

LA CORRIENTE ALTERNA

En el alternador o generador de corriente alterna (CA), las fuerzas mecánicas hacen girar una rueda polar y se obtienen tensiones inducidas en los conductores fijos del estator que son enviadas a la red exterior; mientras que, en el motor, la energía eléctrica que absorbe la red hace girar el rotor y se generan en éste fuerzas mecánicas que hacen girar el eje. En los transformadores, tanto el circuito magnético como el eléctrico son estáticos y se produce una fem gracias a la variación constante de la CA.

1.- Tipos de corriente alterna

La corriente alterna se caracteriza por ser un flujo de cargas variable periódicamente. Esto ano sucede en el régimen permanente ni en le transitorio, y sí en los regímenes periódico y pulsatorio en los que existen diferentes formas de onda. Todas ellas tienen una expresión matemática o analítica que suele ir acompañada de su expresión gráfica, que proporciona una información rápida y visual de la evolución de la magnitud en función del tiempo.

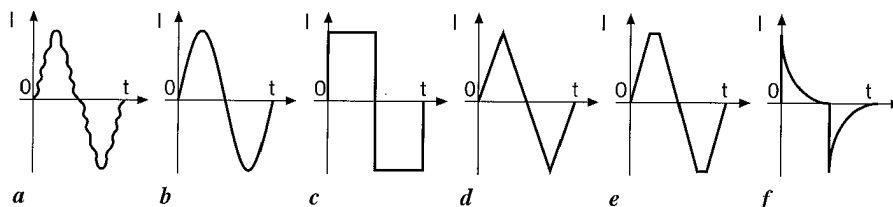


Figura 1. Diversas formas de CA en régimen periódico.

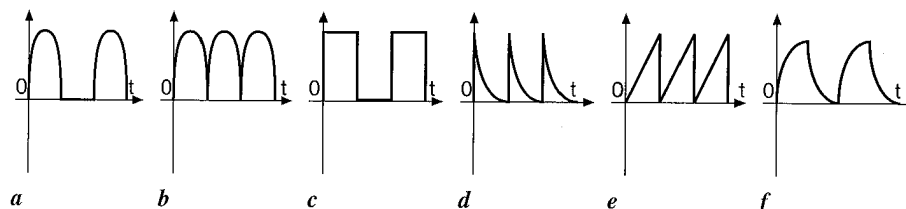


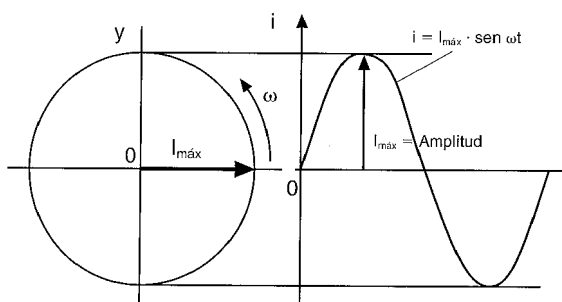
Figura 2. Diversas formas de CA en régimen pulsatorio.

2.- Corriente alterna en régimen alterno puro

La llamaremos en lo sucesivo **corriente alterna senoidal**. Es un flujo de electrones cuya dirección se invierte periódicamente, de forma que el valor medio a lo largo de un periodo es cero. La expresión matemática es la función seno o coseno y se utiliza en los sistemas de distribución de energía eléctrica con una frecuencia de 50 Hz en Europa y 60 Hz en América.

Función seno:

$$y = \text{sen} \alpha = \text{sen} \omega t$$

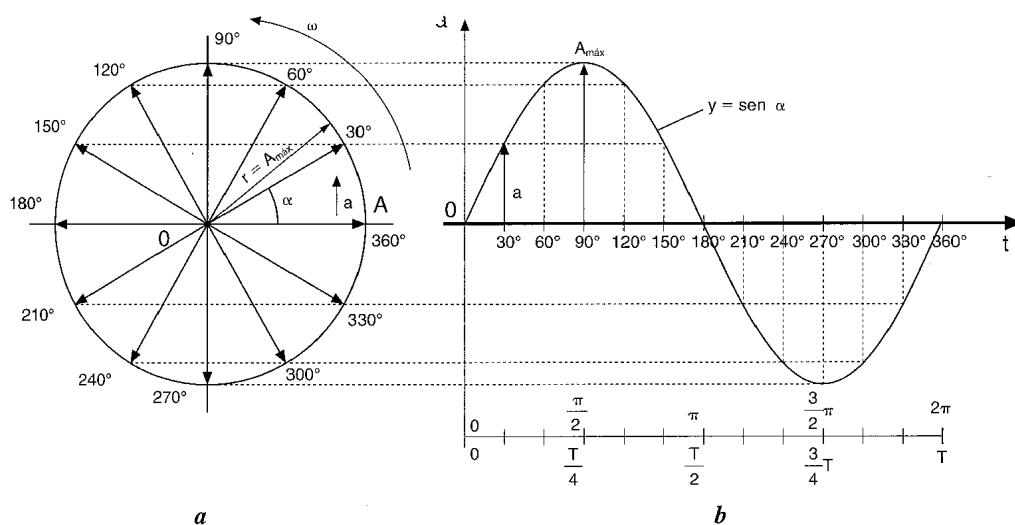


La CA senoidal se utiliza frente a otro tipo de ondas porque ofrece las siguientes ventajas:

- La función seno se opera con facilidad y define con precisión analítica y gráfica la evolución de la intensidad a lo largo del tiempo.
- Se puede generar con facilidad en magnitudes de valor muy elevado.
- Se modifican con facilidad los valores de tensión e intensidad mediante transformadores.
- Todas las ondas no senoidales se pueden descomponer en ondas senoidales de diferentes frecuencias (armónicos).
- Las operaciones para el transporte y utilización son sencillas.

3.- Definición matemática. Frecuencia y periodo

La onda senoidal de CA tiene una expresión matemática que corresponde a la función seno ($y = \text{sen } \alpha$) y su expresión gráfica corresponde a la proyección sobre un eje de un vector giratorio $OA \rightarrow$ que recorre una circunferencia de radio r con movimiento circular uniforme de velocidad angular ω .



La expresión $y = \text{sen } \alpha$ define la función seno, pero cuando se trata de magnitudes en CA es necesario expresarlas en función del tiempo transcurrido. El ángulo está relacionado con el tiempo mediante la expresión:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \Rightarrow \alpha = \omega \cdot t$$

$$y = \text{sen } \omega \cdot t$$

ω : Velocidad angular en rad/s.
 α : Ángulo descrito en radianes.
 t : Tiempo transcurrido en segundos.

La velocidad angular ω , llamada pulsación o velocidad eléctrica, es el cociente entre el ángulo recorrido en un ciclo y el periodo transcurrido en recorrerlo.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

ω : Velocidad angular en rad/s.

2π : Radianes que tienen una circunferencia.

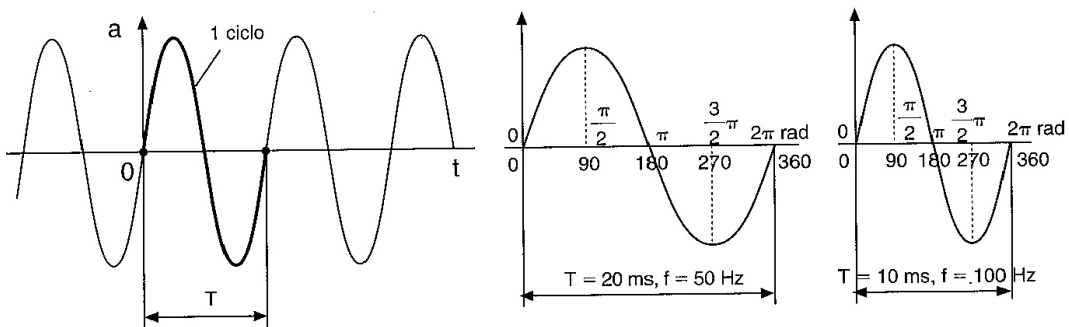
La inversa del periodo es la frecuencia.

T: Tiempo empleado en recorrer un círculo en segundos.

$$f = \frac{1}{T}$$

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

f: Frecuencia en hercios.



4.- Valores característicos de la CA

Vamos a definir y expresar los valores característicos de una onda senoidal de intensidad, que son generalizables a ondas de fem, tensión o potencia.

Valor instantáneo (i)

Es el valor que toma la onda en un instante dado.

$$i = I_{\max} \cdot \text{sen} \alpha = I_{\max} \cdot \text{sen} \omega t$$

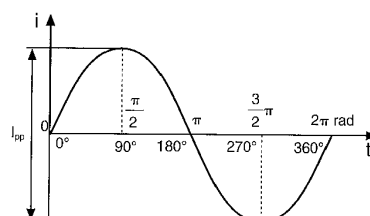
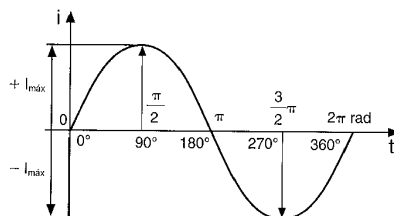
Valor máximo (I_{\max})

Es el valor que toma la onda máxima. También se llama valor de pico o de cresta.

Valor pico a pico (I_{pp})

Se utiliza en telecomunicaciones y para analizar fenómenos de máxima variación. Es dos veces el valor máximo.

$$I_{pp} = 2 \cdot I_{\max}$$



Valor medio (I_{med})

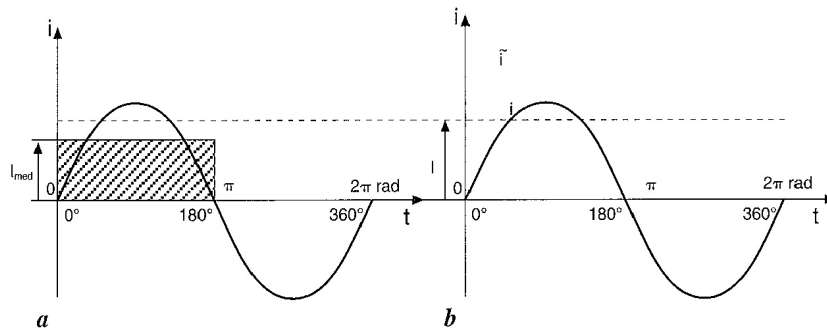
Es la media algebraica de los valores instantáneos de la señal durante un semiperíodo. Por ser CA simétrica, si tomáramos un período completo el valor medio sería cero.

$$I_{med} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{max}$$

Valor eficaz, RMS (I)

Raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los valores instantáneos durante un periodo. Se representa por la letra mayúscula del símbolo de cada magnitud, **I**, **E**, **U**, **P**, etc. En realidad, el valor eficaz de una onda de CA es aquel que llevado a CC nos produce los mismos efectos térmicos.

$$I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$



Factor de amplitud (ζ_a)

Cociente entre el valor máximo de una onda senoidal y su correspondiente valor eficaz.

$$\zeta_a = \frac{E_{max}}{E} = \sqrt{2}$$

Factor de forma (ζ)

Cociente entre el valor eficaz de una onda senoidal y su valor medio durante un semiperíodo.

$$\zeta = \frac{E}{E_{med}} = 1,11$$

VALORES DEL FACTOR DE AMPLITUD Y DE FORMA		
Factor	Amplitud	Forma
Senoidal	$\sqrt{2}$	1,11
Rectangular	1,00	1,00
Semicircular	1,22	1,04
Triangular	$\sqrt{3}$	1,15
Punta de flecha dos semiperíodos	2,22	1,35
Semi-elíptica	1,22	1,04

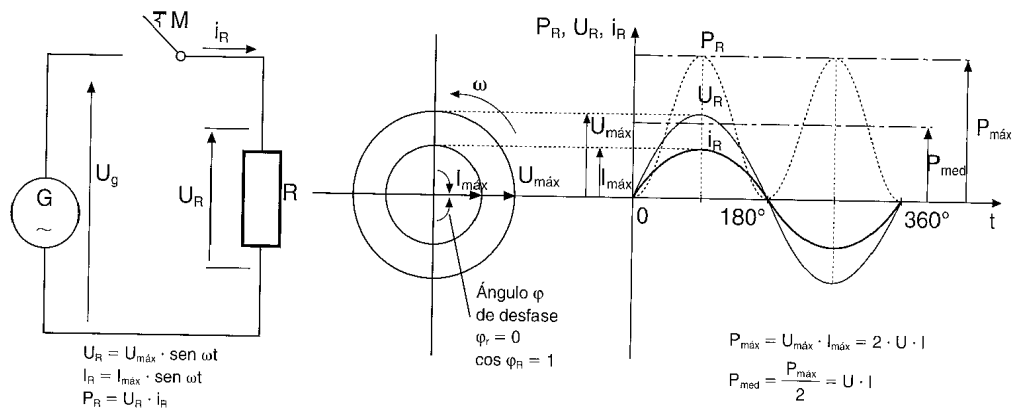
5.- Resistencia, reactancia e impedancia en CA

Resistencia óhmica

Es el valor óhmico del parámetro que caracteriza los resistores y, como sólo depende de la longitud, de la sección y de la naturaleza del conductor, el valor de **R** es independiente del valor de la frecuencia de la CA, por lo que se verifica la ley de Ohm.

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

Cuando sólo existen resistencias en el circuito, decimos que se trata de un circuito **resistivo puro** de CA; en el que se establece, en fase con la tensión aplicada, una intensidad también senoidal, como se aprecia en la figura siguiente.



a Circuito.

b Diagrama vectorial de $U_{\max} - I_{\max}$.

c Representación cartesiana.

$$u = U_{\max} \cdot \text{sen } \omega t$$

$$i = I_{\max} \cdot \text{sen } \omega t$$

$$R = \frac{U_{\max} \cdot \text{sen } \omega t}{I_{\max} \cdot \text{sen } \omega t} = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \frac{U}{I}$$

Respecto a la potencia disipada en cada instante por una resistencia en CA, se multiplican los valores instantáneos de tensión e intensidad.

$$P_R = u_R \cdot i_R = U_{\max} \cdot \text{sen } \omega t \cdot I_{\max} \text{sen } \omega t = 2 \cdot U \cdot I \cdot (1 - \cos 2\omega t)$$

Luego, **Potencia máxima:** $P_{\max} = 2 \cdot U \cdot I$

y **Potencia media:** $P = U \cdot I$

Pulsación: el término $2\omega t$ nos indica que la potencia es de doble pulsación.

Reactancia inductiva. Inductancia (X_L)

Las bobinas presentan una oposición al paso de la CA que se denomina

reactancia inductiva y tiene por expresión:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

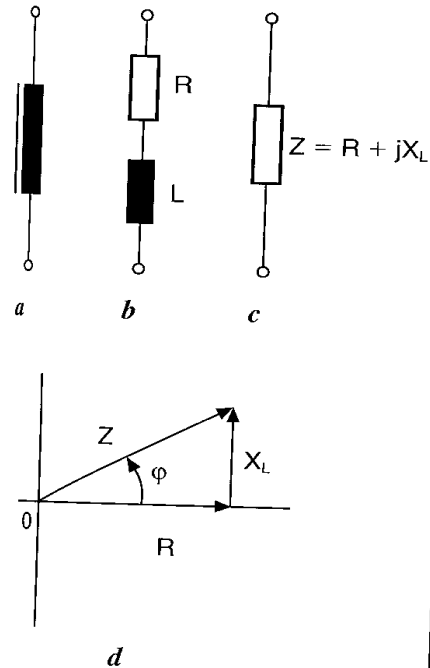
X_L : Reactancia inductiva en Ω .
 f : Frecuencia en Hz.
 L : Coeficiente de autoinducción en H.

Por el efecto de la autoinducción, la reactancia inductiva (X_L) retrasa 90° la corriente respecto de la tensión.

Impedancia (Z)

La conjunción de un fenómeno resistivo e inductivo en un circuito se denomina impedancia (Z). Se representa mediante la hipotenusa de un triángulo rectángulo que tiene la resistencia (R) sobre el eje de abscisas y una reactancia (X_L) sobre el eje de ordenadas, como se ve en la figura siguiente. La hipotenusa de este triángulo es el valor del módulo de (Z) que, por el teorema de Pitágoras vale:

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



6.- Ley de Ohm en CA

La ley de Ohm es generalizable en CA trabajando con impedancias igual que en CC se trabaja con resistencias, luego:

$$Z = \frac{U}{I} \quad I = \frac{U}{Z}$$

$$U = Z \cdot I$$

Z: Valor del módulo de la impedancia en Ω .

U: Módulo de la tensión aplicada en V.

I: Módulo de la intensidad que circula en A.

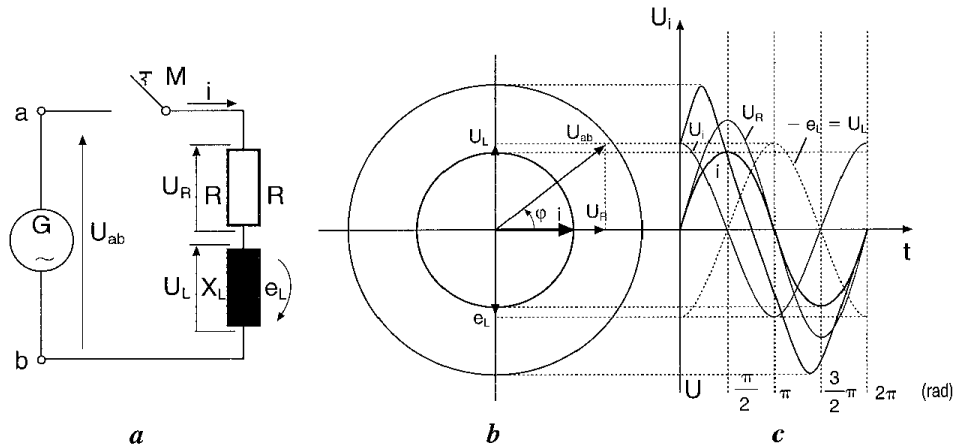
En CA se trabaja con representaciones vectoriales de las magnitudes eléctricas, por lo que siempre hay que definir una magnitud mediante su módulo (valor eficaz que miden los aparatos de medida) y la dirección del vector determinada por el ángulo referido al eje de abscisas.

7.- Circuito RL

En la figura siguiente se representa los parámetros de resistencia (R) y autoinducción (L) de una impedancia (Z) que se somete a una tensión alterna senoidal.

La intensidad instantánea (i) que se produce está retrasada un ángulo (φ) respecto a la tensión, y tiene por expresión:

$$i = I_{\max} \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi)$$



Potencia activa (P): Es la que se transforma en energía utilizable y se expresa en vatios (W).

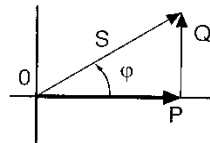
$$P = R \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Potencia reactiva (Q_L): Por efecto de la inductancia se anula cada semiperíodo. Sólo son pérdidas y no se transforma en ningún tipo de energía útil. Se expresa en voltiamperios reactivos (Var).

$$Q_L = X_L \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \text{sen} \varphi$$

Potencia aparente (S): Es el valor de la hipotenusa del triángulo de potencias. Se expresa en voltiamperios (VA).

$$S = Z \cdot I^2 = U \cdot I$$



Factor de potencia ($\cos \varphi$): El coseno del ángulo de desfase entre el vector tensión y el vector intensidad es el factor de potencia. Queda determinado por la relación entre la resistencia y la impedancia o por la relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}$$

8.- Circuito RC

En la figura siguiente se muestra un circuito formado por un condensador

conectado en serie con una resistencia y sometido a una tensión alterna senoidal. La tensión en el circuito será la suma vectorial de U_R más U_C . La composición de ambos vectores (U_R en fase con I ; y U_C retrasada 90° respecto de I) origina en el circuito RC un retraso de tensión respecto a la corriente. La intensidad que se produce se adelanta un ángulo φ respecto a la tensión y tiene por expresión: $i = I_{\max} \cdot \text{sen}[\omega t + \varphi]$. En valores eficaces, la aplicación de la ley de Ohm nos da las siguientes expresiones:

Reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Impedancia:

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

Intensidad:

$$I = \frac{U}{Z}$$

Potencia activa:

$$P = R \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Potencia reactiva:

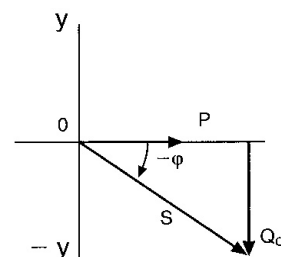
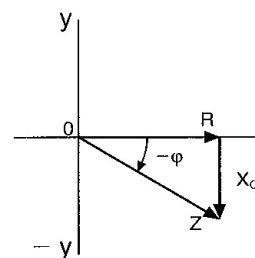
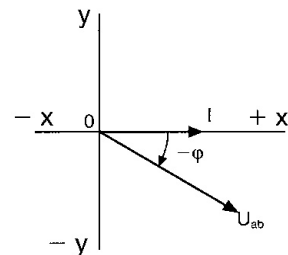
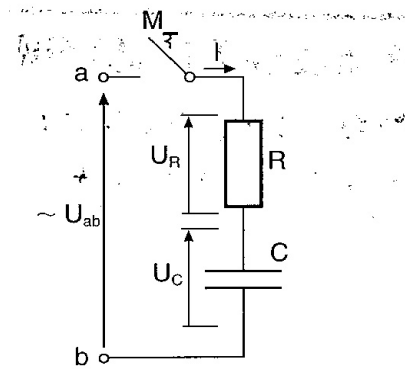
$$Q_L = X_C \cdot I^2 = U \cdot I \cdot \text{sen} \varphi$$

Potencia aparente.

$$S = Z \cdot I^2 = U \cdot I$$

Factor de potencia:

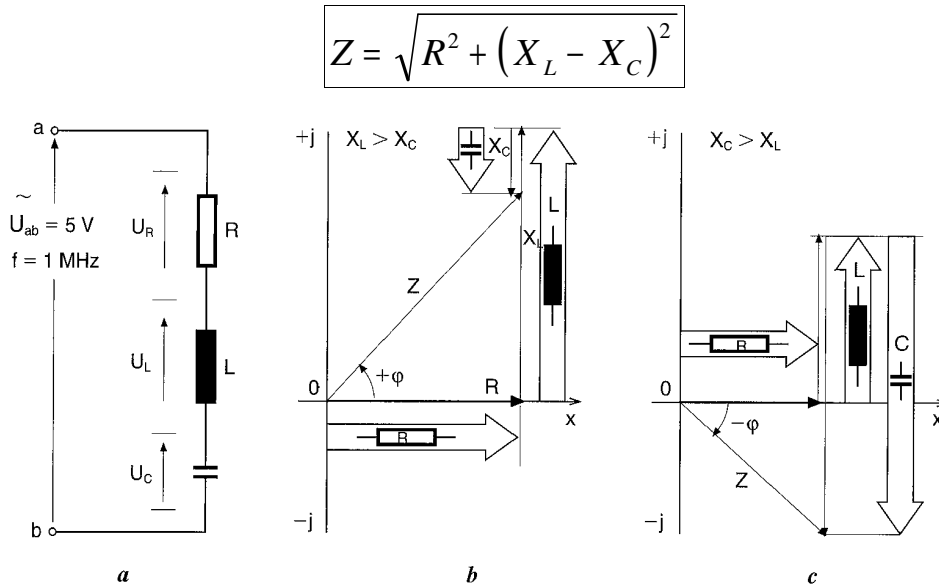
$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{P}{S}$$



9.- Circuito RLC serie

En una conexión en serie de una resistencia, una bobina y un condensador, los efectos de la autoinducción tratan de compensarse con los de la capacidad. La reactancia resultante es de carácter inductivo, si predomina la autoinducción, y de carácter capacitivo si predomina el efecto de la capacidad. Es decir, los vectores que

representan ambas reactancias son de sentidos opuestos (X_L hacia arriba y X_C hacia abajo) y, al sumarlos vectorialmente, se restan dando como resultado un vector que tendrá el sentido de la mayor de las reactancias; realizando la suma vectorial por Pitágoras de este vector resultante con el que representa R , situado en el eje de abscisas, se obtiene la impedancia del circuito (Z).



a Circuito serie RLC.

b Predominantemente inductivo $X_L > X_C$. *c* Predominantemente capacitivo $X_C > X_L$.

Una vez establecida la reactancia predominante, el circuito se resuelve como se ha explicado anteriormente. La suma vectorial de las tensiones parciales es igual a la tensión total aplicada al circuito.

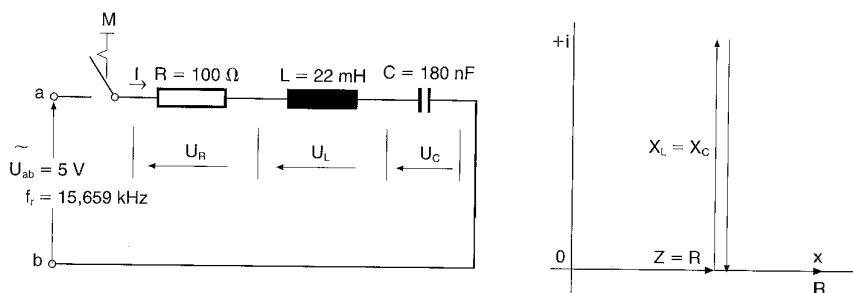
$$U = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$$

10.- Resonancia de un circuito serie

Cuando en un circuito serie RLC el valor de la frecuencia de la corriente aplicada es tal que la reactancia capacitiva y la inductiva son iguales ($X_L = X_C$), éste entra en resonancia y su impedancia es igual a su resistencia ($Z=R$). Dicha frecuencia se llama frecuencia de resonancia (f_r) y su valor es:

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

f_r : Frecuencia de resonancia en Hz.
 L : Coeficiente de autoinducción en H.
 C : Capacidad en F.



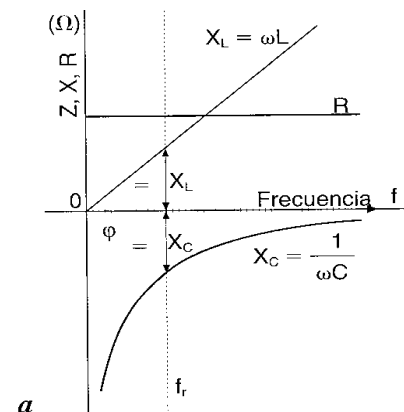
Circuito resonante serie RLC ($Z = R$).

En resonancia de tensiones, se puede dar el caso de ser la tensión total pequeña, mientras que las dos tensiones parciales en L y C sean muy elevadas y peligrosas.

Si analizamos el comportamiento del circuito serie RLC en función de la frecuencia, obtenemos las curvas características siguientes.

Variación de la impedancia (Z)

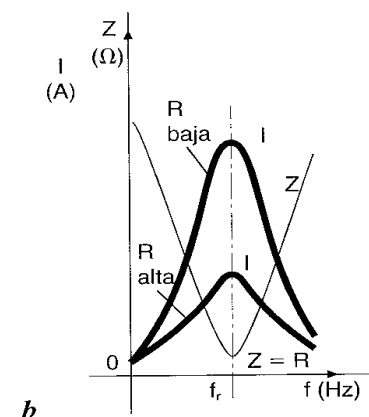
La resistencia permanece constante e independiente del valor de la frecuencia. La reactancia inductiva crece de forma lineal a medida que lo hace la frecuencia. La reactancia capacitiva varía de forma exponencial hasta que se aproxima a cero (figura a).



Variación de la intensidad (I)

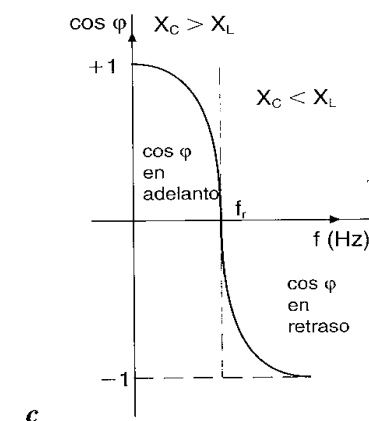
A frecuencia cero, la impedancia es infinita y, por tanto, la intensidad por el circuito es cero. A medida que aumenta la frecuencia, la impedancia disminuye y la intensidad aumenta hasta el límite máximo que coincide con la frecuencia de resonancia. En este punto, la impedancia es mínima y coincide con el valor de resistencia (Z=R), quedando la intensidad determinada por.

$$I = \frac{U}{R}$$



Variación del factor de potencia (cos φ)

Para valores bajos de la frecuencia, el factor de potencia en adelanto es próximo a la unidad y disminuye a medida que nos acercamos a la frecuencia de resonancia para convertirse en un factor de potencia capacitivo a frecuencias muy elevadas (figura c).

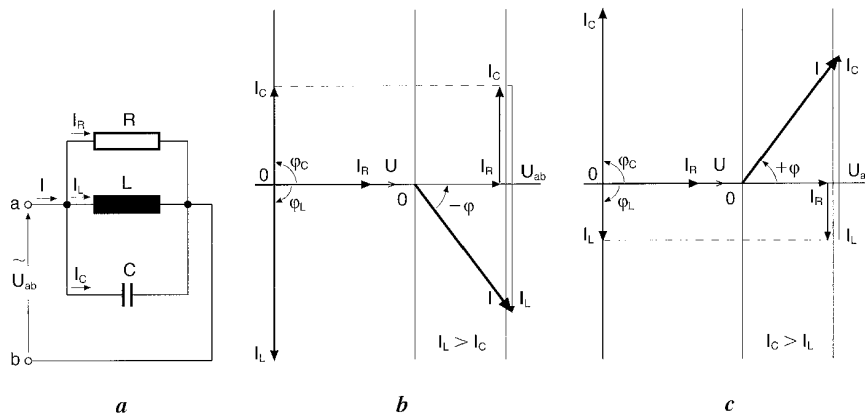


11.- Circuito RLC paralelo

En el circuito paralelo RLC la tensión de alimentación es común a los tres

elementos, por lo que se coloca como referencia en el eje de abscisas. La intensidad que circula por la resistencia se coloca en el mismo eje por estar en fase con la tensión, mientras que la intensidad que circula por la bobina está retrasada 90° , y la del condensador se adelanta 90° , ambas referidas a la tensión de referencia. La suma vectorial de las tres intensidades parciales nos da la intensidad total del circuito, de tal manera que si $I_L > I_C$ el circuito resulta inductivo, y al revés el circuito es capacitivo. El módulo de la intensidad total que resulta del diagrama vectorial de intensidades es:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$



a Circuito paralelo RLC. b Inductivo. c Capacitivo.

12.- Antirresonancia de un circuito paralelo

En un circuito paralelo RLC se puede conseguir anular los efectos de la autoinducción y de la capacidad si la frecuencia toma el valor:

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

f_0 : Frecuencia antirresonante en Hz.
 L : Coeficiente de autoinducción en H.
 C : Capacidad en F.

Para esta f_0 , la impedancia es máxima e igual a la resistencia ($Z=R$) y la intensidad total es mínima $I = \frac{U}{R}$ ya

que las dos intensidades de la bobina y el condensador se anulan entre sí. Pero puede darse el caso, teniendo una intensidad total pequeña, existir intensidades parciales en la bobina y el condensador muy elevadas, con el consiguiente riesgo.

