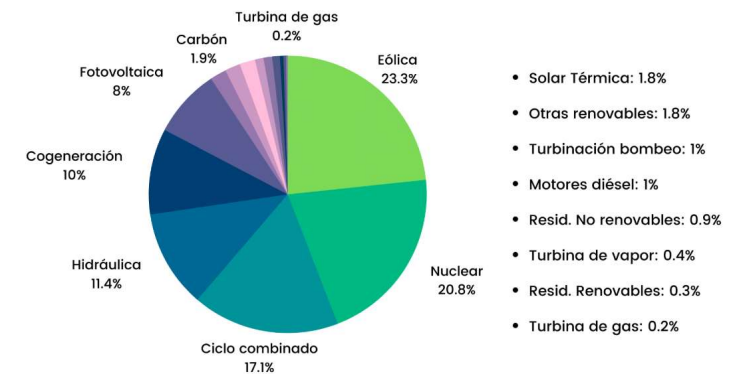
1. **Generación:** a partir de otra forma de energía (ej. eólica, salto de agua, quema de combustible, fusión atómica, sol, etc.)

- Endesa
- Iberdrola
- Naturgy (antigua FENOSA)
- E-Redes, grupo EDP (Electricidade de Portugal)
- Viesgo - BEGASA



<https://elekluz.com/mapas-distribuidoras/>

Generación eléctrica en España en 2021



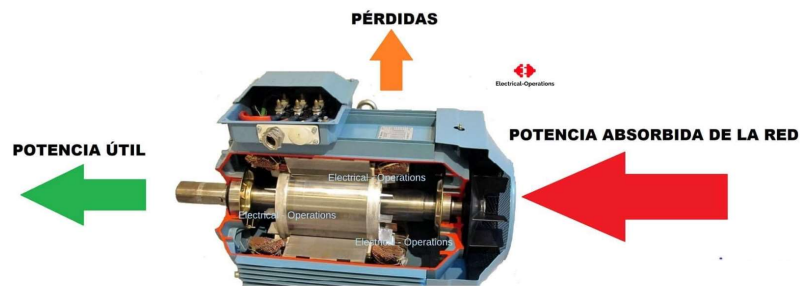
<https://www.plena-energia.com/post/generacion-de-energia-electrica>



2. **Transporte:** grandes distancias a través de conductores eléctricos.

# 1. INTRODUCCIÓN

3. **Transformación:** en otros tipos de energía utilizable (lumínica, calorífica, motriz, etc.).



La gran desventaja de la energía eléctrica es el almacenamiento, una alta demanda de energía eléctrica exige un gran generador que la suministre instantáneamente. Las baterías pueden almacenar energía, pero no existen grandes almacenes para guardar energía en caso de baja demanda.



Baterías de almacenamiento de una planta fotovoltaica de IBERDROLA

<https://www.iberdrola.espana.com/sostenibilidad/almacenamiento-energia/baterias-almacenamiento>

## 2. PRINCIPIOS FÍSICOS

La electricidad tiene su origen en la circulación de electrones en la materia. Los electrones forman parte del átomo y contienen una carga eléctrica negativa. La carga eléctrica se mide en coulomb (C). Un electrón contiene  $1.602176634 \cdot 10^{-19}$  C, este número se define como carga elemental.

Cuando un grupo de átomos tienen exceso de carga negativa o exceso de electrones (polo negativo) y otro grupo tiene un exceso de carga positiva o defecto de electrones (polo positivo) se crea una diferencia de potencial y se tiende a producir una **circulación de electrones mediante un conductor del polo negativo al positivo**. Esta circulación de electrones recibe el nombre de corriente eléctrica intensidad.

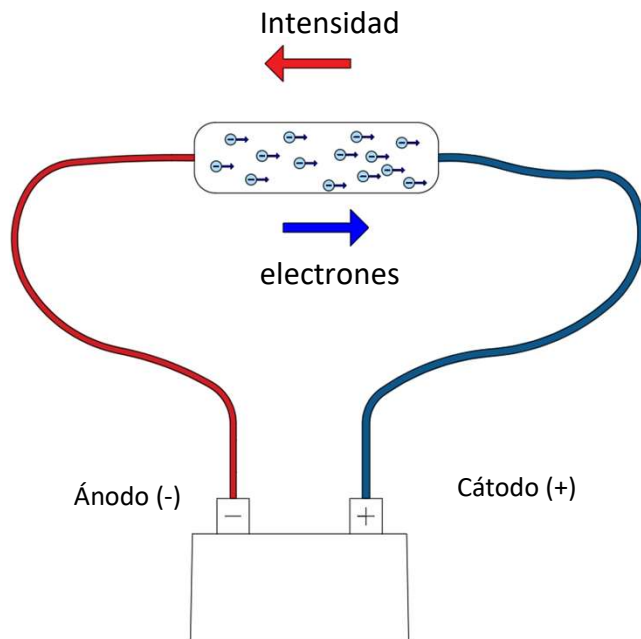
La unidad de corriente es el amperio (ampere) A, y se define 1 coulomb por segundo:

$$A = 1 \frac{C}{s}$$

**Material conductor** es un tipo de material que permite circular electrones, tienen poca resistencia a la circulación

**Material aislante** es un tipo de material que no permite la circulación de electrones, tienen mucha resistencia a la circulación

### 3. CIRCUITO ELÉCTRICO



- ✓ **Corriente positiva (+):** Del positivo al negativo del generador. **Sentido contrario del movimiento de los electrones**
- ✓ **Corriente negativa (-):** Del negativo al positivo del generador. **Sentido del movimiento de los electrones**

- ✓ Se ha convenido que **la corriente siempre va del polo positivo al negativo:**



- ✓ Para que exista corriente siempre tiene que haber un elemento consumidor (**carga**) conectado entre los polos.

**La intensidad que sale de un generador siempre es la misma que la intensidad que entra en el generador**

### 3. CIRCUITO ELÉCTRICO

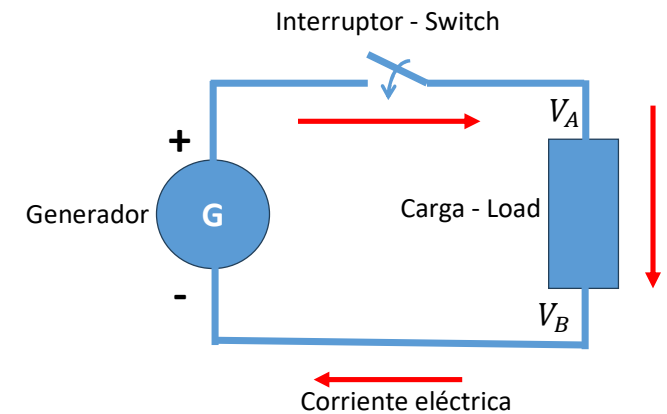
- **Potencial (eléctrico) (V):** energía eléctrica por unidad de carga

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

- **Diferencia de potencial ( $\Delta V$ ):** diferencia de potencial entre dos puntos. Si se conectan mediante un conductor se crea una corriente eléctrica

$$\Delta V = V_{AB} = V_A - V_B$$

- **Generador:** Elemento que crea una energía eléctrica (a partir de otra) y produce una diferencia de potencial entre su polos: pilas, alternadores, dinamos, etc
- **Carga o consumidor:** Elemento que recibe la energía eléctrica y la transforma en otra forma de energía (p.ej una bombilla recibe energía eléctrica y la transforma en energía lumínica)
- **Conductores:** Unen el generador y la carga permitiendo el paso de la corriente eléctrica. A pesar de que estará formado por un elemento conductor siempre presentará una cierta resistencia al paso de la corriente eléctrica y se producirán pérdidas en forma de calor.
- Siempre deberá formarse un **circuito cerrado**, de forma que la corriente que sale del polo positivo será la misma que la que entre por el negativo. El conductor será el encargado de cerrar el circuito. Un interruptor podrá cortar la conducción de un conductor.



La diferencia de potencial entre los polos del generador provoca un movimiento de electrones en el conductor. Los electrones saldrán con una determinada energía eléctrica en el polo positivo, la carga consumirá la energía y retornarán al polo negativo.



## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

Las magnitudes eléctricas fundamentales son:

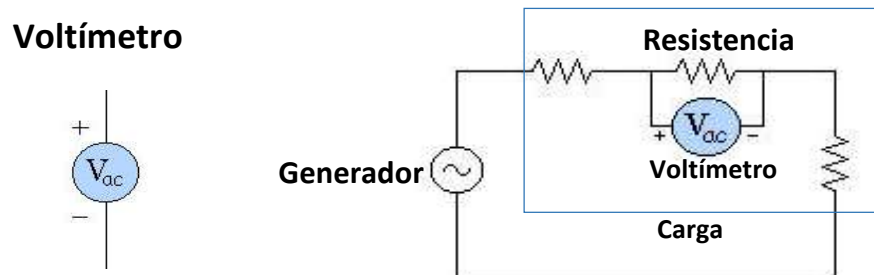
- **Voltaje (\*):** Diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito. La unidad de medida del **Sistema Internacional (SI)** es el **voltio (V)**:

El potencial es la energía eléctrica por carga. Por tanto, su magnitud (Voltio) será unidad de energía (Joules) dividido por unidades de carga (Coulomb)

$$V = \frac{W}{q} \quad [V] = \frac{[J]}{[C]}$$

**La diferencia de potencial de un consumidor (carga) debe ser la misma que la que proporciona el generador al que está conectado.**

En el siguiente circuito la carga se compone de tres resistencias. La diferencia de potencial total de la carga será la suma de voltajes de las tres, que debe coincidir con la que suministra el generador.



Para medir el voltaje se utiliza un voltímetro y se conecta entre los dos puntos que se quieren medir, **en paralelo**. En este caso se mide la diferencia de potencial entre las conexiones de una resistencia, es decir, la energía eléctrica que está consumiendo la resistencia.

(\*) Los términos **voltaje, tensión, diferencia de potencial o caída de potencial** se utilizan de manera indistinta

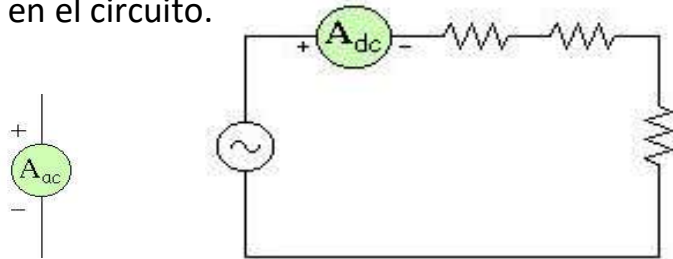
## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

- **Intensidad o corriente:** Medida del flujo de electrones que circula por una circuito por unidad de tiempo. La unidad de medida en el SI es el amperio (A).

$$I = \frac{Q}{t} \quad [A] = \frac{[C]}{[s]} \quad 1A = 1 \frac{C}{s}$$

Carga fundamental (electrón):  $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$   
Cargas en 1 Coulomb:  $1C = 6.241\,509\,074 \times 10^{18}$   
En un amperio circulan:  $1A = 6.241\,509\,074 \times 10^{18} \frac{1}{s}$

Un amperímetro mide la intensidad de corriente que circula a través de él, por tanto, debe conectarse como un elemento más en el circuito.



Amperímetro

Conexión en serie del amperímetro para medir la intensidad que circula por el circuito

**Un amperímetro siempre se conecta en serie** en el punto que queramos medir. No debe producir una diferencia de potencial entre sus polos para no falsear la medida.

**Los voltímetros se conectan en paralelo** al punto que queramos medir. Tienen una **resistencia muy grande** para que no circule una corriente por él y no falseen la medida.

**Los amperímetros se conectan en serie** para que no provoque una diferencia de potencial y no falseen la medida. al punto que queramos medir. Tienen una **resistencia muy pequeña**



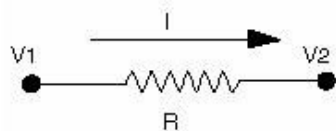
## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

- Resistencia

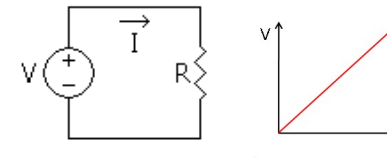
Oposición que presenta cualquier elemento al paso de la corriente eléctrica. La unidad de medida es el Ohm ( $\Omega$ ).  
**Todos los conductores ofrecen una resistencia.**

### Ley de Ohm

Las tres magnitudes fundamentales se relacionan entre ellas matemáticamente a través de la **Ley de Ohm**: el voltaje (dif. de pot.) es directamente proporcional al producto de la resistencia por la intensidad.



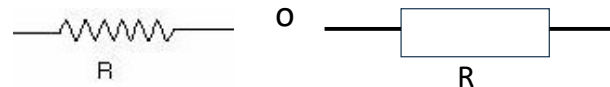
$$V = V_1 - V_2 = RI$$



**La intensidad positiva siempre circula del potencial mayor (positiva) al menor (negativa).**

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R} > 0 \quad V_1 > V_2$$

Todos los conductores ofrecen resistencia, pero existen elementos con valor conocido que se conectan en los circuitos para fijar la intensidad en un circuito. Su símbolo es:



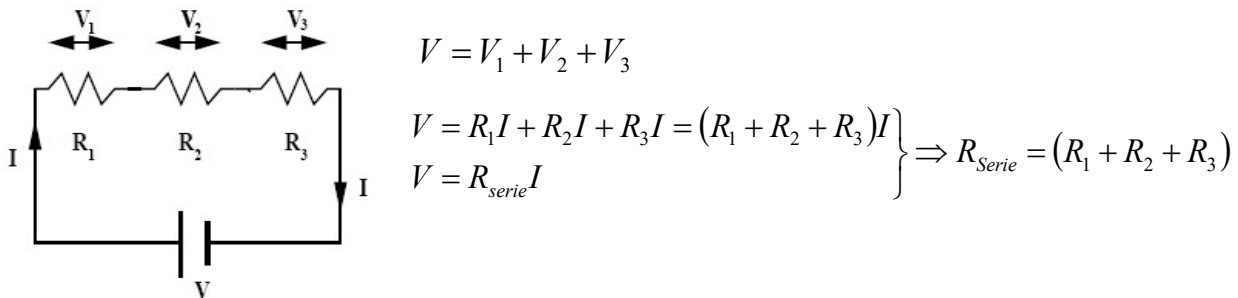
## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

### Conexión entre resistencias

Todas las resistencias conectadas en un circuito pueden verse como una sola resistencia, desde el punto de vista del generador:

- **Resistencias en serie:** la resistencia total es la suma de todas las resistencias

La tensión total ( $V$ ) es la suma de todas las tensiones, aplicando la ley de Ohm obtenemos la resistencia total:

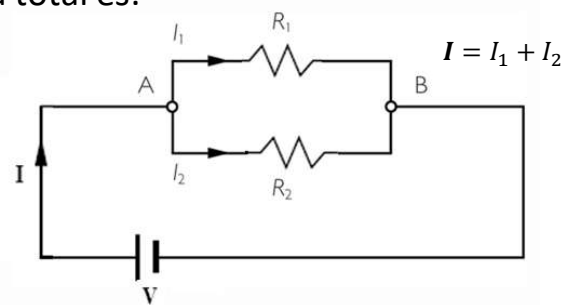


## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

•**Resistencias en paralelo:** Se unen todas las terminaciones de las resistencias en un punto, por cada uno de los lados (A y B). La intensidad, como es un flujo de cargas, se divide entre los ramales de las resistencias:  $I_1, I_2$

La intensidad en cada ramal será menor cuando mayor en la resistencia. La tensión en cada ramal será la misma (V) porque comparten los puntos de conexión:  $V = V_B - V_A$

La resistencia total es:



$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} \\ I &= \frac{V}{R_{\text{Paralelo}}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{1}{R_{\text{Paralelo}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

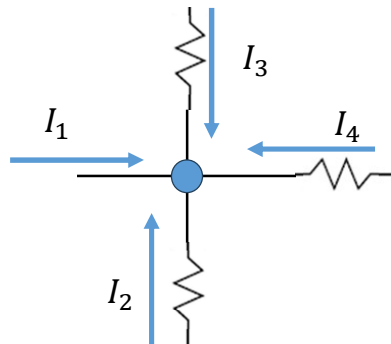
La inversa de la resistencia total es la suma de las inversas de todas las resistencias. La resistencia total es menor que la más pequeña de todas.



## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

### •Resolución de circuitos

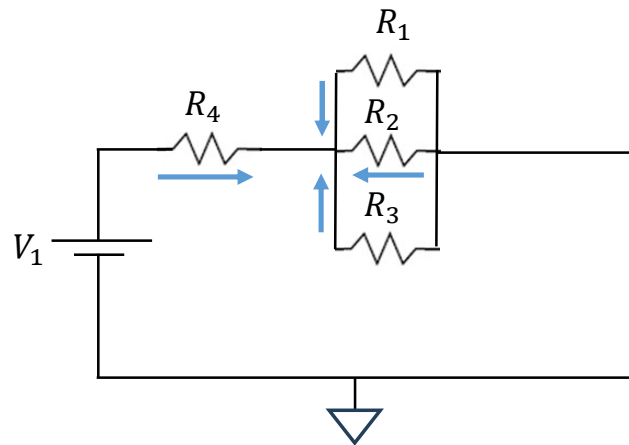
Nodos: Los circuitos se pueden resolver fijándonos en los nodos, o punto de división del circuito en ramas. Podemos pensar que los nodos son sumideros donde se encuentran las intensidades y se anulan entre ellas, de manera que la intensidad es cero en ese punto:



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

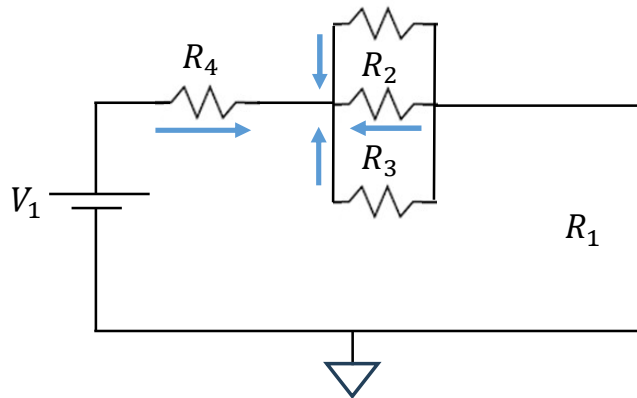
Ejemplo:

Calcular la intensidad en todas las ramas del circuito utilizando el métodos de los nodos



$$\begin{aligned} R_1 &= R_3 = 3k\Omega \\ R_2 &= 6k\Omega \\ R_4 &= 2k\Omega \end{aligned}$$

## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS



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

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

$$\frac{0-V}{R_1} + \frac{0-V}{R_2} + \frac{0-V}{R_3} + \frac{V_1-V}{R_4} = 0$$

$$-V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + \frac{V_1-V}{R_4} = 0$$

$$-\frac{5}{6}V + \frac{24-V}{2} = 0$$

$$V = -\frac{10}{6}V + 24$$

$$V = \frac{6}{16}24 = 9V$$

$$I_1 = I_3 = \left| \frac{-9}{3k} \right| = 3mA$$

$$I_2 = \left| \frac{-9}{3k} \right| = 1.5mA$$

$$I_4 = \frac{24-9}{2k} = 7.5mA$$

## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

### Resistividad

Los conductores eléctricos presentan una resistencia al paso de la corriente eléctrica, por este motivo se producen pérdidas en forma de calor (efecto Joule).

Esta resistencia se calcula con la fórmula:

$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

R: Resistencia del conductor eléctrico ( $\Omega$ , Ohm)

L: longitud del conductor (R)

S: Sección del conductor ( $\text{mm}^2$ )

$\rho$ : Resistividad del conductor ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ )

La resistencia irá en función del tipo de material, de la sección del conductor y de su longitud.

Resistividad del cobre =  $0.0171 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Resistividad del aluminio =  $0,0282 \text{ Ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m}$



## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

La resistencia es proporcional a la resistividad del material y a la longitud e inversamente proporcional al área del material

**Cuanto más área tiene una superficie menos resistencia.**

**Cuanto más corto y/o más sección tiene un cable menos resistencia.**

**Cuanto más largo y/o menos sección tiene un cable más resistencia**



La resistencia produce un consumo y una caída de potencia, por tanto interesa que las conexiones tengan la menor resistencia posible.

En general, para evitar pérdidas de señal, los conexionados interesan que sean de cables cortos (utilizar la menor cantidad de cable posible) y sobredimensionar las secciones de los cables.

En circuitos sobre placas electrónicas (PCB) interesan superficies de potencial grandes para minimizar la resistencia, la disipación de calor, etc.

## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

### Tipos de resistencias

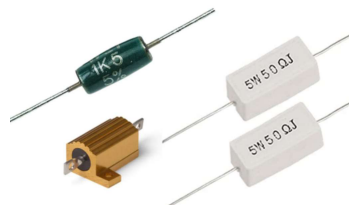
- Film metálico:** aleación de metales, muy precisas. Se utilizan para aplicaciones que necesitan precisión y alta potencia. Suelen tener un revestimiento cerámico azul. Montaje *TH (thru hole)* o agujero pasante



- Carbón: cerámica y carbono.** Las más comunes, poca precisión (tolerancias de 10%), vulnerables a la temperatura. Baratas. Montaje *TH (thru hole)* o agujero pasante



- Bobinadas o “de hilo”:** Se componen de un hilo bobinado (de plata, cobre aluminio, oro, etc). El valor de la resistencia depende de la longitud el hilo, la resistividad del material y de la sección. Precisión. Soporta altas potencias. Permiten recubrimientos de disipación (metálicos, cemento, etc). Permite gran variedad de montaje: montaje *TH (thru hole)*, atornillado, etc



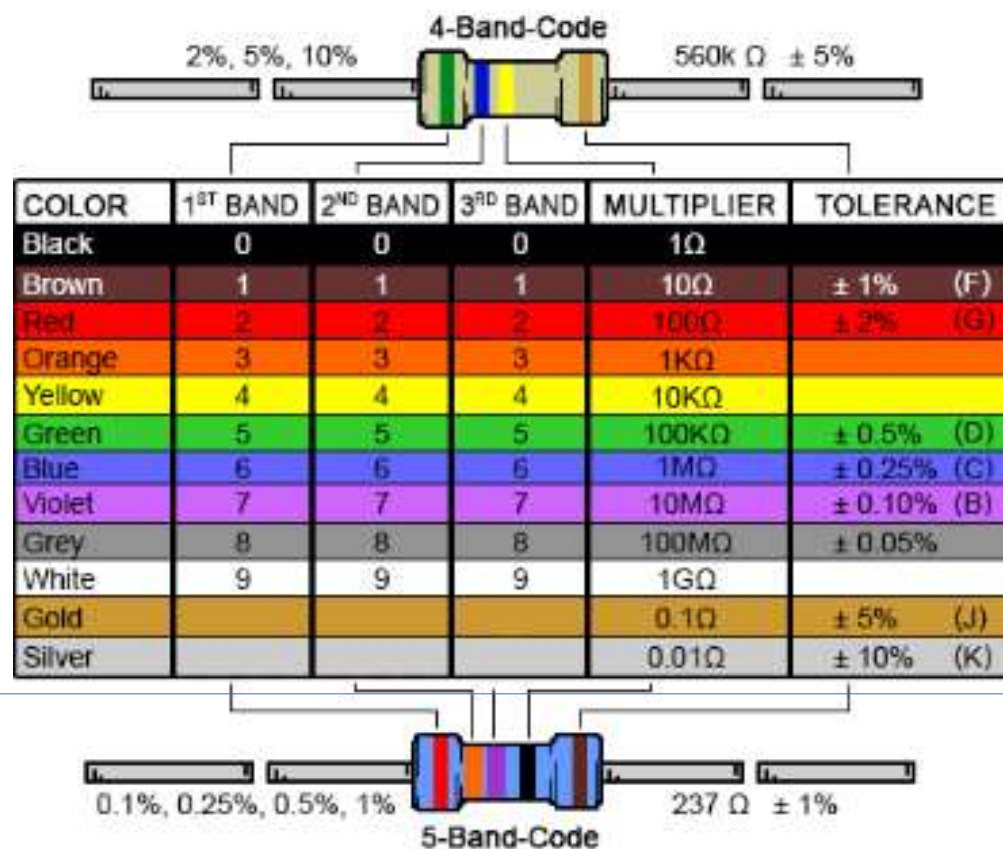
$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

x1	x10	x100	x1000
1	10	100	1k
1,2	12	120	1,2k
1,5	15	150	1,5k
1,8	18	180	1,8k
2,2	22	220	2,2k
2,7	27	270	2,7k
3,3	33	330	3,3k
3,9	39	390	3,9k
4,7	47	470	4,7k
5,1	51	510	5,1k
5,6	56	560	5,6k
6,8	68	680	6,8k
8,2	82	820	8,2k

Valores estándares comerciales

## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

Las resistencias TH, como componentes de un circuito, tienen valores “fijos”, especificados por una codificación de colores en su superficie



## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

•**SMD (Surface Mounted Device):** resistencias utilizadas en placas electrónicas (PCB) de montaje superficial. Son muy baratas, soportan poca potencia y existe una gran variedad de tamaños. Este tipo de resistencia ofrece una gran variedad en las precisiones (0.1% a 10%), dependiendo del uso:

- Resistencia de alta frecuencia/RF
- Resistencias de hoja metálica
- Resistencias de película fina
- Resistencias de película gruesa
- Resistores bobinados

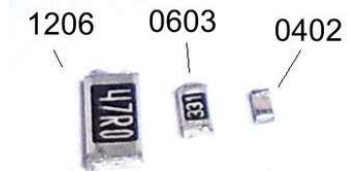


Los tamaños se indican en dos maneras: en métrica (mm) o en pulgadas. La potencia que soportan depende del tamaño.

Por ejemplo:

1206 (métrica 32x16): son  $0.126'' \times 0.063''$  (en métrica 3,2 mm  $\times$  1,6 mm) y soportan 1/4 W

0603 (métrica 16x08): son  $0.126'' \times 0.063''$  (en métrica 1,6 mm  $\times$  0,8 mm) y soportan 1/10W



### Códigos

- 3 dígitos: A los dos primeros dígitos del código se añade el número de ceros indicados por el tercer dígito
- 4 dígitos: igual que el código de 3 dígitos pero con más precisión, el cuarto dígito indica el número de ceros
- 3 dígitos con separador: el carácter 'R' indica una coma decimal

Por ejemplo:

103, indica 10000=10k Ohms

331, indica 330 Ohms

8202, indica 82kOhms

4R7: indica 4.7

## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

- **Código EIA-96:** El valor se indica por un código y un multiplicador:

CÓDIGO	VALOR
1	100
2	102
3	105
4	107
5	110
6	113
7	115
8	118
9	121
10	124
11	127
12	130
13	133
14	137
15	140
16	143
17	147
18	150
19	154
20	158
21	162
22	165
23	169
24	174
25	178

CÓDIGO	VALOR
26	182
27	187
28	191
29	196
30	200
31	205
32	210
33	215
34	221
35	226
36	232
37	237
38	243
39	249
40	255
41	261
42	267
43	274
44	280
45	287
46	294
47	301
48	309
49	316
50	324

CÓDIGO	VALOR
51	332
52	340
53	348
54	357
55	365
56	374
57	383
58	392
59	402
60	412
61	422
62	432
63	442
64	453
65	464
66	475
67	487
68	499
69	511
70	523
71	536
72	549
73	562
74	576
75	590

CÓDIGO	VALOR
76	604
77	619
78	634
79	649
80	665
81	681
82	698
83	715
84	732
85	750
86	768
87	787
88	806
89	825
90	845
91	866
92	887
93	909
94	931
95	953
96	976

Multiplicador	
Z	0,001
Y o R	0,01
X o S	0,1
A	1
B o H	10
C	100
D	1000
E	10000
F	100000

Por ejemplo:

12E: indica el valor  $130 \times 100000 = 1.3 \text{ MOhms}$

## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

### Capacidad

Un condensador es una componente eléctrico que tiene la capacidad de almacenar, de manera temporal, la carga eléctrica. Está constituida por dos placas iguales y un material interno dieléctrico o aislante. Al aplicar un diferencia de potencial entre sus polos, se acumulan cargas positivas en una placa y negativas en otra, de manera proporcional. La proporcionalidad es la capacidad (**C**) y su unidad es el **Faradio**:

$$C = \frac{Q}{V_+ - V_-} \rightarrow C(V_+ - V_-) = Q$$

La intensidad es la variación de cargas en el tiempo. Matemáticamente, la intensidad es la derivada de la carga respecto al tiempo:

$$I = \frac{d}{dt} Q = C \frac{d}{dt} (V_c)$$

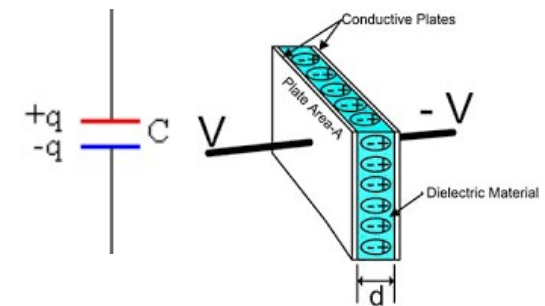
$$I_C(t) = C \frac{d}{dt} V_C(t)$$

Conexión de condensadores:

- Condensadores en serie:
- Condensadores en paralelo:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$C_P = C_1 + C_2$$



La tensión que se aplica en un condensador debe depender del tiempo: **corriente alterna**.

**En corriente continua** ( $V_c = \text{cte}$ , no hay variación en el tiempo): No circula corriente a través del condensador, por tanto **no hay paso de corriente**.



# 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

## Capacidad

1. **No polarizados:** no tienen polos negativos o positivos. El conexionado es indiferente, son simétricos.

- **Película (TH)**

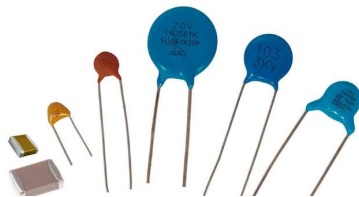
- Película Metalizada, con papel como dieléctrico
- Película-lámina: placas de aluminio y plástico como dieléctrico (polipropileno, poliéster, naftalato polietileno, sulfuro de polifenileno, politetrafluoroetileno). Alta resistencia de aislamiento, buena estabilidad de la capacitancia, alta eficiencia a alta frecuencia.



- **Cerámicos (SMD y TH)**

Los condensadores cerámicos son condensadores que utilizan la cerámica como material aislante. Pueden ser monocapa o multicapa.

- **Monocapa:** pueden variar en capacitancia, tensión, encapsulado, tolerancia y tipo de montaje. Tensiones desde 50 V hasta 40 kV, capacidades de 1 pF hasta 470 nF, y montajes radiales, axiales, de tornillo y de superficie
- **Multicapa (MLCC):** Están formados por capas alternas de material cerámico y capas conductoras de metal. Las capas cerámicas aíslan el condensador, consiguiendo reducir la pérdida de energía en forma de calor. Son el tipo de condensador más común y se pueden encontrar en una amplia gama de aplicaciones



• **Condensadores cerámicos de clase 1:** los más estables con características lineales.

• **Condensadores cerámicos de clase 2:** mejor rendimiento volumétrico (relación volumen-capacidad), poca precisión y estabilidad. Tienen aplicaciones de acoplamiento y desacoplamiento.

• **Condensadores cerámicos de clase 3:** alta eficiencia volumétrica con baja precisión y bajo factor de disipación. Se utilizan en desacoplamiento.

Un condensador de desacoplo es un condensador que se utiliza para filtrar las señales de CA de una señal de CC.

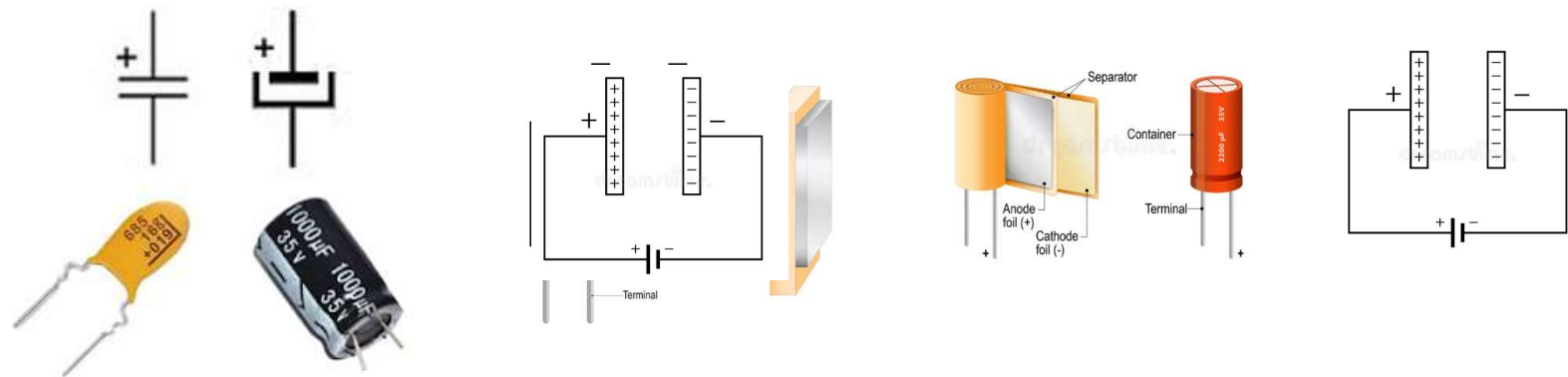
## 4. MAGNITUDES ELÉCTRICAS

- 2. **Polarizados o electrolíticos:** tienen polo negativo y positivo. Son capaces de almacenar y liberar cargas eléctricas en un solo sentido, lo que los hace útiles en aplicaciones como rectificadores y filtros de señales.

**Aluminio:** Los condensadores electrolíticos de aluminio se construyen a partir de dos tiras de aluminio: ánodo (cubierta de una capa aislante de óxido), y cátodo (tira de aluminio y líquido electrolito). Esta pila se enrolla sobre sí misma, ajustada con dos conectores pin y se encaja en un cilindro de aluminio. Son compactos pero poco precisos, los hay disponibles en el rango de  $<1 \mu\text{F}$  hasta  $1 \text{ F}$ , con voltajes de trabajo de hasta varios cientos de voltios. El dieléctrico es una fina capa de óxido de aluminio

**Tantalo:** compacto, dispositivo de bajo voltaje de hasta varios cientos de mF, tienen menor densidad energética pero son mucho más precisos que los de aluminio. El ánodo está formado por granos de tantalio, con el dieléctrico formado electroquímicamente por una fina capa de óxido.

- TH



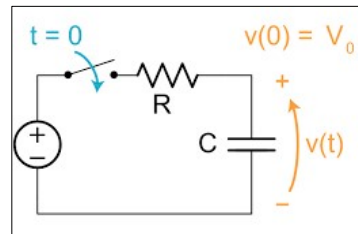
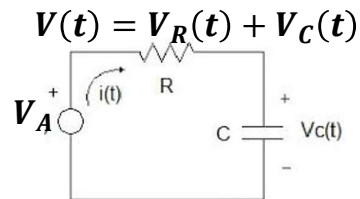
- SMD



## 5. CIRCUITO RC

### Circuito de una resistencia y un condensador en serie

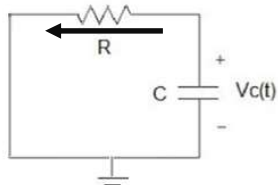
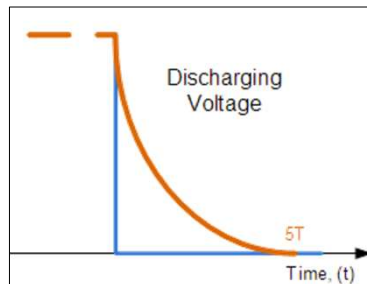
Estudio del comportamiento del circuito ante pulsos de tensión



$$V(t) = RC \frac{d}{dt} V_C(t) + V_C(t)$$

- V(t): Flanco de bajada: de 5V a 0

Inicialmente el condensador está a 5V y se abre el conmutador (se elimina el generador)



$$V(t) = RC \frac{d}{dt} V_C(t) + V_C(t)$$

$$V(t)=0 \Rightarrow I_C(t) = RC \frac{d}{dt} V_C(t) \Rightarrow$$

$$\frac{d}{dt} V_C(t) = -\frac{1}{RC} V_C(t) \Rightarrow \frac{dV_C(t)}{V_C(t)} = -\frac{1}{RC} dt \Rightarrow \int \frac{dV_C(t)}{V_C(t)} = -\int \frac{1}{RC} dt$$

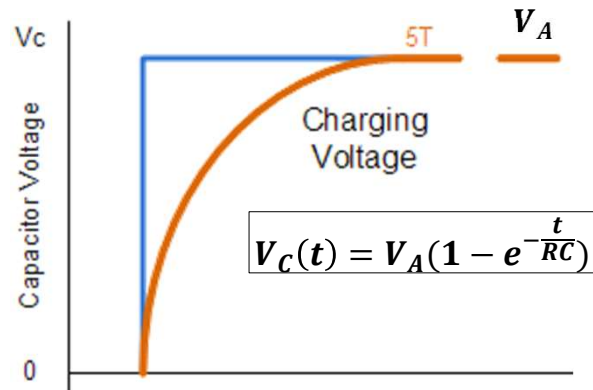
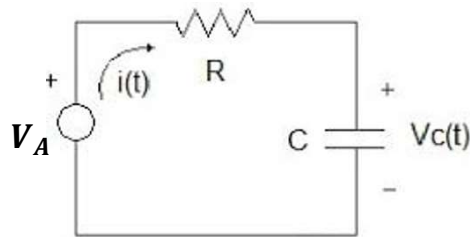
$$V_C(t) = V_A e^{-\frac{t}{RC}}$$

$V_C(t) = K e^{-\frac{t}{RC}} = V_A$   
Condición inicial, la tensión en la capacidad es  $V_A$

## 5. CIRCUITO RC

- V: Flanco de subida: de 0 a 5V**

Inicialmente el condensador está a 0V y se va cargando



Se considera que con un tiempo de

$$t = 5RC$$

el condensador se ha cargado a un 99.3% de la tensión de entrada y se considera cargado

$$V_C = V_A(1 - e^{-5})$$

$$V_C = V_A 0,993$$

$$V = RI(t) + V_C(t)$$

$$V = RC \frac{d}{dt} V_C(t) + V_C(t)$$

Ecuación diferencial lineal de 2 orden

$$\frac{d}{dt} V_C(t) + \frac{1}{RC} V_C(t) = \frac{V_A}{RC}$$

$$\frac{d}{dt} V_C(t) = -\frac{1}{RC} V_C(t) + \frac{V_A}{RC}$$

Solución homogénea

$$V_h(t) = K e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$V_p(\infty) = V_A$$

Solución particular

$$V_C(t) = K e^{-\frac{t}{RC}} + V_A$$

$$V_C(0) = K e^{-\frac{0}{RC}} + V_A = 0$$

$$K = -V_A$$

$$V_C(t) = V_A(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

## 5. CIRCUITO RC

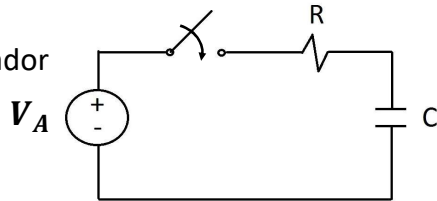
### Ejemplos:

Carga del condensador

$R=1.5k\Omega$

$V_A=24V$

$C=500\mu F$



$$V_C(t) = V_A(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$V_C(t) = 24(1 - e^{-1.33t})$$

El tiempo necesario para que el condensador se cargue es:

$$t = 5RC = \mathbf{3.75s}$$

Intensidad máxima (inicial):

$$I_c = 24/1.5k = 16mA$$

Intensidad final (a 3.75s):

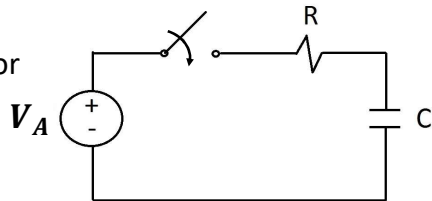
$$I_{cf} = 112\mu A$$

Carga del condensador

$R=1k\Omega$

$V_A=10V$

$C=1000\mu F$



$$V_C(t) = V_A(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$V_C(t) = 10(1 - e^{-t})$$

El tiempo necesario para que el condensador se cargue es:

$$t = 5RC = \mathbf{5s}$$

Intensidad máxima (inicial):

$$I_c = 10/1k = 10mA$$

Intensidad final (a 5s):

$$I_{cf} = 70\mu A$$

## 6. POTENCIA

### Potencia

Se define como la cantidad de energía que es capaz de generar por unidad de tiempo. La unidad de medida de potencia es el vatio (W). Un vatio es 1 joule por segundo:  $1W = 1J/s$

Las unidades del vatio son  $[W] = [J]/[s]$

En un circuito eléctrico, la potencia se obtiene multiplicando la diferencia de potencial por la intensidad de corriente (cantidad de electrones que atraviesan el conductor por segundo).

$$P = \frac{U}{t} = \frac{qV}{t} = VI \quad \longrightarrow \quad P = V \cdot I = \frac{V^2}{R} = I^2 \cdot R$$



En los motores eléctricos se suele utilizar el **Caballo de Vapor (CV)**:

$$1 \text{ CV} = 735,498 \text{ W} \rightarrow \underline{736 \text{ W}}$$

En el sistema no internacional, se tiene el Caballo de Potencia (*Horse Power*):  $1 \text{ HP} = 745,6998 \text{ W}$

$$1 \text{ HP} = 1,0138 \text{ CV}$$

### Ejemplo

Una bombilla con una diferencia de potencial de 230 Voltios y consumo 2A, estará consumiendo una potencia

$$P = 230 \cdot 2 = 460 \text{ W}$$

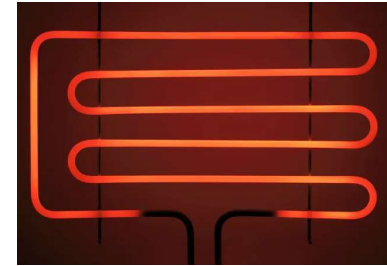


## 6. POTENCIA

### Efecto Joule

Si sobre un conductor circula una corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor, debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan. Este calor eleva la temperatura del conductor. Se calcula con la siguiente formula:

$$Q = I^2 R t$$



Donde el calor se expresa en Joules, si la intensidad son amperios, la resistencia ohmios y el tiempo son segundos.

Diferentes dispositivos, como hornos, calefacciones eléctricos, soldadores, bombillas de iluminación se basan en el efecto Joule.

En la mayoría de las aplicaciones, sin embargo, es un efecto indeseado y la razón por la que los aparatos eléctricos y electrónicos (como los ordenadores) necesitan un ventilador que disipe el calor generado y evite el calentamiento excesivo de los diferentes dispositivos.

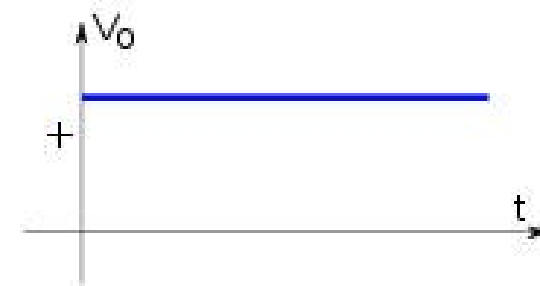
El efecto Joule debe tenerse muy en cuenta a la hora de proyectar instalaciones eléctricas, **ya que una sección de cable inadecuada puede provocar calentamientos excesivos de éste**. Hay que tener en cuenta que a menor sección de cable, mayor resistencia y mayor efecto Joule.

# 7. CORRIENTE ALTERNA

## CORRIENTE CONTINUA (DC)

Tipo de corriente eléctrica en el que el valor de la tensión **no varía con el tiempo**, se mantiene constante a lo largo del tiempo. La corriente entre dos puntos es continua y siempre tiene el mismo sentido (de positivo a negativo)

En general, se utiliza en la alimentación de aparatos electrónicos. Las tensiones usuales más usuales son 3.3Vdc, 5 Vdc, 12 Vdc, 24 Vdc, 48 Vdc. **En la industria la tensión continua más común es 24V.**

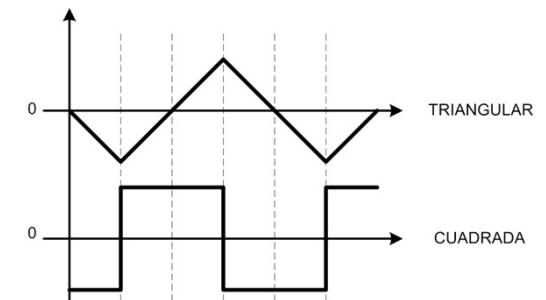
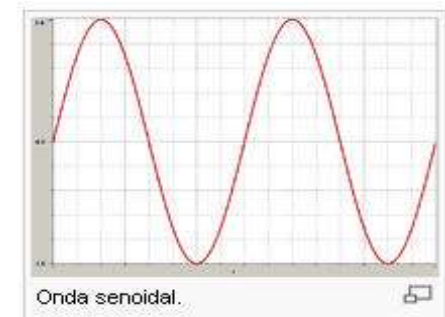


## CORRIENTE ALTERNA (AC)

Tipo de corriente eléctrica en el que el valor de la tensión **varía con el tiempo**, en **magnitud y/o dirección**. La forma de variación (forma de onda) puede ser senoidal, triangular, cuadrada, etc. La más utilizada es la senoidal, porque es la que se obtiene de un generador alternador, por la facilidad de transporte, etc.

Ejemplos de corriente alterna:

- Corriente cuadrada (tren de pulsos) varía en dirección, no en magnitud
- Corriente triangular: varía en dirección y en magnitud
- Corriente senoidal es la provista por las compañías eléctricas



DESARROLLO DE PROJ. DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL 2024

# 7. CORRIENTE ALTERNA

## Corriente alterna senoidal

Es ampliamente utilizada por su facilidad para la generación y transporte de energía eléctrica. Varía su magnitud y sentido según la **función matemática seno (o coseno)**. Desde su origen, su amplitud y frecuencia es constante.

Europa: 50 Hz y 220-240Vac eficaz

América: 60 Hz y 125Vac eficaz

Japón: 50/60 Hz y 100Vac eficaz



La corriente alterna senoidal permite optimizar el transporte de corriente eléctrica en largas distancia. Para transportar grandes potencias de corriente se **aumenta mucho la tensión y se baja la intensidad**. De esta manera se disminuye la sección de cables y se minimiza el efecto Joule (ya que depende de la intensidad al cuadrado). Además se minimizan las caídas de tensión en el cable.

$$Q = I^2 R t$$

$$P = VI$$

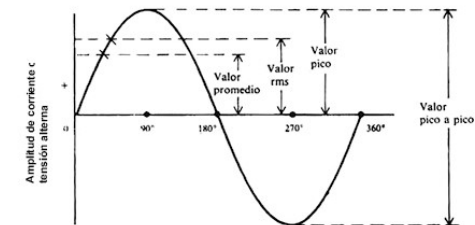
Por ejemplo, si una estación genera 100 KW a 230 Vac, la corriente sería de 455 A, ( $I = 100000 / 230$ ) pero si con un transformador se aumenta la tensión a 10 KV (10.000 V), entonces hay que dimensionar los cables para 10 A ( $I = 100000 / 10000$ ). El ahorro económico en sección de cable de transporte y facilidad de instalación es claro.

# 7. CORRIENTE ALTERNA

## Corriente alterna senoidal (ac)

La señal (corriente o tensión) varían continuamente en magnitud y dirección. La forma de señal más común es la senoidal. Los parámetros a tener en cuenta son:

- **Valor pico:** máximo que la señal puede tomar
- **El valor pico a pico:** distancia entre el pico máximo positivo y el pico negativo o la diferencia entre el máximo y el mínimo
- **La amplitud:** distancia entre el cero (o el valor dc offset) y el valor máximo. Normalmente se refiere al valor pico
- **Periodo:** tiempo transcurrido para que la señal vuelva a repetir sus valores
- **Frecuencia:** Número de periodos en un segundo. Es la inversa del periodo.
- **Fase (desfase):** fracción de periodo transcurrido desde que la señal ha pasado por un tiempo tomado como origen (normalmente 0). Se mide en grados, donde  $360^\circ$  es el periodo entero.
- **Tensión eficaz:** es el valor de amplitud dividido entre raíz de 2 (para corrientes senoidales). **Es la tensión e intensidad consumida.** Valores típicos son 230 Vac (tensión de uso doméstico) y 400 Vac (tensión de uso industrial).



# 7. CORRIENTE ALTERNA

## FASORES

La expresión matemática de una señal senoidal es:

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi)$$

donde

$V_m$ : es la amplitud, o tensión máxima

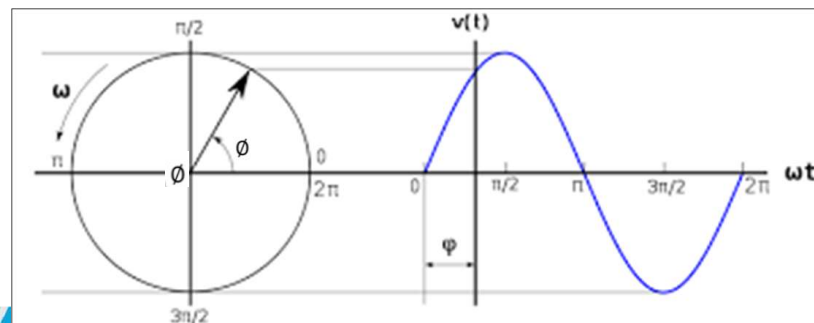
$\omega$ : es la frecuencia en radianes/segundo

$\phi$ : es el desfase

En este caso, se representa la señal senoidal mediante un coseno, pero podría representarse por un seno.

Podemos representar la señal senoidal mediante una flecha rotando a una determinada velocidad.

Imaginemos una flecha girando sobre una circunferencia respecto a su centro: la posición 'y' de la flecha variará en el tiempo como una senoidal, cuya amplitud será la longitud de la flecha y la frecuencia dependerá de la velocidad de giro ( $\omega$ ). El desfase ( $\phi$ ) es el ángulo respecto a la horizontal cuando se toma el origen de tiempo ( $t=0$ ).



## 7. CORRIENTE ALTERNA

En representación de señales de **fasores**, las señales se representan cuando  $t=0$ . Es decir, **la inclinación de la flecha siempre indicará el desfase. No se tiene en cuenta la velocidad ni el tiempo ni la función senoidal**. Los fasores nos permitirán representar diferentes señales alternas sinusoidales desfasadas entre sí de una manera simplificada.

La representación consiste en eliminar la parte senoidal y trabajar con exponenciales complejas. Esto facilita enormemente los cálculos y la representación gráfica. Para ello se utiliza la fórmula de Euler:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x$$

Si nos quedamos solo con la parte real (no la compleja), tenemos (\*):

$$\cos(x) = e^{jx}$$

Por tanto, la tensión

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi)$$

quedará:

$$V(t) = V_m (e^{j(\omega t + \phi)})$$

$$V(t) = V_m (e^{j\phi} e^{j\omega t})$$

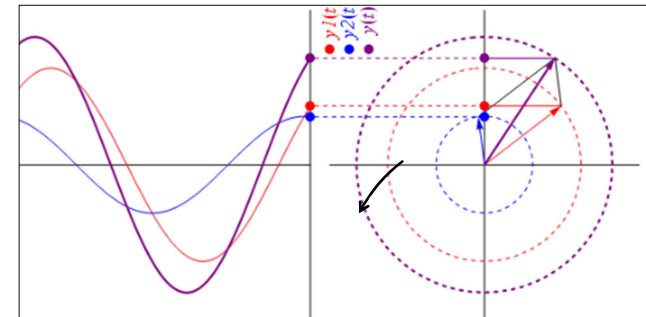
La tensión quedará definida por el **desfase** ( $\phi$ ) **y por la amplitud**  $V_m$  ya que todas las tensiones tienen la misma frecuencia  $\omega$ .

Por tanto, podemos definir la tensión, de forma abreviada, como un **fasor**:

Forma exponencial:  $V = V_m e^{j\phi}$

Forma abreviada:  $V = V_m \angle \phi$

(\*): utilizamos la 'j' en la notación compleja para evitar confusión con la intensidad 'i'



<https://en.wikipedia.org/wiki/File:Unfasor.gif>



# 7. CORRIENTE ALTERNA

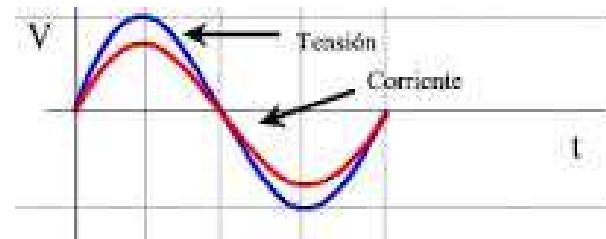
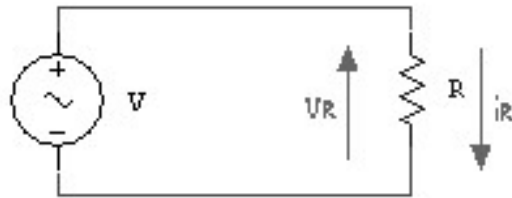
## Ejemplos de fasores

### 1. Circuito receptor resistencia pura

La corriente que circula por este circuito es una tensión alterna senoidal de igual frecuencia y de la misma fase que la tensión de alimentación. La resistencia no altera el desfase en la salida.

$$V(t) = R I(t)$$

No hay desfase entre la tensión y la corriente



$$\text{Tensión: } V = V_m e^{j\phi}$$

$$\text{Intensidad: } I = \frac{V_m}{R} e^{j\phi}$$

En corriente alterna se define **impedancia (Z)** como la relación entre la tensión y la intensidad. En este caso la impedancia es R:

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



# 7. CORRIENTE ALTERNA

## 2- Circuito receptor de capacidad pura $V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi)$

Al aplicar una tensión alterna senoidal sobre una capacidad pura, circulará una intensidad senoidal con la misma frecuencia pero desfasada  $\pi/2$ . Es decir, **la intensidad se adelanta  $\pi/2$  respecto la tensión.**

$$I = C \frac{dV_C}{dt}$$

$$(1): I(t) = C \frac{d}{dt} (V_m \cos(\omega t + \phi))$$

$$(2): I(t) = -\omega C V_m \sin(\omega t + \phi) \quad \boxed{\sin(\omega t) = \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})}$$

$$(3): I(t) = -\omega C V_m \cos(\omega t + \phi - \frac{\pi}{2})$$

En fasores, la tensión es:

$$V = V_m e^{j\phi}$$

De (3) obtenemos la intensidad en fasores:

$$I = -\omega C V_m e^{j(\phi - \frac{\pi}{2})} = e^{j\pi} I_m e^{j(\phi - \frac{\pi}{2})} = I_m e^{j(\phi + \frac{\pi}{2})}$$

$$e^{j\pi} = -1$$

$$I_m = \omega C V_m$$

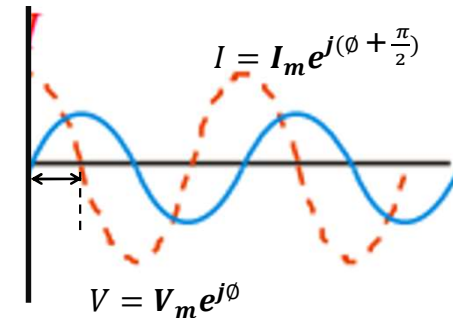
$$Z = \frac{V_m e^{j\phi}}{I_m e^{j(\phi + \frac{\pi}{2})}} = Z_m e^{j(-\frac{\pi}{2})}$$

**Impedancia**

$$\boxed{Z_m = \frac{V}{I} = \frac{1}{C\omega}}$$

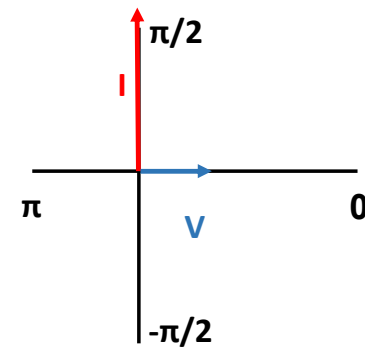


**En corriente alterna senoidal, un condensador desfasa 90° la intensidad respecto la tensión.**



Cuando I está en el máximo, V está a 0

**Fasores**



## 7. CORRIENTE ALTERNA

### 3. Circuito receptor de inductancia pura $V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi)$

Al aplicar una tensión alterna senoidal sobre una inductancia pura, circulará una intensidad senoidal con la misma frecuencia pero desfasada  $\pi/2$ . Es decir, **la intensidad se retrasa  $\pi/2$  respecto la tensión.**

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

Integrando la  $v(t)$

$$i(t) = \frac{1}{L\omega} V_m \sin(\omega t + \phi)$$

$$i(t) = \frac{1}{L\omega} V_m \cos(\omega t + \phi - \frac{\pi}{2})$$

$$\sin(\omega t) = \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$V = V_m e^{j\phi}$$

$$I = I_m e^{j(\phi - \frac{\pi}{2})}$$

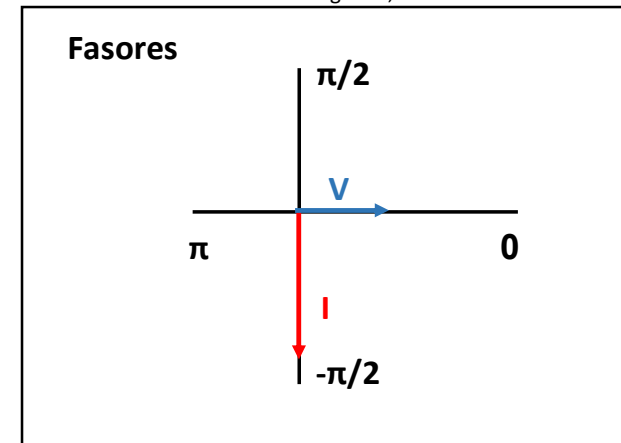
$$I_m = \frac{V_m}{L\omega}$$

$$Z = \frac{V_m e^{j\phi}}{I_m e^{j(\phi - \frac{\pi}{2})}} = Z_m e^{j(\frac{\pi}{2})}$$

**Inductancia: desfase  $-90^\circ$  de la intensidad respecto la tensión.**

$$Z_m = L\omega$$

Cuando  $I$  está en el máximo negativo,  $V$  está a 0

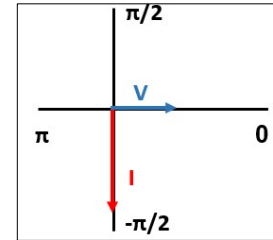


# 7. CORRIENTE ALTERNA

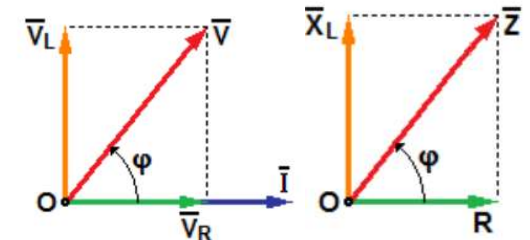
## 4. Circuito RL

Al aplicar una tensión alterna sobre el circuito:

- $V_r$ : La intensidad generada está en fase con la tensión en la resistencia.
- $V_L$ : La intensidad estará desfasada  $-90^\circ$  respecto la tensión que cae en la bobina.



$$Z = \frac{V_m e^{j\phi}}{I_m e^{j(\phi - \frac{\pi}{2})}} = Z_m e^{j(\frac{\pi}{2})}$$

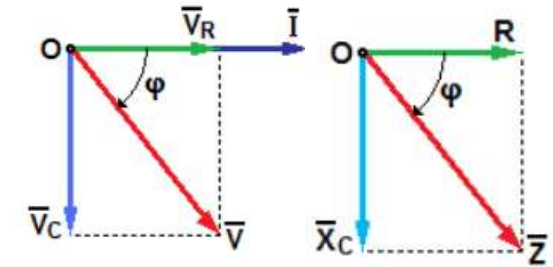
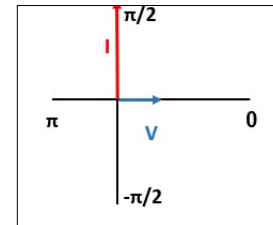


Por tanto, **la tensión que cae en la bobina está desfasada  $-90^\circ$  respecto la tensión que cae en la resistencia**

## 5. Circuito RC

Al aplicar una tensión alterna sobre el circuito:

- $V_r$ : La intensidad generada está en fase con la tensión en la resistencia.
- $V_C$ : La intensidad estará desfasada  $90^\circ$  respecto la tensión que cae en el condensador



$$Z = \frac{V_m e^{j\phi}}{I_m e^{j(\phi + \frac{\pi}{2})}} = Z_m e^{j(-\frac{\pi}{2})}$$

Por tanto, **la tensión que cae en el condensador está desfasada  $90^\circ$  respecto la tensión que cae en la resistencia**

## 7. CORRIENTE ALTERNA

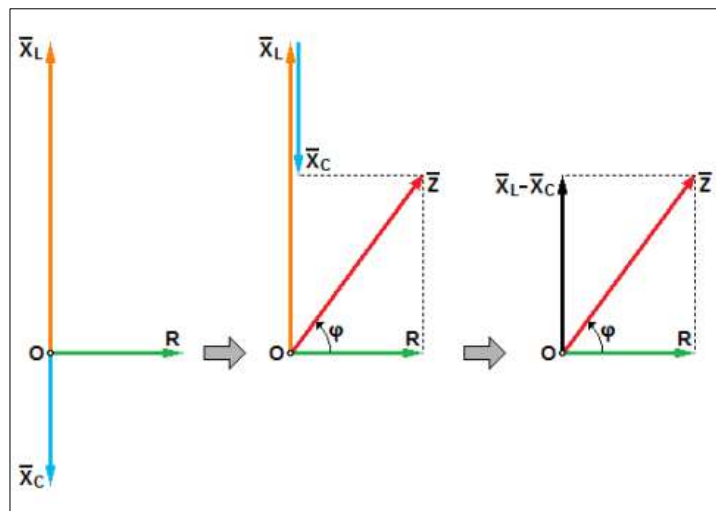
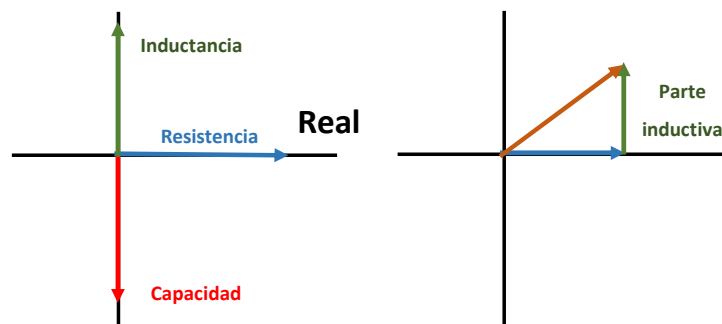
La **impedancia (Z)** de un circuito es la suma de todas las resistencias de los componentes. La **impedancia** tiene una parte resistiva (**resistencia**) y una parte reactiva (de una parte **inductiva** y una parte **capacitiva**). Se simboliza por un número complejo:

- **Parte resistiva (R)**: Transforma la energía en trabajo. Es la parte real del número complejo. No crea desfase entre V e I
- **Parte reactiva (X)**: No realiza trabajo. Es la parte compleja. Crea un desfase entre V e I

**Capacitiva**: almacena energía y la acumula en campo eléctrico y la retorna al cambiar el sentido de la corriente.

**Inductiva**: almacena energía y la acumula mediante un campo magnético y la retorna al cambiar el sentido de la corriente.

Podemos mostrar gráficamente el número complejo como un vector, donde en la abscisas (horizontal) se muestra la parte resistiva y en las ordenadas (vertical) la parte reactiva (compleja). En el ejemplo se muestra la impedancia de un circuito RLC en serie.



$$\bar{Z} = R + j.X_L - j.X_C$$

$$\bar{Z} = R + j.(X_L - X_C)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{X_L - X_C}{R} \right]$$

$$X_C = \frac{1}{C\omega} \quad X_L = \omega L$$

## 7. CORRIENTE ALTERNA

La potencia total consumida vendrá dada por la expresión  $P = VI = ZI^2$   
Tenemos que:

- **Potencia activa (W):** Producto escalar de los vectores V e I. Es la proyección de la potencia (VI) sobre el eje resistivo. **Es la potencia que realiza trabajo (energía)**

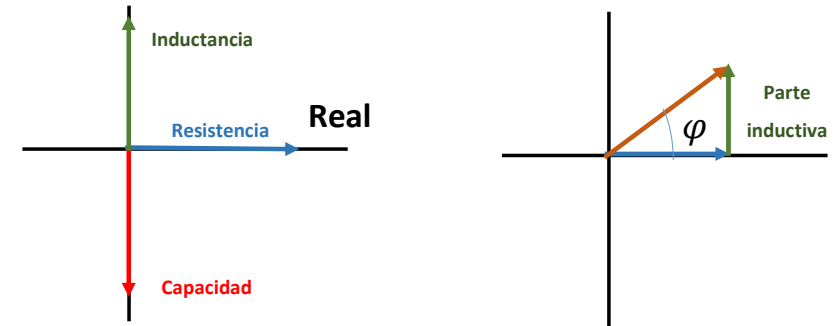
$$P = VI \cos \varphi$$

- **Potencia reactiva (VA):** Es la proyección sobre el eje imaginario, no produce trabajo.

$$Q = VI \sin \varphi$$

- **Potencia aparente (VA):** Suma de ambas potencias. Indica el consumo total real.

$$S_{aparente} = \sqrt{P^2 + Q^2} = VI$$



Teorema de Boucherot: se basa en el principio de la conservación de la energía.

$$\begin{aligned} P_{generada} &= \sum_{k=1}^N p_k \\ Q_{generada} &= \sum_{k=1}^N q_k \\ S_{generada} &\neq \sum_{k=1}^N S_k \\ S_{generada} &= \sqrt{P_{generada}^2 + Q_{generada}^2} \end{aligned}$$

## 7. CORRIENTE ALTERNA

Al parámetro ' $\cos\Phi$ ' se le denomina factor de potencia, y es conveniente por motivos de eficiencia energética que sea **lo más cercano a 1**, lo cual implica que los sistemas de consumo tengan la menor componente reactiva posible.

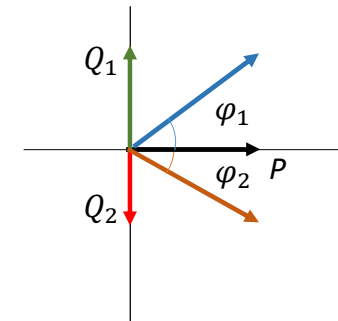
Para disminuir los consumos reactivos se añaden en el circuito consumidor dispositivos que incorporen consumos reactivos en sentido contrario:

$Q_1$ : consumo reactivo inicial

$Q_c$ : consumo reactivo de compensación

$Q_2$ : consumo reactivo final

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = K P$$



Por ejemplo,

tenemos una potencia activa de 300kW a 400V y un factor de 0.75. Calcular la potencia reactiva necesaria para lograr un factor de 0.9:

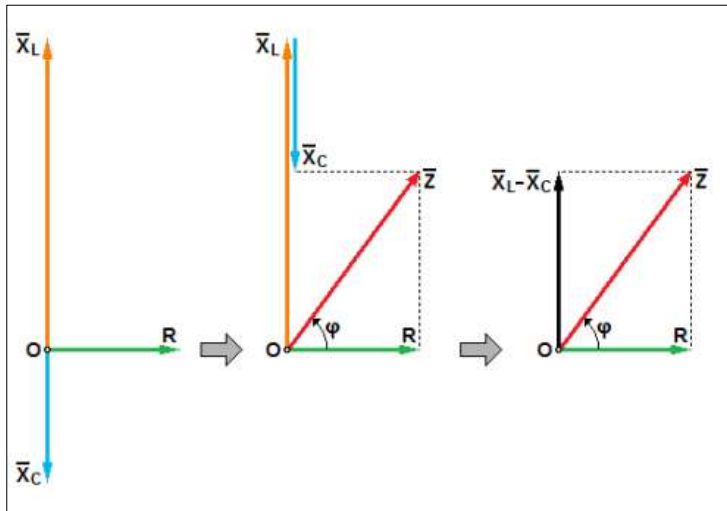
$$Q_c = P (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = 0.398 \cdot 300kW = 119.3kW$$



# 7. CORRIENTE ALTERNA

Cuando se igualan las impedancias inductivas y capacitivas se elimina la impedancia reactiva y se maximiza la potencia. Esto se logra variando la frecuencia de la señal, hasta lograr la frecuencia de resonancia ( $f_0$ ):

$$X_L = X_C \rightarrow L\omega = \frac{1}{C\omega} \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow \boxed{f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$$

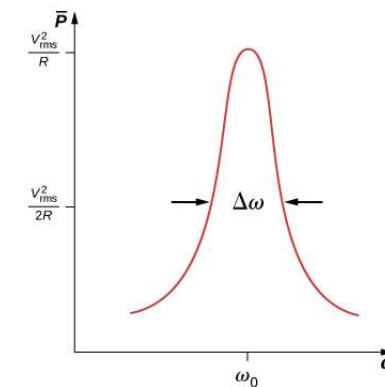


$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{X_L - X_C}{R} \right]$$

$$\varphi = 0$$

$$Z = R$$



Factor de calidad:  
 $Q = \omega_0 / \Delta\omega$

Circuito resonante,  
se elimina la impedancia  
reactiva

$$\boxed{X_L = X_C}$$

$$\boxed{f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$$

En resonancia la intensidad y la potencia son máximas. Los circuitos resonantes se utilizan en electrónica para implementar osciladores, circuitos de sintonización, etc. En aplicaciones eléctricas industriales las frecuencias son constantes y se buscan componentes con la mínima impedancia reactiva ( $\varphi \sim 0$ ) para maximizar la potencia.

# 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

## Sistema trifásico

Sistema de 3 corrientes monofásicas de **igual amplitud y frecuencia y desfasadas 120 grados (U, V y W) y un neutro (N)** que normalmente estará conectado a tierra en origen. Es el sistema utilizado para la distribución de energía eléctrica.

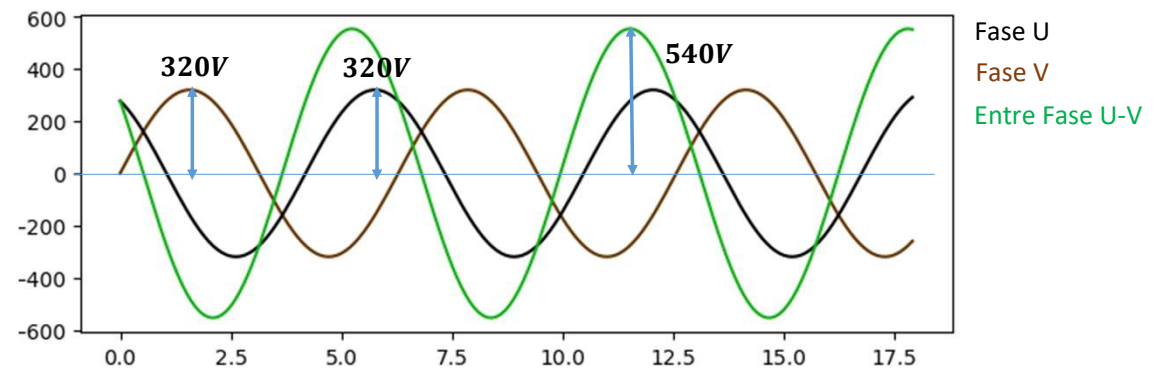
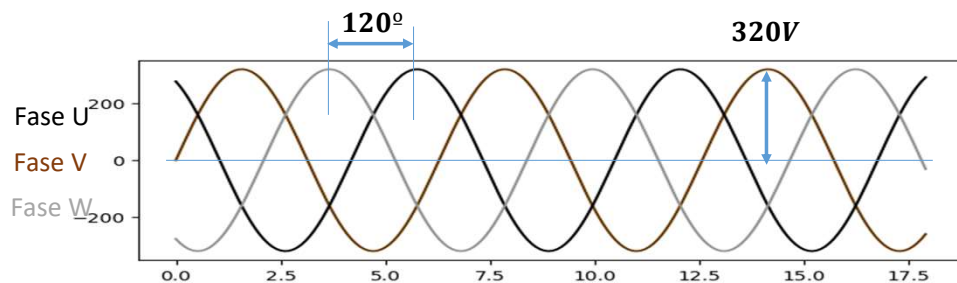
### 1. Amplitudes de señal de tensión de consumo

- **Amplitud** Fase-Neutro (monofásica): Amplitud de la señal de las fases respecto neutro

$$v_{UN} = v_{VN} = v_{WN} = v_a \sim 320V$$

- **Amplitud** Fase-Fase: Amplitud de la señal entre fases. Hay que multiplicar la amplitud Fase-Neutro por raíz de 3

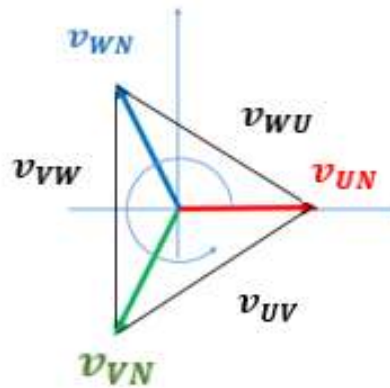
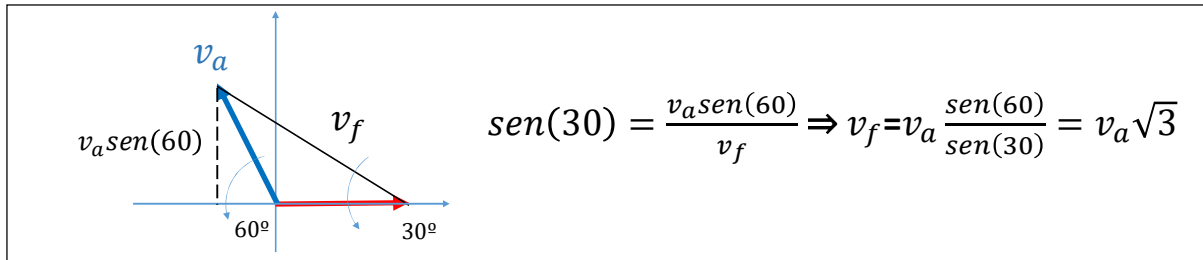
$$v_f = v_a \sqrt{3} \sim 540V$$



## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

Cálculo del factor  $\sqrt{3}$

Resta de vectores



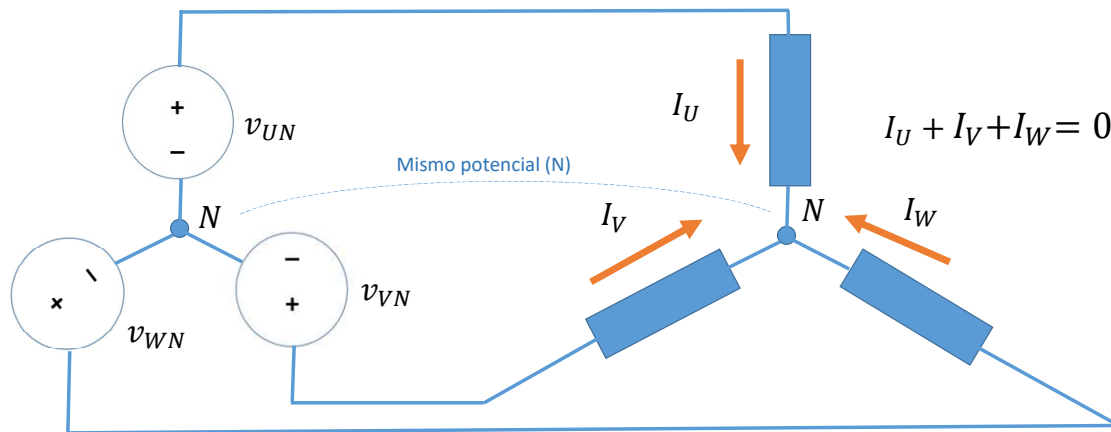
Cálculo del factor  $\sqrt{3}$

## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

### Sistemas equilibrados

Un sistema trifásico está equilibrado cuando se dan las siguientes condiciones:

- 1- Los generadores están equilibrados: las señales que generan son de igual amplitud y frecuencia. La fase entre las tres señales son constante.
- 2- Las cargas están equilibradas: las impedancias son las mismas para las tres fases.



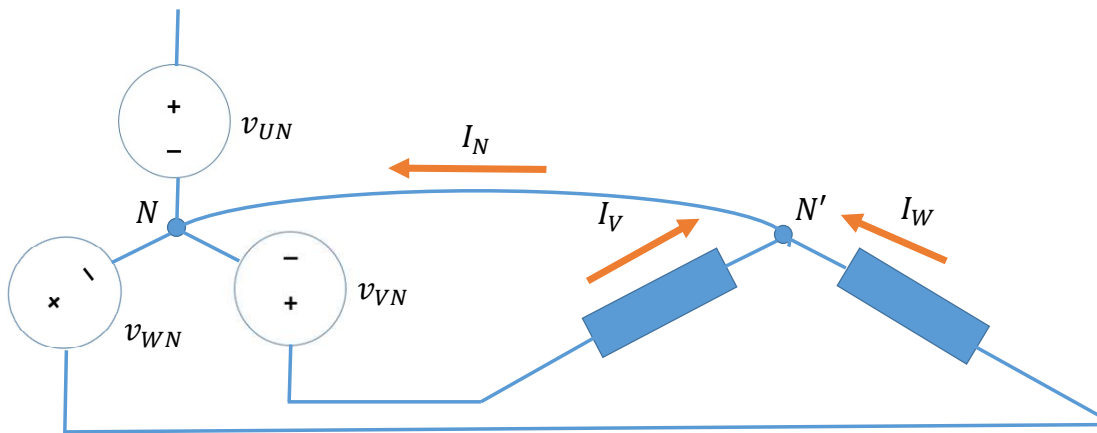
## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

### Sistemas no equilibrados

Un sistema trifásico no está equilibrado cuando se dan **una** de las siguientes condiciones:

- 1- Los generadores no están equilibrados
- 2- Las cargas no están equilibradas: las impedancias no son las mismas

$$I_V + I_W = -I_N$$



# 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

## 2. Valores eficaces de tensiones de consumo

- **Tensión eficaz Fase-Neutro (monofásica):** Amplitud de la señal de las fases respecto neutro dividido entre raíz de 2

$$v_{RNe f} = v_{SNe f} = v_{TNe f} = \frac{v_a}{\sqrt{2}} \sim 220V$$

- **Tensión eficaz Fase-Fase:** Amplitud de la señal entre fases dividido entre raíz de 2

$$v_{fef} = \frac{v_f}{\sqrt{2}} \sim 380V$$

## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

Desde el centro de transformación más cercano hasta las viviendas o industria se disponen cuatro hilos:

- un neutro (N)
- tres fases (R, S y T)

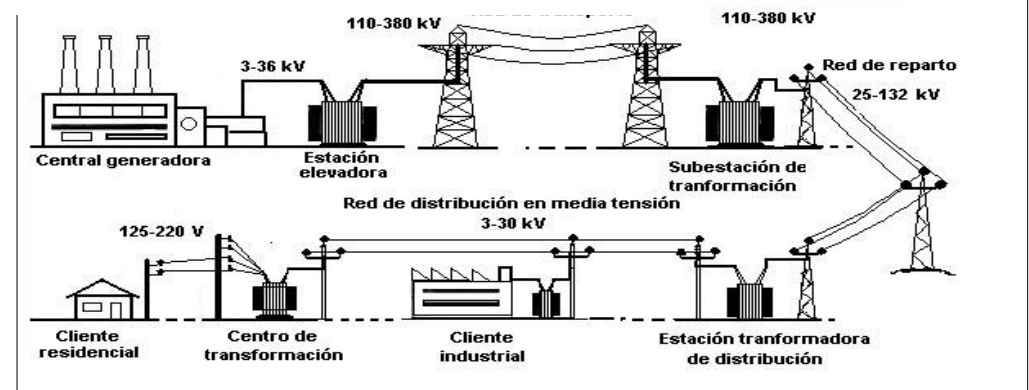
### Tensión eficaz monofásica: 230V

- un neutro (N)
- una fase
- Tensión amplitud  $\sim 320V$
- Tensión eficaz:  $320V/1,414 \sim 230V$



### Tensión eficaz trifásica: 380V entre fases

- un neutro (N)
- tres fases (R, S y T)
- Tensión (amplitud) entre fase y neutro: 320V
- Tensión (amplitud) entre fases:  
 $320V \cdot 1,73 \sim 540V$
- Tensión eficaz entre fases:  $540V/1,414 \sim 380V$





# 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

## 3. Potencia

La **potencia útil en** un sistema trifásico (**W**). Es la potencia que se transforma en movimiento, calor, etc. Es el valor que se muestra en las especificaciones del dispositivo. Se calcula mediante la expresión

$$P = \sqrt{3}VI\cos\varphi$$

La **potencia reactiva en** un sistema trifásico se calcula con la expresión.

$$Q = \sqrt{3}VI\sin\varphi$$

La **potencia aparente (consumida)** total, se puede medir mediante vatímetro (mide intensidades eficaces, tensiones y desfase  $\cos\varphi$ ). Sus unidades son **VA**:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}VI$$

- $\cos\varphi$  es el factor **de potencia** que se define como un desfase entre la tensión y la intensidad y viene motivado por la actuación de los condensadores y bobinas. Cuando se desconoce suele usarse un valor en torno entre 0,8 y 0,9.

- V es la tensión de la fase al neutro. Normalmente:  
$$V = 230V$$
$$V_f = \sqrt{3}V = 400V$$

Para calcular la potencia trifásica siempre hay que utilizar la tensión entre fases  $V_f$ , ya que la conexión de la carga siempre es entre dos fases.

## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

En una instalación interesa tener valores de  $\cos\varphi$  cercanos 1 o  $\sin\varphi$  cercanos a cero ( $Q \sim 0$ ). Esto se logra compensando las impedancias de inductancia mediante condensadores.

S: Potencia aparente (o consumida)  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}VI$

P: Potencia resistiva (útil)  $P = \sqrt{3}V_a I \cos\varphi$

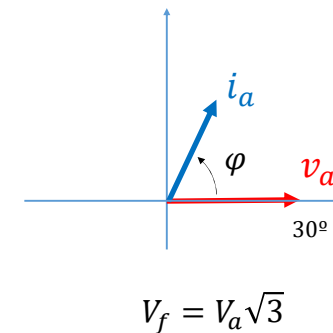
Q: Potencia reactiva (no útil)  $Q = \sqrt{3}V_a I \sin\varphi$

### Problemas por bajo factor de potencia $\cos\varphi$

- Mayor consumo de corriente.
- Aumento de las pérdidas e incremento de las caídas de tensión en los conductores.
- Sobrecarga de transformadores, generadores y líneas de distribución.
- Incremento de la facturación eléctrica por mayor consumo de corriente.

### Beneficios por corregir el factor de potencia $\cos\varphi$

- Disminución de las pérdidas en conductores.
- Reducción de las caídas de tensión.
- Aumento de la disponibilidad de potencia de transformadores, líneas y generadores.
- Incremento de la vida útil de las instalaciones
- Reducción de los costos por facturación eléctrica.



p: Pérdidas del conductor (R)

$$p = 3RI^2$$

## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

### Disminución de pérdidas de potencia en conductores

**p:** Pérdidas del conductor (R) por efecto *Joule*  $p = 3RI^2 \longrightarrow p = \frac{R}{V_a^2} S^2 \longrightarrow p = \frac{R}{V_a^2} \frac{P^2}{(\cos\varphi_a)^2}$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}VI$$

$p_1$  : Pérdidas del conductor (aguas arriba) con una carga sin corrección en la carga (aguas abajo)

$p_2$  : Pérdidas del conductor (aguas arriba) con una carga con corrección en la carga (aguas abajo)

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_1 \left[ 1 - \left( \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \right)^2 \right]$$

#### Ejemplo

Suponemos una carga con un factor de potencia de 0.7

$$\cos\varphi_1 = 0.7$$

¿Cuánto mejora la pérdida si mejoramos el factor de potencia a 0.9?

$$\frac{\Delta p}{p_1} = \left[ 1 - \left( \frac{0.7}{0.9} \right)^2 \right] = 0.395 \quad \text{Mejora de un } \mathbf{39,5\%}$$

## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

### Evaluación económica

Los distribuidores de energía eléctrica aplican un sistema de tarifas que sanciona el consumo de energía con un factor de potencia medio mensual inferior a 0.9. Los factores de potencia deben estar entre **0.7 y 0.9**

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi$$

**P:** Potencia resistiva (útil)      si  $\cos \varphi \geq 0,89 \rightarrow \operatorname{tg} \varphi > 0.5$

**Q:** Potencia reactiva (no útil)       $\frac{Q}{P} > 0.5$

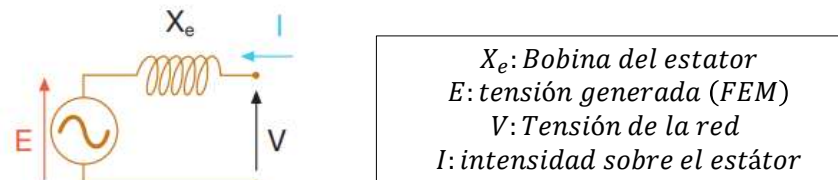
**La potencia reactiva (Q) no debe superar un 50% la activa (P)**

## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

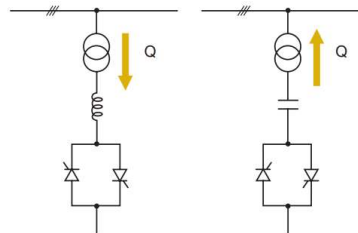
### Eliminación potencia reactiva

Los principales medios para la producción de potencia reactiva son:

- Alternadores síncronos: generadores de energía eléctrica. La potencia reactiva se regula ajustando la excitación del alternador.
- Compensadores síncronos: motores síncronos cuya excitación se sincroniza con la red cuya misión es absorber la potencia reactiva excedente de un circuito. La FEM del alternador debe ser inferior a la de la red (subexcitación) para conseguir la absorción de potencia reactiva. Circuito equivalente:



- Compensadores estáticos: circuitos con condensadores o bobinas que generan energía reactiva para compensar la reactiva de la red. Los tiristores modulan con continuidad la absorción de la potencia reactiva. **Se utilizan en redes de alta tensión.**



- **Baterías de condensadores estáticos:** aplicando una tensión alterna entre las armaduras, el condensador está sometido a ciclos de carga y descarga durante los cuales acumula energía reactiva (carga del condensador) para luego inyectarla al circuito al que va conectado (descarga del condensador). **Se utilizan en redes de baja tensión**

Fuente: "Cuadernos de aplicaciones técnicas (CT8): Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas" ABB

## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

### Eliminación potencia reactiva mediante condensadores estáticos

Para eliminar la parte reactiva se utilizan condensadores conectados en configuración estrella o triángulo: En estrella cada condensador soporta la tensión simple (de fase) mientras que en triángulo soporta la tensión compuesta (de línea)

- **Condensadores en triángulo**

Sobre cada condensador cae tensión trifásica (entre fases):

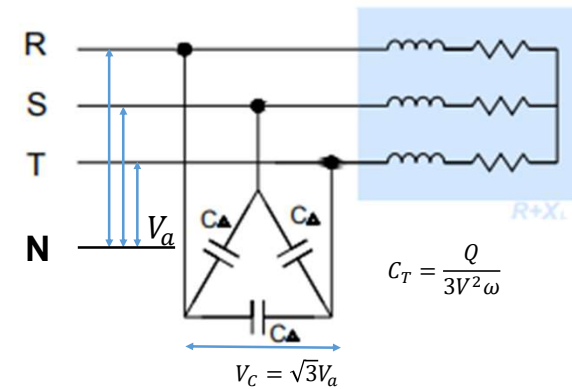
$$V_C = \sqrt{3}V_a \quad V_a: \text{Tensión entre fase y neutro}$$

La potencia capacitiva en los condensadores debe ser igual que la reactiva que se desea eliminar (Q):

$$Q = \sqrt{3}V_a I = \sqrt{3}V_a \frac{\sqrt{3}V_a}{Z_C} = 3V_a^2 C_T \omega$$

$$C_T = \frac{Q}{3V_a^2 \omega}$$

Q: impedancia reactiva que se quiere eliminar



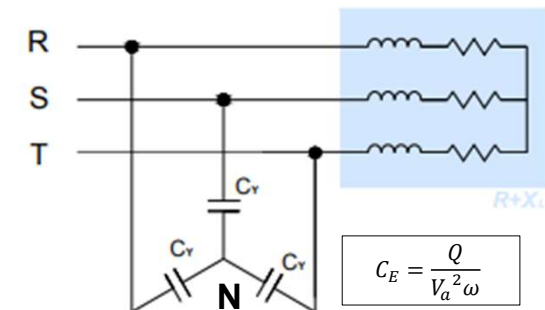
- **Condensadores en estrella**

Sobre cada condensador cae una tensión:

$$V_C = V_a$$

$$Q = V_a I = V_a \frac{V_a}{Z_C} = V_a^2 C_E \omega$$

$$C_E = \frac{Q}{V_a^2 \omega}$$



## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

La potencia para eliminar la parte inductiva es la misma en ambas configuraciones:

$$V_a^2 C_E \omega = 3V_a^2 C_T \omega$$

$$C_E = 3C_T$$

Los condensadores en estrella deben tener una capacidad mayor (el triple) que los condensadores en triángulo.

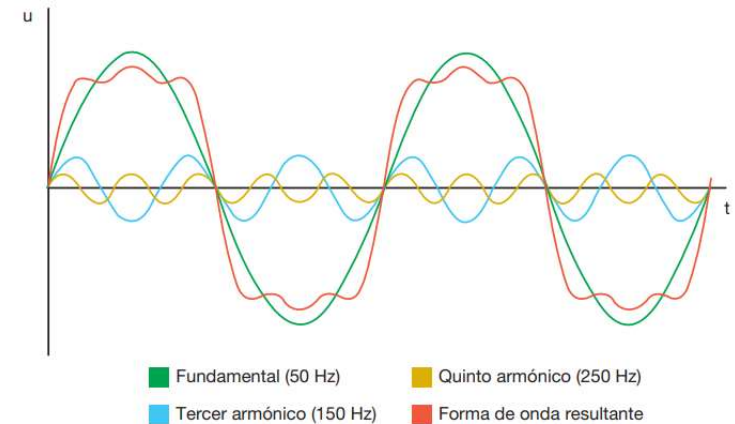
Para altas frecuencias la impedancia de los condensadores de compensación es muy pequeña. Por tanto, los condensadores de compensación pueden verse **afectados por armónicos** (señales de alta frecuencia proporcionales a la tensión y que proceden de la red).

**Teorema de Fourier:** Las señales no continuas periódicas (por ejemplo tren de pulsos) se pueden descomponer en una serie de señales senoidales de frecuencia proporcional a la señal periódica original. La señal senoidal con la frecuencia original se llama frecuencia **fundamental** y las demás señales senoidales (con frecuencias proporcionales) se llaman **armónicos**.

Los armónicos son introducidos en la red eléctrica y pueden producir daños o mal funcionamiento sobre otros componentes de la red

Los armónicos son producidos por aparatos que producen señales no continuas como:

- Ordenadores
- Fluorescentes
- Convertidores
- Fuentes de alimentación conmutada
- Accionamientos de velocidad variables
- etc





## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

### Corrección en Motores asíncronos

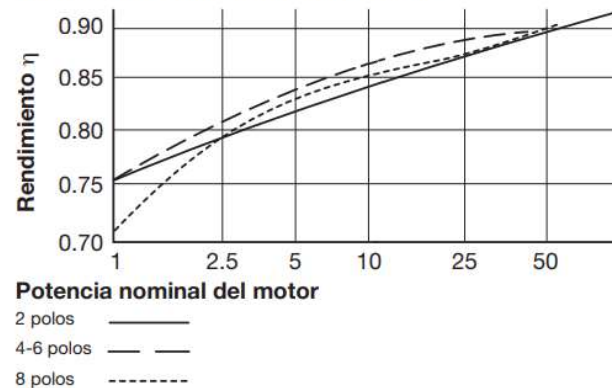
Rendimiento de un motor:

$$\eta = \frac{P_n}{P_a}$$

$P_n$ : Potencia nominal

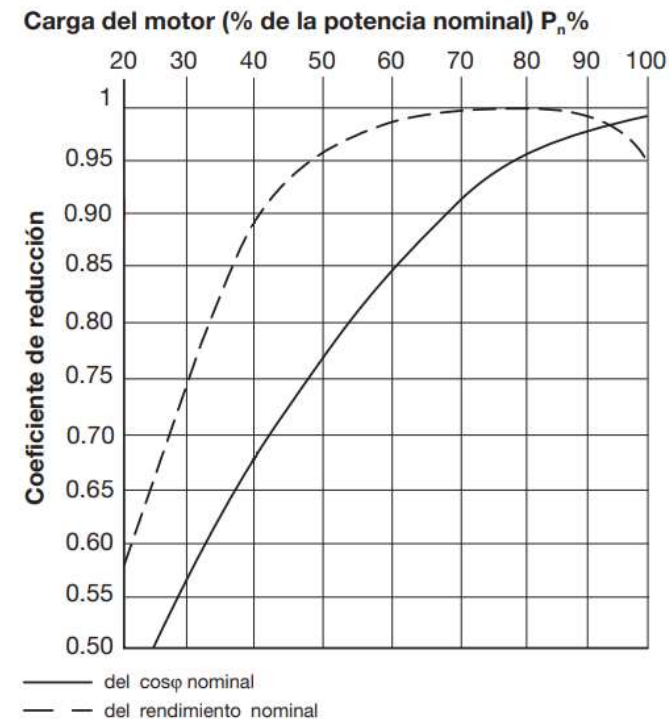
$P_a$ : Potencia consumida (absorbida)

Rendimiento en función de la potencia



Fuente: "Cuadernos de aplicaciones técnicas (CT8): Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas" ABB

El coeficiente de potencia y el rendimiento de un motor no es siempre el mismo, depende de rango de trabajo en el que esté funcionando. En la siguiente gráfica se muestra la reducción de los valores nominales de coeficientes de potencia y de rendimiento respecto a la potencia a la que esté trabajando.



## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

### Ejemplo:

Suponemos un motor asíncrono de 6 polos y 11kW con una carga que demanda un 40% de la potencia nominal del motor

- Rendimiento nominal es de 0.86
- Factor de potencia de 0.77

Mirando la gráfica de reducción, tenemos que para 40%

$$\eta = 0.9 \eta_n = 0.77$$

$$\cos\varphi = 0.67 \cos\varphi_n = 0.52$$

Potencia absorbida

$$P_a = \frac{P_{n'}}{\eta} = \frac{0.4 P_n}{\eta} = \frac{0.4 \cdot 11kW}{0.77} = 5.68kW$$

Potencia de corrección para obtener 0.9

$$\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= 0.52 & Q_c &= P_a (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = 1.16 \cdot 5.68kW = 6.53kVA \\ \cos\varphi_2 &= 0.9 \end{aligned}$$

La potencia de corrección no debe superar el 90% la potencia reactiva absorbida con el motor en vacío  
 $\sin\varphi_1 = 1$

## 8. CORRIENTE ALTERNA TRIFÁSICA

La distribución de energía eléctrica desde los centros de generación hasta los centros de consumo se realiza a través de **líneas eléctricas de transporte de sistemas AC trifásicos (sin neutro)**

Las líneas eléctricas transportan tensiones muy grandes (110kV, 220kV, 400kV) para poder disminuir la intensidad y reducir la sección de los cables. Para distribuir esta tensión a los centros de consumo se utilizan transformadores que disminuyen la tensión (a 220V-230V) y aumentan la intensidad. La energía eléctrica que llega a los centros de consumo es la “misma” que la transportada, salvo las pérdidas producidas en el transporte y en los transformadores.

Esta operación de aumentar la tensión y disminuir la intensidad solo se puede realizar sobre **señales AC**, ya que los **transformadores** solo trabajan con este tipo de señales.



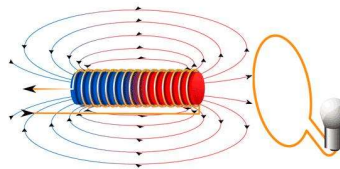
## 9. ELECTROMAGNETISMO

Hay una relación directa entre electricidad y magnetismo. Las leyes que lo unifican son las leyes de Maxwell.

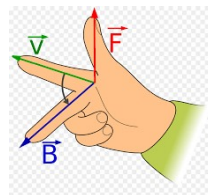
- **Ley de Ampere:** Las cargas eléctricas en movimiento generan a su alrededor campos magnéticos cuya intensidad es proporcional a la cantidad de cargas (intensidad). La dirección del campo magnético cumple la norma de la mano derecha



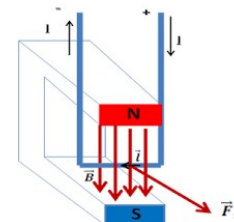
- **Ley de inducción o de Faraday:** Un campo magnético variable en movimiento en el interior de una solenoide genera una diferencia de potencial en éste.



- **Fuerza Lorentz:** Si a una intensidad aplicamos un campo magnético se genera una fuerza perpendicular al campo



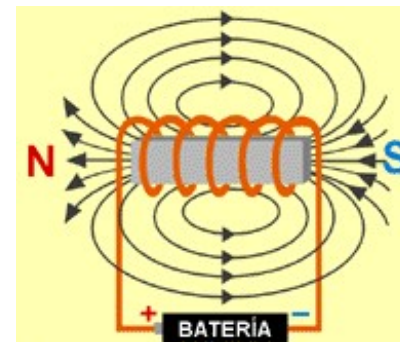
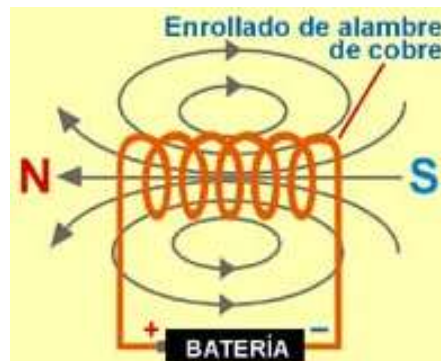
$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



## 9. ELECTROMAGNETISMO

### Solenoides

Hilo de cobre con barniz aislante enrollado en forma de espira. Si aplicamos una diferencia de potencial en sus extremos genera un campo magnético (ley de Ampère), más intenso que si el hilo de cobre estuviese extendido, sin espiras.



Si al solenoide le introducimos un cilindro de metal como núcleo, se intensificará el campo magnético y actuará de imán (electroimán)

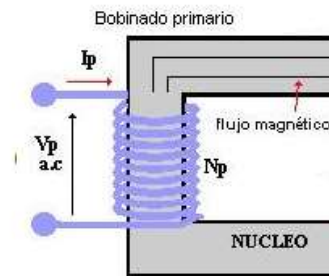
Si el núcleo lo movemos en el interior del solenoide (campo magnético variable) producimos una corriente en él.

Estos son los principios que explican el funcionamiento de: motores, generadores, transformadores, relés, protectores termomagnéticos, sensores, etc

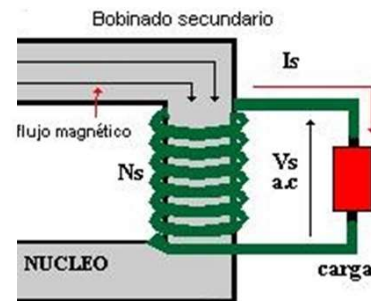
## 9. ELECTROMAGNETISMO

- Transformadores

Formados por un núcleo férreo con bobinas a sus extremos. Una bobina por la que circula corriente **alterna** genera un campo magnético variable



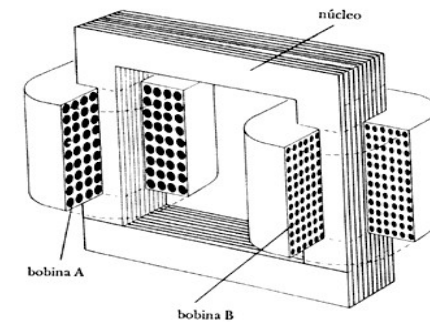
El flujo magnético variable genera una diferencia de potencial entre la bobina secundaria (ley de Faraday)



## 9. ELECTROMAGNETISMO

Un transformador aumenta o disminuye la tensión alterna, manteniendo la frecuencia.

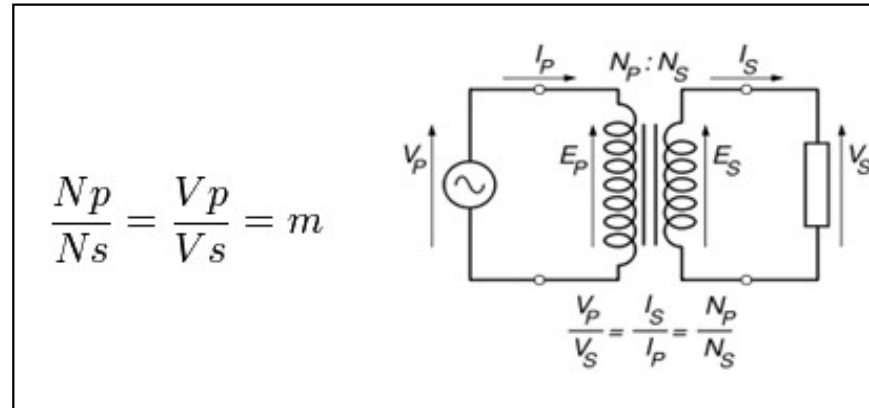
- Están basados en un fenómeno de inducción electromagnética
- Son dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado de hierro dulce o hierro silicio.
- Las bobinas o devanados se denominan 'primario' o 'secundario' según correspondan a la entrada o salida.
- Si se aplica una diferencia de potencial alterna en el devanado primario, las variaciones de intensidad y sentido de la corriente alterna crearán un campo magnético variable dependiendo de la frecuencia de la corriente.
- El campo magnético variable creado en el devanado primario originará, por inducción electromagnética, la aparición de una fuerza electromotriz en los extremos del devanado secundario





## 9. ELECTROMAGNETISMO

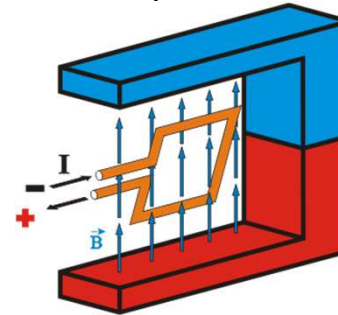
- La potencia de entrada al equipo (en el primario), en el caso de un transformador ideal (sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida
- Un transformador real presenta un porcentaje de pérdidas en la potencia.
- La relación entre la fuerza electromotriz inductora ( $V_p$ ) (la aplicada al devanado primario) y la fuerza electromotriz inducida ( $V_s$ ) (la obtenida en el secundario) es directamente proporcional al número de espiras de los devanados primario ( $N_p$ ) y secundario ( $N_s$ ). A esta relación se le denomina relación de transformación ( $m$ ).



## 9. ELECTROMAGNETISMO

### Motores

El movimiento del eje se genera por inducción electromagnética. En un conductor en el que circula una corriente se coloca sobre una campo magnético, se genera una fuerza (fuerza de Lorentz)



### Protecciones

Muchas protecciones detectan un aumento de amperaje gracias al aumento del campo magnético consecuente

