

CAPITULO 5

Corriente alterna

Se denomina Corriente Alterna (CA) a la corriente eléctrica en la cual la magnitud y el sentido varían periódicamente, siendo la forma sinusoidal la más utilizada.

El uso doméstico de la corriente continua comenzó a principios de la década de 1880 mediante pequeñas centrales eléctricas que iluminaban calles y hogares de pequeñas zonas de Nueva York, lo cual fue impulsado por Thomas Edison (1847-1931). Sin embargo, el uso de la corriente continua empezó a tambalear en 1888 cuando Nikola Tesla (1856-1943) comenzó a desarrollar una tecnología basada en la corriente alterna, lo cual desató lo que se conoce como la "Guerra de Corrientes".



Nikola Tesla - Thomas Edison

El desarrollo de un dispositivo, el transformador, que eleva o disminuye la tensión de manera eficaz, permitió que los sistemas de distribución de corriente alterna triunfaran sobre sus homólogos de corriente continua. Dado que la energía está relacionada con el producto entre la tensión y la intensidad de corriente, la misma energía puede ser transportada a largas distancia utilizando bajas intensidades de corriente y valores altos de voltaje. Esto permite minimizar las pérdidas por causa del efecto Joule y otros efectos asociados al paso de corriente tales como la histéresis o las corrientes de Foucault. Para ello se utiliza un transformador, en el punto de generación, para elevar la tensión, lo cual disminuye la intensidad de corriente de manera proporcionalidad, y una vez en el punto de consumo, el voltaje es reducido para su uso mediante otro transformador.

Transformador

Dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna. En el caso de un transformador ideal, la potencia entregada por el transformador es igual a la potencia que ingresa al mismo.

Los transformadores se basan en el fenómeno de inducción magnética descubierto por Faraday (1791-1867) y, en su forma más simple, están formados por dos bobinas aisladas entre sí eléctricamente. Las bobinas, denominadas primario o secundario según correspondan a la entrada o salida del transformador, generalmente están devanadas sobre un núcleo ferromagnético cerrado como se muestra en la figura 1.

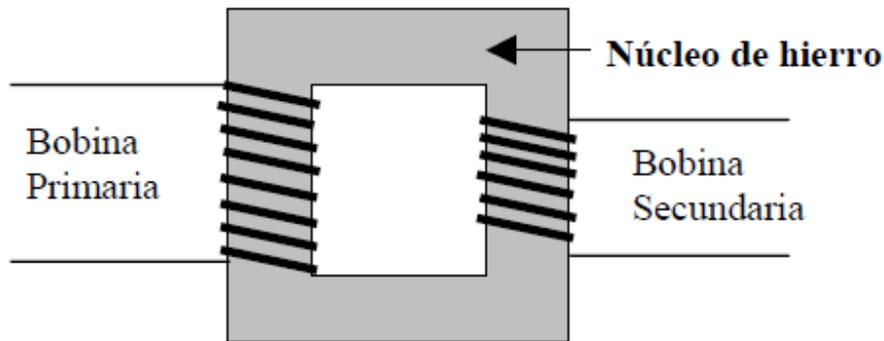


Figura 1. Transformador

Un transformador ideal está caracterizado por **la relación de transformación m** dada por,

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = m \quad (1)$$

Donde los subíndices p y s hacen referencia al primario y al secundario, respectivamente; N es el número de vueltas de la bobina, V el voltaje entre los terminales de la bobina e I la intensidad de corriente que circula por la misma. En el caso de un transformador real, la ecuación (1) no se cumple exactamente debido a pérdidas en el núcleo y a resistencias internas de las bobinas.

Actividades propuestas:

1. A partir de consideraciones teóricas, deduzca la expresión (1).
2. Estudie la validez de dicha expresión para distintas configuraciones de bobinas y núcleos.
3. Para una configuración de bobinas y núcleo, determine la inductancia mutua de las bobinas y compare el valor obtenido con lo predicho por la teoría. Verifique que la inductancia mutua es simétrica frente a un intercambio entre la bobina primaria y la secundaria.

Rectificadores y Filtros

Los **rectificadores** son circuitos formados por diodos que modifican la señal de entrada. Estos circuitos son usados generalmente en los circuitos de alimentación de aparatos electrónicos como una etapa para convertir una señal alterna en una continua.

La Figura 2 muestra dos circuitos rectificadores, uno construido con un solo diodo (D ; Figura 2a) y otro, con cuatro (D_1, D_2, D_3, D_4 ; Figura 2b), donde v_s es un voltaje de corriente alterna, R_L es una resistencia de carga y v_L es el voltaje de salida.

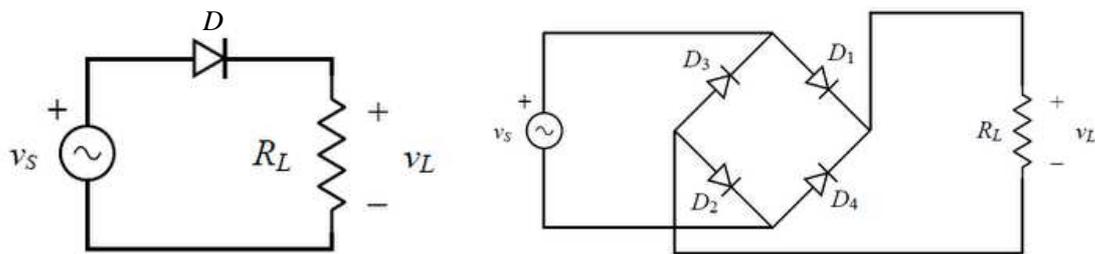


Figura 2: a. Rectificador de media onda. b. Rectificador de onda completa

Actividades propuestas:

1. Analice los circuitos presentados en la Figura 2 y haga un esquema de la señal que espera observar en la resistencia R_L .
2. Arme los circuitos de la Figura 2 y observe la señal de salida. Compare la frecuencia y el voltaje pico a pico de la señal de entrada y de salida.

Los **filtros** son circuitos formados con componentes pasivos que solo permiten el paso de ciertas frecuencias de la señal de entrada. En base a esto, los filtros se pueden clasificar como,

- *Filtros pasa bajo*: permiten pasar señales con frecuencias menores a una determinada frecuencia, denominada frecuencia de corte.
- *Filtros pasa alto*: permiten pasar señales con frecuencias mayores a una determinada frecuencia, denominada frecuencia de corte.
- *Filtros pasa banda*: permiten pasar señales con frecuencias dentro de una banda de frecuencia.

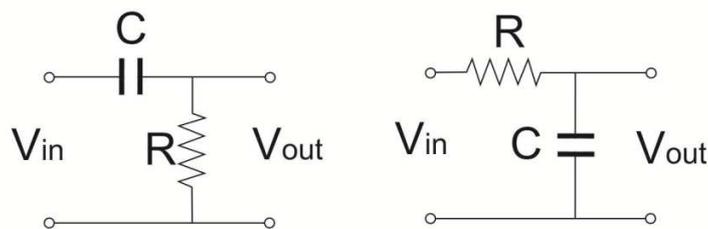


Figura 3: a. Filtro Pasa Alto. b. Filtro Pasa Bajo

En la Figura 3 se muestran dos circuitos que actúan como filtros pasa alto (Figura 3a) y como filtro pasa bajo (Figura 3b).

Un uso habitual para los filtros pasa bajo es en fuentes de alimentación para la conversión de una señal alterna en una continua. Para ello, se conecta este tipo de filtro a continuación de la etapa de rectificación para lograr un valor constante de la tensión de salida de la etapa rectificadora.

Una opción para construir un filtro pasa banda es conectar un filtro pasa bajo y uno pasa alto en serie o utilizar un circuito RLC serie.

Para este último caso (circuito RLC serie), la banda de frecuencia está centrada en una frecuencia específica, denominada frecuencia de resonancia, que solo depende del valor de L y C utilizados. El ancho de la banda de frecuencia está determinado por la resistencia presente en el circuito, siendo esta más angosta cuanto menor es el valor de la resistencia.

Actividades propuestas:

1. Arme los circuitos correspondientes a cada tipo de filtro (Figura 3) y conecte cada uno de ellos a un generador de señal. Observe la señal de salida de cada filtro y analice las frecuencias de corte en función de los valores de los componentes (R y C) utilizados.
2. Conecte un filtro pasa bajo a la salida de un circuito rectificador y observe la señal de salida. Repita para distintos valores del capacitor.
3. Conecte una señal sinusoidal a un circuito RLC serie y observe la tensión en la resistencia en función de la frecuencia.

Composición espectral de señales periódicas

Las señales periódicas, como las que se obtienen a partir de un generador de funciones (cuadrada, triángulo, diente de sierra, etc.), pueden ser descritas como una superposición de señales armónicas (sinusoides) de diferentes frecuencias. Estas son las denominadas series de Fourier. Dicho de otra manera, las diferentes “formas de onda” que se obtienen en un generador de funciones poseen diferentes “*composiciones espectrales*”, según sean la frecuencia y amplitud de los respectivos armónicos. Esto permite analizar una señal cualquiera tanto en el dominio temporal como en el de frecuencia.

Utilizando el hecho que un circuito resonante serie (RLC serie) actúa como un filtro pasa banda, se propone observar y discutir las propiedades enunciadas cuando se utiliza una señal cuadrada en el mismo.

Actividad propuesta:

Siga los siguientes pasos documentando detalladamente lo que observa.

1. Verifique con el osciloscopio que el generador de funciones provee una onda cuadrada.
2. Conecte el generador al amplificador y cargue la salida del amplificador (50Ω) con una resistencia entre 50Ω y 70Ω . Verifique con el osciloscopio que la salida del amplificador reproduce la onda cuadrada.
3. Reemplace la salida del amplificador a la correspondiente a baja impedancia de carga, y cambie la resistencia de carga a un valor entre 10 y 20Ω . Verifique que se reproduce la onda cuadrada a la salida del amplificador. Realice un barrido de frecuencias y observe la forma de onda a la salida del amplificador. ¿Se mantiene siempre la onda cuadrada? Tenga en cuenta que en este caso la carga es de carácter netamente resistivo.
4. Conecte un circuito RLC como carga manteniendo la forma de onda cuadrada. Realice un barrido de frecuencia observando la caída de tensión en la resistencia. ¿Qué ocurre con la

forma de onda a la frecuencia de resonancia? Discuta y registre lo observado. ¿Qué ocurre fuera de resonancia? Explique. Es posible determinar la frecuencia de resonancia del circuito utilizando una onda cuadrada?

5. Repita el procedimiento anterior pero observando la salida del amplificador. Explique lo que observa.

Motor eléctrico de corriente alterna

Un motor de corriente alterna (motor CA) es un sistema que genera energía mecánica de rotación utilizando una corriente eléctrica alterna. Comúnmente consiste de dos partes básicas, una parte exterior, estática, llamada estator y una parte interior, móvil, llamada rotor. Este último es el responsable de producir el torque.

El estator consta de un apilado de chapas magnéticas, sobre las cuales está arrollado un bobinado. Cuando éste bobinado es alimentado con una corriente alterna, se genera, en el interior del estator, un campo magnético giratorio.

Dependiendo del tipo de rotor que se utilice, se pueden distinguir dos tipos principales de motores CA, motor síncrono o motor de inducción.

En el *motor síncrono*, el campo magnético del rotor es generado por bobinas o imanes permanentes (Figura 4). En este tipo de motores CA, la frecuencia de rotación está sincronizada con la frecuencia de la corriente alterna con la cual el motor es alimentado, y por lo tanto, el periodo de rotación del motor es un número entero de ciclos de la corriente alterna.

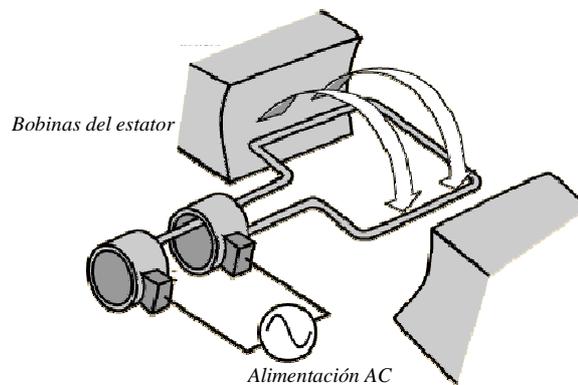


Figura 4

En el *motor de inducción*, creado por Galileo Ferraris y Nikola Tesla entre 1885 y 1886, el campo magnético en el rotor es creado por corrientes inducida en el mismo (Figura 5).

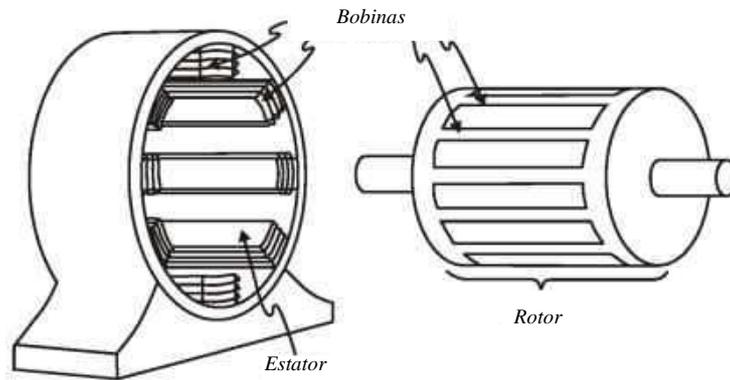


Figura 5

En este tipo de motores, el rotor está formado por arrollamientos de alambres que forman bucles cerrados. El campo magnético variable (giratorio) generado por el estator induce corrientes en el rotor, las cuales interactúan con el campo magnético del estator, generando un torque sobre el mismo (Figura 6)

En este tipo de motores CA, el rotor gira a una velocidad más lenta que el campo del estator, por lo cual a este tipo de motores también se lo denominan *asíncronos*.

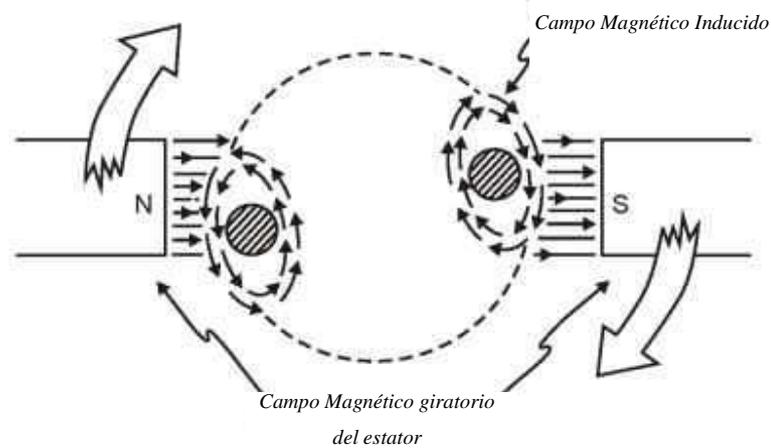


Figura 6

Actividades propuestas:

1. Deduzca, según lo explicado, si el motor de corriente alterna mostrado en esta experiencia es un motor síncrono o de inducción.

1. ANÁLISIS DE IMPEDANCIAS Y ÁNGULOS DE FASE EN CIRCUITOS, RL Y RLC SERIE.

Inductor o bobina

Un inductor o bobina es un elemento que se opone a los cambios de variación de corriente en un circuito. Cuando circula por una bobina una corriente i variable con el tiempo (generada por una fuente de tensión alterna, figura 1), la ecuación correspondiente puede escribirse:

$$-L \frac{di}{dt} + V_0 \text{sen}(\omega t) = 0$$

Integrando esta ecuación obtenemos i en función del tiempo:

$$i_L = -\frac{V_0}{\omega L} \cos(\omega t) = \frac{V_0}{\omega L} \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

La **intensidad** i_L en la bobina **está retrasada 90°** respecto de la diferencia de potencial entre sus extremos V_L . La relación entre sus amplitudes es:

$$I_L = \frac{V_L}{\omega L}$$

con $V_L=V_0$, la amplitud de la *fem* alterna.

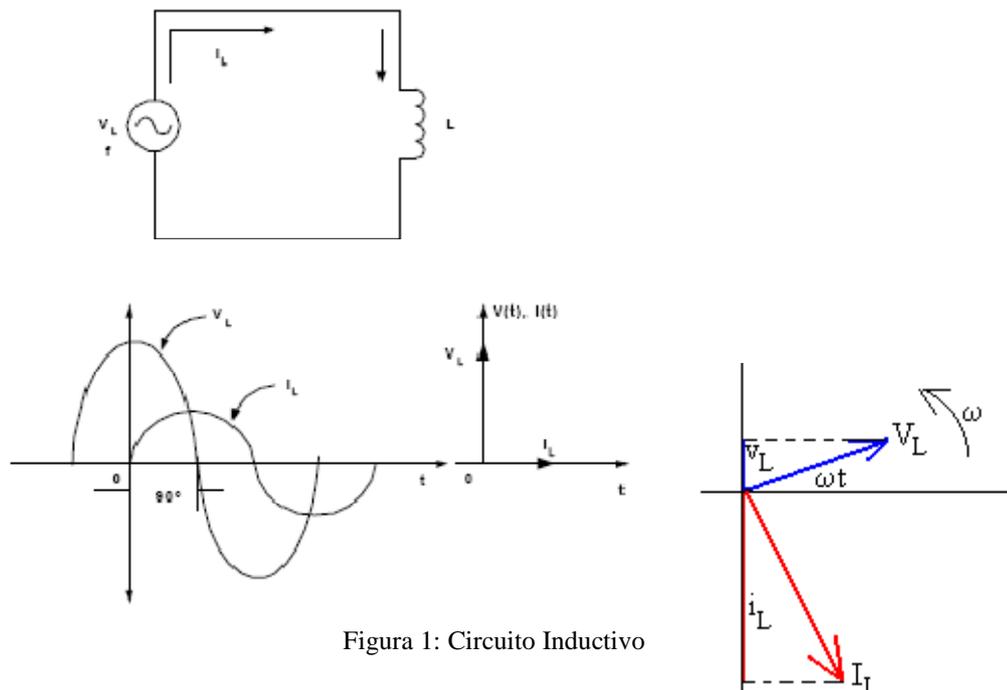


Figura 1: Circuito Inductivo

f es la frecuencia en Hertz (Hz) y L la inductancia en Henrios (H). El efecto combinado de la frecuencia y la inductancia se denomina reactancia inductiva y mide la oposición que presenta la bobina al paso de la corriente alterna. La reactancia inductiva se designa como X_L , se mide en ohms [Ω] y se calcula mediante la siguiente fórmula: $X_L = 2\pi fL$. Por tanto, la reactancia de una bobina es directamente proporcional a la frecuencia (f). A medida que aumenta la frecuencia, aumenta la reactancia y disminuye la corriente, y viceversa. El término $2\pi f$ se denomina comúnmente *frecuencia angular*, se designa como ω y se mide en radianes por segundo (rad/s). La magnitud de la corriente a través de la bobina se puede expresar en términos de X_L y ω así:

$$I_L = \frac{V_L}{X_L} = \frac{V_L}{\omega L}$$

Circuito RLC en serie

El circuito que se muestra en la figura 2, el cual está compuesto por una fuente de tensión variable $V(t)$, una resistencia R , un condensador de capacidad C y una bobina de autoinductancia L , se denomina circuito *RLC serie*.

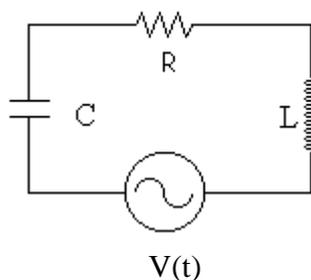


Figura 2

Si al tiempo $t = 0$ se establece una corriente eléctrica que varía con el tiempo $i(t)$, de acuerdo a la segunda regla de Kirchhoff resulta que:

$$V - L \frac{di}{dt} = i(t)R + \frac{Q(t)}{C}$$

Si la fuente de la figura 2 es una fuente de tensión sinusoidal $V(t) = V_0 \text{sen}(2\pi f_0 t)$ de frecuencia f_0 , la solución de la ecuación anterior, toma la forma:

$$i(t) = I_0 \text{sen}(2\pi f_0 t + \phi)$$

De aquí puede verse que las diferencias de potencial entre los terminales de cada elemento serán:

$$V_R = V_{0R} \text{sen}(2\pi f_0 t + \phi_R)$$

$$V_L = V_{0L} \text{sen}(2\pi f_0 t + \phi_L)$$

$$V_C = V_{0C} \text{sen}(2\pi f_0 t + \phi_C)$$

Se puede dibujar el diagrama de vectores (figura 3) teniendo en cuenta:

1. que la intensidad que pasa por todos los elementos es la misma,
2. que la suma (vectorial) de las diferencias de potencial entre los extremos de los tres elementos da la diferencia de potencial en el generador de corriente alterna.

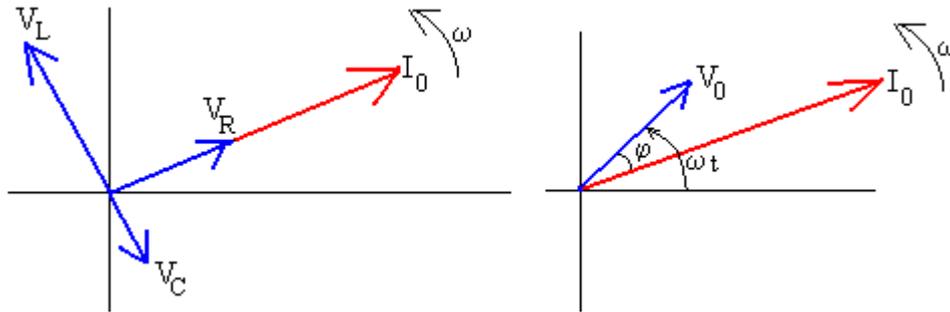


Figura 3: Diagrama vectorial:

El vector resultante de la suma de los tres vectores es

$$V_0 = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} = I_0 \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

Se denomina impedancia del circuito al término

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

de modo que se cumpla una relación análoga a la de los circuitos de corriente continua

$$V_0 = I_0 Z$$

El ángulo que forma el vector resultante de longitud V_0 con el vector que representa la intensidad I_0 es

$$\tan \varphi = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

Las expresiones de la fem y de la intensidad del circuito son:

$$V = V_0 \text{sen}(\omega t) \quad I = I_0 \text{sen}(\omega t - \varphi)$$

Parámetros de una señal de corriente alterna

Los principales parámetros que caracterizan una señal alterna, de corriente o voltaje, pura (figura 4) son su amplitud, su frecuencia y su fase. Otros parámetros relacionados con la amplitud son el valor instantáneo, el valor pico a pico, el valor promedio y el valor eficaz.

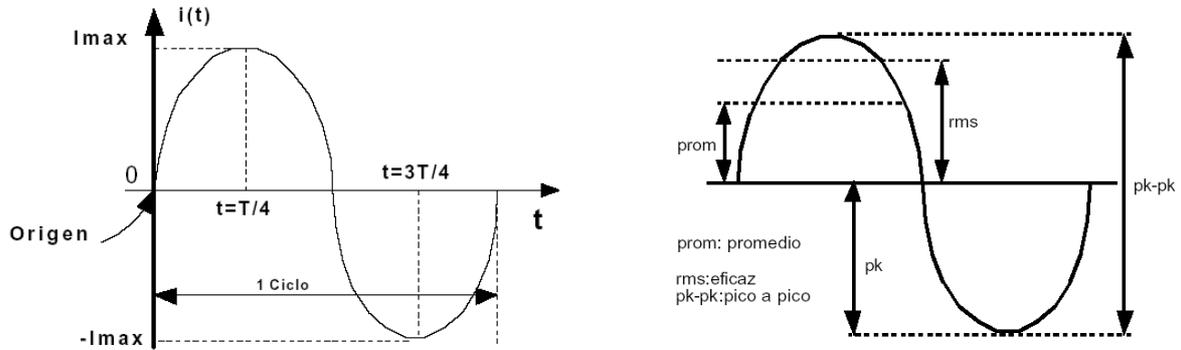


Figura 4: a) Señal de Corriente Alterna Pura b) Valores pico, pico a pico, promedio y eficaz.

La amplitud máxima se denomina también “valor pico” y se refiere al máximo valor positivo o negativo, que alcanza la señal durante un ciclo. El valor pico de una señal de voltaje se mide en Volts (V) y el de una señal de corriente en Amperes (A).

El *valor instantáneo* es el que tiene la señal en cualquier instante de tiempo y se puede expresar en forma general mediante una ecuación del tipo:

$$\text{Valor Instantáneo} = A_0 \cdot \sin(2\pi ft \mp \varphi)$$

En la expresión anterior, f es la frecuencia de la señal en hertz (Hz), t es el tiempo en segundos (s) y φ es el ángulo de fase en radianes (rad). Este último especifica el desplazamiento de la forma de onda a la izquierda o a la derecha del origen.

El *valor pico a pico* es numéricamente igual al doble del valor pico y corresponde al medido entre los puntos de amplitud máxima de un ciclo de la señal.

El *Valor promedio* se define como el promedio aritmético de todos los valores que adopta la señal durante un semiciclo y es aproximadamente igual al 63.7% del valor pico. Esto es:

$$\text{Valor pico a pico} = 2 \times \text{Valor pico}$$

$$\text{Valor promedio} \approx 0,637 \times \text{Valor pico}$$

El *valor eficaz o rms* (root-mean-square: raíz cuadrática media) de una señal de corriente alterna es el que produce en un elemento resistivo la misma disipación de potencia que una corriente continua de igual valor.

Actividades

1) Circuito *RL*

El circuito de la figura 5 consiste en dos impedancias Z_1 y Z_2 , las que pueden ser inductancias, capacitores o resistencias (elementos pasivos), conectadas en serie con una fuente de alimentación de corriente alterna (CA) de tensión V_o .

Arme el circuito utilizando una inductancia y una resistencia como impedancias (circuito *RL*), y un generador de onda senoidal de frecuencia variable como fuente de alimentación. Luego de seleccionar frecuencia y tensión de alimentación, mida cuidadosamente con el osciloscopio el valor de la tensión “pico a pico” (V_{pp}) en cada elemento del circuito.

Realice las mediciones adicionales que considere necesarias para determinar los ángulos de fase entre la tensión de la fuente y la corriente del circuito, y entre la caída de tensión en cada elemento y la corriente. Con estos datos realice un diagrama vectorial de impedancias del circuito. Repita las mediciones para un valor de frecuencia que difiera al menos 10 veces del anterior.

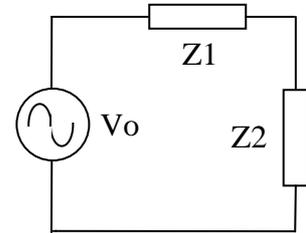


Figura 5

2) Circuitos *RLC*

- Analizar el comportamiento de la corriente en un circuito *RLC* en función del valor de la resistencia.
- Determinar las diferencias de fase relativas entre los elementos del circuito *RLC* y entre cada elemento y la fuente. Realice el correspondiente diagrama vectorial de impedancias del circuito.

2. CIRCUITO *RLC* SERIE. RESONANCIA.

Circuito resonante serie

Arme un circuito *RLC* en serie (figura 6) utilizando preferentemente una resistencia de valor pequeño (no mayor a 10Ω). Antes de encender el generador realice consideraciones sobre las variaciones en la impedancia de carga del circuito al variar la frecuencia. Mida en función de la frecuencia (al menos 20 puntos) los siguientes parámetros:

- La tensión (V_{pp}) en la resistencia (V_R).
- La tensión en el capacitor.
- La tensión en la inductancia.
- La tensión en la fuente de alimentación.
- La diferencia de fase entre la corriente y la tensión de la fuente.

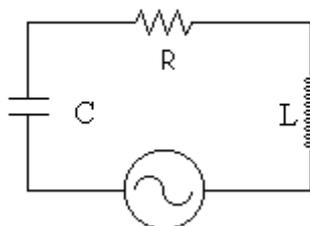


Figura 6

Realice una gráfica donde se superpongan las cinco curvas.

Repita la medición del punto (a) (V_R vs. f) agregando una resistencia de mayor valor (entre $10k\Omega$ y $100k\Omega$) en serie.

A partir de los resultados contenidos en ambos gráficos elabore conclusiones.

3. ANALISIS DE ADMITANCIAS Y CORRIENTES EN CIRCUITOS RESONANTES PARALELO.

Circuito RLC Paralelo

Arme un circuito *RLC* en conexión paralelo y conéctelo a un generador de tensión alterna de frecuencia variable. Determine la frecuencia de resonancia f_o del circuito y el intervalo de frecuencia ($2\Delta f$) en el cual se produce un cambio de fase entre la corriente total y la corriente en la resistencia mayor a 120° . Mida la corriente total en función de la frecuencia desde $f_o - \Delta f$ hasta $f_o + \Delta f$ (al menos 20 puntos).

Realice la medición para dos valores diferentes de resistencia, uno del orden de 10 veces la resistencia asociada a la inductancia, y otra al menos 100 veces mayor. Superponga ambas curvas en un mismo gráfico. Elabore conclusiones.

Para un valor de frecuencia diferente al de resonancia, realice las mediciones que considere necesarias a los fines de elaborar un gráfico vectorial de admitancias.

Consideraciones antes de comenzar a medir

1. ¿Por qué sugerimos que la resistencia empleada sea al menos 10 veces mayor a la del bobinado de la inductancia? ¿Qué cambios esperaría si esta resistencia no estuviera?
2. ¿Cómo se propone medir la frecuencia de resonancia? Discuta al menos dos posibilidades y elabore un criterio para elegir la que considere más conveniente.
3. ¿Cómo propone medir la diferencia de fase entre la corriente total y la corriente en la resistencia?
4. ¿Qué relación debe existir entre la corriente en la resistencia y la corriente total en resonancia?

4. ELEMENTOS CIRCUITALES REALES: ANGULO DE PÉRDIDA Y POTENCIA EN CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

A lo largo del curso realizamos diferentes experimentos con elementos circuitales como son las resistencias, bobinas y capacitores. En el caso ideal, cada uno se comporta como resistencia, inductancia y capacidad respectivamente. En este práctico analizaremos en qué medida los elementos en uso se apartan de dicha condición, y utilizaremos los conceptos involucrados para realizar mediciones de R, L y C.

Si un elemento reactivo posee una pérdida asociada a una componente resistiva (caso trivial la bobina: la resistencia del bobinado se suma a la inductancia), la consecuencia es que existirá

potencia disipada por efecto Joule y el ángulo de fase entre la tensión y la corriente en el elemento no será de 90° . El ángulo que define la diferencia entre la fase real y la de 90° se denomina ángulo de pérdida (δ).

Un problema equivalente atañe a la resistencia: la misma puede tener componentes inductivas y/o capacitivas, las que se manifestarán o no según la frecuencia de trabajo.

En los elementos reactivos ideales, la “potencia reactiva” es nula como consecuencia de la diferencia de fase de 90° entre la tensión y la corriente. Sin embargo, debido a la existencia de pérdidas, hablamos de “potencia aparente”, definiendo el “factor de potencia” para cuantificar la pérdida. El mismo es igual a $\cos\phi = \cos(\pi/2 - \delta)$.

Elija una resistencia, una bobina y un capacitor (electrolítico). Para cada uno de ellos diseñe un circuito con la finalidad de analizar el ángulo de pérdida en función de la frecuencia en el rango 100Hz – 100kHz. Realice un gráfico de δ en función de la frecuencia para cada elemento.

5. LÍNEA DE $\lambda/4$ – ADAPTACIÓN DE IMPEDANCIAS

La adaptación de las impedancias entre una fuente o generador AC y una carga dada es una premisa fundamental a los fines de garantizar la máxima transferencia de potencia. Tratándose de señales alternas, el “teorema de la potencia” expresa que *la máxima transferencia de potencia de una fuente a una carga ocurre cuando la impedancia de carga es compleja conjugada respecto a la impedancia de salida de la fuente*.

Antes de continuar es muy instructivo demostrar este teorema en el caso CC. Para el dibujo de la figura 7 muestre que la potencia disipada en la resistencia de carga R_c es máxima si R_c es igual a R_f , siendo R_f la resistencia interna de la fuente (o resistencia *de salida*).

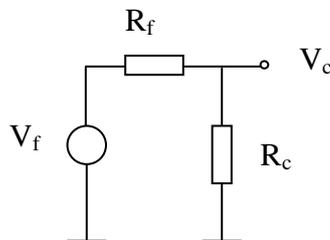


Figura 7.

Ahora considere que tratamos el caso CA y que la impedancia de salida del generador o fuente es compleja del tipo inductiva, mientras que la impedancia de carga es compleja de tipo capacitiva (figura 8).

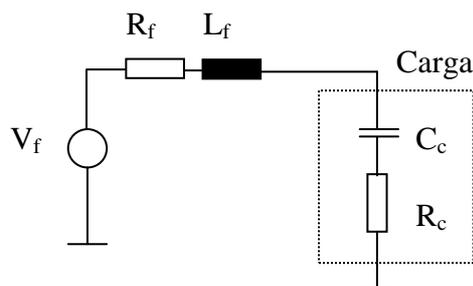


Figura 8.

Evidentemente, a la frecuencia de resonancia las componentes reactivas se cancelan y recuperamos el caso anterior (sólo que ahora tratamos el caso en que la fuente genera una tensión alterna). De manera que en este caso, nuevamente la transferencia de potencia será máxima si las resistencias de la fuente y de carga son iguales. En el caso general, puede requerirse la adaptación entre impedancias de naturaleza más complicada o sin que medie necesariamente una resonancia. Para ello es necesario intercalar entre el generador y la carga una *red de adaptación*. Esta cumple con la finalidad de que la impedancia de carga "se vea" desde la fuente como su compleja conjugada. Existe una gran variedad de redes de adaptación según la función auxiliar que uno requiera de la misma. Un ejemplo es el caso en que la red cumple la función de filtro, el cual puede ser pasa bajo, pasa banda o pasa alto, según permita el paso de bajas, una banda intermedia o altas frecuencias.

Un caso importante de red de adaptación que veremos en el práctico es el de la línea de $\lambda/4$ o cuarto de onda, la cual puede aproximarse por una red en configuración " π ". La característica que define a esta red es que si Z_E es la impedancia de entrada y Z_S la impedancia de salida, se cumple que $Z_E \cdot Z_S = |Z|^2$, donde Z es la impedancia característica de los elementos de la red. Esta última expresión sugiere que si la impedancia de entrada es pequeña, la de salida será grande (y vice-versa). En el caso extremo, si $Z_E=0$, entonces $Z_S=\infty$ y si $Z_E=\infty$ entonces $Z_S=0$. Analicemos entonces el funcionamiento de una red tipo Pi de tres elementos (figura 9).

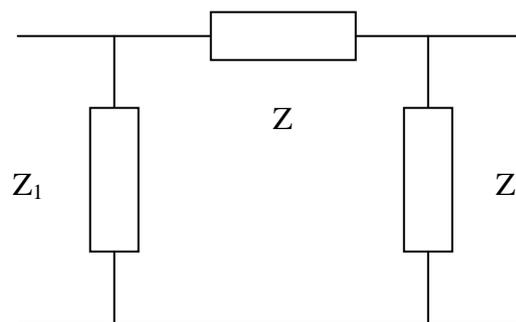


Figura 9.

Interpongamos la red entre una fuente V_f y una impedancia de carga Z_C (figura 10).

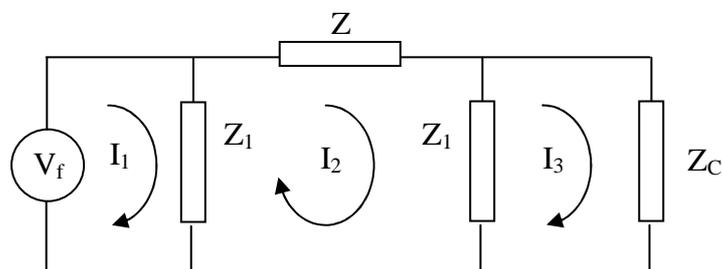


Figura 10.

Utilizando las reglas de Kirchhoff:

- $V_f = I_1 Z_1 - I_2 Z_1$
- $I_2(2Z_1 + Z) - I_1 Z_1 - I_3 Z_1 = 0$
- $I_3(Z_1 + Z_C) - I_2 Z_1 = 0$

De donde obtenemos: $Z_E = V_f/I_1 = [Z_1^2 Z_C + Z Z_1 (Z_1 + Z_C)] / [Z_1^2 + 2Z_1 Z_C + Z(Z_1 + Z_C)]$.

Si particularizamos al caso en que Z representa una inductancia y Z_1 una capacidad: $Z = j\omega L$ y $Z_1 = -j/\omega C$, obtenemos una expresión para Z_E en términos de L , C , ω y Z_C . Muestre que en resonancia, esa expresión se reduce a:

$Z_E Z_C = 1/\omega^2 C^2$. Es decir, a la frecuencia de resonancia esta red se comporta como una línea de cuarto de onda con una impedancia característica $Z = 1/\omega C$ (lo cual resulta obvio del siguiente análisis: si la carga tiene impedancia nula, lo que ve la fuente es un circuito resonante LC paralelo a masa, el cual en resonancia presenta impedancia infinita. Al contrario, si eliminamos la carga, o sea que Z_C es infinita, la fuente ve un LC serie a masa, el que en resonancia tiene impedancia nula).

Parte 1

Arme un circuito Pi como el sugerido y utilícelo como adaptador de impedancia para aplicar una señal senoidal a una carga entre 4 y 20 ohms, utilizando la salida de 600 ohms del generador. Sugerencia: use los capacitores de 0,22 μF e inductancias entre 1 y 2 mH. Piense como puede determinar si la red de adaptación funciona o no y cómo cuantificar la calidad de la misma.

Parte 2

Verifique el funcionamiento de la misma red como línea de cuarto de onda. Para ello conecte la red como carga del generador y monitoree la tensión de la fuente con un osciloscopio. Primero haciendo $Z_C = 0$ (corto), haga un barrido de frecuencia alrededor de la resonancia. Verifique que en resonancia la tensión de la fuente se asemeja a aquella que se observa "en vacío" (es decir sin carga). Luego elimine Z_C y nuevamente haga un barrido de frecuencia. Verifique ahora que en resonancia la fuente queda expuesta a sobrecarga. A los fines de no dañar el generador evite utilizar la máxima amplitud de salida y/o coloque una resistencia de 100 Ω en serie entre la salida y la red. Mida las curvas mencionadas y presente los correspondientes gráficos en el informe.