

# Electrotecnia

Oscar Perpiñán Lamigueiro

<http://oscarperpinan.github.io>

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

# Conceptos preliminares

## Definiciones

## Elementos Lineales

## Elementos No Lineales

## Asociación de elementos pasivos

## Corriente alterna sinusoidal

## Máquinas Eléctricas

## Aparamenta eléctrica

## Análisis en frecuencia

## Recursos

# Sistema de suministro eléctrico

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Un **sistema de suministro eléctrico** tiene como objetivo **producir, transportar y distribuir energía eléctrica** a los lugares de consumo, con el mínimo coste posible en condiciones de **fiabilidad, calidad y seguridad**.

Se pueden identificar diferentes componentes del sistema:

- ▶ Generadores
- ▶ Redes de transporte
- ▶ Redes de distribución
- ▶ Equipos de acondicionamiento, transformación y protección (y en algunos casos, almacenamiento)
- ▶ Puntos de consumo

Conceptos  
preliminares

Definiciones

Elementos Lineales

Elementos No Lineales

Asociación de elementos  
pasivos

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

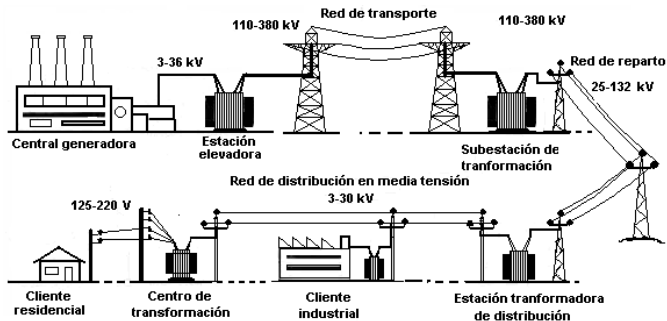
## Sistema de suministro eléctrico

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

## Definiciones

Asociación de elementos pasivos



- ▶ La electricidad es un fenómeno físico asociado al **movimiento de las cargas eléctricas**.
- ▶ El aprovechamiento de la electricidad consiste en generar y canalizar el movimiento de las cargas eléctricas.
- ▶ El movimiento de las cargas eléctricas es la **corriente eléctrica**. Este movimiento se realiza mediante un trabajo, cuantificado por el **potencial**.

- **Variación de la carga con el tiempo en la sección transversal de un conductor**

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

- Movimiento de electrones libres. Sin embargo, por convenio su sentido es positivo para el movimiento de las cargas positivas.
- **Principio de conservación de la carga:** las líneas de corriente son cerradas (o solenoidales)
  - Primera ley de Kirchhoff : la suma de las corrientes que llegan a un nudo es igual a la suma de las que salen.

# Tensión. Diferencia de potencial

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- Trabajo realizado al mover una carga unidad entre dos puntos.

$$v = \frac{dW_e}{dq}$$

- Si entre dos puntos A y B existe una diferencia de potencial, podemos escribir:

$$v_{AB} = v_A - v_B$$

$$v_{AB} = -v_{BA}$$

Conceptos  
preliminares

Definiciones

Elementos Lineales

Elementos No Lineales

Asociación de elementos  
pasivos

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos



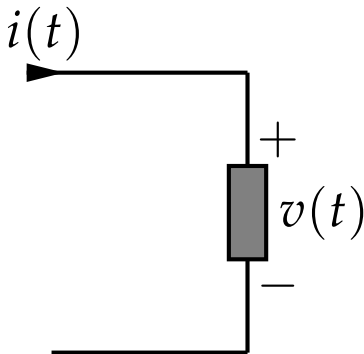
- ▶ Trabajo realizado por unidad de tiempo

$$p(t) = \frac{dW_e}{dt} = v(t) \cdot \frac{dq(t)}{dt} = v(t) \cdot i(t)$$

- ▶ Un elemento del circuito absorbe (*receptor*) o entrega (*generador*) potencia según el sentido de tensión y corriente en sus terminales
- ▶ **Principio de conservación de la energía:** la energía producida por un generador se consume por los receptores del circuito para producir trabajo (mecánico, químico, etc.) o calor.
  - ▶ Segunda ley de Kirchhoff: la suma (con signo) de las tensiones a lo largo de un camino cerrado (circuito) es cero

# Potencia eléctrica

**Ejemplo:** en el dipolo de la figura se absorbe potencia ( $p(t) > 0$ )



# Potencia y Energía

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Definiciones

Elementos Lineales

Elementos No Lineales

Asociación de elementos  
pasivos

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

**Energía** es la capacidad para realizar un trabajo.

Unidades Wh, kWh

1 kWh = 3.6 MJ

**Potencia** es la cantidad de trabajo efectuado *por  
unidad de tiempo*.

Unidades W, kW

# Eficiencia y Rendimiento

**Eficiencia** de un proceso es la relación entre la *potencia* de salida y la *potencia* de entrada a ese proceso.

**Rendimiento** de un proceso es la relación entre la *energía* de salida y la *energía* de entrada a ese proceso.

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Definiciones

Elementos Lineales

Elementos No Lineales

Asociación de elementos  
pasivos

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Conceptos preliminares

Definiciones

**Elementos Lineales**

Elementos No Lineales

Asociación de elementos pasivos

Corriente alterna sinusoidal

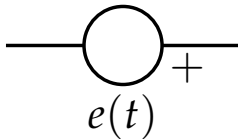
Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

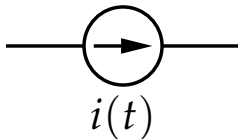
Análisis en frecuencia

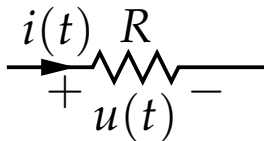
Recursos

- ▶ **Generador de tensión:** su tensión es independiente de la corriente (la corriente la fija el circuito)
  - ▶ Batería electroquímica
  - ▶ Inversor de electrificación rural a su salida



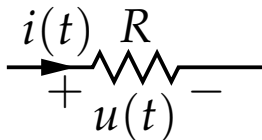
- ▶ **Generador de corriente:** su corriente es independiente de la tensión (la tensión la fija el circuito)
  - ▶ Inversor de conexión a red a su salida





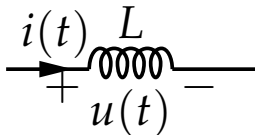
- ▶ **Produce una caída de tensión entre sus terminales directamente proporcional a la corriente que lo atraviesa.**
- ▶ La constante de proporcionalidad es el valor de la resistencia:  $V = R \cdot I$
- ▶ Su valor depende de resistividad del material, de la sección y de la longitud:  $R = \rho \cdot \frac{L}{S}$

## Resistencia



- ▶ Disipa energía eléctrica produciendo **calor**:  
 $p(t) = R \cdot i^2(t)$
- ▶ Cortocircuito: resistencia nula (tensión nula)
- ▶ Circuito abierto: resistencia infinita (corriente nula).

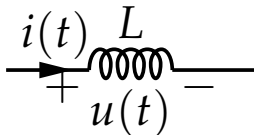




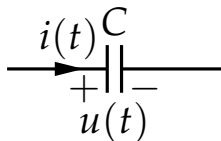
- ▶ Cuando una corriente oscilante atraviesa un conductor arrollado se produce una **tensión inducida que se opone a esta corriente** (ley de Faraday y Lenz)
- ▶ La constante que liga la tensión en sus terminales con el cambio de la corriente es el valor de la inductancia

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

## Bobina o inductancia

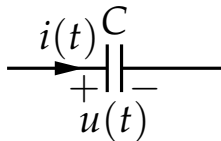


- ▶ Almacena **energía magnética**.
- ▶ La bobina **retrasa los cambios de la corriente** respecto de la tensión.
- ▶ En circuitos de corriente continua es un cortocircuito.



- ▶ Cuando se establece una tensión entre dos placas metálicas separadas por una capa dieléctrica, se produce una **separación de cargas que se acumulan en cada placa**, con signos contrarios.
- ▶ La constante de proporcionalidad entre la carga acumulada y la tensión entre las placas es la capacidad

$$C = \frac{Q}{V_{AB}}$$



- ▶ En el proceso de carga se produce una corriente eléctrica entre las dos placas

$$i(t) = \frac{dq(t)}{d(t)} = C \frac{dv(t)}{dt}$$

- ▶ Almacena **energía eléctrica**
- ▶ **Retrasa las variaciones de la tensión respecto de la corriente**
- ▶ En un circuito de corriente continua cuando el condensador está cargado se comporta como un circuito abierto.

# Conceptos preliminares

Definiciones

Elementos Lineales

**Elementos No Lineales**

Asociación de elementos pasivos

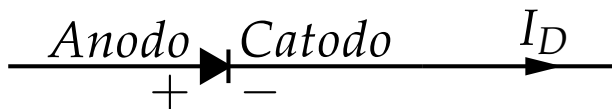
Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

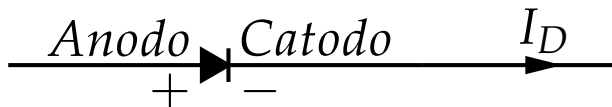
Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

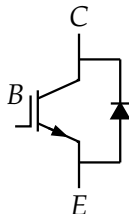


- Un diodo es un dispositivo electrónico que permite el paso de corriente a través de él a partir de una tensión de polarización.
- Cuando no conduce se comporta (idealmente) como un circuito abierto. Cuando conduce se comporta (idealmente) como un cortocircuito.



- ▶ Por tanto, puede ser utilizado como
  - ▶ **Elemento de bloqueo** (evitar que circule corriente por una parte del circuito en ciertas condiciones)
  - ▶ **Elemento de protección** (obligar a que la corriente circule por él, evitando que circule por otra rama paralela).

# Transistor



- ▶ Un transistor es un dispositivo electrónico con tres terminales que permite el paso de corriente entre dos de sus terminales cuando en el tercer terminal está polarizado adecuadamente.
- ▶ Cuando no conduce se comporta (idealmente) como un circuito abierto.
- ▶ Cuando conduce se comporta (idealmente) como un cortocircuito.





## Conceptos preliminares

Definiciones

Elementos Lineales

Elementos No Lineales

Asociación de elementos pasivos

Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

# Conexión en serie

Electrotecnia

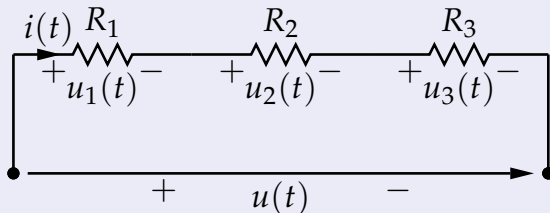
Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Misma corriente por todos los elementos: la tensión se reparte

$$R_s = \sum_i R_i$$

$$L_s = \sum_i L_i$$

$$\frac{1}{C_s} = \sum_i \frac{1}{C_i}$$



Conceptos  
preliminares

Definiciones

Elementos Lineales

Elementos No Lineales

Asociación de elementos  
pasivos

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

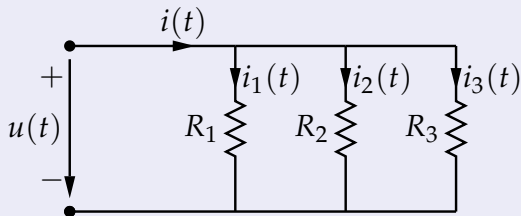
# Conexión en paralelo

Misma tensión aplicada a todos los elementos: la corriente se reparte

$$\frac{1}{R_p} = \sum_i \frac{1}{R_i}$$

$$\frac{1}{L_p} = \sum_i \frac{1}{L_i}$$

$$C_p = \sum_i C_i$$



Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

# Pulsación - Frecuencia - Fase

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

$$y(t) = Y_o \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$

- ▶ T: periodo de la onda (segundos)
- ▶  $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$ : pulsación (radianes/segundo)
- ▶  $f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{T}$ : frecuencia (Hz)
- ▶  $\varphi$ : fase (radianes o grados)
  - ▶ Es el argumento de la onda para  $t=0$
  - ▶ Tomando una onda como referencia, si la fase es  $0^\circ$ , se dice que están en fase con la onda de referencia.
  - ▶ Ídem, si la fase es  $90^\circ$ , se dice que están en cuadratura.
  - ▶ Ídem, si la fase es positiva, se dice que la onda adelanta respecto a la referencia.
- ▶  $Y_o$  valor máximo de la onda.

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

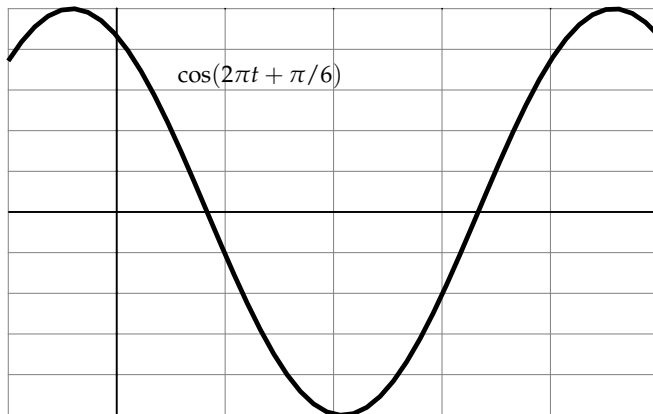
Recursos

# Pulsación - Frecuencia - Fase

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

$$y(t) = Y_o \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$$



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos



# Valor medio y valor eficaz

## ► Valor medio:

$$Y_m = \frac{1}{T} \int_0^T y(t)$$

### ► Para señal sinusoidal:

$$Y_m = \frac{1}{T} \int_0^T Y_o \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi) dt = 0$$

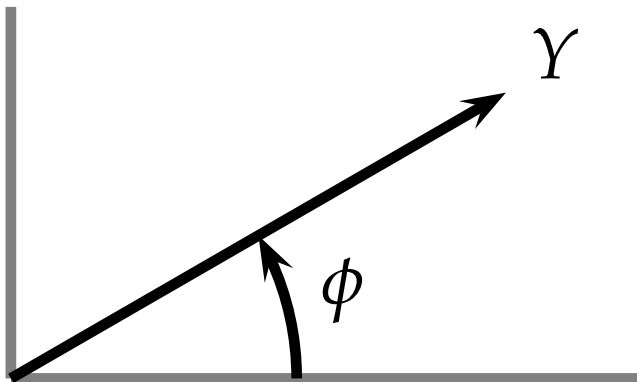
## ► Valor eficaz:

$$Y = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T y^2(t)}$$

### ► Para señal sinusoidal:

$$Y = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (Y_o \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi))^2 dt} = \frac{Y_o}{\sqrt{2}}$$

$$\overline{Y} = Y \cdot e^{j\phi} = Y \cdot (\cos(\phi) + j \cdot \sin(\phi))$$



Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Conceptos Fundamentales

**Impedancia**

Potencia

Trifásica

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

# Impedancia

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

$$\bar{R} = R$$

$$\bar{X}_C = \frac{1}{j\omega C}$$

$$\bar{X}_L = j\omega L$$

$$\bar{Z} = R + jX$$

$$\bar{Z} = Z \cdot e^{j\phi_Z}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\tan(\phi_Z) = \frac{X}{R}$$

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

**Impedancia**

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

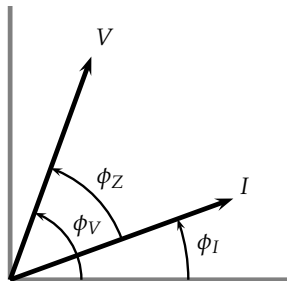
Recursos

# Impedancia

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} = \frac{V}{Z} \cdot e^{j(\phi_V - \phi_Z)} = I \cdot e^{j\phi_I}$$



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

**Impedancia**

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Elécticas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Convenio de signos para Desfase

- ▶ La tensión es origen de fases ( $\phi_V = 0$ ).
- ▶ La corriente está retrasada de la tensión un ángulo  $\phi$  positivo:

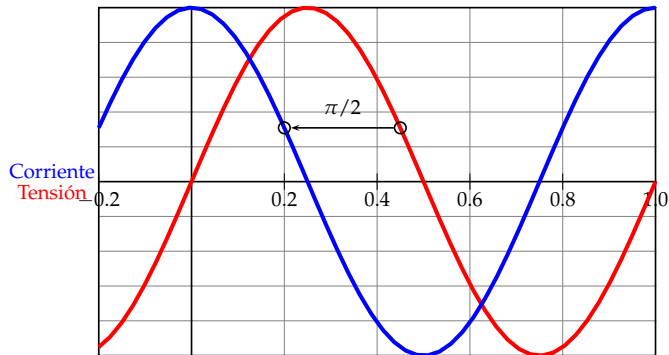
$$\begin{aligned}\phi_I &= -\phi = \phi_V - \phi_Z \\ \phi &= \phi_Z \\ i(t) &= I_o \cdot \cos(\omega \cdot t - \phi)\end{aligned}$$

- ▶ Por tanto, **si el circuito es inductivo (retrasa fase de corriente respecto de tensión)  $\phi$  es positivo.**

# Circuito Capacitivo puro

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Elécticas

Aparatura  
eléctrica

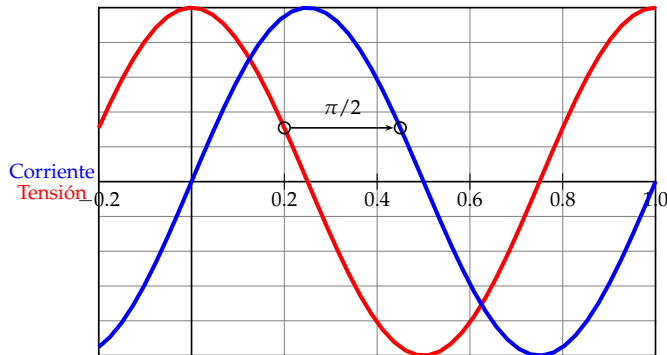
Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Circuito Inductivo puro

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

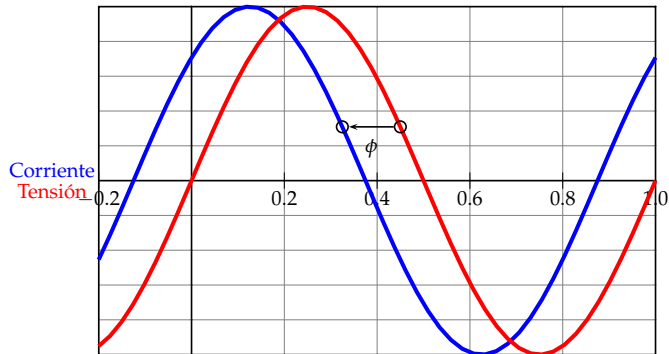
Recursos



# Circuito Capacitivo

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Elécticas

Aparatura  
eléctrica

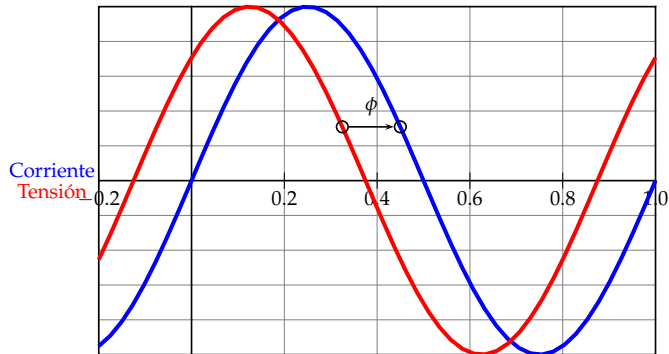
Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Circuito Inductivo

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Elécticas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

**Corriente alterna sinusoidal**

Conceptos Fundamentales

Impedancia

**Potencia**

Trifásica

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

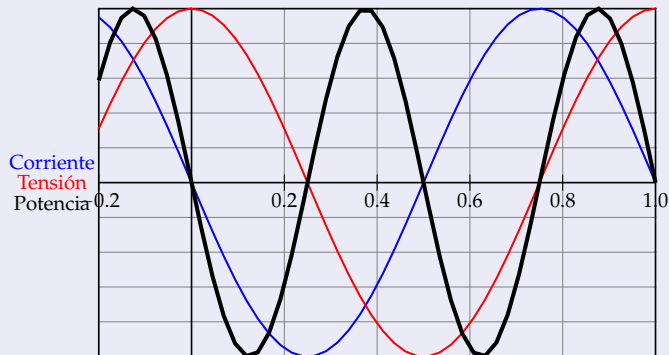
Recursos

# Circuito Capacitivo puro

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

## Potencia



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Elécticas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Circuito Inductivo puro

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

## Potencia



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

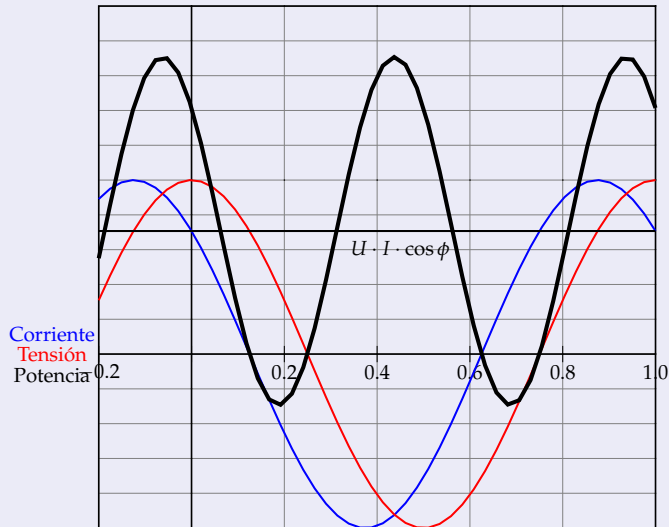
Aparata  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Circuito Capacitivo

## Potencia



Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

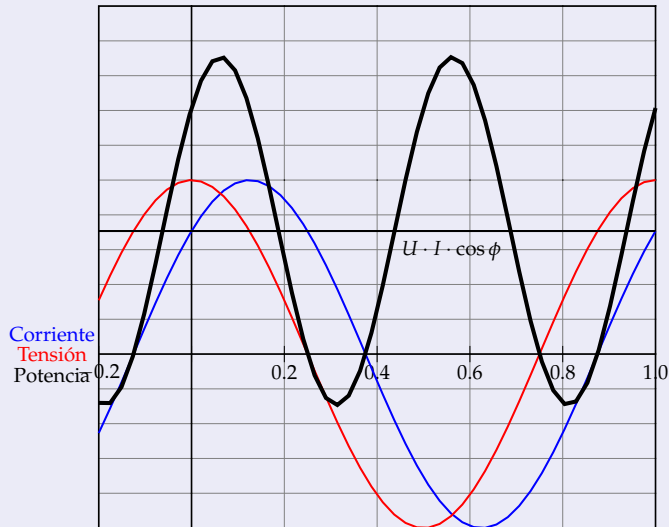
Análisis en  
frecuencia

Recursos



# Circuito Inductivo

## Potencia



Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Elécticas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos



# Potencia Activa, Reactiva y Aparente

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

**Potencia**

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

$$P = V \cdot I \cdot \cos(\phi)$$

$$Q = V \cdot I \cdot \sin(\phi)$$

$$S = P + jQ$$



# Potencia de elementos

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparata  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

- ▶ Una **resistencia sólo consume potencia activa** ( $\cos(\phi) = 1$ ).
- ▶ Un **condensador no consume potencia activa** ( $\cos(\phi) = 0$ ), y **entrega potencia reactiva** ( $\sin(\phi) = -1$ )
- ▶ Una **bobina no consume potencia activa** ( $\cos(\phi) = 0$ ) y **absorbe potencia reactiva** ( $\sin(\phi) = 1$ )

# Compensación de reactiva

- ▶ El factor de potencia ( $\cos(\phi)$ ) representa el desfase entre tensión y corriente.
- ▶ Es la fracción de potencia activa dentro de la potencia aparente.
- ▶ Suponiendo tensión constante, la corriente que debe circular es  $I = \frac{S}{V} = \frac{P}{V \cdot \cos(\phi)}$ .
- ▶ Para alimentar una potencia activa determinada, **la corriente es tanto más alta cuanto menor el factor de potencia.**
- ▶ **Factores de potencia bajos** obligan a
  - ▶ Utilizar **grandes secciones** de cable para transportar la misma potencia activa
  - ▶ Generar **mayor potencia aparente** para alimentar la misma potencia activa

# Compensación de reactiva

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparata  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

- ▶ Comúnmente, el factor de potencia es **inductivo** (máquinas eléctricas industriales).
- ▶ La red debe suministrar potencia reactiva inductiva (problemas derivados de bajo factor de potencia)
- ▶ Es necesario alterar localmente el factor de potencia:
  - ▶ Solución común: utilizar **bancos de condensadores** como suministradores de potencia reactiva.

Para un circuito serie R-L-C:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Si  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  el circuito tiene carácter resistivo ( $Z=R$ ).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

y por tanto el  $\cos(\phi) = 1$  (la potencia aparente coincide con la activa).

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

**Corriente alterna sinusoidal**

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

**Trifásica**

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

# Motivación de los sistemas trifásicos

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparata  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

- ▶ La potencia instantánea de un sistema monofásico es pulsante. En un sistema trifásico la potencia instantánea es constante, evitando vibraciones y esfuerzos en las máquinas.
- ▶ Para transportar una determinada potencia la masa de conductor necesaria es un 25% en un trifásico que en un monofásico.

# Generación de un sistema trifásico

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

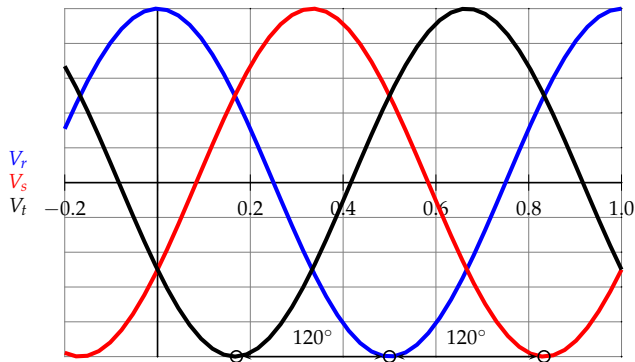
Trifásica

Máquinas  
Elécticas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

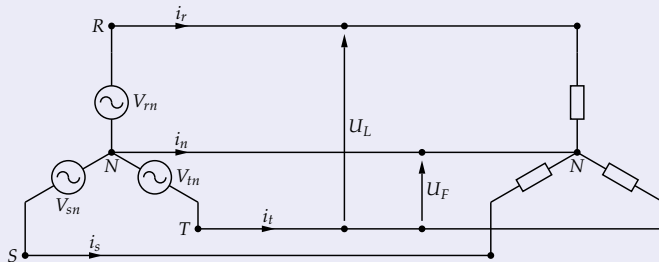


## Receptor en Estrella (cuatro hilos, 3F+1N)

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_F$$

$$I_F = I_L$$

$$P = 3 \cdot V_F I_F \cos(\phi) = \sqrt{3} V_L I_L \cos(\phi)$$



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparata  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos



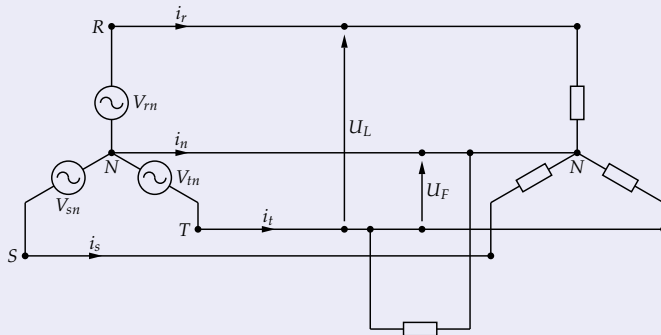
# Fase y línea

## Receptor en Estrella (cuatro hilos, 3F+1N)

$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_F$$

$$I_F = I_L$$

$$P = 3 \cdot V_F I_F \cos(\phi) = \sqrt{3} V_L I_L \cos(\phi)$$

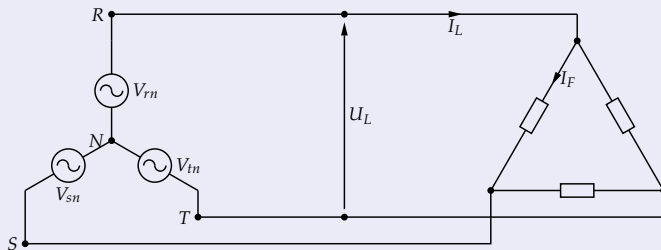


## Receptor en Triangulo (tres hilos, 3F)

$$V_L = V_F$$

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$P = 3 \cdot V_F \cdot I_F \cos(\phi) = \sqrt{3} V_L I_L \cos(\phi)$$



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

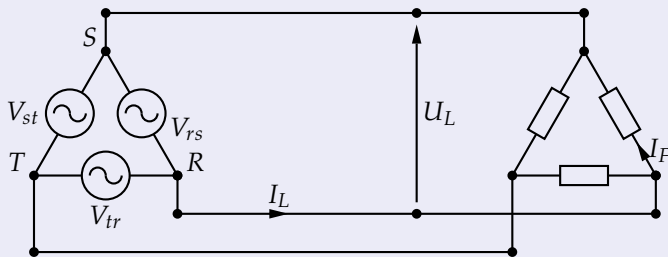
Recursos

## Receptor en Triangulo (tres hilos, 3F)

$$V_L = V_F$$

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

$$P = 3 \cdot V_F \cdot I_F \cos(\phi) = \sqrt{3} V_L I_L \cos(\phi)$$



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Conceptos Fundamentales

Impedancia

Potencia

Trifásica

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

**Máquinas Eléctricas**

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

**Máquinas Eléctricas**

**Fundamentos de Electromagnetismo**

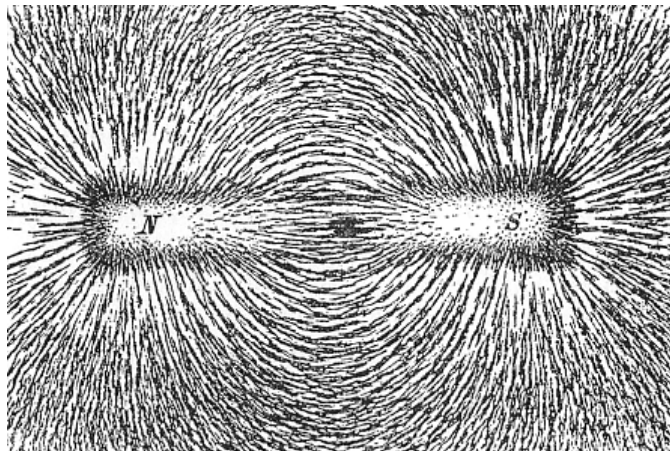
Tipos de máquinas

Aparamenta eléctrica

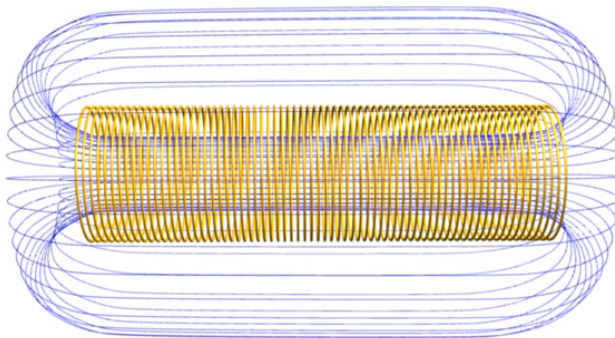
Análisis en frecuencia

Recursos

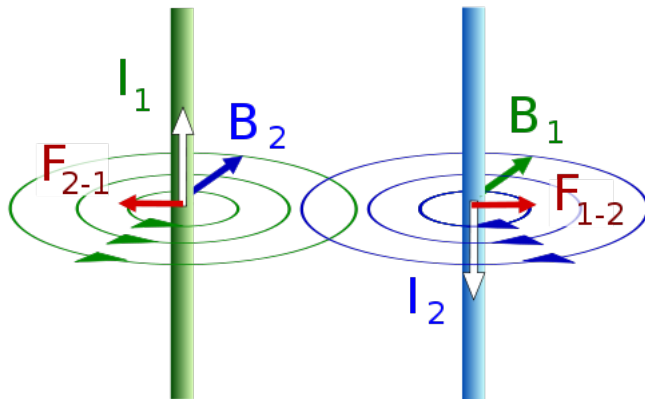
- Un campo magnético ejerce una fuerza sobre una carga en movimiento. (Fuerza de Lorentz)



- Una corriente eléctrica crea un campo magnético en torno al conductor. (Oersted, Biot-Savart)



- ▶ Un conductor por el que circula corriente, situado en el seno de un campo magnético, altera este campo magnético, y experimenta una fuerza que lo expulsa para disminuir la alteración (Fuerza de Ampere)



Vídeo: [Repulsión entre barras de Alta Tensión](#)



- ▶ Entre los puntos extremos de una espira estática atravesada por un campo magnético, aparece una **tensión inducida siempre que el flujo magnético sea variable**. (Ley de Faraday).
- ▶ Esta condición se cumple cuando la **espira está en movimiento**, cuando el **campo magnético es variable**, o cuando ambas situaciones coinciden.

- ▶ La tensión inducida es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa la superficie encerrada por la espira.

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

- ▶ Al elemento que emite el campo magnético se le denomina **inductor** y aquel que es atravesado por este flujo es el **inducido**.

# Electromagnetismo

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

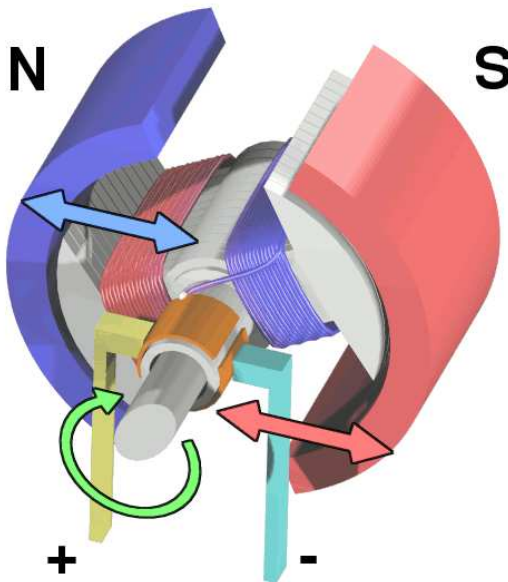
Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos



## Tensión, frecuencia y flujo

$$E = 4.44 \cdot N \cdot \phi \cdot f$$

- ▶  $E$  es la tensión inducida;  $N$  número de espiras;  $\phi$  es el flujo interceptado;  $f$  frecuencia eléctrica
- ▶ El flujo depende proporcionalmente de la tensión e inversamente de la frecuencia.

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

## Par, potencia y velocidad

$$P = T \cdot \omega$$

- ▶  $P$  es potencia mecánica;  $T$  par mecánico;  $\omega$  es la velocidad angular.
- ▶ El par busca alinear los ejes magnéticos de inductor e inducido, o de estator y rotor. Una vez que están alineados, el par es nulo.

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

**Máquinas Eléctricas**

Fundamentos de Electromagnetismo

Tipos de máquinas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

## Frecuencia eléctrica y velocidad

$$f_2 = f_1 - n \cdot p$$

- ▶  $f_2$  es la frecuencia en el inducido;  $f_1$  es la frecuencia en el inductor;  $n$  es la velocidad angular;  $p$  es el número de polos.
- ▶ Al utilizar colector de delgas (escobillas) en el inducido, la frecuencia en el circuito exterior ( $f_L$ ) es diferente a  $f_2$ .

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Clasificación de máquinas

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

- ▶ Estáticas ( $n = 0 \Rightarrow f_2 = f_1$ ): Transformadores
- ▶ Rotativas ( $n \neq 0$ ):
  - ▶ Flujo inductor constante ( $f_1 = 0 \Rightarrow f_2 = n \cdot p$ )
    - ▶ Delgas ( $f_L \neq f_2$ ): Máquinas de corriente continua
    - ▶ Anillos ( $f_L = f_2$ ): Máquinas síncronas
  - ▶ Flujo inductor variable ( $f_1 > 0 \Rightarrow f_2 = f_1 - n \cdot p$ )
    - ▶ Delgas ( $f_L \neq f_2$ ): Motor universal
    - ▶ Anillos ( $f_L = f_2$ ): Máquinas asíncronas

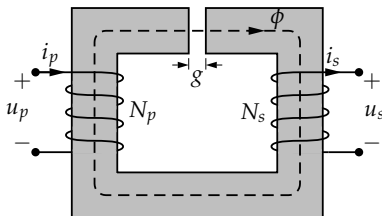


# Transformador

- ▶ Un transformador consiste en dos bobinas acopladas magnéticamente.
- ▶ Un transformador ideal tiene las siguientes relaciones entre tensión y corriente de entrada (primario) y salida (secundario):

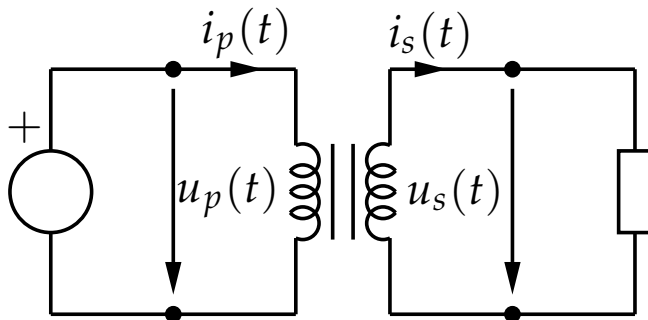
$$N_s \cdot I_s = N_p \cdot I_p$$

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s}$$



# Transformador

- Un transformador ideal con relación de transformación  $N_p/N_s < 1$  (más vueltas en el secundario que en el primario), sube tensión ( $V_s > V_p$ ) y reduce corriente ( $I_s < I_p$ ).



## Motor DC

- ▶  $f_1 = 0; f_L = 0;$
- ▶ Estator-Inductor alimentado por corriente DC (o imanes permanentes).
- ▶ El colector de delgas transforma la frecuencia de alimentación (DC) en alterna.
- ▶ Rotor-Inducido gira sincronizado con la frecuencia «transformada».

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

## Motor asíncrono o de inducción

- ▶  $f_1 \neq 0$ ;
- ▶ Estator-inductor alimentado por una corriente trifásica alterna. Produce un campo giratorio.
- ▶ Rotor-inducido constituido por espiras cortocircuitadas (jaula de ardilla).
- ▶ Se produce un par que busca alinear el eje de las espiras con el campo inducido. El rotor se mueve siguiendo al campo giratorio.
- ▶ La velocidad de giro es inferior a la frecuencia de alimentación (asíncrono).

Vídeos: Motor de inducción artesanal (1) (2)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

## Generador Síncrono o Alternador

- ▶  $f_1 = 0$ ;
- ▶ Rotor-inductor alimentado por corriente continua mediante anillos.
- ▶ Estator-inducido constituido por un devanado trifásico.
- ▶ Al aplicar energía mecánica en el eje del rotor y alimentarlo con corriente continua, se obtiene una fuerza electromotriz en el estator.
- ▶ Empleado en turbinas hidráulicas y térmicas.

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

## Dinamo

- ▶  $f_1 = 0; f_L = 0;$
- ▶ Estator-Inductor alimentado por corriente DC (o imanes permanentes).
- ▶ El colector de delgas transforma la frecuencia de alimentación (DC) en alterna.
- ▶ Al aplicar energía mecánica en el eje del rotor y alimentar el estator con corriente continua, se obtiene una fuerza electromotriz en el inducido con  $f_2$ .
- ▶ Las delgas rectifican para obtener  $f_L = 0$  en la salida.

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Fundamentos de  
Electromagnetismo  
Tipos de máquinas

Aparatura  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

**Aparamenta eléctrica**

Análisis en frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Definición y Funciones

Tipos de Dispositivos

Análisis en frecuencia

Recursos



## ITC-BT-01

**Aparamenta:** Equipo, aparato o material previsto para ser conectado a un circuito eléctrico con el fin de asegurar una o varias de las siguientes funciones: **protección, control, seccionamiento, conexión.**

**Función de la Aparamenta:** Garantizar la seguridad de las personas, la continuidad en el suministro y la protección de los elemento de la instalación.

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Definición y Funciones  
Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Funciones de la aparamenta

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Definición y Funciones  
Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

Recursos

## ► Protección:

- Protección de los elementos de los circuitos contra las tensiones térmicas y mecánicas de las corrientes de cortocircuito.
- Protección de las personas en caso de producirse un defecto de aislamiento.
- Protección de los dispositivos y aparatos suministrados.

# Funciones de la aparamenta

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Definición y Funciones  
Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

Recursos

- **Aislamiento:** separar de forma verificable un circuito, un aparato o un elemento de la planta del resto de un sistema que se encuentra en tensión, con el fin de que el personal pueda realizar con total seguridad trabajos en la parte aislada.

# Funciones de la aparamenta

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Definición y Funciones

Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

Recursos

- ▶ **Control:** modificar un sistema cargado en cualquier momento
  - ▶ Control funcional (conmutación rutinaria, etc.).
  - ▶ Conmutación de emergencia.
  - ▶ Operaciones de mantenimiento del sistema de alimentación.

# Arco Eléctrico

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

- ▶ Descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial.
- ▶ Durante el tiempo de la descarga se produce una luminosidad muy intensa y un gran desprendimiento de calor.
- ▶ Ambos fenómenos, en caso de ser accidentales, pueden ser sumamente destructivos.

Vídeo: [Apertura en Alta Tensión](#)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Definición y Funciones  
Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Poder de corte y cierre

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparata  
eléctrica

Definición y Funciones

Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

Recursos

**Poder de corte:** intensidad de corriente que este dispositivo es capaz de cortar, bajo una tensión de restablecimiento determinada.

**Poder de cierre:** intensidad de corriente que este aparato es capaz de establecer, bajo una tensión dada.

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

**Aparamenta eléctrica**

Definición y Funciones

**Tipos de Dispositivos**

Análisis en frecuencia

Recursos

# Dispositivos simples

## Seccionador

- ▶ Dispositivo de dos posiciones (abierto/cerrado) enclavable y accionado manualmente que proporciona un aislamiento seguro de un circuito cuando está enclavado en la posición abierta.
- ▶ Un seccionador no está diseñado para abrir o cerrar el paso de la corriente.

## Interruptor de carga

- ▶ Dispositivo no automático (accionamiento manual) de dos posiciones (abierto/cerrado).
- ▶ Se utiliza para cerrar y abrir circuitos cargados en condiciones normales de circuitos sin defectos.



# Dispositivos simples

## Contactor

- ▶ Dispositivo accionado por solenoide que por lo general se mantiene cerrado mediante una corriente (reducida).
- ▶ Se suelen controlar de forma remota por medio de pulsadores de activación/desactivación.

## Fusible

- ▶ Un filamento o lámina de un metal o aleación de bajo punto de fusión que se intercala en un punto determinado de una instalación eléctrica
- ▶ Se funde por Efecto Joule cuando la intensidad de corriente supere, por un cortocircuito o un exceso de carga.
- ▶ Es capaz de abrir un circuito en carga.

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Definición y Funciones  
Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

Recursos



# Interruptor magnetotérmico

- ▶ Dispositivo automático capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando ésta sobrepasa ciertos valores máximos.
- ▶ El dispositivo consta de dos partes, un electroimán y una lámina bimetálica, conectadas en serie y por las que circula la corriente que va hacia la carga.
- ▶ Su funcionamiento se basa en dos de los efectos producidos por la circulación de corriente eléctrica en un circuito: el magnético y el térmico (efecto Joule).
- ▶ Se emplea para **proteger contra sobreintensidades y sobrecargas**.

Vídeo: [Apertura de un PIA](#)



# Interruptor diferencial

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparatura  
eléctrica

Definición y Funciones

Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

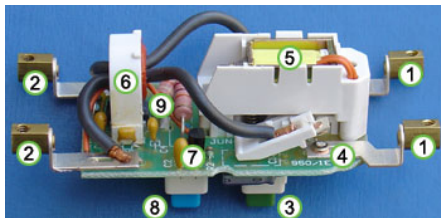
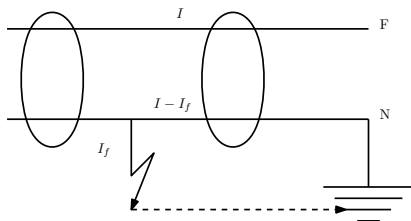
Recursos

- ▶ Dispositivo automático capaz de interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando existe una corriente diferencial residual, indicativa de un defecto de aislamiento.
- ▶ Para la detección emplea un transformador toroidal que abraza a todos los conductores.
- ▶ Cuando existe un defecto, la suma fasorial de las corrientes abarcadas no será nula y, por tanto, aparecerá una intensidad en el secundario del transformador, proporcional al defecto.
- ▶ Se emplea para la **protección de las personas**.

# Interruptor Diferencial

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
<http://oscarperpinan.github.io>



Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Definición y Funciones

Tipos de Dispositivos

Análisis en  
frecuencia

Recursos

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

**Análisis en frecuencia**

Recursos

- ▶ Un señal periódica puede ser descompuesta en sus armónicos mediante la serie de Fourier:

$$x(t) = a_0 + A_1 \cdot \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \cdot \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots$$

- ▶  $A_n \cdot \sin(n\omega t + \phi_n)$  es el armónico de orden  $n$  de la señal  $x(t)$  y  $a_0$  es el valor medio de  $x(t)$ .
- ▶ Por ejemplo, una señal pura de 50 Hz, tendrá  $a_0 = 0$  y  $A_n = 0$  salvo  $A_1$ .
- ▶ El armónico de primer orden se conoce como armónico fundamental.

# Armónicos

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

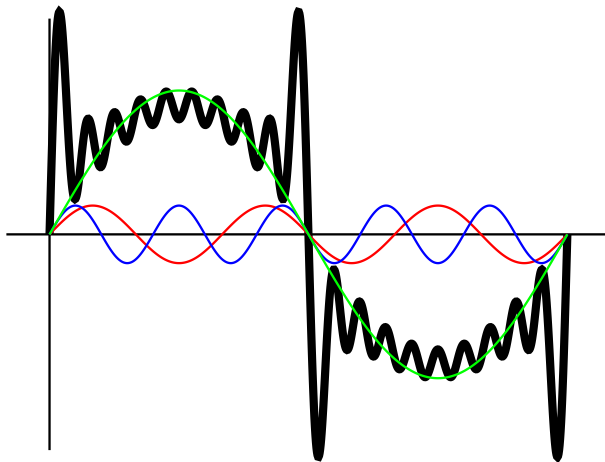
Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparata  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos





# Distorsión armónica

En general, los armónicos son inevitables pero indeseables. Para caracterizar el contenido en armónicos se utiliza:

- **Distorsión armónica total (THD):** medida de la similitud entre la forma de la onda y su componente fundamental

$$THD = \frac{1}{A_1} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} A_n^2}$$

- **Factor de distorsión (FD):** cociente entre el valor eficaz del armónico fundamental y el valor eficaz de la señal

$$FD = \frac{A_1}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} A_n^2}}$$

Cuando  $a_0 = 0$  (señal sin componente de continua)

$$FD_{a_0=0} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

# Potencia aparente

Al existir distorsión,

$$S^2 \neq P^2 + Q^2$$

Se define una nueva potencia, la potencia de distorsión

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

Por tanto, el factor de potencia

$$FP = \frac{P}{S} \neq \cos(\phi_1)$$

Para señales sin componente continua, y suponiendo distorsión sólo en la onda de corriente:

$$FP = FD \cdot \cos(\phi_1) = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

Conceptos preliminares

Corriente alterna sinusoidal

Máquinas Eléctricas

Aparamenta eléctrica

Análisis en frecuencia

Recursos

# Bibliografía

- ▶ **Fraile Mora, J.:** *Circuitos Eléctricos*. Ed. Prentice Hall.
- ▶ **Fraile Mora, J.:** *Electromagnetismo y circuitos eléctricos*. Ed. Mc. Graw Hill.
- ▶ **Fraile Mora, J.:** *Máquinas Eléctricas*. Ed. Mc. Graw Hill.
- ▶ **Hayt, W. y Kemmerly, J:** *Análisis de circuitos en ingeniería*. Ed. Mc. Graw Hill.

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos

# Enlaces útiles

- ▶ Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión
- ▶ Guía de diseño de instalaciones eléctricas (Schneider Electric)
- ▶ Tú verás
- ▶ Equipos industriales
- ▶ Base de Precios PREOC

Electrotecnia

Oscar Perpiñán  
Lamigueiro  
[http://  
oscarperpinan.  
github.io](http://oscarperpinan.github.io)

Conceptos  
preliminares

Corriente alterna  
sinusoidal

Máquinas  
Eléctricas

Aparamenta  
eléctrica

Análisis en  
frecuencia

Recursos