

TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE ELECTROMAGNETISMO

Curso 2012-2013

Grupo I de prácticas:

1. Medidas de corriente continua.
2. Medidas de corriente alterna. El osciloscopio.
3. Circuitos resonantes.
4. Transitorios RC, RL y RLC.
5. Medida de la permitividad dieléctrica.
6. Ciclos de histéresis de materiales ferromagnéticos. Transformadores.

Septiembre 2012

PRÁCTICA N° 1: MEDIDAS DE CORRIENTE CONTINUA

Objetivos: Utilización de voltímetro y amperímetro, tanto analógico como digital, medidas de tensión y corriente en circuitos de corriente continua con resistencias y efecto de carga.

Material: Un voltímetro analógico, un amperímetro analógico y un polímetro digital, pila y portapilas, interruptor (pulsador), resistencias y cables de conexión.

1. INTRODUCCIÓN

Un **voltímetro** es un instrumento destinado a medir la diferencia de potencial (d.d.p.) entre dos puntos de un circuito, tal como se indica esquemáticamente en la figura 1. Observemos que el voltímetro se conecta en paralelo. Los voltímetros se suelen construir utilizando un microamperímetro (o galvanómetro) como aparato base al que se añade en serie una resistencia. Esta resistencia, junto a las características del aparato base, define el margen de medida del voltímetro. Los voltímetros usuales disponen de varias escalas, lo que significa que el fabricante ha montado en su interior las resistencias adecuadas para cada una de ellas. Desde el punto de vista de una red eléctrica, el circuito equivalente de un voltímetro es su resistencia interna, r_v .

Un **voltímetro ideal** sería aquel cuya conexión a cualquier red eléctrica no produjera modificación alguna de las corrientes y potenciales existentes en la misma. De esta forma la diferencia de potencial medida correspondería efectivamente a la existente antes de la conexión. El voltímetro ideal presentaría una resistencia interna infinita. Sin embargo, los voltímetros reales presentan una resistencia interna finita y ello supone que una cierta corriente se desvíe por el aparato al conectarlo a un circuito dado, modificando las corrientes y potenciales preexistentes en el circuito. Este hecho se conoce como **efecto de carga del voltímetro**, y justifica la importancia de conocer las características del aparato que en su momento se utilice, y saber deducir de las mismas si su efecto de carga es o no despreciable. Si el efecto de carga es despreciable, entonces podremos hacer uso del voltímetro como si se tratara de un voltímetro ideal, situación deseable desde el punto de vista práctico. Si por el contrario el efecto de carga no es despreciable, entonces todavía se puede hacer uso del voltímetro, pero teniendo presente que la diferencia de potencial medida es distinta de la preexistente antes de conectar el aparato, la cual puede calcularse en algunos casos a partir de la medida.

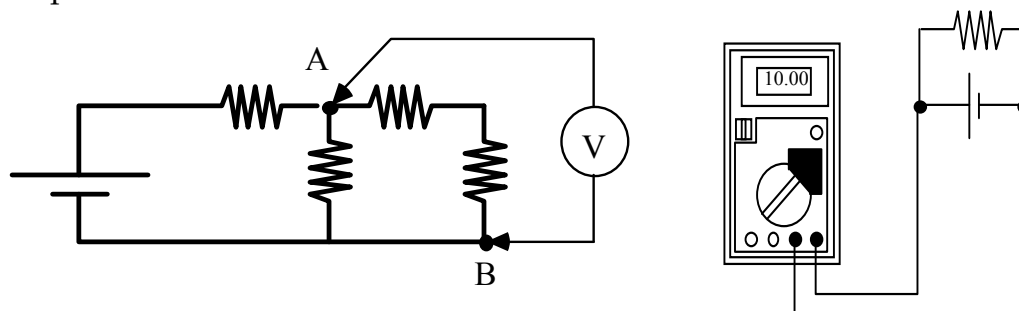


Figura 1. Medida de diferencias de potencial.

La magnitud que representa el efecto de carga de un voltímetro al medir una d.d.p. entre dos puntos A y B de un circuito es la variación relativa en dicha d.d.p. antes y después de conectar el aparato, es decir:

$$\varepsilon_r (\%) = \frac{(V_A - V_B) - (V_A - V_B)'}{(V_A - V_B)} \times 100 \quad (1)$$

siendo $(V_A - V_B)'$ la d.d.p. que hay entre los puntos A y B al añadir el voltímetro.

Un **amperímetro** es un instrumento destinado a medir la intensidad de la corriente eléctrica que recorre una rama dada de un circuito. Los amperímetros usuales requieren para ello interrumpir la rama en un punto e intercalar el aparato, de modo que la corriente a medir circule por el interior del mismo (figura 2): los amperímetros se conectan en serie. Los amperímetros analógicos se suelen construir utilizando un microamperímetro como aparato base al que se conecta una resistencia en paralelo. Esta resistencia, junto a las características del aparato base, define el margen de medida del amperímetro. Los amperímetros usuales disponen de varias escalas, que el fabricante define montando en el interior del aparato las resistencias adecuadas para cada una de ellas. Desde el punto de vista de la red eléctrica en la que se utiliza el aparato, el circuito equivalente de un amperímetro es su resistencia interna, r_A .

Un **amperímetro ideal** no modificaría las corrientes y potenciales de un circuito al conectarlo al mismo. De esta forma la corriente medida sería efectivamente la existente antes de conectar el aparato. El amperímetro ideal presentaría una resistencia interna nula.

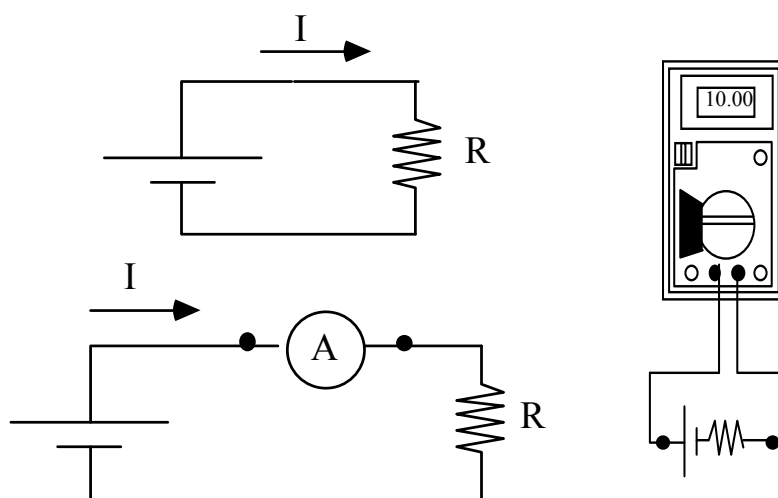


Figura 2. Medida de la intensidad de corriente.

Sin embargo, los amperímetros reales presentan una resistencia no nula, y ello supone que al conectarlo se modifican las corrientes y potenciales del circuito. Este hecho se conoce como **efecto de carga del amperímetro**, y justifica la importancia de conocer las características del aparato que en su momento se utiliza, y saber deducir de las mismas si su efecto de carga es o no es despreciable. Si el efecto de carga es despreciable, entonces podremos hacer uso del amperímetro como si se tratara de un aparato ideal, situación deseable desde el punto de vista práctico. Si por el contrario el efecto de carga no es despreciable, entonces todavía se puede hacer uso del

amperímetro, pero teniendo en cuenta que la corriente medida es distinta de la preexistente antes de conectar el aparato, la cual puede calcularse en algunos casos a partir de la medida.

De manera similar al voltímetro, el efecto de carga de un amperímetro al medir la corriente que pasa por una rama de un circuito se define como:

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{I - I'}{I} \times 100 \quad (2)$$

siendo I' la corriente que circula cuando se añade el aparato.

2. MANEJO DE LOS APARATOS ANALÓGICOS Y DIGITALES

En esta práctica usaremos un voltímetro y amperímetro analógicos y un polímetro digital. Este último servirá como voltímetro, amperímetro y óhmetro. Aunque el funcionamiento interno de los aparatos analógicos y digitales puede ser diferente, desde el punto de vista de las medidas ambos se caracterizan de igual forma, teniendo el mismo circuito equivalente. En régimen de corriente continua todos los aparatos tienen un borne positivo (+) y un borne negativo (-): el voltímetro mide siempre la diferencia de potencial entre el borne positivo y el borne negativo ($V_+ - V_-$) y el amperímetro la corriente que entra por el borne positivo y sale por el negativo.

Los aparatos analógicos deben conectarse en posición vertical u horizontal según las indicaciones del fabricante (⊥ posición vertical, — posición horizontal). En esta práctica dichos aparatos se utilizarán únicamente para medidas en continua, de manera que **SÓLO SE SELECCIONARAN POSICIONES DEL CONMUTADOR EN LOS RANGOS MARCADOS EN BLANCO** (con el símbolo $\overline{\hspace{1cm}}$). Ambos aparatos tienen dos bornes: uno positivo (+) y otro negativo (COM). Por otra parte, hay diferentes escalas graduadas superpuestas, pero dichas escalas tienen unidades arbitrarias: el fondo de escala nos indica que el aparato mide entre 0 (voltios o amperios) y el valor del fondo de escala. El fondo de escala está determinado por la posición del conmutador o bien por la elección de un determinado borne (según el modelo). Para realizar una medida deberemos fijar, inicialmente, el mayor fondo de escala del aparato; seguidamente iremos disminuyendo el fondo de escala, **GIRANDO MUY SUAVEMENTE** el conmutador (o cambiando el borne) hasta que hagamos una medida que no sobrepase el fondo de escala. Los aparatos analógicos se dañan cuando la aguja se sale de escala, por lo que nunca deberemos consentir que la medida sea mayor que el fondo de escala o que la aguja se desvíe hacia la parte negativa, y, si sucede por un descuido, deberemos desconectar rápidamente el aparato.

Un **polímetro** es un aparato que puede medir las siguientes magnitudes:

- Diferencia de potencial de corriente continua
- Diferencia de potencial de corriente alterna
- Intensidad de corriente continua
- Intensidad de corriente alterna
- Resistencias.

El polímetro es pues un aparato que puede hacer las funciones de amperímetro, voltímetro u óhmetro. El **voltímetro** y el **amperímetro digital** que se emplearán en esta práctica son parte de un polímetro digital. Dicho polímetro se puede conectar

indistintamente en posición vertical u horizontal. Cada tipo de medida o función del polímetro, así como el correspondiente margen de medida (fondo de escala), corresponde a una posición debidamente indicada del conmutador de selección. Las posibles funciones de nuestro polímetro son:

DCV= voltímetro de corriente continua
ACV= voltímetro de corriente alterna
OHM= óhmetro o medidor de resistencias

DCA= amperímetro de corriente continua
ACA= amperímetro de corriente alterna.

Las unidades de la cantidad que se lee en la pantalla corresponden a la unidad asociada al fondo de escala seleccionado.

Para conseguir una medida lo más precisa posible con el polímetro y evitarle posibles daños, seguiremos el siguiente procedimiento. **ANTES DE CONECTAR** el polímetro al circuito el conmutador debe situarse en la posición que seleccione la función correcta y en el mayor margen o escala posible. Seguidamente conectamos el polímetro. A continuación iremos disminuyendo el fondo de escala, **GIRANDO MUY SUAVEMENTE EL CONMUTADOR**, hasta que aparezca un “1” en la pantalla (lo que indica que la medida sobrepasa el valor máximo de la escala), para “subir” finalmente hacia la escala inmediata superior. Así conseguiremos el mayor número de cifras significativas.

Antes de comenzar las medidas de la práctica se recuerda que el error de sensibilidad de una medida directa es el correspondiente al valor más pequeño que puede apreciarse. Así pues, cada vez que se haga una medida con un aparato anotad la escala en la que se hace y la sensibilidad de dicha escala (que no tiene porqué ser la división más pequeña). Si la medida fluctúa en un cierto intervalo, habrá que utilizar dicho intervalo como margen de error.

En el caso del polímetro digital que utilizamos en esta práctica, el error que debemos asignar a la medida es mayor que el valor más pequeño que puede apreciarse en la pantalla (resolución). Dicho error real depende de la función de medida y de la escala que se use, y puede calcularse para cada medida siguiendo las instrucciones del apéndice 3.

3. MEDIDAS BÁSICAS CON VOLTÍMETRO/AMPERÍMETRO

Montar el circuito de la figura 3. ε es la pila de 4,5 V (pila de “petaca”). Utilizar el voltímetro analógico y luego el digital para medir $V_A - V_B$. Esta diferencia de potencial corresponderá a la fuerza electromotriz de la pila. Comparad los valores medidos con el valor nominal (4,5 V).

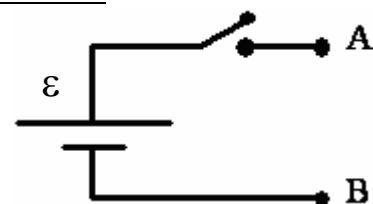


Figura 3.

A continuación montar el circuito de la figura 4. Utilizar el amperímetro analógico y luego el digital para medir la corriente I que circula por dicho circuito. Comparad los valores medidos con el valor calculado a partir de la ley de Ohm utilizando los valores medidos de la fem de la pila y de la resistencia.

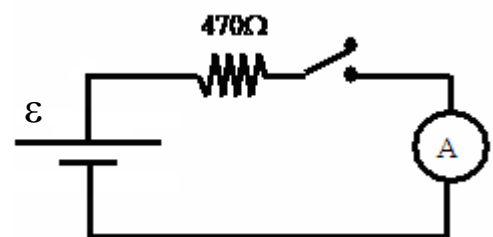


Figura 4.

4. MEDIDA DE RESISTENCIAS

En primer lugar mediremos las resistencias utilizando la parte de óhmetro del polímetro digital. Comparad los valores medidos (teniendo en cuenta el error de medida del polímetro) con los valores nominales según el código de colores (teniendo en cuenta la tolerancia dada por el fabricante), que viene descrito en el apéndice 1.

A continuación determinaremos la resistencia interna del voltímetro y amperímetro analógicos, utilizando medidas de tensión y corriente con ambos aparatos.

En primer lugar determinaremos la resistencia interna del voltímetro analógico, r_V , **para la escala de 10 V**. Montar el esquema de la figura 5a, siendo R la caja de resistencias. Realizar varias medidas (al menos 6) de V e I para distintos valores de R, **utilizando la escala del amperímetro más conveniente**, y calcular la resistencia interna del voltímetro $r_V = V/I$ para la escala de 10V. Una manera es calcular la media de los valores obtenidos, aunque es siempre mucho mejor representar V en función de I, y obtener r_V del ajuste por mínimos cuadrados. Dependiendo del tiempo disponible se elegirá uno u otro método.

A continuación determinaremos la resistencia interna del amperímetro en **la escala de 10 mA**. Montar el esquema de la figura 5b, siendo R la caja de resistencias. Iniciar el montaje con un valor grande de R para asegurarse que la corriente no exceda el valor máximo admitido por el amperímetro (escala de 10 mA). **Utilizar la escala del voltímetro más adecuada para la caída de potencial que se esté midiendo**. Realizar varias medidas (al menos 6) de V e I variando R (procurando que queden distribuidas uniformemente en todo el intervalo de I) y deducir de las mismas el valor de la resistencia interna del amperímetro $r_A = V/I$, para la escala de 10 mA.

Comparad los valores de resistencias internas obtenidos con los que se dan en el apéndice 2.

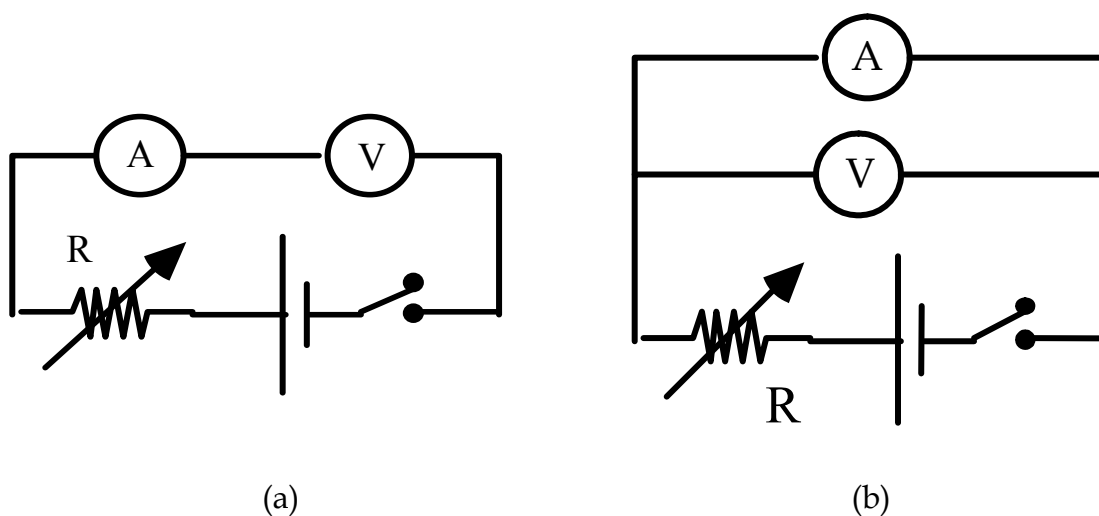


Figura 5.

5. MEDIDA DE CORRIENTE Y TENSIÓN EN CIRCUITOS DC. EFECTO DE CARGA.

En este apartado montaremos un circuito simple con resistencias y vamos realizar medidas de corriente y tensión, evaluando el efecto de carga de los aparatos en las medidas. Montar, en primer lugar los circuitos de la figura 6. Medir con el voltímetro analógico las d.d.p. V_A-V_C , V_A-V_B y V_B-V_C usando el mismo fondo de escala (10 V). Observar si se verifica:

$$(V_A-V_C) = (V_A-V_B) + (V_B-V_C) \quad (3)$$

Justificar los resultados obtenidos en base al efecto de carga del voltímetro.

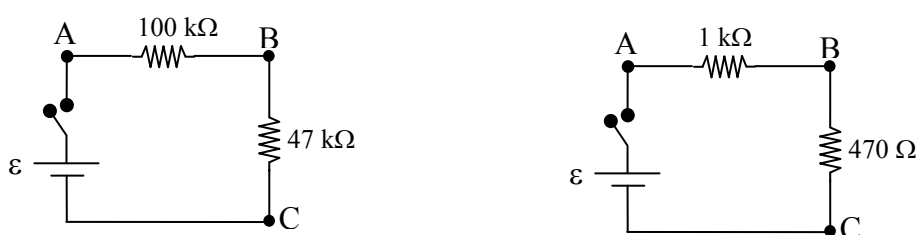


Figura 6.

Repetir la misma secuencia de medidas con el voltímetro digital (en la escala de 20 V), así como el análisis de resultados.

A continuación montar el circuito de la figura 7. Medir con el amperímetro analógico (en la escala de 10 mA) las corrientes que pasan por cada una de las resistencias. Comprobar si se cumple:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (4)$$

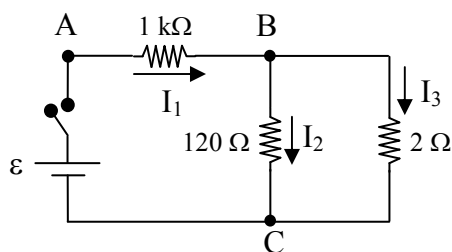


Figura 7.

Justificar los resultados en base al efecto de carga del amperímetro.

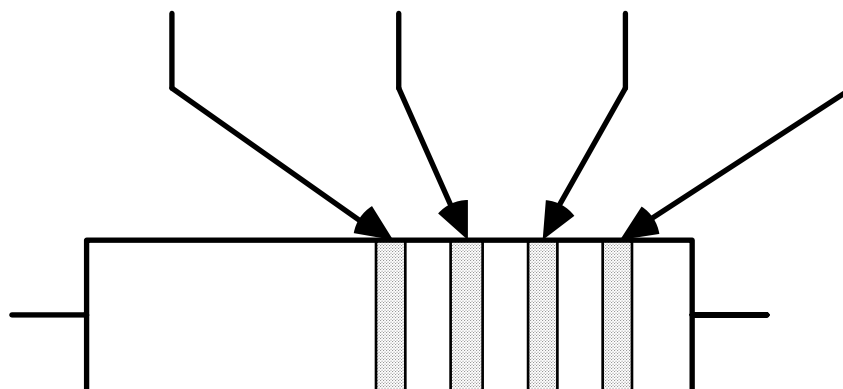
Repetir la misma secuencia de medidas con el amperímetro digital (en la escala de 20 mA), así como el análisis de los resultados.

6. CUESTIONES

Realizar los cálculos y comprobaciones propuestos a lo largo del guión.

APÉNDICE 1: CÓDIGO DE COLORES PARA RESISTENCIAS

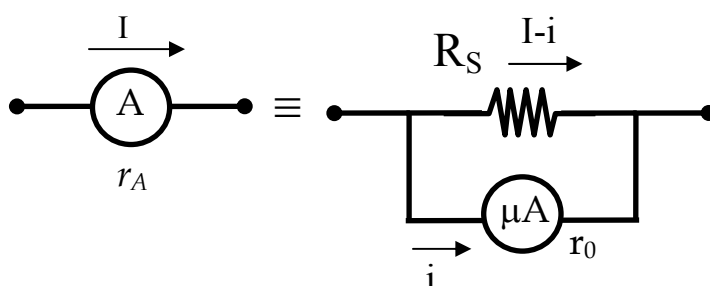
COLOR	1º dígito	2º dígito	factor	tolerancia
plata	-	-	10^{-2}	$\pm 10\%$
oro	-	-	10^{-1}	$\pm 5\%$
negro	-	0	10^0	-
marrón	1	1	10^1	-
rojo	2	2	10^2	-
naranja	3	3	10^3	-
amarillo	4	4	10^4	-
verde	5	5	10^5	-
azul	6	6	10^6	-
violeta	7	7	10^7	-
gris	8	8	10^8	-
blanco	9	9	10^9	-



El valor resultante al aplicar este código de colores viene dado en ohmios.

APÉNDICE 2: RESISTENCIAS INTERNAS DE LOS APARATOS

Como se ha dicho en la introducción un amperímetro analógico se construye utilizando un microamperímetro como aparato base (con resistencia interna r_0), en paralelo con una resistencia, R_s , cuyo valor permite cambiar el fondo de escala. El amperímetro digital no se construye así, pero su circuito equivalente se puede representar también de esa forma, que presentamos en la siguiente figura:



Así pues, si para un valor dado de R_s la corriente máxima que puede medir el amperímetro es $I_{\max}$ (fondo de escala) tendremos:

$$I_{\max} \cdot r_A = i_{\max} \cdot r_0$$

siendo $i_{\max}$ la corriente máxima que mide el microamperímetro.

Como $i_{\max}$ y r_0 son características del aparato base, la resistencia interna del amperímetro se puede poner como:

$$r_A(\Omega) = \frac{C(\text{mA} \cdot \Omega)}{\text{Fondo de escala}(\text{mA})}$$

siendo $C = i_{\max} \cdot r_0$ una constante que depende de las características del aparato base.

Los valores de C para los aparatos que se utilizan en ésta práctica son los siguientes:

$$C_{\text{digital}} = 200 \text{ mA} \cdot \Omega$$

$$C_{\text{analógico}} = 1000 \text{ mA} \cdot \Omega$$

Por su parte, el voltímetro analógico se construye con un miliamperímetro como aparato base, con una resistencia en serie, cuyo valor permite cambiar el fondo de escala. En este caso la resistencia interna del voltímetro analógico se puede escribir como:

$$r_V(\text{k}\Omega) = \frac{\text{Fondo de escala}(\text{V})}{K(\text{mA})}$$

siendo $K = i_{\max}$, la corriente máxima del aparato base.

Los valores de K para los aparatos que se utilizan en esta práctica son:

$$K(\text{Chauvin-Arnoux}) = 45 \mu\text{A}$$

$$K(\text{YEW}) = 1 \text{ mA}$$

El voltímetro digital se construye de manera diferente, y por lo general suele tener una resistencia interna muy alta, que además es la misma para todas las escalas. El voltímetro digital usado en esta práctica tiene una resistencia interna $r_V = 10 \text{ M}\Omega$.

APÉNDICE 3: ASIGNACIÓN DE ERROR A LAS MEDIDAS REALIZADAS CON EL POLÍMETRO DIGITAL

DC VOL TAGE

Range	Accuracy	Resolution
200mV	$\pm 0.5\%$ of rdg ± 1 digits	100 μ V
2V	$\pm 0.8\%$ of rdg ± 1 digits	1mV
20V		10mV
200V		100mV
1000V		1V

AC VOL TAGE

Range	Accuracy	Resolution
200mV	$\pm 1.2\%$ of rdg ± 3 digits	100 μ V
2V	$\pm 0.8\%$ of rdg ± 3 digits	1mV
20V		10mV
200V		100mV
700V	$\pm 1.2\%$ of rdg ± 3 digits	1V

DC CURRENT

Range	Accuracy	Resolution
20 μ A	$\pm 2.0\%$ of rdg ± 5 digits	10nA
200 μ A	$\pm 0.8\%$ of rdg ± 1 digits	0.1 μ A
2mA		1 μ A
20mA		10 μ A
200mA		100 μ A
2A	$\pm 1.2\%$ of rdg ± 1 digits	1 mA
10A	$\pm 2.0\%$ of rdg ± 5 digits	10 mA

AC CURRENT

Range	Accuracy	Resolution
20 μ A	$\pm 3.0\%$ of rdg ± 7 digits	10nA
200 μ A	$\pm 1.8\%$ of rdg ± 3 digits	0.1 μ A
2 mA	$\pm 1.0\%$ of rdg ± 3 digits	1 μ A
20 mA		10 μ A
200 mA	$\pm 1.8\%$ of rdg ± 3 digits	100 μ A
2A		1 mA
10A	$\pm 3.0\%$ of rdg ± 7 digits	10 mA

RESISTANCE

Range	Accuracy	Resolution
200 Ω	$\pm 0.8\%$ of rdg ± 3 digits	0.1 Ω
2K Ω	$\pm 0.8\%$ of rdg ± 1 digits	1 Ω
20K Ω		10 Ω
200K Ω		100 Ω
2M Ω		1K Ω
20M Ω	$\pm 1.0\%$ of rdg ± 2 digits	10K Ω

PRÁCTICA N° 2: MEDIDAS DE CORRIENTE ALTERNA. EL OSCILOSCOPIO

Objetivos: Manejo de osciloscopio y polímetro en medidas de corriente alterna.

Material: polímetro, osciloscopio, generador de funciones, generador de corriente alterna de frecuencia y amplitud fijas y componentes R, L y C.

1. INTRODUCCIÓN

En esta práctica vamos a realizar una serie de medidas de corriente alterna utilizando tanto un polímetro como un osciloscopio. En corriente continua las magnitudes vienen caracterizadas únicamente por un valor numérico, mientras que en corriente alterna hay que considerar amplitudes y fases. En esta práctica pondremos de manifiesto esas diferencias y utilizaremos las medidas para obtener los parámetros característicos de los elementos utilizados en los circuitos.

Como ya vimos en la práctica 1, **el polímetro** es un aparato que puede medir diversas magnitudes. Cada tipo de medida o función del polímetro, así como el correspondiente margen de medida (fondo de escala), corresponde a una posición debidamente indicada del conmutador de selección. Las posibles funciones de nuestro polímetro son:

DCV= voltímetro de corriente continua

ACV= voltímetro de corriente alterna

OHM= óhmetro o medidor de resistencias

DCA= amperímetro de corriente continua

ACA= amperímetro de corriente alterna.

Las unidades de la cantidad que se lee en la pantalla corresponden a la unidad asociada al fondo de escala seleccionado.

Para conseguir una medida lo más precisa posible con el polímetro y evitarle posibles daños, seguiremos el siguiente procedimiento. **ANTES DE CONECTAR** el polímetro al circuito el conmutador debe situarse en la posición que seleccione la función correcta y en el mayor margen o escala posible. Seguidamente conectamos el polímetro. A continuación iremos disminuyendo el fondo de escala, **GIRANDO MUY SUAVEMENTE EL CONMUTADOR**, hasta que aparezca un “1” en la pantalla (lo que indica que la medida sobrepasa el valor máximo de la escala), para “subir” finalmente hacia la escala inmediata superior. Así conseguiremos el mayor número de cifras significativas.

En el caso del polímetro digital que utilizamos en esta práctica, el error que debemos asignar a la medida es mayor que el valor más pequeño que puede apreciarse en la pantalla (resolución). Dicho error real depende de la función de medida y de la escala que se use, y puede calcularse para cada medida siguiendo las instrucciones del apéndice 3 de la práctica 1.

A continuación recordamos cómo debe conectarse el polímetro cuando se use como voltímetro, amperímetro y óhmetro:

- CUANDO SE USE COMO VOLTÍMETRO, EL POLÍMETRO DEBE CONECTARSE EN PARALELO (ver figuras 1 y 2).

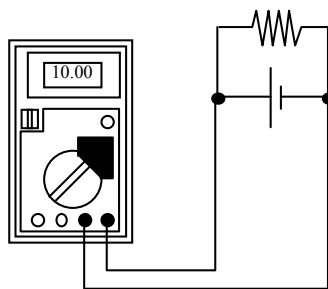


Figura 1

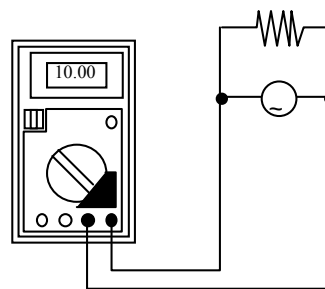


Figura 2

- CUANDO SE USE COMO AMPERÍMETRO, EL POLÍMETRO DEBE CONECTARSE EN SERIE (ver figuras 3 y 4).

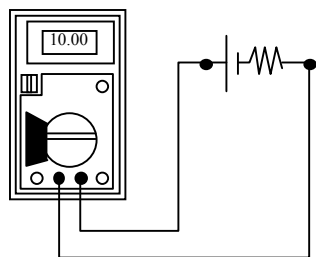


Figura 3

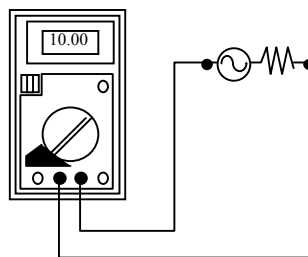


Figura 4

- CUANDO SE USE COMO ÓHMETRO, HAY QUE DESCONECTAR LA RESISTENCIA A MEDIR DE CUALQUIER CIRCUITO DONDE PUDIERA ESTAR CONECTADA, es decir, que para medir el valor de una resistencia con el óhmetro del polímetro la resistencia debe estar completamente aislada de cualquier circuito, como indica la figura 5.

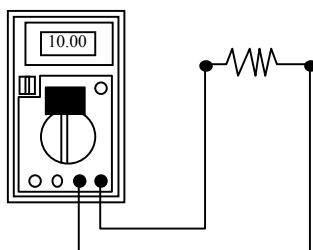


Figura 5

Por otra parte, el **osciloscopio** es un aparato que proporciona una representación gráfica XY en su pantalla. En la configuración más usual, dicha representación gráfica corresponde a la variación de una tensión con el tiempo (eje X = tiempo, eje Y=tensión medida). En esta práctica podremos comparar las medidas de amplitud realizadas con el osciloscopio en esta configuración, con los valores medidos con un polímetro.

Una segunda configuración del aparato permite representar dos tensiones, una (eje Y) en función de la otra (eje X), dejando el tiempo como un parámetro. Esta configuración la utilizaremos en esta práctica para medir diferencias de fase entre

dos señales. En los apéndices A y B al final de guión se resume el funcionamiento y las funciones de los mandos del osciloscopio así como la descripción de los métodos de medida de desfases.

Antes de comenzar las medidas de la práctica se recuerda que el error de sensibilidad de una medida directa es el correspondiente al valor más pequeño que puede apreciarse. Así pues, cada vez que se haga una medida con un aparato anotad la escala en la que se hace y la sensibilidad de dicha escala (que no tiene porqué ser la división más pequeña).

IMPORTANTE: En el caso de tener una fuente de alimentación con dos salidas independientes, una de corriente continua y otra de alterna, no se deben mezclar nunca ambas salidas, ya que se puede DAÑAR SERIAMENTE LA FUENTE. En caso de mínima duda para identificar los bornes correspondientes a las dos salidas consultad con el profesor.

2. MANEJO DEL OSCILOSCOPIO Y MEDIDAS DE COMPROBACION

El objetivo de este apartado es entender el papel de cada uno de los mandos de control del osciloscopio y hacer medidas aprender a hacer las medidas básicas. Para ello se deben leer paralelamente los apéndices A "Mandos del Osciloscopio" y B "Generador de Señal". En esencia se trata de seguir el esquema:

- a) Enchufar el osciloscopio a la red y conectarlo con el mando POWER.
- b) Conectar la señal procedente de un generador (ver Apéndice "GENERADOR DE SEÑAL") al canal 1 (CH I). Situar los mandos de control del disparo en modo automático e interno (ver A.1.3). Ajustar los mandos de control del canal de entrada (A.1.4) y los mandos de control del eje horizontal (A.1.2) hasta conseguir una imagen estable que incluya unos pocos períodos de la señal.
- b) Una vez obtenida una imagen estable en la pantalla del osciloscopio, estudiar uno por uno los mandos del osciloscopio y del generador de señal siguiendo los apéndices A y B.
- c) Recordar que para hacer medidas de tensión en el eje vertical o de tiempos en el eje horizontal, los botones centrales de los conmutadores de dichas escalas deben situarse en la posición de calibrado (ver indicaciones en el apéndice A.1.2 y A.1.4).
- d) Para visualizar la tensión de barrido interno del osciloscopio, desconectar las señales de los canales 1 y 2, y variar el tiempo de barrido (mando de control del eje horizontal: TIME/DIV) en un tiempo muy largo (1 ó 2 segundos). Observaremos que aparece un punto en la pantalla que recorre la pantalla horizontalmente. Comprobar que el tiempo que tarda en recorrer cada cuadro (grande) es el tiempo de barrido fijado con el mando de control.

Dejando los mandos del generador de señal fijos en una posición cualquiera, mediremos la amplitud y frecuencia de la señal que esté proporcionando:

- a) Medida de tensiones: amplitud de una señal armónica.

Contando el número de divisiones verticales (cuadros grandes) que abarque en la pantalla la señal desde su máximo hasta su mínimo, y multiplicando por la escala que indique el mando volts/div. , obtendremos lo que se llama la ddp de pico a pico, que es 2 veces la amplitud de la señal armónica. Es decir, para una señal de la forma: $v(t)=v_0\text{sen}(\omega t+\phi)$, la tensión de pico a pico vale $2v_0$. El valor eficaz de dicha tensión (que es lo que mediríamos con un voltímetro de corriente alterna)

se calcularía dividiendo por la raíz cuadrada de dos: $V_{\text{eficaz}} = v_0 / \sqrt{2}$. Para realizar esta medida debemos recordar que la señal se puede desplazar en la pantalla tanto en el eje horizontal como en el vertical.

b) Medida de tiempos: período y frecuencia de una señal armónica.

Contando el número de divisiones horizontales (cuadros grandes) correspondientes a una longitud de onda de la señal (distancia entre dos máximos consecutivos o dos mínimos consecutivos), y multiplicándolo por la escala que indique el mando TIME/DIV, obtendremos el período de la señal (T). La frecuencia será simplemente su inverso y deberá coincidir (dentro del margen de incertidumbre correspondiente) con la indicada en los mandos del generador ($f=1/T$). Para realizar esta medida debemos recordar que la señal se puede desplazar en la pantalla tanto en el eje horizontal como en el vertical.

3. MEDIDA DE FRECUENCIAS POR EL METODO DE LAS CURVAS DE LISSAJOUS

Este apartado es una aplicación de la configuración XY del osciloscopio: representación de una tensión Y en función de otra X.

Las **curvas de Lissajous** son las trayectorias que sigue un punto en el plano XY al componer dos movimientos armónicos simples perpendiculares. Estas curvas tienen formas características y simples cuando la relación entre las frecuencias de los movimientos armónicos es una fracción sencilla. Esta propiedad puede utilizarse para medir frecuencias y en particular para determinar las frecuencias múltiplo y submúltiplo de otra frecuencia dada como referencia.

En nuestro caso utilizaremos las curvas de Lissajous para determinar la frecuencia de un oscilador de frecuencia fija. Para obtener una curva de Lissajous en la pantalla del osciloscopio procederemos como sigue:

- Pasaremos a la configuración X-Y, pulsando el conmutador correspondiente.
- Conectaremos la señal del oscilador de frecuencia fija al canal de entrada 1 (eje Y) que tomaremos como frecuencia de referencia f_1 . En caso de tener una fuente de alimentación con dos salidas (DC y AC), deberá utilizarse la salida AC.
- Conectaremos la señal del generador de frecuencia variable al canal de entrada 2 (eje X). Ajustar los mandos de ambos canales para obtener una figura de tamaño razonable en la pantalla, que inicialmente puede tener la apariencia de un simple borrón rectangular.
- Variando la frecuencia f_2 del generador (eje X) buscaremos crear las curvas más sencillas posibles: una elipse, un "ocho", etc. (encontrar al menos 6 curvas).

Dada la imposibilidad práctica de ajustar exactamente la frecuencia del generador, las curvas de Lissajous suelen presentar una deriva continua, prueba de la sensibilidad del método. Debemos conformarnos con tomar mentalmente una fotografía instantánea de las curvas más sencillas. Para una figura de Lissajous cualquiera, la relación entre las frecuencias de los dos movimientos armónicos que la componen puede obtenerse mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de cortes de la curva con el eje Y}}{\text{N}^\circ \text{ de cortes de la curva con el eje X}} = q$$

Anotar los diagramas de las figuras más sencillas que se obtengan y los valores de q correspondientes (la frecuencia f_2 es la frecuencia que marca el mando del generador de tensión):

Diagrama	q	f ₂ medida	f ₁ calculada

Si representamos posteriormente f_2 en función de q, podremos obtener f_1 como la pendiente de la recta de ajuste de los puntos experimentales, ya que $f_2 = q f_1$.

4. MEDIDAS DE CORRIENTE ALTERNA CON POLÍMETRO Y OSCILOSCOPIO

1) En primer lugar, fijaremos la frecuencia del generador de funciones a un valor $f = 1$ kHz. Mediremos la tensión que suministra, $|\varepsilon|$ (con el mando de amplitud al máximo). Haced la medida de dicha tensión utilizando el polímetro y el osciloscopio, comparando los valores medidos con ambos aparatos. Tened en cuenta que para la medida con osciloscopio debe utilizarse un cable coaxial. Para comparar las medidas con ambos aparatos hay que recordar que el polímetro mide el valor eficaz, mientras que con el osciloscopio se mide la amplitud.

2) Medida del coeficiente de autoinducción L de la bobina

Medida con polímetro:

2a) Medir con el polímetro el valor de R y el de la resistencia de la bobina R_B .

2b) Montar el circuito de corriente alterna de la figura 6, **conectando correctamente el borne de tierra.**

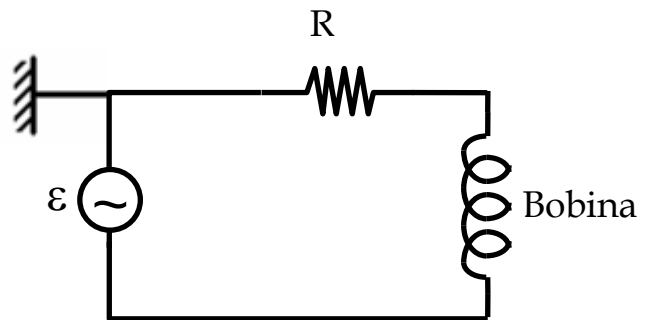


Figura 6

2c) Medir la ddp en los bornes de R ($|V_R|$). Observemos que en régimen de corriente alterna el voltímetro mide el módulo de la tensión correspondiente.

2d) Medir la ddp en los bornes de la bobina $|V_B|$. Observemos que en régimen de corriente alterna el voltímetro mide el módulo de la tensión correspondiente.

Aunque los valores que se miden con el polímetro (en AC) son eficaces, no es necesario convertir a valores de amplitud para hacer los cálculos posteriores, dado que eso no cambia el valor de las impedancias (los valores de corriente que se obtienen son también eficaces).

La medida de $|V_R|$ permite calcular $|I|$ teniendo en cuenta el valor de R (el cual se ha medido en el apartado anterior) de una forma sencilla: $|I| = |V_R| / R$. Teniendo en cuenta que la impedancia compleja de la bobina es $Z_B = R_B + jL\omega$, la medida de $|V_B|$ permite calcular el módulo de la impedancia compleja de la bobina $|Z_B|$, de la forma $|Z_B| = |V_B| / |I|$. Con este valor, podremos despejar fácilmente el valor de L teniendo en cuenta que $|Z_B| = (R_B^2 + (L\omega)^2)^{1/2}$ (R_B la hemos medido anteriormente, y la frecuencia angular ω viene dada por $\omega = 2\pi f$ rad/s).

Medida con osciloscopio:

2e) Medir la diferencia de fase entre ε y V_R en el circuito de la figura 6. La señal de ε la llevaremos al canal I y la de V_R al canal II. Es muy importante llevar cuidado con la conexión de los bornes correspondientes a las mallas de los cables

coaxiales, que deben situarse en un punto común, evitando así cortocircuitos. En este caso la única posibilidad es que ese punto común sea la **salida de la fuente marcada con el símbolo de tierra** (ver figura 6). Determinaremos la diferencia de fase Φ entre las dos señales usando el método de la elipse y también midiendo el retardo temporal (ver apéndices C y D).

V_R está en fase con la corriente I ($V_R = IR$) y $\varepsilon = I Z_T$, siendo $Z_T = R + R_B + jL\omega$ la impedancia total del circuito. Por lo tanto, la diferencia de fase entre ε y V_R es el argumento de Z_T , es decir, $\tan \Phi = L\omega / (R + R_B)$. Con el valor medido de Φ y los valores de R , R_B y ω conocidos, se puede despejar el valor de L y comparar con el obtenido a partir de las medidas con el polímetro.

3) Medida de la capacidad del condensador

Medida con polímetro:

3a) Montar el circuito de la figura 7, conectando correctamente el borne de tierra. Comprobar el valor de tensión de la fuente de alimentación (debe ser, dentro del margen de sensibilidad del aparato, el mismo medido en los apartados anteriores, $|\varepsilon|$).

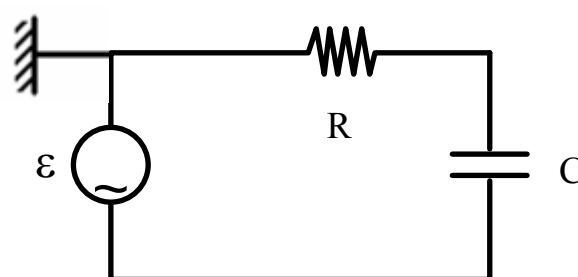


Figura 7

3b) Medir la ddp en los bornes de R ($|V_R|$).

3c) Medir la ddp en los bornes del condensador $|V_C|$.

La medida de $|V_R|$ nos permite calcular el módulo de la intensidad, teniendo en cuenta el valor de R ($|I| = |V_R| / R$). La medida de $|V_C|$ permite calcular el módulo de la impedancia compleja del condensador $|Z_C|$, ya que $|Z_C| = |V_C| / |I|$. Calcularemos por último C recordando que la impedancia del condensador es $Z_C = 1 / (jC\omega)$, por lo que $|Z_C| = 1 / (C\omega)$.

Medida con osciloscopio:

3d) Mediremos la diferencia de fase Φ entre ε (canal 1) y V_R (canal 2), usando como punto común para las mallas el indicado en la figura 8, **que coincidirá con el borne de la salida de tensión alterna marcado con el símbolo de tierra**. Utilizad el método de la elipse y el del retardo temporal.

Como V_R está en fase con I , e $I = \varepsilon / Z_T$, con $Z_T = R + (1 / jC\omega)$, la diferencia de fase Φ es el argumento de Z_T , por lo tanto, $\tan \Phi = -1 / RC\omega$. Con el valor medido de Φ (en realidad se mide $|\Phi|$) y los valores de R y ω conocidos, se puede despejar el valor de C y comparar con el obtenido a partir de las medidas con el polímetro.

Las medidas del resto de la práctica las haremos únicamente con el polímetro.

4) Comprobación de la suma vectorial de las tensiones en un circuito serie:

4a) Montar el circuito de la figura 8.

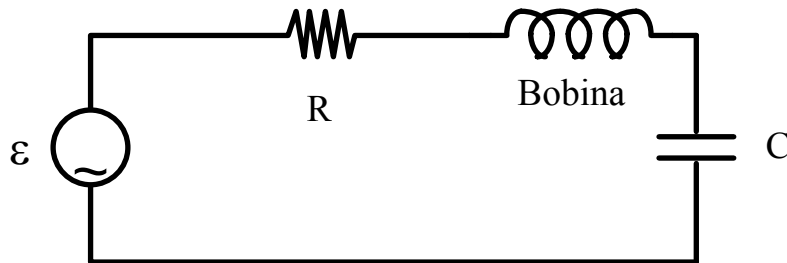


Figura 8

4b) Medir $|V_R|$, $|V_B|$ y $|V_C|$ y la ddp en los bornes del generador, $|\varepsilon|$.

4c) Comprobar que la suma de $|V_R|$, $|V_B|$ y $|V_C|$ no es igual a $|\varepsilon|$.

4d) Calcular los argumentos o desfases de V_R , V_B y V_C respecto a I , a partir de los valores calculados de R , L y C en los apartados anteriores. Para ello escoger el origen de fases en la intensidad, es decir, $I = |I|e^{j0}$. Por lo tanto:

$$V_R = |V_R|, V_B = |V_B|e^{j\phi} \text{ con } \phi = \arctg((L\omega)/R_B), V_C = |V_C|e^{-j\pi/2}$$

Calcular la suma de números complejos $V_R + V_B + V_C$. Verificar que se cumple la relación: $\varepsilon = V_R + V_B + V_C$, comparando $|V_R + V_B + V_C|$ con $|\varepsilon|$.

5. CUESTIONES

Realizar los cálculos y comprobaciones indicados a lo largo del guión.

APÉNDICE A: EL OSCILOSCOPIO. CONFIGURACIONES Y CONTROLES BÁSICOS

El osciloscopio es esencialmente un tubo de rayos catódicos en el que se genera un haz de electrones que produce un punto luminoso al chocar contra una pantalla recubierta interiormente de material fluorescente (ver figura 9). Durante el recorrido, los electrones pasan entre unas placas metálicas P_1 situadas en posición horizontal y otras P_2 situadas en posición vertical. Aplicando una diferencia de potencial (ddp) a las placas P_1 y P_2 se consigue controlar la posición del haz de electrones en la pantalla.

Si la ddp aplicada a un par de placas es variable con el tiempo, el haz de electrones seguirá esta variación. Por ejemplo, aplicando a P_1 una tensión sinusoidal, el punto luminoso describirá en la pantalla un movimiento armónico simple en dirección vertical. Si ahora aplicamos a P_2 una tensión creciente linealmente con el tiempo, el punto luminoso se verá obligado a recorrer la pantalla en dirección horizontal con velocidad constante. La composición de estos dos movimientos hace que el punto luminoso dibuje en la pantalla la tensión aplicada inicialmente a las placas P_1 en función del tiempo. El osciloscopio consigue generar una gráfica estable en la pantalla a base de superponer rápidamente la misma imagen.

La tensión creciente linealmente con el tiempo aplicada a las placas P_2 se llama **tensión de barrido interno del osciloscopio**, por ser una tensión generada dentro del osciloscopio y que obliga al punto luminoso a barrer horizontalmente la pantalla.

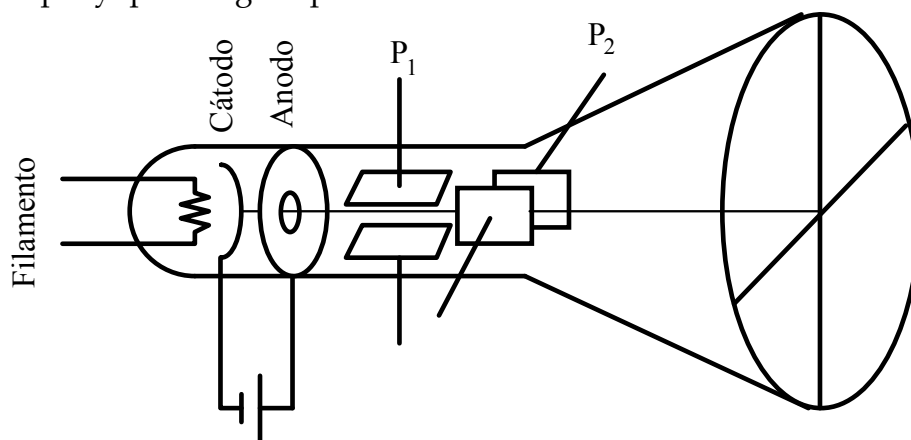


Figura 9

A continuación se resumen los controles básicos del osciloscopio en las dos configuraciones usuales.

A.1. CONFIGURACIÓN N° 1: REPRESENTACION DE UNA DDP EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

A.1.1 Control del haz de electrones:

POWER = conecta el osciloscopio.
INTENSITY = controla el brillo de la imagen de la pantalla.
FOCUS = enfoca la imagen haciéndola nítida.

A.1.2 Control del eje horizontal:

TIME/DIV = fija la escala del eje horizontal (tiempo/división grande) mediante la selección de la frecuencia de barrido interno. El botón central del conmutador permite un ajuste continuo de la escala del eje X, y sólo en su posición de calibrado (completamente girado a la izquierda o a la derecha, dependiendo del modelo, a veces está indicado al lado del mismo conmutador) la escala de la pantalla es la indicada en el selector TIME/DIV.
X-POS. = controla la posición del eje horizontal, sirviendo para centrar la imagen.
X- MAG. = permite ampliar la escala horizontal en un factor 10.

A.1.3 Control del disparo del barrido interno (TRIGGER):

AT/NORM. = En la posición AT (sin pulsar) realiza el control de disparo de barrido en modo automático, mientras que en la posición NORM. (pulsado) permite controlar el nivel de trigger manualmente.
LEVEL = fija el valor de la tensión de entrada con el que se inicia (o se dispara) el trazado de la misma en la pantalla. Con ello se consigue que trazados sucesivos se superpongan al iniciarse siempre en el mismo punto, dando así una imagen inmóvil en la pantalla. La imagen resulta inestable cuando este mando está desajustado. Este mando sólo actúa en modo NORM.
+/- = determina el que el inicio del trazado de la curva se realice con pendiente positiva o negativa respectivamente.
EXT = Sin pulsar conecta el disparo del barrido interno, y pulsado permite la sincronización del barrido con una señal exterior, que deberá conectarse en la entrada TRIG. INP.

A.1.4 Control de los canales de entrada (eje vertical):

El osciloscopio de esta práctica tiene dos canales de entrada (CH I y CH II), lo que significa que pueden representarse simultáneamente dos tensiones distintas en función del tiempo. Cada uno dispone de un conector para cable coaxial tipo BNC, señalado con la palabra VERT. INP., que se utiliza

para conectar la tensión que se desee representar gráficamente en la pantalla. Es **MUY IMPORTANTE** observar que uno de los bornes de cada una de las entradas es tierra (conectada a la malla exterior del cable coaxial), y que por tanto dicho borne sólo puede conectarse a la tierra de los circuitos en los que se miden tensiones. Cada canal de entrada se controla esencialmente con tres mandos:

Y-POS.= controla la posición del origen del eje vertical, desplazando la imagen verticalmente.

VOLTS/DIV = fija la escala del eje vertical en voltios por división grande. El botón central del conmutador permite un ajuste continuo de la escala del eje Y, y sólo en su posición de calibrado (completamente girado a la izquierda o a la derecha, dependiendo del modelo. La posición de calibrado viene indicada en el panel frontal del aparato) la escala de la pantalla es la indicada en el selector.

AC-GD-DC = conmutador de tres posiciones: filtra la señal de entrada quitando la componente de corriente continua (AC), es decir, representa la señal variable con el tiempo eliminando cualquier componente de continua; conecta el canal a tierra con independencia de la tensión que esté aplicada al borne de entrada (GD), por lo que en la pantalla aparece una recta horizontal (barrido) que podremos desplazar hacia arriba o hacia abajo, fijando así el origen de potenciales; no filtra la señal de entrada (DC), incluyendo también la componente de corriente continua que ésta pueda tener.

El conmutador CHI/II permite seleccionar qué canal se representa en la pantalla, mientras que el conmutador DUAL permite representar ambos canales simultáneamente. ADD representa la suma de las señales de los dos canales.

A.2. CONFIGURACION N°2: REPRESENTACION DE UNA DDP (CH I) EN FUNCION DE OTRA DDP (CH II)

El conmutador X-Y desconecta el barrido interno, y conecta el eje horizontal al canal de entrada CH II. Con ello los mandos de este canal pasan a controlar el eje X (salvo la posición horizontal, que se controla con el mando X-POS., ver A.1.2) y la pantalla se convierte en el plano XY: eje Y= canal CH I y eje X= canal CH II (siempre que el conmutador CHI/II esté sin apretar. En caso de que esté apretado los ejes estarán invertidos).

APÉNDICE B: GENERADOR DE SEÑAL

Un **generador de señal** es un aparato que proporciona una señal en función del tiempo cuya forma podemos controlar. Las formas más habituales son señales sinusoidales, cuadradas, triangulares, en diente de sierra, etc. Suele disponer de los siguientes mandos y conexiones:

INTERRUPTOR DE CONEXIÓN: pone en marcha el aparato, tiene dos posiciones ON (encendido) y OFF (apagado), y a veces está incorporado a otros mandos del aparato (ó está en la parte trasera).

SELECTOR DE FUNCIÓN: es un conmutador que selecciona el tipo de señal que el aparato genera. Típicamente las opciones son: señal sinusoidal, que es la más usual, señal cuadrada, señal triangular y señal en diente de sierra, pero no todos los generadores incorporan las mismas opciones.

BORNES DE SALIDA: son los bornes del generador entre los que aparece la ddp generada en el mismo. Uno de ellos es el borne de referencia y suele estar conectado a tierra. En ocasiones los bornes son un conector tipo BNC para cable coaxial, en cuyo caso el borne exterior es el de referencia (tierra). Algunos generadores, además del borne de salida habitual (generalmente con una impedancia de $50\ \Omega$ ó $600\ \Omega$), presentan una salida de referencia cuadrada (TTL) y una entrada (INPUT) para amplificación. En esta práctica sólo se utilizará la salida de baja impedancia ($50\ \Omega$).

CONTROL DE LA AMPLITUD: son los mandos que permiten variar la amplitud (voltios) de la señal generada. Suele disponerse de dos mandos: un conmutador que selecciona distintos intervalos y otro mando que permite una variación continua de la amplitud. En nuestro caso, sólo se dispone de éste segundo (AMPLITUDE).

CONTROL DE LA FRECUENCIA: son los mandos que permiten variar la frecuencia (Hz) de la señal generada. Suele disponerse de dos mandos: un conmutador que selecciona distintos intervalos o rangos de frecuencia, y otro mando que permite una variación continua de la frecuencia.

APÉNDICE C: MEDIDA DE DESFASES CON EL OSCILOSCOPIO

Dadas dos señales sinusoidales:

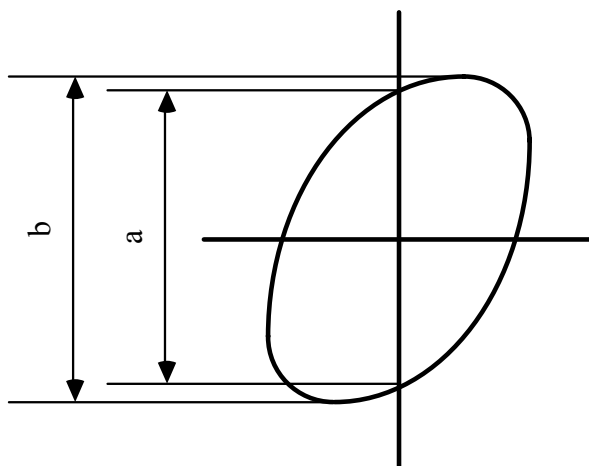
$$V_1 = V_{10} \sin(\omega t + \Phi_1)$$

$$V_2 = V_{20} \sin(\omega t + \Phi_2)$$

la medida del desfase entre ambas señales $\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ puede realizarse mediante la función XY de un osciloscopio. Previa conexión de V_1 y V_2 a los bornes de entrada de los canales A y B, la función XY configura el osciloscopio de tal modo que en la pantalla se obtiene la gráfica V_1 en función de V_2 .

La gráfica V_1 en función de V_2 es una elipse, a partir de la cual puede medirse el módulo del desfase $|\Phi|$ mediante la relación:

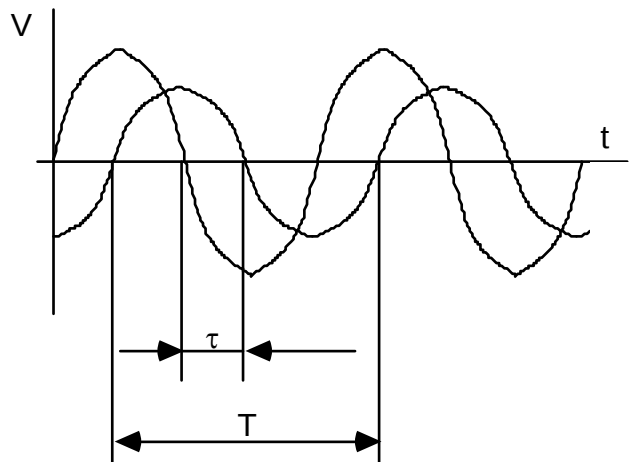
$$\sin |\Phi| = \frac{a}{b}$$



El valor de b se puede medir desplazando la posición horizontal (X-POS.) para poder ver mejor las tangentes con el eje vertical. Sin embargo, observar que para medir el valor de " a ", la elipse debe estar bien centrada ya que dicho valor queda determinado por los cortes con el eje vertical. Para centrar perfectamente la elipse podemos usar el conmutador AC-GD-DC. Pondremos el conmutador en posición GD en los dos canales. Esto equivale a desconectar las dos señales, con lo que observaremos un punto en la pantalla. Este punto lo centraremos con los mandos que nos permiten desplazar la señal de la pantalla (X-POS. para el eje horizontal, e Y-POS. para el eje vertical). A continuación volveremos a la posición inicial con lo que tendremos la elipse centrada. El cociente a/b determina el módulo de Φ , y su signo debe deducirse o bien por consideraciones físicas o bien por otras medidas distintas.

APÉNDICE D: MEDIDA DEL RETARDO TEMPORAL

La medida del retardo τ entre dos sinusoides, tal como indica la figura



permite determinar el desfase entre dos señales sinusoidales:

$$V_1 = V_{10} \sin(\omega t + \Phi_1)$$

$$V_2 = V_{20} \sin(\omega t + \Phi_2)$$

El desfase entre ambas señales $\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ viene dado por $\Phi = (2\pi\tau)/T$ (salvo un múltiplo de 2π), es decir, si medimos τ y T podremos calcular fácilmente el desfase Φ .

PRÁCTICA N°3: CIRCUITOS RESONANTES

Objetivos: utilización del osciloscopio para estudiar las características de dos circuitos resonantes (uno en serie y otro en paralelo).

Material: osciloscopio, polímetro, generador de baja frecuencia y componentes RLC.

1. CARACTERÍSTICAS DE UN CIRCUITO RLC SERIE

Al mencionar las características de un circuito resonante, como por ejemplo un circuito RLC serie, normalmente uno se refiere a la dependencia con la frecuencia de la corriente y a las diferencias de potencial en sus componentes.

En el caso de un circuito RLC serie, como el indicado en la figura 1, lo más usual es estudiar la dependencia de la corriente I con la frecuencia angular del generador ω . Esta corriente vendrá dada por la expresión:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + j(L\omega - \frac{1}{C\omega})} \quad (1)$$

Cuya amplitud $|I|$ y fase Φ vendrán dadas por (ver figura 2):

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

$$\text{tg } \Phi = -\frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} \quad (3)$$

donde hemos tomado el origen de fases en la fuerza electromotriz del generador, es decir, $\varepsilon = |\varepsilon| e^{j0}$.

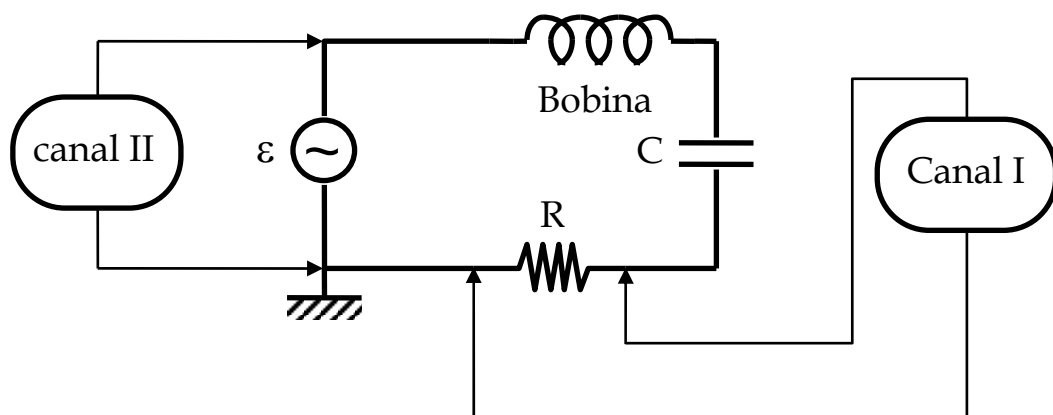


Figura 1. Circuito resonante serie RLC

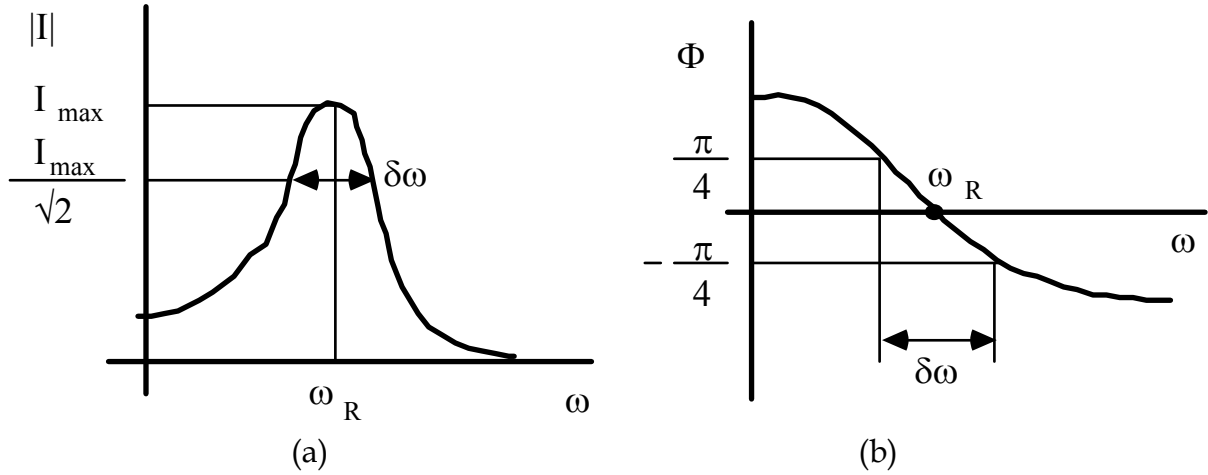


Figura 2. Características de un circuito resonante serie RLC: (a) Módulo de la corriente, (b) Fase de la corriente.

Se define la **frecuencia de resonancia** ω_R como aquella frecuencia para la cual el desfase sea cero, por lo que en nuestro caso (ver figura 2b):

$$\omega_R = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

Observemos que cuando $\omega = \omega_R$, $|I|$ tendrá su valor máximo, tal y como la figura 2a representa de forma esquemática. Una característica que se busca en los circuitos resonantes es que ese máximo de corriente sea lo más agudo posible, lo que permite desarrollar ciertas aplicaciones prácticas de los circuitos RLC, como por ejemplo filtros de frecuencia. Para medir esa característica se define el **factor de calidad** Q como 2π por el cociente entre la energía almacenada y la energía disipada en un ciclo. Esta definición es aplicable a todo tipo de sistema resonante, ya sea mecánico, electromagnético, etc. En el caso de un circuito RLC serie, otra definición de Q equivalente y de interpretación más directa es:

$$Q = \frac{\omega_R}{\delta\omega} \quad (5)$$

donde $\delta\omega$ es la anchura del pico de resonancia medida, o bien en la gráfica de $|I|$ en función de ω (figura 2a) en los puntos en los que la corriente se atenúa un factor $\sqrt{2}$ respecto a su valor máximo, o bien medida en la gráfica de Φ en función de ω (figura 2b) en los puntos en los que $|\Phi|$ toma el valor $\pi/4$.

El valor de Q en función de los componentes RLC de acuerdo con las definiciones anteriores viene dado por:

$$Q = \frac{\omega_R L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

Otro circuito resonante muy empleado es el circuito RLC paralelo, que en cierto modo tiene propiedades complementarias respecto del RLC serie. La figura 3 es el esquema del circuito que vamos a estudiar, cuyas ecuaciones teóricas pueden deducirse análogamente a las deducidas anteriormente para el circuito serie. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, hay que considerar la resistencia de la bobina R_B . Si no la consideramos, el factor de calidad de la resonancia sería ∞ , ya que no se disiparía energía en el circuito (la impedancia del paralelo bobina-condensador, Z_{BC} sería ∞ en la resonancia, y por tanto no pasaría corriente por R). El cálculo exacto es bastante complicado, pero podemos obtener relaciones sencillas, si tenemos en cuenta las aproximaciones: $R_B \ll L\omega$ y cerca de la resonancia $Z_{BC} \gg R$. Con estas consideraciones se puede obtener:

$$|I| = |\varepsilon| \frac{C}{L} \sqrt{R_B^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)^2} \quad (7)$$

$$\text{tg}\Phi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R_B} \quad (8)$$

En este caso el factor de calidad viene dado por:

$$Q = \frac{\omega_R}{\delta\omega} = \frac{1}{R_B} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

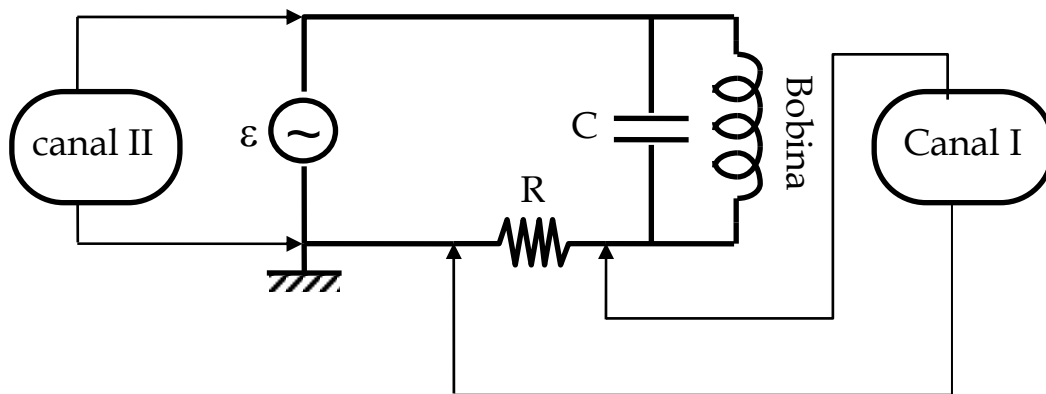


Figura 3. Circuito resonante paralelo

2. CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO RESONANTE SERIE RLC

2.1. MEDIDA DE $|I|$ EN FUNCIÓN DE ω

Montar el circuito de la figura 1 y conectar los canales del osciloscopio tal y como se indica. Recordar que la malla exterior de los cables coaxiales debe conectarse siempre a un punto común, tierra o masa, que debe coincidir con la masa del generador de señal; es decir, **todas las mallas externas** de los cables coaxiales deben estar conectadas a un único punto común (Consultar al profesor si tenéis dudas en la forma de realizar la conexión). Observar que la corriente $|I|$ se calcula dividiendo la

amplitud medida en el canal A (ó I) entre la resistencia R ($|I| = |V_R|/R$). En el eje de abscisas podemos representar f en lugar de ω por comodidad, ya que son proporcionales ($\omega=2\pi f$).

Fijar la amplitud de la señal del generador en un valor dado (canal B ó II del osciloscopio) y **ANOTAD** dicho valor ($|\varepsilon|$). Hacer un primer barrido de frecuencia y observar de forma aproximada el rango en el que se mueve la señal del canal A (ó I) así como el valor aproximado de la frecuencia correspondiente al máximo, o sea f_R ($f_R = \omega_R/(2\pi)$). Al realizar este barrido debemos observar cualitativamente el comportamiento de la figura 2a (si no lo observamos, consultar con el profesor).

Medir seguidamente con detalle (por ejemplo con pasos de 1 ó 2 kHz fuera de la resonancia, y más pequeños en torno a la resonancia) $|V_R|$ en función de la frecuencia f (en el rango entre 2 kHz y 50 kHz), construyendo la tabla:

$f(\text{kHz})$	$ V_R (\text{voltios})$

Conviene incluir en la tabla anterior el valor de $|V_R|$ justo a la frecuencia de resonancia (valor máximo, en el caso del circuito serie RLC).

Para esta secuencia de medidas **no podemos** cambiar la amplitud del generador de señal ($|\varepsilon|$), puesto que modificaríamos la estructura general de la curva (ver ecuación 2). Conviene tener presente que si por un descuido la modificamos, deberemos repetir toda la secuencia de medidas.

2.2. MEDIDA DE Φ EN FUNCIÓN DE ω

Con el mismo montaje del apartado anterior, mediremos Φ en función de ω (ó por mayor comodidad f) utilizando la configuración XY del osciloscopio (pulsando el conmutador XY que está al lado del mando TIME/DIV) y de acuerdo con las explicaciones del apéndice "Medida de desfases con el osciloscopio". Hacer un primer barrido de frecuencia y observar de forma aproximada cómo se deforma la elipse generada en el osciloscopio. Se observará que la frecuencia de resonancia ω_R corresponde al caso de una elipse degenerada en una recta, pues en tal caso $\Phi=0$.

Medir seguidamente con detalle Φ en función de f , construyendo la tabla:

f	b	a	Φ

Observar que el signo de Φ hemos de dárselo nosotros ya que el método de medida sólo nos proporciona $|\Phi|$. La figura 2b nos sirve de orientación para darle el signo adecuado a Φ .

3. CARACTERIZACIÓN DEL CIRCUITO RESONANTE PARALELO RLC

Montar el circuito de la figura 3. Repetir las medidas de los apartados 2.1 y 2.2 para el circuito paralelo. La frecuencia de resonancia sigue siendo el valor de ω que hace que el desfase sea cero, y por lo tanto, sigue cumpliéndose (4). Sin embargo, observar que el comportamiento de dicho circuito es diferente al del apartado 2, tal y como se puede deducir a partir de las expresiones (7) y (8). En la determinación del desfase Φ hay que considerar el signo a partir del análisis de (8). Para analizar los resultados conviene medir el valor de R_B con un polímetro (desconectando previamente la bobina del circuito).

4. CUESTIONES

En el circuito serie hay que considerar que el generador y la bobina tienen resistencia interna que puede no ser despreciable frente a R (sobre todo la del generador, r). En realidad, en el circuito serie podemos tener en cuenta todas las resistencias de manera muy simple, basta con cambiar R por $R+R_B+r$ en las expresiones (2),(3) y (6). En el circuito paralelo habría que hacer el tratamiento exacto para tener en cuenta todas las resistencias del circuito. El valor de R se puede deducir del código de colores, R_B se puede medir con un polímetro y r está indicado en el generador.

- a) Representar gráficamente $|I|$ en función de f para el circuito serie. Deducir de dicha gráfica el valor de f_R y luego el de L , tomando en cuenta el valor conocido de $C = 47 \text{ nF}$ (ecuación 4). Medir así mismo δf en la gráfica y evaluar el factor de calidad Q con las ecuaciones (5) y (6). Representar sobre la gráfica experimental la curva teórica (ecuación 2), comentando el acuerdo entre ambas.
- c) Representar gráficamente Φ en función de f para el circuito serie. Deducir de la gráfica f_R , δf y Q . Comparar el valor de Q obtenido con el del apartado a) y comentar los resultados.
- e) Representar gráficamente $|I|$ en función de f para el circuito paralelo. Deducir de dicha gráfica el valor de f_R y luego el de L , tomando en cuenta el valor conocido de $C = 47 \text{ nF}$ (ecuación 4). Comparar los resultados con los del apartado a). Explicar porqué el comportamiento es distinto al del circuito RLC serie. Ayuda: tener en cuenta el distinto comportamiento de la impedancia de bobina y condensador (Z_{BC}) en función de la frecuencia, en ambos circuitos.

APÉNDICE: MEDIDA DE DESFASES CON EL OSCILOSCOPIO

Dadas dos señales sinusoidales:

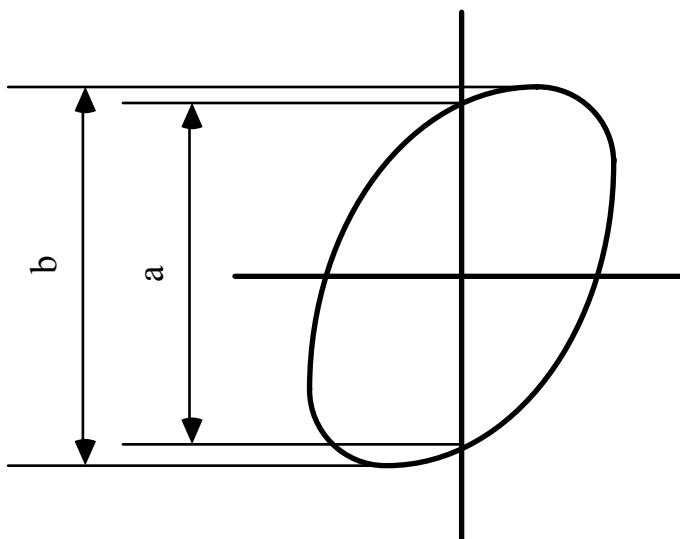
$$V_1 = V_{10} \sin(\omega t + \Phi_1)$$

$$V_2 = V_{20} \sin(\omega t + \Phi_2)$$

la medida del desfase entre ambas señales $\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ puede realizarse mediante la función XY de un osciloscopio. Previa conexión de V_1 y V_2 a los bornes de entrada de los canales A y B, la función XY configura el osciloscopio de tal modo que en la pantalla se obtiene la gráfica V_1 en función de V_2 .

La gráfica V_1 en función de V_2 es una elipse, a partir de la cual puede medirse el desfase Φ mediante la relación:

$$\sin |\Phi| = \frac{a}{b}$$



El valor de b se puede medir desplazando la posición horizontal (X-POS.) para poder ver mejor las tangentes con el eje vertical. Sin

embargo, observar que para medir el valor de " a ", la elipse debe estar bien centrada ya que dicho valor queda determinado por los cortes con el eje vertical. Para centrar perfectamente la elipse podemos usar el conmutador GD. Si pulsamos dicho conmutador para los dos canales, equivale a desconectar las dos señales, con lo que observaremos un punto en la pantalla. Este punto lo centraremos con los mandos que nos permiten desplazar la señal de la pantalla (X-POS. para el eje horizontal, e Y-POS. ó POSITION para el eje vertical). A continuación volveremos a la posición inicial con lo que tendremos la elipse centrada. El cociente a/b determina el módulo de Φ , y su signo debe deducirse o bien por consideraciones físicas o bien por otras medidas distintas.

PRÁCTICA N° 4: ESTUDIO DE TRANSITORIOS RC, RL y RLC

Objetivos: Utilización de un osciloscopio digital para estudiar los transitorios más sencillos.

Material: Osciloscopio digital e impresor gráfico, generador de baja frecuencia, componentes R, C (47nF) y L (bobina de 10000 espiras).

1. TRANSITORIOS RC, RL y RLC

Se entiende por "transitorio" de un circuito eléctrico el tiempo que transcurre desde la conexión o desconexión de algún componente hasta alcanzar el régimen estacionario de corrientes y diferencias de potencial. El caso que estudiaremos en esta práctica es el más usual consistente en la conexión o desconexión del generador:

Transitorio de conexión: $\varepsilon(t) = 0, t \leq 0$ y $\varepsilon(t) = \varepsilon, t > 0$ (1)

Transitorio de desconexión: $\varepsilon(t) = \varepsilon, t \leq 0$ y $\varepsilon(t) = 0, t > 0$

a) Transitorio RC: carga y descarga de un condensador

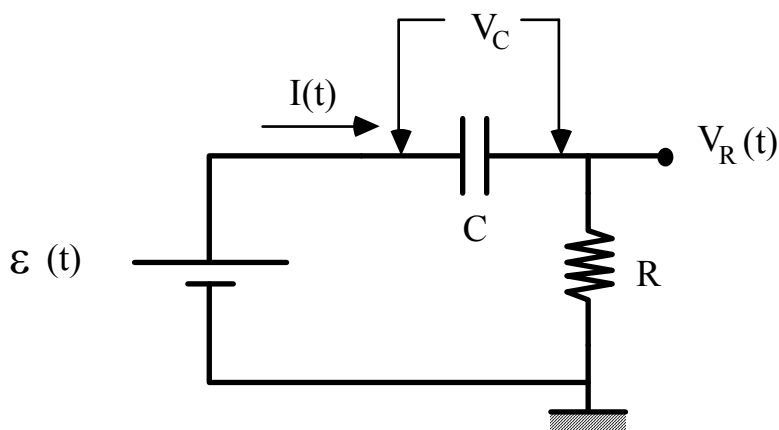


Figura 1

De acuerdo con la figura 1, nos planteamos calcular $I(t)$ al conectar o desconectar el generador en $t=0$. Suponemos para ello que el condensador se encuentra inicialmente descargado ($Q(t)=0$ y $V_C(t)=0$ en $t \leq 0$). Teniendo en cuenta la ley de Ohm y que la carga almacenada por el condensador en cada instante de tiempo es $Q(t)$, tendremos:

$$Q(t) = \int_0^t I dt \quad V_C = \frac{Q}{C} \quad (2)$$

Así pues, la diferencia de potencial proporcionada por el generador ($\varepsilon(t)$ definida en la ecuación 1, que indistintamente puede corresponder al transitorio de conexión o de desconexión) es igual, en cualquier instante de tiempo, a la diferencia de potencial en los bornes del condensador ($V_C(t)$) más la diferencia de potencial en los bornes de

la resistencia ($V_R(t)$), es decir, $\varepsilon(t) = V_C(t) + V_R(t)$. Derivando esta ecuación, y recordando que $V_R(t) = R I(t)$, encontramos que la corriente $I(t)$ que circula por el circuito satisface la siguiente ecuación diferencial:

$$R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (3)$$

La solución de dicha ecuación es:

$$I(t) = \pm \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \pm \frac{\varepsilon}{R} e^{-t/\tau} \quad (4)$$

donde el signo + corresponde al transitorio de conexión del generador, y el signo - al transitorio de desconexión. $\tau = RC$ es la constante de tiempo del transitorio RC.

En la ecuación anterior se ha considerado el caso ideal en el que toda la resistencia del circuito está concentrada en R. En realidad, el generador de fem suele tener una resistencia interna r que hay que tener en cuenta si no es pequeña comparada con el valor de R. En ese caso la corriente sería:

$$I(t) = \pm \frac{\varepsilon}{R+r} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{con } \tau = (R+r)C \quad (4)_{\text{bis}}$$

b) Transitorio RL: conexión y desconexión de una autoinducción

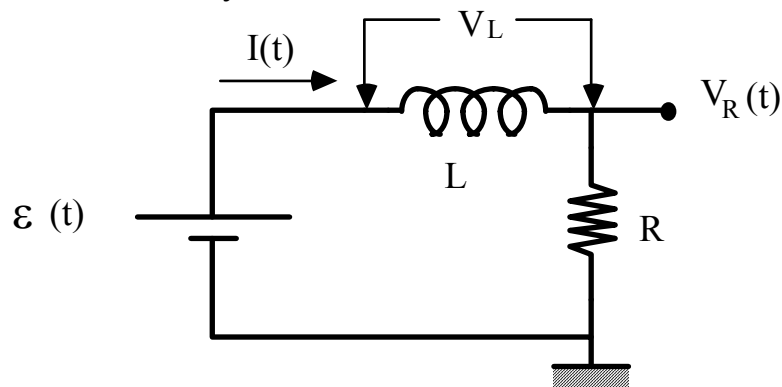


Figura 2

De acuerdo con la figura 2, nos planteamos ahora calcular la corriente $I(t)$ que circula al conectar o desconectar el generador en $t=0$. Teniendo en cuenta las características de una autoinducción, $V_L(t)$ será:

$$V_L = L \frac{dI}{dt} \quad (5)$$

Donde L es el coeficiente de autoinducción de la bobina. La tensión proporcionada por el generador ($\varepsilon(t)$ definida en la ecuación 1, que indistintamente puede corresponder al transitorio de conexión o de desconexión) es igual, en cualquier instante de tiempo, a la diferencia de potencial en los bornes de la bobina ($V_L(t)$) más

la diferencia de potencial en los bornes de la resistencia ($V_R(t)=R I(t)$), es decir, $\varepsilon(t)=V_L(t)+V_R(t)$. Por lo tanto, la corriente $I(t)$ satisface la siguiente ecuación diferencial:

$$L \frac{dI}{dt} + RI = \varepsilon(t) \quad (6)$$

La solución para el caso de conexión del generador es:

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (7)$$

y para el caso de desconexión:

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (8)$$

siendo $\tau = L/R$ en este caso la constante de tiempo del transitorio RL.

En realidad hay que considerar como en el apartado anterior la resistencia interna de la fem r , y sobre todo la resistencia de la bobina R_B . Si despreciamos el valor de r frente a R_B y R , podemos escribir como solución para el transitorio de conexión:

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R + R_B} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \text{ con } \tau = L/(R + R_B) \quad (7)_{\text{bis}}$$

c) Transitorio RLC serie: oscilaciones amortiguadas

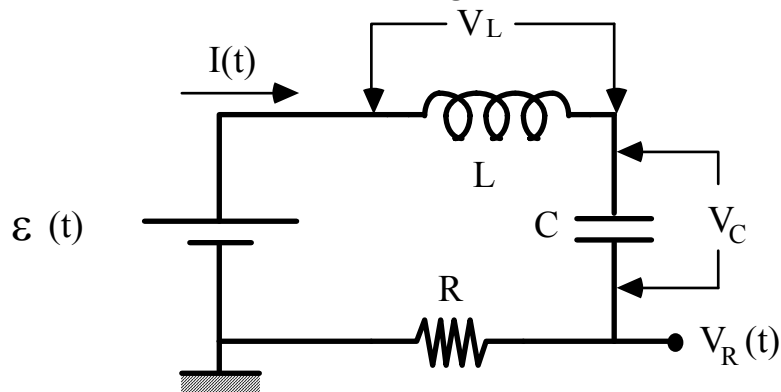


Figura 3

De acuerdo con la figura 3, nos planteamos calcular la corriente $I(t)$ que circula por el circuito al conectar o desconectar el generador. Igual que en los apartados anteriores, la tensión proporcionada por el generador ($\varepsilon(t)$ definida en la ecuación 1, que indistintamente puede corresponder al transitorio de conexión o de desconexión) es igual, en cualquier instante de tiempo, a la diferencia de potencial en los bornes de la bobina ($V_L(t)$), más la diferencia de potencial en los bornes del condensador ($V_C(t)$), más la diferencia de potencial en los bornes de la resistencia ($V_R(t)=R I(t)$), es decir, $\varepsilon(t)=V_L(t)+V_C(t)+V_R(t)$. Derivando esta ecuación, encontramos que la corriente $I(t)$ satisface la siguiente ecuación diferencial:

$$L \frac{d^2I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (9)$$

cuya solución es:

$$I(t) = \pm \frac{\varepsilon}{L(\alpha_1 - \alpha_2)} \left(e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t} \right) \quad (10)$$

donde la solución + corresponde al caso de conexión del generador y la solución - al caso de desconexión, y donde α_1 y α_2 son las raíces de la ecuación:

$$LC\alpha^2 + RC\alpha + 1 = 0 \quad (11)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{-RC \pm \sqrt{R^2C^2 - 4LC}}{2LC} \quad (12)$$

donde el signo + corresponde a α_1 , y el signo - corresponde a α_2 .

Si estas raíces resultan ser complejas, entonces se obtiene que la ecuación (10) se reduce a:

$$I(t) = \pm \frac{\varepsilon}{L\Omega} e^{-t/\tau} \sin \Omega t \quad (13)$$

siendo:

$$\Omega = \frac{\sqrt{4LC - R^2C^2}}{2LC} \quad \text{y} \quad \tau = 2L/R \quad (14)$$

lo que corresponde a una variación sinusoidal amortiguada exponencialmente con un tiempo característico τ . En los casos en que $R^2C^2 < 4LC$ se tendrá que $\Omega \cong \sqrt{1/LC}$, coincidiendo con la frecuencia propia de resonancia del circuito RLC serie.

En las expresiones (13) y (14) habrá que tener en cuenta el valor no despreciable de la resistencia de la bobina, y cambiar R por $(R+R_B)$.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

La figura 4 es el esquema del montaje experimental que nos va a permitir analizar los transitorios comentados anteriormente.

Los procesos de conexión y desconexión del generador se simulan mediante la función onda cuadrada del generador de funciones disponible. Dicha onda cuadrada genera un proceso de "conexión" cada vez que pasa de 0 voltios a V_0 , y uno de desconexión cuando pasa de V_0 a 0 voltios. El período de dicha onda cuadrada debe ser lo bastante largo para que se alcance el régimen estacionario entre conexión y desconexión, y por otra parte lo bastante corto para que se vea correctamente el transitorio en el osciloscopio. Los elementos usados en esta práctica han sido diseñados para que cumplan estos dos requisitos siempre que se trabaje a la frecuencia del generador (que define el periodo de la señal cuadrada proporcionada por el generador) indicada en cada caso.

Dado que el osciloscopio es en esencia un voltímetro, para observar $I(t)$ se medirá la diferencia de potencial $V_R(t)$ generada en la resistencia R, que resulta ser proporcional a $I(t)$ ($V_R(t) = R I(t)$).

La impedancia Z será distinta en cada caso: Z será igual al condensador para el transitorio RC, a la bobina para el transitorio RL, y a la bobina en serie con el condensador para el transitorio RLC.

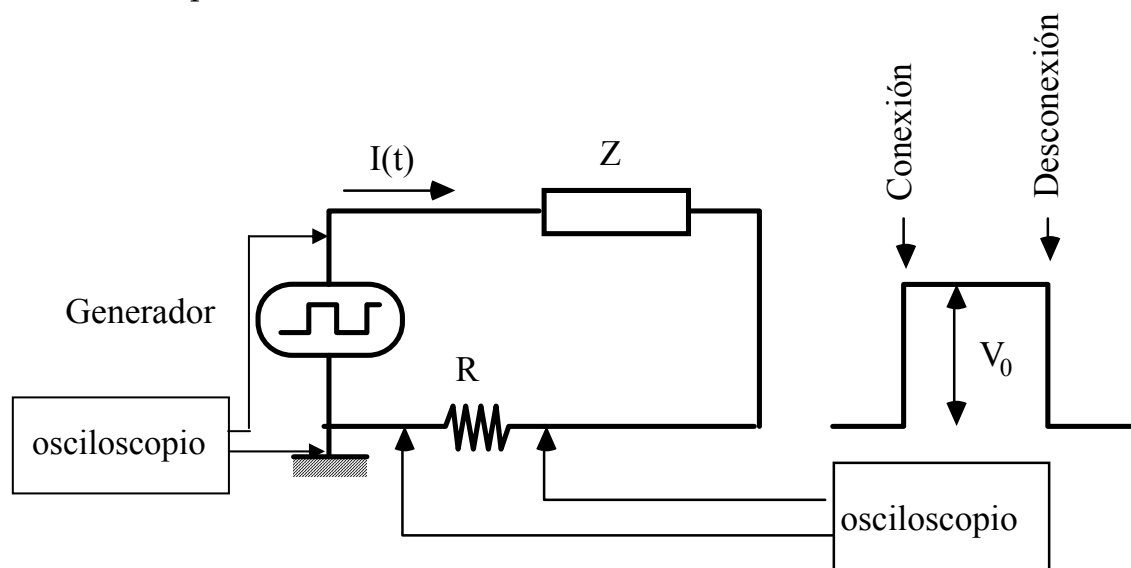


Figura 4

3. MEDIDAS

3.1. TRANSITORIO RC

Montar el circuito de la figura 1 ($R=470\ \Omega$ y $C=47\ \text{nF}$) de acuerdo con el esquema general de la figura 4 (la impedancia Z en este caso es el condensador). Si comparamos la señal del generador con la del transitorio (utilizando el modo dual, ver apéndice A: "Osciloscopio digital HM507"), se pueden hacer los ajustes necesarios para observar este último correctamente. Podremos ajustar la frecuencia del generador ($\sim 1000\ \text{Hz}$), la amplitud ε (V_0) y los controles del osciloscopio hasta obtener en su pantalla una imagen clara y grande del transitorio (figura 5). Se recomienda que el cero de V_R coincida con la línea horizontal más baja del retículo de la pantalla, y que se observe lo más ampliada posible la zona de variación exponencial, sin que la imagen se salga de escala. Si es necesario se puede ajustar la amplitud del generador para que el transitorio se vea lo más grande posible. **Medir el valor de ε** utilizando los cursores (ver apéndice A) **y anotar su valor**. Se medirá también el valor de la amplitud máxima del transitorio $V_{R\text{max}}$ (valor de V_R en $t = 0$) usando los cursores (ver apéndice A) y se anotará su valor. En la pantalla del osciloscopio se medirá a continuación el valor de τ , teniendo en cuenta que para $t = \tau$ la señal se atenúa en $1/e$. Para ello se utilizará el marcador V_t (V_t marker) desplazándolo por el transitorio hasta llegar al valor de $V_{R\text{max}}/e$ (ver apéndice A: medida de las coordenadas V - t de un punto de una señal), anotando el correspondiente valor de $t = \tau$, así como la incertidumbre del mismo (intervalo en el que se puede determinar).

Repetir la medida cambiando el valor de la resistencia ($R= 1.8\ \text{k}\Omega$ y $18\ \text{k}\Omega$). Observar cómo afecta el hecho de cambiar la resistencia al tiempo que se tarda en alcanzar el estado estacionario. En este caso el estado estacionario es una corriente nula (y por tanto V_R también nulo), ya que el condensador se comporta como un circuito abierto en corriente continua (ver ecuación (4)). Se apreciará que en cada

caso puede resultar conveniente reajustar los controles del osciloscopio e incluso bajar la frecuencia del generador para que el transitorio se imprima bien: observar que la frecuencia del generador está ligada con el tiempo entre la conexión y la desconexión que simulamos con el generador de señal, por lo que del valor de dicha frecuencia dependerá que la señal haya alcanzado el estado estacionario, y en consecuencia que podamos separar los dos transitorios de conexión y desconexión.

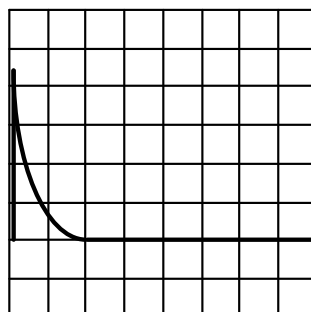


Figura 5. Conexión de un circuito RC

3.2. TRANSITORIO RL

Montar el circuito de la figura 2 ($R=470\ \Omega$ y la bobina de 10000 espiras) de acuerdo con la figura 4 (la impedancia Z en este caso es la bobina). Utilizar, como en el caso anterior, el canal libre del osciloscopio para visualizar la señal del generador. Ajustar la frecuencia del generador ($\sim 20\text{ Hz}$), la amplitud y los controles del osciloscopio para obtener una imagen clara (figura 6). A frecuencias bajas habrá que realizar un ajuste manual del nivel de trigger (mando LEVEL) para estabilizar la imagen en la pantalla. Una alternativa es utilizar el control de sincronismo externo: para ello debe conectarse un cable coaxial entre la salida marcada TTL del generador de funciones y el borne "TRIG.EXT" del osciloscopio. A continuación hay que seleccionar el modo de control de trigger externo. Para ello hacer una pulsación larga del botón TRIG. SOURCE (entre los dos mandos VOLTS/DIV) y luego una pulsación corta. Aparece un menú en la pantalla con las opciones Y1,Y2, ext, y alt. Haremos pulsaciones cortas del botón TRIG. SOURCE hasta seleccionar la opción "ext". Veremos las señales de los dos canales en pantalla. Pulsaremos en el botón CHI ó CHII para dejar únicamente la del transitorio. Ajustar las escalas y los desplazamientos horizontal y vertical, de manera que el transitorio empiece en el punto inferior izquierda del retículo de la pantalla ($V_R=0$) y para que la zona de variación exponencial se observe lo más ampliada posible sin que la imagen se salga de la pantalla. Por comodidad se puede ajustar ε para que el valor máximo del transitorio coincida con un número exacto de divisiones. Medir el valor de ε para las comprobaciones posteriores. Medir también la amplitud máxima del transitorio $V_R^{\max}$ (V_R cuando $t \rightarrow \infty$). Usar en ambos casos la medida con cursores (Apéndice A) y anotar los valores correspondientes. A continuación se medirá en la pantalla del osciloscopio el valor de τ . Para ello hay que tener en cuenta que en este caso para $t = \tau$, V_R alcanza un valor aproximado de un 60% de su valor máximo (ecuación 7_{bis}). Utilizando el marcador V_t como en el apartado anterior, nos desplazaremos por el transitorio hasta llegar al punto en el que la señal vale $0,6V_R^{\max}$, anotando el correspondiente valor de $t = \tau$.

Repetir la medida cambiando la resistencia ($R = 1.8 \text{ k}\Omega$ y $18 \text{ k}\Omega$). Observar cómo afecta el hecho de cambiar la resistencia al tiempo que se tarda en alcanzar el estado estacionario. En este caso el estado estacionario para el transitorio de conexión es una corriente continua constante (ver ecuación (7)), y para el de desconexión es una corriente nula (ver ecuación (8)), ya que una bobina (sin resistencia interna) es un cortocircuito en régimen permanente de corriente continua. Se apreciará que en cada caso puede resultar conveniente reajustar los controles del osciloscopio e incluso bajar la frecuencia del generador para que el transitorio se imprima bien: observar que la frecuencia del generador está ligada con el tiempo entre la conexión y la desconexión que simulamos con el generador de señal, por lo que del valor de dicha frecuencia dependerá que la señal haya alcanzado el estado estacionario, y en consecuencia que podamos separar los dos transitorios de conexión y desconexión.

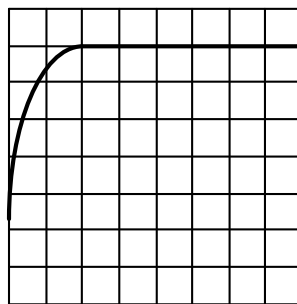


Figura 6. Conexión de un circuito RL

3.3. TRANSITORIO RLC

Montar el circuito de la figura 3 (con $R = 470 \Omega$), de acuerdo con el montaje de la figura 4 (la impedancia Z es el condensador conectado en serie con la bobina). En el segundo canal del osciloscopio mediremos la señal del generador. Ajustar la frecuencia del generador ($\sim 18 \text{ Hz}$) y los demás controles para obtener una imagen clara del transitorio (figura 7). De nuevo, en este caso, puede ser una ayuda emplear la opción del osciloscopio de control de sincronismo exterior utilizada en el apartado anterior. Conviene centrar el transitorio: para ello podemos utilizar la opción GRD (ó GD) del canal correspondiente del osciloscopio para centrar la señal de barrido en la pantalla (ver apéndice A). Ajustaremos el inicio del transitorio a la izquierda, y las escalas horizontal y vertical para ver lo más ampliada posible la zona de oscilaciones. Si es necesario retocar la amplitud del generador, midiendo y anotando su valor. Medir el periodo T usando los cursores verticales (ver apéndice A). A continuación medir las coordenadas (V,t) de los máximos y los mínimos, usando el V_t marker (Apéndice A).

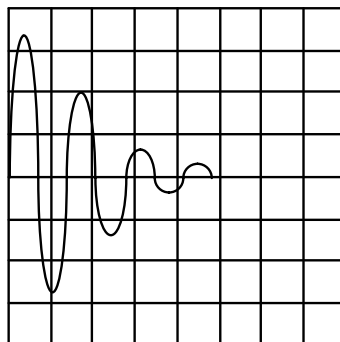


Figura 7. Conexión de un circuito RLC

Repetir las medidas cambiando la resistencia ($R=1.8\text{ k}\Omega$ y $18\text{ k}\Omega$). Observar como afecta el hecho de cambiar la resistencia al tiempo que se tarda en alcanzar el estado estacionario (en este caso el estado estacionario es una corriente igual a 0, ya que un condensador no "deja" pasar la corriente continua). Se apreciará que en cada caso puede resultar conveniente reajustar los controles del osciloscopio e incluso bajar la frecuencia del generador para que el transitorio se vea bien: observar que la frecuencia del generador está ligada con el tiempo entre la conexión y la desconexión que simulamos con el generador de señal, por lo que del valor de dicha frecuencia dependerá que la señal haya alcanzado el estado estacionario, y en consecuencia que podamos separar los dos transitorios de conexión y desconexión.

4. CUESTIONES

Tomar en cuenta el hecho de que el generador de onda cuadrada no es ideal y tiene una impedancia interna de $50\text{ }\Omega$, lo que significa que debe considerarse la presencia de una resistencia suplementaria de $50\text{ }\Omega$ en serie con los demás elementos.

- a) A partir de la constante de tiempo τ medida para el transitorio RC, obtener C, conocido el valor de R y comparar con el valor nominal. Analizar cómo varía τ con el valor de R. Ver la cuestión (d). Calcular el valor de la amplitud máxima del transitorio ($V_R^{\max}$) a partir del valor medido de ε , teniendo en cuenta la ecuación 4_{bis}. Comparad dicho valor con el medido directamente en la pantalla del osciloscopio.
- b) Para el transitorio RL, deducir el valor de L a partir de la constante de tiempo τ medida experimentalmente. Analizar cómo varía τ con el valor de R. Calcular el valor de la amplitud máxima del transitorio ($V_R^{\max}$) a partir del valor medido de ε , teniendo en cuenta la ecuación 7_{bis}. Comparad dicho valor con el medido directamente en la pantalla del osciloscopio.
- c) Analizar el transitorio RLC con las ecuaciones (13) y (14). Tomar en cuenta el valor de L deducido del apartado anterior para comprobar el valor de la frecuencia angular de oscilación Ω y el del amortiguamiento exponencial de las oscilaciones. Observar que la frecuencia de oscilación se puede medir a partir del periodo de las oscilaciones T ($\Omega=(2\pi)/T$), y que la constante de amortiguamiento τ se puede medir utilizando la envolvente de los máximos y mínimos de la curva. Para ello se puede representar el logaritmo neperiano de los valores máximos y mínimos (en módulo) de V en función de t (escala semilogarítmica), y del ajuste se pueden obtener los parámetros característicos. Analizar el papel de la resistencia R. ¿Hay algún valor de R para el que se produce amortiguamiento crítico o sobreamortiguamiento? Comentar, teniendo en cuenta la ecuación (14).

APÉNDICE A: OSCILOSCOPIO DIGITAL HM507

Desde un punto de vista práctico, un osciloscopio digital funciona esencialmente como un osciloscopio normal analógico, con la posibilidad extra de congelar la imagen dado que la misma puede memorizarse.

El osciloscopio HM507 puede funcionar en modo analógico o digital. En primer lugar nos aseguraremos de seleccionar el modo analógico. Una pulsación prolongada del mando "STOR. ON" conmuta de analógico a digital y viceversa. En el modo digital la visualización en pantalla es más brillante y aparece información adicional.

- Visualización de una o dos señales V(t):

Conectaremos la señal a uno de los canales de entrada, por ejemplo el canal I (INPUT CHI) y haremos una pulsación corta de CHI. A continuación se pueden ajustar las escalas horizontal (VOLTS/DIV) y vertical (TIME/DIV), así como los desplazamientos vertical (Y.POS/CURS.I) y horizontal (X.POS.) para visualizar cómodamente la señal en pantalla. En caso de dificultad para hacer el ajuste, se puede utilizar la opción AUTOSET, y a continuación hacer los retoques manuales que sean necesarios.

Una pulsación corta de CHII nos permitirá visualizar la señal conectada al canal II (INPUT CHII), pudiendo hacer el mismo tipo de ajustes indicados en el párrafo anterior.

En esta práctica hay que asegurarse de seleccionar en cada canal de entrada la opción DC. Para ello hacer una pulsación corta del botón AC/DC/GND que hay al lado de cada uno de los canales de entrada. Aparece en la pantalla parte inferior izquierda) las opciones DC, AC y GND. Cada pulsación permite pasar de una a otra. En la opción DC el osciloscopio representa la señal de entrada sin modificarla. La opción AC filtra la componente de continua que pueda tener la señal de entrada. Y por último la opción GND conecta el canal a tierra, lo que es equivalente a desconectar la señal. Esta opción permite centrar el nivel de cero utilizando los mandos Y-POS. correspondientes. En esta práctica se seleccionará la opción DC.

Para visualizar las dos señales simultáneamente hacer una pulsación corta de DUAL MENU. Una vez tenemos en pantalla las dos señales simultáneamente. Si se pulsa de nuevo DUAL MENU aparecen en la pantalla tres opciones: dual, add y XY. La primera visualiza simultáneamente las dos señales, la segunda la suma de las señales y la tercera corresponde al modo XY. Para volver a visualizar la señal de un solo canal basta con hacer una pulsación corta de CHI ó CHII.

- Medida de amplitud utilizando cursores:

En primer lugar hacer una pulsación prolongada de SELECT (debajo de la pantalla) hasta que aparezca el tipo de medida y valor en la parte superior derecha de la pantalla. A continuación hacer una pulsación corta de MEASURE (debajo de la pantalla). Aparecerá en la pantalla el menú CURSOR MEASURE con las posibilidades de medida. Desplazarse por el menú, utilizando los botones correspondientes a las flechas, hasta la opción ΔV , y pulsar el botón correspondiente a "Set" para seleccionar la opción y volver a la pantalla inicial. Aparecerán en

pantalla dos líneas horizontales. Pulsar el botón CURSOR POS (se iluminará el led correspondiente). Podemos desplazar cada línea con los mandos CUR.I y CURS.II (justo encima de los respectivos VOLTS/DIV) hasta hacerlas coincidir con los extremos de la señal que se quiere medir, cuyo valor aparece en la parte superior derecha de la pantalla. Para eliminar los cursores y volver al modo anterior hacer una pulsación prolongada de SELECT.

- Medida de un intervalo de tiempo

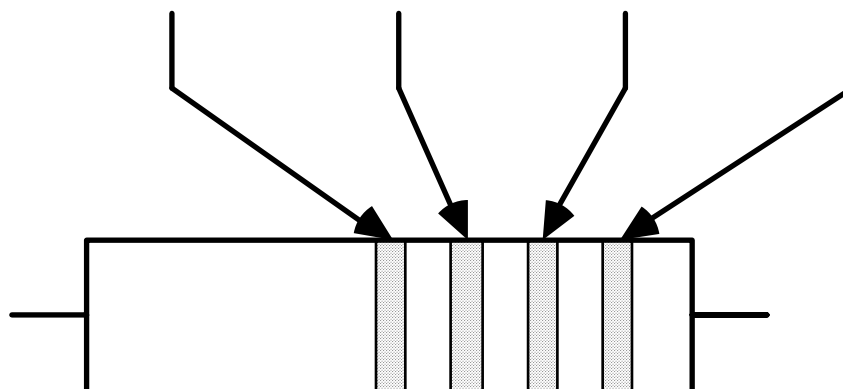
Podemos medir el intervalo de tiempo entre puntos de la señal (por ejemplo para determinar el periodo). En primer lugar haremos una pulsación prolongada de SELECT y a continuación una corta de MEASURE. Seleccionaremos la opción Δt en el menú que aparece en pantalla, pulsando finalmente la opción "Set" para seleccionar y salir del menú. Aparecerán en pantalla dos líneas verticales. Como antes, pulsando el botón CURSOR POS, podremos desplazar las líneas independientemente con los mandos CURS. I y CURS. II. El tipo de medida y su valor está indicado en la parte superior derecha de la pantalla. Para eliminar los cursores y volver al modo anterior hacer una pulsación prolongada de SELECT.

- Medida de las coordenadas V-t de un punto de una señal:

El osciloscopio HM507 nos permite determinar las coordenadas (V,t) de un punto de una señal, desplazando un cursor a lo largo de dicha señal. Para ello, en primer lugar haremos una pulsación prolongada de SELECT y a continuación una corta de MEASURE. Seleccionaremos la opción Vt Marker en el menú, pulsando la opción "Set" para seleccionar y salir. Aparece sobre la señal un marcador en forma de "diana". Para desplazar el marcador a lo largo de la señal pulsar el botón CURSOR POS y después girar el mando CURS. I. En la parte superior derecha de la pantalla tenemos indicación del tipo de medida (mkr, en este caso) así como del valor de la amplitud (V) o del tiempo (t) en ese punto. Cambiaremos de un valor al otro con una pulsación corta de UNIT (bajo de la pantalla). Después de anotar los valores de las coordenadas (V,t) que nos interesen podremos volver a la pantalla anterior con una pulsación prolongada de SELECT.

APÉNDICE B: CÓDIGO DE COLORES PARA RESISTENCIAS

COLOR	1º dígito	2º dígito	factor	tolerancia
plata	-	-	10^{-2}	$\pm 10\%$
oro	-	-	10^{-1}	$\pm 5\%$
negro	-	0	10^0	-
marrón	1	1	10^1	-
rojo	2	2	10^2	-
naranja	3	3	10^3	-
amarillo	4	4	10^4	-
verde	5	5	10^5	-
azul	6	6	10^6	-
violeta	7	7	10^7	-
gris	8	8	10^8	-
blanco	9	9	10^9	-



El valor resultante al aplicar este código de colores viene dado en ohmios.

PRÁCTICA N° 5: MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA

Objetivos: Medida de permitividades dieléctricas en baja frecuencia mediante un circuito resonante.

Material: Generador de baja frecuencia con frecuencímetro, osciloscopio, condensador plano rellenable de 255 mm de diámetro, caja de condensadores calibrados (10^5 - 10^2 pF), condensador variable calibrado (40-140 pF ó rango similar), bobina, resistencia de $47\ \Omega$, láminas de dieléctrico y cables coaxiales.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de medida de permitividades dieléctricas estáticas, en baja frecuencia, en radiofrecuencia y en microondas, consisten en esencia en la medida de la capacidad de un condensador construido con el material a estudiar. Para frecuencias superiores del espectro electromagnético, las correspondientes al infrarrojo, al visible y al ultravioleta, los métodos de medidas son distintos y consisten básicamente en la medida de la transmitancia y reflectancia del material.

La presente práctica se ciñe al desarrollo de un método de medida de permitividades dieléctricas en baja frecuencia. El fundamento de la técnica de medida es la determinación de la variación de capacidades que se produce en un condensador al rellenarlo con un material dieléctrico. Para medir estas variaciones de capacidad puede emplearse un puente de impedancias, o bien un circuito resonante. Esta segunda opción es la que se empleará en esta práctica, y es la técnica que de forma usual se utiliza cuando las medidas se realizan en radiofrecuencia y microondas, si bien en estos casos el circuito resonante puede reducirse a una cavidad resonante.

El circuito resonante que se va a utilizar es un circuito serie RLC. En primer lugar mediremos los valores del condensador en vacío, y en segundo lugar mediremos la permitividad dieléctrica del material plástico disponible.

La utilización de un circuito resonante para la medida de capacidades se fundamenta en la dependencia de la frecuencia de resonancia con el valor de la capacidad. En nuestro caso, para un circuito RLC serie, se cumple la relación:

$$\omega_R^2 = 1/(LC) \quad (1)$$

En esencia, el problema se reduce a la medida de ω_R . Para ello, o bien se mide la amplitud de la corriente, que para $\omega = \omega_R$ debe ser máxima, o bien se mide el desfase entre la corriente y la tensión aplicada, que para $\omega = \omega_R$ debe ser nulo. **Este segundo método es el que emplearemos en esta práctica, utilizando la configuración XY del osciloscopio.**

ANTES DE EMPEZAR, LEER ATENTAMENTE EL APENDICE: MANEJO DEL CONDENSADOR CON SEPARACIÓN VARIABLE.

2. CARACTERIZACIÓN DEL CONDENSADOR PLANO Y MEDIDA DE ϵ_0

En este apartado vamos a determinar el valor de la capacidad del condensador de placas plano-paralelas, con aire como dieléctrico, C_0 , en función de la separación entre placas d . A partir de estos resultados podremos medir la permitividad dieléctrica del vacío ϵ_0 .

Para ello montaremos el circuito de la figura 1 **fijando la frecuencia** del generador en un valor dado, por ejemplo **50 KHz**. Los condensadores C_1 y C_2 serán, respectivamente, la caja de capacidades calibradas y el condensador variable calibrado de 40-140 pF (o rango similar); la suma de ambos la llamaremos C'_0 (Recordemos que la capacidad equivalente de varios condensadores en paralelo es la suma de las capacidades de dichos condensadores).

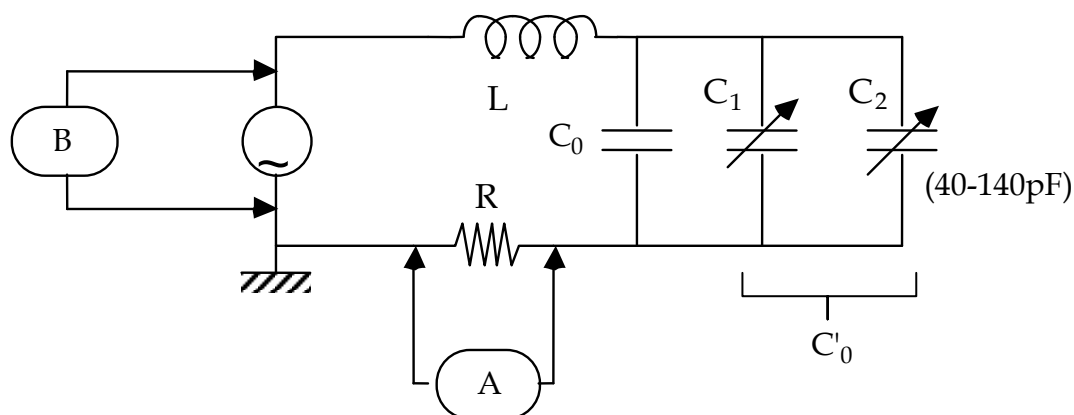


Figura 1

Como paso preliminar, determinaremos la capacidad total del circuito resonante, i.e., el valor de capacidad K que debemos conectar al circuito para que éste se encuentre en resonancia a la frecuencia elegida (frecuencia angular ω_R). Recordemos que dicha condición de resonancia se verificará cuando $\omega_R^2 = 1/(LK)$. Para medir K desconectaremos primero ambos bornes del condensador de placas plano-paralelas C_0 (i.e., hacemos $C_0=0$), y variaremos sistemáticamente los condensadores calibrados C_1 y C_2 hasta alcanzar la condición de resonancia, que se identificará experimentalmente por el método de la elipse. La lectura de las capacidades C_1 y C_2 en la condición de resonancia permite pues determinar K como $K = C'_0 = C_1 + C_2$. Téngase en cuenta que en este procedimiento la incertidumbre que debemos asignar a la medida de C_2 no viene determinada, en general, por la sensibilidad del condensador calibrado C_2 , sino por el margen o rango de capacidad en el que se observa la resonancia (elipse degenerada en recta).

A continuación, **manteniendo fija la frecuencia del generador**, conectamos el condensador de placas plano-paralelas y fijamos una distancia entre placas d , por ejemplo, $d = 1$ mm. Al añadir la correspondiente capacidad C_0 al circuito, éste dejará de estar en resonancia. Sin embargo, podemos restablecer la condición de resonancia, identificada nuevamente por el método de la elipse, modificando C'_0 adecuadamente. En dicha configuración se debe cumplir necesariamente que la capacidad total $C_0 + C'_0$ es igual a la capacidad de resonancia K , que hemos medido

anteriormente. Así pues, este procedimiento permite obtener la capacidad C_0 a través de la diferencia $C_0 = K - C'_0$.

Si variamos la distancia entre placas d cambiamos C_0 y deberemos ajustar en cada caso C'_0 para recuperar la condición de resonancia. Repetiremos el procedimiento descrito arriba para una serie de separaciones d (1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.7, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 7, 10, 20, 40 mm), y organizaremos los resultados en una tabla:

d	$1/d$	C_1	C_2	$C'_0 = C_1 + C_2 (*)$	$C_0 = K - C'_0 (*)$

(*) Dado que el rango de C_2 es el más pequeño (ajuste fino), al asignar errores a K , C'_0 y $C_0 = K - C'_0$ podemos considerar únicamente la incertidumbre de C_2 .

También se aconseja escribir el error con dos cifras cuando empiece por 1 y por 2.

Tened en cuenta que puede haber un desplazamiento de cero en el valor de la distancia entre placas. Puede ocurrir que al cerrar completamente las placas la distancia marcada no sea cero, o bien que cuando la distancia es cero hay una cierta separación entre placas (quizás por falta de paralelismo). Este desplazamiento del cero hay que considerarlo (sumando o restando una cierta distancia d_0 a las separaciones d) ya que puede afectar sobre todo a las medidas para separaciones muy pequeñas. En última instancia, se pueden eliminar las medidas para distancias pequeñas, si no se consigue una buena compensación de dicho desplazamiento.

3. MEDIDA DE LA PERMITIVIDAD DIELECTRICA

En este apartado vamos a medir la permitividad dieléctrica relativa (ϵ_r) del medio material de unas láminas dieléctricas mediante dos procedimientos.

El primer método es idéntico al del apartado 2, pero ahora las distancias d vendrán determinadas por el número de láminas dieléctricas introducidas entre las placas del condensador (Cuando se rellena el condensador variable con las láminas dieléctricas, deberemos rellenar completamente dicho condensador, es decir, deberemos ajustar la distancia entre placas de forma que “no quede espacio con aire”). Medir C para todas las separaciones d posibles (número de láminas = 1, 2, 3, etc.).

El segundo método es diferente, y se realiza en los siguientes pasos:

- 1) Rellenar el condensador con un número de láminas dieléctricas. Medir la distancia entre placas d . Determinar ahora la capacidad $C' = C_1 + C_2$ que hace resonar el circuito a 50 KHz. Se cumplirá $C+C'=K$, puesto que la frecuencia de resonancia no ha cambiado
- 2) Quitar las láminas del condensador, sin modificar la distancia entre placas. Con el condensador vacío, determinar la capacidad $C'_0 = C_1 + C_2$ que hace que el circuito resuene a 50 KHz. Igual que antes, la capacidad total del circuito es $C_0+C'_0=K$.
- 3) Calcular el incremento $\Delta C' = C'_0 - C'$

4. CUESTIONES

- a) Tomar las medidas de la capacidad de la sección 2 (condensador plano vacío) y representar $C_0 = K - C'_0$ en función de $1/d$. Se obtendrá una función lineal del tipo:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d} + C_\infty \quad (6)$$

siendo C_∞ la capacidad remanente para $d=\infty$ y $C_0=\epsilon_0 S/d$, la capacidad debida a las placas del condensador. La pendiente de esta gráfica nos permite también deducir el valor de ϵ_0 . Comparar dicho valor con el valor teórico.

- b) Repetir el análisis anterior con las medidas de la sección 3 (primer método) y deducir el valor de la permitividad dieléctrica del material. En este caso deduciremos $\epsilon=\epsilon_0\epsilon_r$ (ya que la capacidad de un condensador de placas plano-paralelas relleno de un dieléctrico de constante ϵ es $C_0=\epsilon S/d$), por lo que podremos obtener ϵ_r .

- c) A partir de $\Delta C'$ medido en la sección 3 (segundo método), encontrar la permitividad dieléctrica relativa de las láminas (para $f = 50$ kHz) teniendo en cuenta que:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{\Delta C'}{C_0(d)} \quad (7)$$

donde $C_0(d)$ es la capacidad del condensador con aire para la distancia d que hemos usado (Esta función ya ha sido deducida en la cuestión a)).

- d) Comparar los valores de la permitividad dieléctrica relativa obtenida en los apartados b) y c).

APENDICE: Manejo del condensador con separación variable

El condensador de placas plano-paralelas utilizado en esta práctica dispone de un tornillo micrométrico, que permite variar la separación entre placas de 0 a 90 mm, con una sensibilidad de décimas de milímetro, realizando la lectura sobre una escala con nonius. **ES MUY IMPORTANTE SEÑALAR QUE EL RECORRIDO MICROMÉTRICO ES SÓLO DE 20 MM.** Esto no quiere decir, sin embargo, que no se pueda variar la distancia entre placas de forma micrométrica en todo el rango (0-90 mm). Para aumentar la separación entre placas hay que girar la manivela correspondiente en sentido antihorario, y al revés en caso contrario. Dado un sentido de avance, una vez se llegue al final del recorrido micrométrico, la manivela se bloquea. **NO FORZAR NUNCA LA MANIVELA.** En ese momento lo que se debe hacer es desbloquear el tornillo lateral, que se encuentra al lado del nonius, y girar la manivela en sentido contrario al del avance que se estaba realizando, hasta que de nuevo se bloquee, **SIN LLEGAR A FORZAR.** De esta manera, se recupera el recorrido micrométrico de 20 mm, sin modificar la separación entre placas. Durante esta operación no tocar la placa móvil, porque se puede modificar su posición. A continuación, bloquearemos el tornillo lateral, y ya podemos continuar el avance en el sentido inicial. Si se quiere variar la distancia con pasos grandes, o bien se quiere abrir o cerrar el condensador desde una posición extrema a otra, se puede hacer un desplazamiento manual de la placa móvil, sin necesidad de hacer todo el recorrido con paso micrométrico. Para ello, basta con desbloquear el tornillo lateral, mover manualmente la placa hasta la posición deseada y volver a bloquear el tornillo lateral, para fijar dicha posición.

PRÁCTICA N° 6: CICLOS DE HISTÉRESIS DE MATERIALES FERROMAGNÉTICOS.

Objetivos: Medida de los ciclos de histéresis de un medio ferromagnético, observación de la saturación de la imanación, y medida de la energía de imanación. Manejo de un vatímetro.

Material: Osciloscopio digital e impresor gráfico, autotransformador variable 0-50 V, amperímetro, voltímetro, vatímetro, transformador (bobinas de diferente número de espiras), núcleo ferromagnético laminado de sección 3,6 cm² y longitud media 29 cm, y circuito RC integrador, generador de señal sinusoidal, polímetros, resistencias.

1. INTRODUCCIÓN

Entre las propiedades de un **medio ferromagnético** cabe destacar:

- Una relación no lineal entre B y H , lo que impide poder utilizar el concepto usual de permeabilidad magnética.
- La posibilidad de obtener campos magnéticos elevados con relativa facilidad, observándose un fenómeno de saturación.
- Una relación $B(H)$ con histéresis, que puede dar lugar a una imanación remanente que permite la construcción de imanes permanentes.

Por ello, cuando se plantea estudiar las características de un medio ferromagnético, lo fundamental es conseguir medir cómo varía el campo magnético B generado en su seno en función del campo H aplicado. Dicha medida da lugar a una gráfica (figura 1) que es la característica $B(H)$ o **ciclo de histéresis** del material.

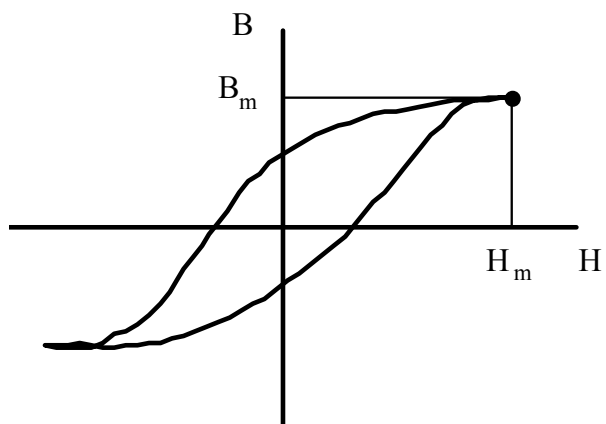


Figura 1

Los parámetros fundamentales que analizaremos a partir de dicha gráfica son:

- Las coordenadas del extremo del ciclo (H_m , B_m), cuya medida para varios H_m permite observar la saturación del medio y deducir el máximo valor de la imanación M obtenible.
- El área del ciclo, que resulta ser la energía por unidad de volumen necesaria para imanar y desimanar el material en un ciclo.

2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Montar el circuito de la figura 2. La corriente alterna (50 Hz) que alimenta la bobina del primario se controla mediante el autotransformador variable de 50 V. Observar que el valor de la intensidad **no debe sobrepasar 0.5 A** para no dañar el

vatímetro. Es muy importante no olvidar la resistencia $R_L = 33 \Omega$, que sirve para limitar la corriente que circula por el circuito. Esta resistencia debe estar colocada tal y como se muestra en la figura 2, es decir, antes del vatímetro, de manera que no afecte a la lectura del mismo. Se dispone de un amperímetro para medir la intensidad eficaz de alimentación, un voltímetro para medir la ddp eficaz aplicada, y un vatímetro para medir la potencia media consumida por la imanación del material ferromagnético.

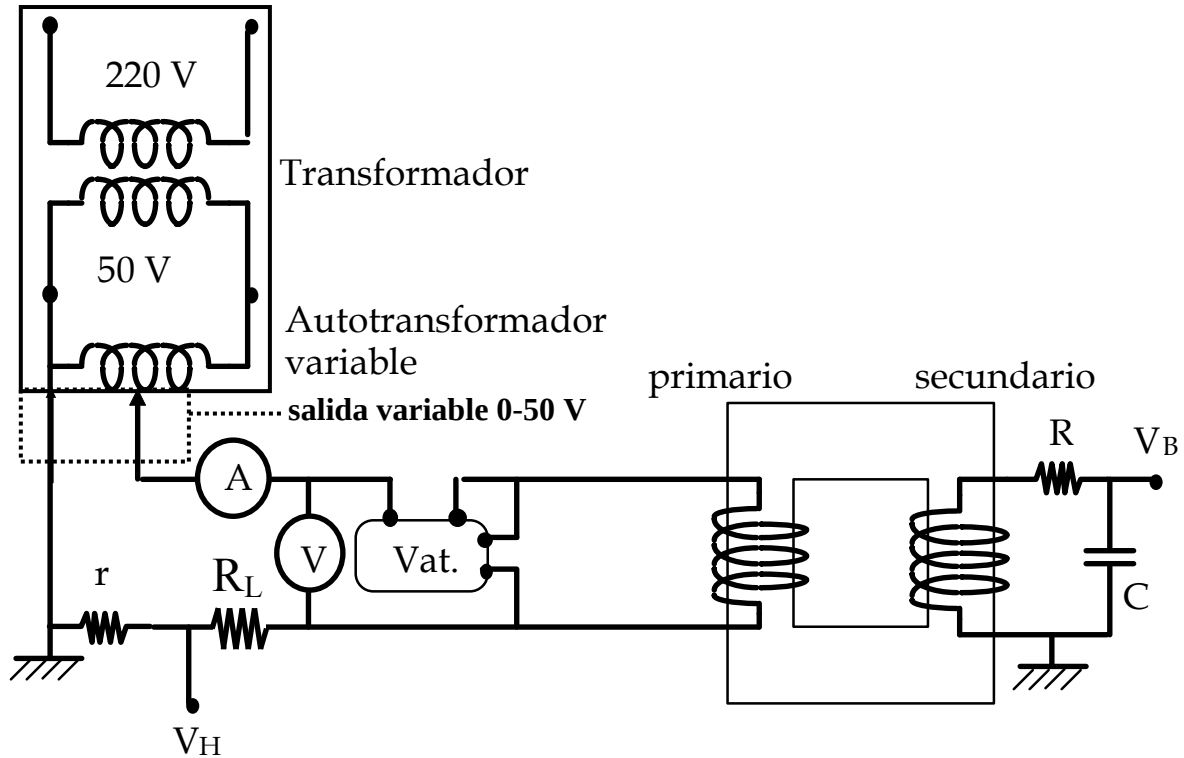


Figura 2

El primario generará un campo H que seguirá las variaciones de la intensidad aplicada, de acuerdo con la expresión:

$$H(t) = \frac{N_p}{L_m r} V_H(t) \quad ; \quad V_H(t) = r I(t) \quad (1)$$

siendo: $N_p = 400$, número de espiras del primario; $L_m = 29 \text{ cm}$, longitud media del núcleo ferromagnético y $r = 1 \Omega$ la resistencia para medir V_H .

El campo B generado se medirá mediante la tensión V_B del integrador RC:

$$B(t) = \frac{RC}{N_s S} V_B(t) \quad (2)$$

siendo: $R = 18 \text{ k}\Omega$; $C = 6,8 \mu\text{F}$; $N_s = 200$, número de espiras del secundario y

$S = 3,6 \text{ cm}^2$, área de la sección transversal del núcleo en el secundario.

Las diferencias de potencial V_H y V_B se conectarán al osciloscopio con la configuración XY de forma que correspondan a los ejes X e Y, respectivamente.

Antes de conectar la alimentación comprobar el montaje con un profesor del laboratorio.

3. MEDIDAS

Observar en primer lugar la forma de los ciclos de histéresis en la pantalla del osciloscopio, variando la intensidad aplicada (**No sobrepasar en ningún caso 0.5 A**). Centrar con cuidado los ciclos en la pantalla del osciloscopio. Construir la siguiente tabla con una decena de puntos. Imprimir únicamente el ciclo mayor, correspondiente a la corriente máxima (el más próximo a la saturación), de acuerdo con el Apéndice "Osciloscopio digital e impresor gráfico". Leer, así mismo, el Apéndice "Cursores del osciloscopio HM408", y medir V_{Hm} y V_{Bm} para cada ciclo, valores que permitirán calcular H_m y B_m , respectivamente. Los valores de V_{Hm} y V_{Bm} corresponden con las amplitudes de $V_H(t)$ y $V_B(t)$ y por lo tanto se medirán en el modo normal (no en el modo XY en el que se visualizan los ciclos), como es habitual a partir de la amplitud de pico a pico y dividiendo por 2.

Número de ciclo	I	V	V_{H_m}	V_{B_m}	Potencia	Observaciones

Elegir los puntos de la tabla en función del valor de la intensidad de forma que se repartan uniformemente entre 0 amperios y la intensidad máxima (que en todo caso **será inferior a 0.5 A**).

4. CUESTIONES

- Calcular a partir de V_{Hm} y V_{Bm} los valores H_m y B_m (mediante las ecuaciones (1) y (2)), y construir una gráfica de B_m en función de H_m . Extrapolar dicha curva para estimar la imanación de saturación del material.
- Representar la potencia consumida en cada ciclo en función de B_m en escalas logarítmicas, y deducir el coeficiente α experimental: $P \propto B_m^\alpha$, comprobando la validez de esta ecuación fenomenológica.
- Tomar el ciclo mayor y calcular gráficamente su área, A (ver Apéndice: "Medida gráfica del área del ciclo de histéresis"). Dicha área determina la energía consumida en un ciclo por unidad de volumen del material. Para expresar el área en unidades del sistema internacional (J/m^3), habrá que tener en cuenta la relación entre H y V_H (ecuación 1), así como la de B y V_B (ecuación 2). Así pues, podremos calcular la potencia consumida en el ciclo como:

$$P = A \cdot V \cdot f, \text{ siendo } V \text{ el volumen del núcleo y } f \text{ la frecuencia (50 Hz)}$$

Se puede comprobar la consistencia de este resultado con el valor de la potencia medida con el vatímetro.

APÉNDICE: OSCILOSCOPIO DIGITAL E IMPRESOR GRÁFICO

Un osciloscopio digital funciona esencialmente como uno analógico, con la posibilidad extra de congelar la imagen dado que la misma puede memorizarse. Los controles suplementarios de que dispone el osciloscopio digital HM 408 son:

- STOR: activa la digitalización de la señal: 200 puntos/div.
- DOT J: activa la unión entre puntos consecutivos mediante una línea recta.
- SINGLE: al activar esta función el osciloscopio graba la señal sincronizada con un disparo del barrido interno y la muestra en pantalla; cada vez que se pulsa el control RESET se borra la señal y se graba una nueva. Si este control está desactivado, entonces automáticamente se graban las señales de forma consecutiva.
- HOLD: congela la imagen del canal I y/o II.

En relación al impresor gráfico, deben seguirse las siguientes instrucciones:

- 1) Encender la impresora. Una vez encendida no debe apagarse hasta finalizar la práctica, para evitar la repetición innecesaria del autotest.
- 2) Activar al función "STOR" del osciloscopio, si estaba desactivada, y dejarla activa durante toda la práctica.
- 3) Ajustar las escalas de los ejes verticales para que el tamaño del ciclo sea lo más grande posible sin salirse del cuadrado central 8x8 de la pantalla, manteniendo dichas escalas en su posición de "calibradas".
- 4) Imprimirlo pulsando el mando "PRINT" del impresor gráfico. Anotar en el papel los comentarios necesarios para su identificación, en particular y si no salen automáticamente, los valores de las escalas vertical y horizontal.

APÉNDICE: CURSORES DEL OSCILOSCOPIO HM408

Los controles de los cursores están ubicados debajo de la pantalla. Estos cursores no funcionan en la configuración XY, por ello es necesario pasar a la configuración normal, para poder hacer medidas con los cursores. Los controles del modelo HM408 son los siguientes:

READOUT: activa los cursores y controla su intensidad luminosa.

Δt : activa la opción "cursores para medir tiempos".

ΔU : activa la opción "cursores para medir ddp".

$\langle \uparrow \downarrow \rangle$ CURSOR: controles para desplazar los cursores.

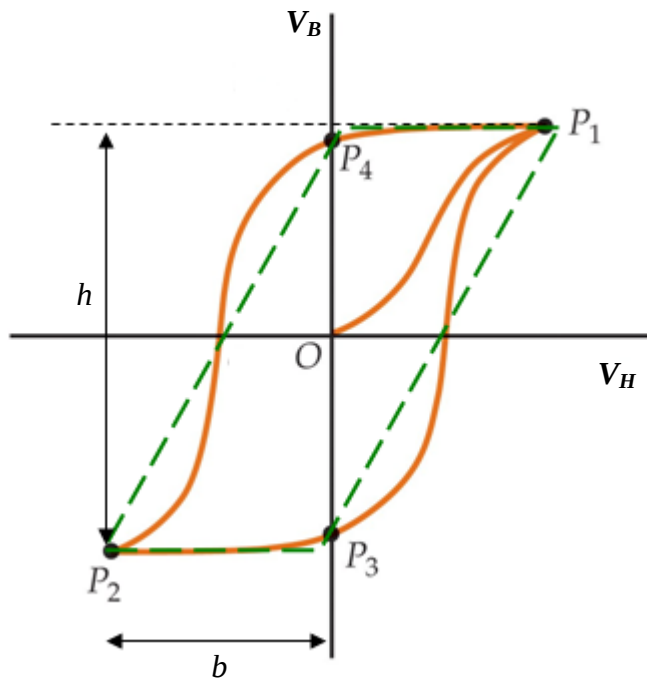
TRACK: activa y desactiva el movimiento conjunto de ambos cursores controlados por los cursores marcados I.

En esta práctica utilizaremos los cursores para medir los valores V_{Hm} y V_{Bm} . Para ello se pueden seguir los siguientes pasos:

- 1) Una vez que se tenga en la pantalla el ciclo deseado, se imprimirá y si se desea se podrá memorizar ("congelar la imagen") utilizando las teclas HOLD I y II.
- 2) Desconectando la configuración XY, se obtendrá $V_H(t)$ y $V_B(t)$.
- 3) Se conectarán los cursores ΔU y se desplazarán hasta ajustarlos con los extremos superior e inferior de la señal del canal I. Ajustaremos el control CH I/II para medir en la pantalla ΔU_1 que corresponderá a $2V_{Bm}$.
- 4) Conmutaremos ahora el control CH I/II al canal II y ajustaremos los cursores a los extremos de la señal del canal II, midiendo así ΔU_2 que será $2V_{Hm}$.
- 5) Volver a la configuración XY.

APÉNDICE: MEDIDA GRÁFICA DEL ÁREA DEL CICLO DE HISTÉRESIS

Para evaluar de forma gráfica el área del ciclo, basta con dibujar un paralelepípedo como el que muestra la figura, haciendo que el área dentro y fuera del paralelepípedo sean aproximadamente iguales. El área del ciclo se puede aproximar por la del paralelepípedo, midiendo la base (b) y la altura (h).



Tanto b como h tendrán unidades de tensión (voltios), con valores que dependerán de las escalas horizontal y vertical, respectivamente. Para convertir el área en unidades del S.I. (energía por unidad de volumen, J/m^3), hay que pasar b a unidades de H (ecuación 1) y h a unidades de B (ecuación 2).