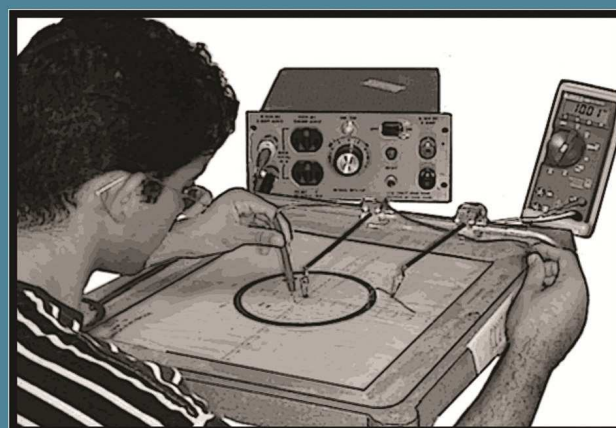
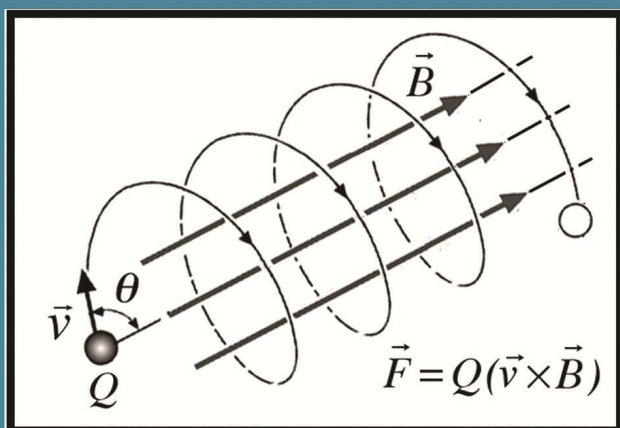
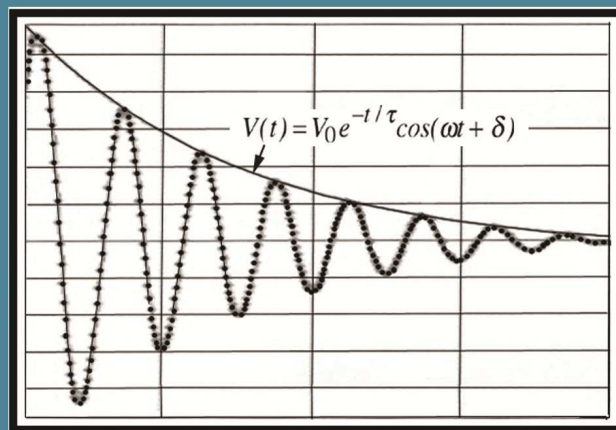
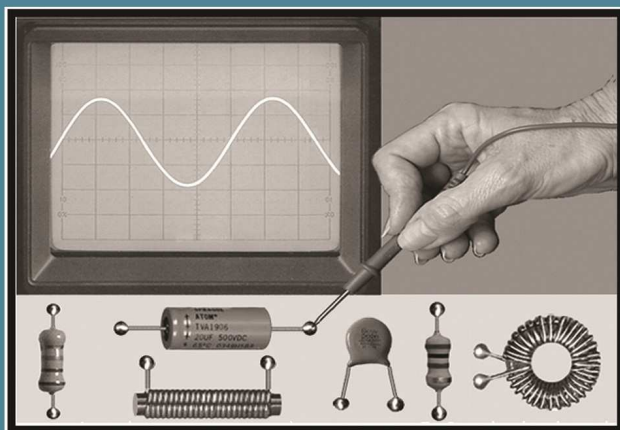


LABORATORIO 2 DE FÍSICA

EDICIÓN 2010

DOUGLAS FIGUEROA
Y ALFREDO SÁNCHEZ



LABORATORIO D
UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR

LABORATORIO 2 DE FÍSICA

DOUGLAS FIGUEROA, PhD

Profesor titular
Departamento de Física, USB

ALFREDO SÁNCHEZ, PhD

Profesor titular
Departamento de Física, USB



LABORATORIO D
Universidad Simón Bolívar

LABORATORIO 2 DE FÍSICA
Douglas Figueroa y Alfredo Sánchez

©2010 LABORATORIO D
Universidad Simón Bolívar,
Valle de Sartenejas. Baruta. Edo. Miranda Apartado postal B9000. Caracas 1 080-A. Venezuela Teléfax
9063163

*Hecho el depósito de ley
Reservados todos los derechos*

Ilustraciones
Douglas Figueroa

Coordinación de producción

Corrección
Prof. Eduardo D. Greaves

Composición y diagramación
Prof. Nery Suárez y Prof. Eduardo D. Greaves

ISBN 980-237-195-5
Depósito legal: 1f2442000530854
Impresión XEROX

Prologo de la Primera edición

El presente texto es el segundo de una serie de tres, denominada "Laboratorio de Física", que sirve de guía y material de apoyo para la realización de prácticas en los cursos básicos de los laboratorios de física de la Universidad Simón Bolívar. Esta serie representa un trabajo altamente significativo desde el punto de vista metodológico para el mejoramiento de la enseñanza de los cursos básicos de naturaleza experimental. A los profesores Douglas Figueroa y Alfredo Sánchez les correspondió la labor de preparar este segundo nivel siguiendo los lineamientos metodológicos pautados por el grupo de docentes que se propuso en el año 1995 la tarea de darle significado y relevancia al aprendizaje que obtendrían nuestros alumnos al cursar las asignaturas de, laboratorio.

La temática que se aborda en el texto está asociada a fenómenos mecánicos (3 prácticas) y fenómenos electrostáticos y electromagnéticos (11 prácticas). Las tres prácticas de mecánica se han ubicado en este curso por el nivel de conocimientos que requieren para su realización. Las once prácticas relativas a fenómenos electrostáticos y electromagnéticos pueden separarse en dos grupos: uno consistente de dos prácticas, ambas orientadas a que el estudiante aprenda el correcto uso de importantes instrumentos como lo son el multímetro y el osciloscopio; y el otro con las restantes nueve prácticas, que abordan los conceptos de campos eléctricos y magnéticos, los fenómenos electromagnéticos de inductancia, resonancia y oscilaciones amortiguadas, y, finalmente, las aplicaciones a circuitos eléctricos en regímenes transientes, continuos y alternos.

En este texto, al igual que en los demás textos de la serie "Laboratorio de Física", se combinan el estudio de importantes fenómenos básicos fundamentales con aplicaciones de dichos conceptos en instrumentos y circuitos de uso frecuente en la vida cotidiana. Las experiencias seleccionadas permiten ilustrar el fenómeno en estudio, dentro de un nivel de tratamiento cuantitativo, manteniendo una exigencia relativamente moderada en cuanto a la sofisticación de los equipos requeridos.

El curso está basado en una metodología de trabajo en grupos de dos alumnos, con el apoyo de un computador para el procesamiento e interpretación de los datos obtenidos, y, en función de la disponibilidad de equipos, de la conducción de la misma práctica por todos los equipos. Las prácticas, al igual que en toda la serie, presentan los objetivos de la experiencia, listan los materiales requeridos, contienen una breve introducción teórica, indican actividades preliminares que debe realizar el alumno antes de venir al laboratorio, describen el procedimiento de obtención y el procesamiento de los datos experimentales y, finalmente, cierra con algunas preguntas relacionadas con aspectos metacognoscitivos sobre el tema estudiado.

En el logro de esta meta deben destacarse varias contribuciones que han hecho posible su realización. En primer término, la contribución de la Sociedad de Amigos de la Universidad Simón Bolívar con donaciones para la dotación de computadoras; en segundo término, a la editorial Equinoccio por la publicación de estos materiales; en tercer término, a la política por parte del Laboratorio D y de la Unidad de Laboratorios para dar prioridad a la dotación y renovación de equipos para los laboratorios docentes; en cuarto término, la entusiasta participación de alumnos y docentes en las fases de ensayo y validación de estas guías y, finalmente, al trabajo sistemático del grupo de docentes que han promovido y ejecutado este amplio proceso de cambio e innovación educativa buscando consolidar la comprensión de la física y la trascendencia del aprendizaje de nuestros alumnos.

Nery Suárez Profesora titular
Departamento de Física

Prologo de la segunda edición

La física básica cuya enseñanza se pretende mediante este libro está bien establecida y no ha cambiado significativamente desde la primera edición. No así la tecnología que continúa avanzando permanentemente. En esta segunda edición se ha actualizado y corregido todas las guías de las 14 prácticas contenidas. Con el paso del tiempo los aparatos utilizados para la ejecución de las experiencias se dañan y obligan a su reemplazo y modernización. Igualmente se incorporan nuevas unidades tales como tableros de medición, tableros para conexiones eléctricas nuevos instrumentos: multímetros, fuentes de poder, osciloscopios, etc. Todos estos cambios obligatorios hacen las guías, inadecuadas en cuanto a las instrucciones detalladas que aparecen en las secciones de "Procedimientos de operación" o "Procedimiento experimental". En esta edición se han actualizado las guías a todos los nuevos instrumentos que se han incorporado durante los años desde que se produjo la primera edición y sus sucesivas reimpressiones. La experiencia "Practica II - 10 Corriente Alterna" ha sido revisada completamente y escrita de nuevo. Este trabajo fue realizado por el Prof. José Adames. La experiencia de "Practica II -14 Inducción electromagnética" ha sido reformada para incluir corriente directa y corriente alterna modernizando la instrumentación utilizada. Esta labor es debida al Prof. Ricardo Perez. También han sido incorporadas correcciones a los textos en muchas secciones que resultaban confusas, o daban lugar a repetidas consultas por parte de los estudiantes requiriendo la corrección de errores menores en formulas o textos. Todos los cambios realizados se han hecho tratando de respetar la estructura, diagramación, ilustraciones y procedimientos de los autores originales: Prof. Douglas Figueroa y Alfredo Sanchez. La "estrategia educativa" y "filosofía" contenidas en estos cursos experimentales son debidas al conjunto numeroso de profesores del departamento de Física de la USB que a lo largo del tiempo han dictado la materia y que han contribuido mediante ideas y sugerencias al desarrollo de los cursos experimentales de física. En este sentido estas guías son patrimonio intelectual de la Universidad y agradecemos las sugerencias que han hecho y que tengan a bien hacer los profesores para el continuo mejoramiento de este instrumento de formación de nuestra juventud.

Prof. Eduardo D. Greaves
Sartenejas, abril de 2010.

INTRODUCCION

El Laboratorio de Física te brinda la oportunidad de ponerte en contacto directo con los conceptos y principios aprendidos en los cursos teóricos, aplicándolos a situaciones reales. Durante tu estadía en este laboratorio podrás aprender varias técnicas experimentales que te permitirán, mediante el manejo de instrumentos y aparatos, demostrar el significado y la aplicación de estos conceptos y principios.

Los experimentos que vas a realizar a lo largo de este trimestre se refieren a temas que han sido seleccionados de los contenidos programáticos de los cursos introductorios de Física y cubren las áreas de Mecánica y Electromagnetismo.

A fin de facilitar el trabajo, ponemos a tu disposición esta guía de prácticas, las cuales hemos estructurado de la siguiente manera:

- **Objetivos:** Descripción breve de los objetivos a lograr.
- **Materiales:** Lista de los materiales que encontrarás en la mesa de trabajo para la ejecución de la práctica.
- **Teoría:** Explicación concisa del propósito que motiva la práctica y breve introducción de la teoría en que se fundamenta.
- **Procedimiento experimental:** Descripción de aparatos y técnicas experimentales a utilizar. Se dan instrucciones explícitas de los pasos a seguir a fin de que sirvan de guía rápida para facilitar la ejecución eficiente de la práctica, tomando en cuenta el limitado tiempo destinado a las sesiones de laboratorio.
- **Preguntas:** La práctica concluye con una serie de preguntas cuya finalidad es evaluar tu nivel de comprensión sobre la situación planteada.
- **Referencias:** Se sugieren algunos textos donde puedes encontrar explicaciones más amplias y detalladas sobre el tema.

Esperamos que al finalizar este laboratorio no solo hayas afianzado y ampliado tus conocimientos de física, sino también que hayas adquirido destrezas experimentales que te permitan encontrar respuestas a preguntas y enfrentar situaciones problemáticas que necesariamente encontrarás en tu futura actividad profesional.

INDICE

PRÓLOGO.	Pág. 1
INTRODUCCIÓN	Pág. 3
ÍNDICE	Pág. 4

LISTA DE PRÁCTICAS:

Practica II - 1: EL MULTÍMETRO.	Pág. II-01.1
Practica II - 2: CAMPOS ELÉCTRICOS	Pág. II-02.1
Practica II - 3: EL OSCILOSCOPIO	Pág. II-03.1
Practica II - 4: DINÁMICA DE ROTACIÓN	Pág. II-04.1
Practica II - 5: PÉNDULO DE TORSIÓN .	Pág. II-05.1
Practica II - 6: PÉNDULO REVERSIBLE	Pág. II-06.1
Practica II - 7: PUENTE DE WHEATSTONE.	Pág. II-07.1
Practica II - 8: ELECTRONES EN CAMPOS MAGNÉTICOS.	Pág. II-08.1
Practica II - 9: TRANSIENTES EN CIRCUITOS RC.	Pág. II-09.1
Practica II -10: CORRIENTE ALTERNA.	Pág. II-10.1
Practica II -11: RESONANCIA ELÉCTRICA.	Pág. II-11.1
Practica II -12: OSCILACIONES AMORTIGUADAS.	Pág. II-12.1
Practica II -13: EL POTENCIÓMETRO	Pág. II-13.1
Practica II -14: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA..	Pág. II-14.1

APÉNDICE A1: *CÓMO ESCRIBIR UN INFORME* Pág. II-A1.1

APÉNDICE A2: *USO DE LA COMPUTADORA.* Pág. II-A2.1

APÉNDICE A3: INTERFASE Y SOFTWARE para Dinámica de rotación Pág. II-A3.1

MEDICIONES ELÉCTRICAS CON EL MULTÍMETRO

OBJETIVOS

- Familiarizarse con el funcionamiento del multímetro.
- Aprender cómo usar el multímetro para medir corrientes, voltajes y resistencias.
- Estudiar el comportamiento de elementos lineales y no lineales.

MATERIALES

1. Tablero de medición.
2. Bombillo.
3. Resistencias.
4. Multímetro de aguja.
5. Multímetro digital.
6. Cables de conexión.
- 7 Fuente de poder AC y/o DC.

EL MULTÍMETRO

El multímetro es el instrumento más útil y versátil que se utiliza para las mediciones eléctricas, ya que combina la capacidad de medir voltajes, corrientes y resistencias en un solo instrumento.

En este laboratorio usaremos diferentes tipos de multímetros, algunos de tipo analógico y otros de tipo digital. Un multímetro usualmente posee varias perillas selectoras: una para seleccionar el *tipo de medida* (AC o DC), otra para la *función del instrumento*

(voltaje, corriente o resistencia) y otra para el *rango* (máximo valor que puede ser medido). Antes de utilizar el multímetro debes familiarizarte con los principios de su funcionamiento.

A. Amperímetro DC

El corazón del multímetro es un galvanómetro, instrumento que detecta la presencia de una pequeña corriente que pasa a su través. El tipo más común de galvanómetro se basa en la rotación de una bobina de alambre que transporta corriente en presencia del campo magnético de un imán. La desviación de una aguja en una escala es proporcional a la corriente que pasa por la bobina (*figura 1*).

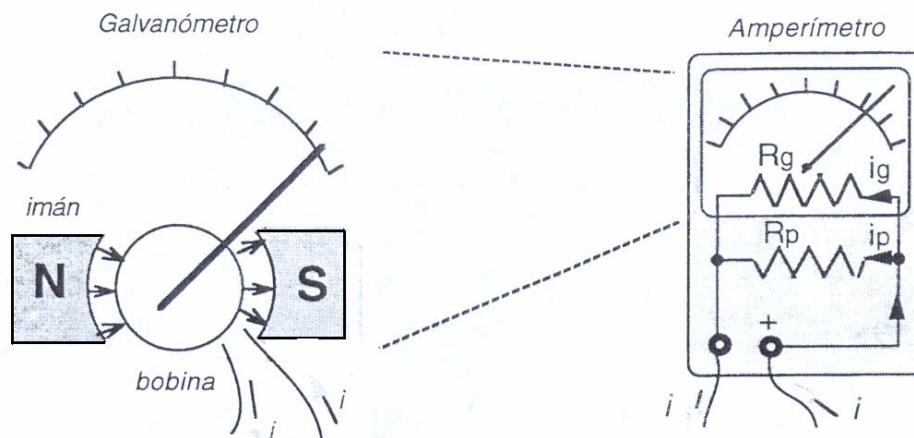


Fig. 1: Esquema de funcionamiento de un amperímetro

Cuando se desean medir corrientes muy pequeñas (menores de 1 mA), el galvanómetro se puede usar directamente como amperímetro. Para medir corrientes mayores, es necesario conectar una resistencia R_p , denominada *shunt*, en paralelo con el galvanómetro (cuya resistencia es R_g), como indica la figura 1.

En este caso la corriente total a medir es la suma: $i = i_p + i_g$, y por estar las resistencias en paralelo, el voltaje a través de ellas es el mismo, $V_p = V_g$, entonces:

$$i_p R_p = i_g R_g \quad \square \quad R_p = R_g \left(\frac{i_g}{i_p} \right)$$

Por ejemplo, supongamos que la resistencia de la bobina del galvanómetro es $R_g = 20\Omega$ y requiere de una corriente $i_g = 1 \text{ mA}$ para una máxima desviación de la aguja en la escala. Si se quiere extender el rango de las medidas en un factor 100, es decir, que la lectura máxima de la escala represente 100 mA, cuando por el galvanómetro esté pasando realmente $i_g = 1 \text{ mA}$, entonces la corriente en la resistencia en paralelo debe ser $i_p = 99 \text{ mA}$ y el valor de la resistencia a conectar en paralelo es:

$$R_p = R_g \left(\frac{i_g}{i_p} \right) = (20\Omega) \left(\frac{1\text{mA}}{99\text{mA}} \right) = 0,202\Omega$$

La perilla de *rango* del amperímetro es la que permite seleccionar la resistencia shunt R_p apropiada a la magnitud de la corriente que se desea medir.

La función del multímetro como amperímetro es la que requiere de mayor cuidado ya que presenta una resistencia interna muy pequeña. Por lo tanto, si se equivoca y lo conecta a través de puntos que tienen una diferencia de potencial (aun moderada), podría pasar una corriente grande que *dañaría el instrumento*. Esto significa que previamente hay que abrir o "cortar" el circuito e insertar el amperímetro entre los puntos de desconexión para que quede en serie con el elemento cuya corriente queremos determinar.

B. Voltímetro DC

Recordemos que lo que acciona la aguja del galvanómetro es la corriente que fluye; por lo tanto, como el voltaje es proporcional a la corriente ($V = i_g R_g$), en principio se podría usar como voltímetro. Desde luego, la resistencia R_g del galvanómetro es pequeña y para extender su rango de operación basta con agregarle una resistencia R_s en serie, como se ilustra en la figura 2.

El valor del voltaje a medir será entonces igual al producto de la corriente i por la resistencia total ($R_g + R_s$).

$$V = i(R_g + R_s)$$

Por ejemplo, si la corriente para máxima deflexión del galvanómetro es $i = 1 \text{ mA}$ y su resistencia es $R_g = 20 \Omega$, para que el voltímetro mida en la escala de 0 - 25 voltios, el valor de la resistencia total debe ser:

$$R_s + R_g = \frac{25 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 25 \text{ k}\Omega$$

Observe que como la resistencia R_g del galvanómetro es muy pequeña puede despreciarse y la resistencia en serie debe tener un valor $R_s = 25 \text{ k}\Omega$.

Un voltímetro debe tener una resistencia sumamente elevada para que sea mínima su influencia en el circuito. En la práctica el voltímetro, por estar en paralelo, reduce la resistencia entre los puntos a medir, "sangrando" corriente del circuito.

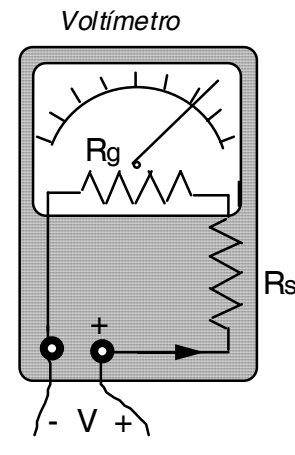


Fig. 2: Esquema de un voltímetro

Una de las cualidades importantes de un voltímetro es el número de ohmios por voltio y generalmente se encuentra prescrito en el aparato. Por ejemplo, el multímetro Simpson modelo 260, cuando se usa para medir voltios DC, tiene una sensibilidad de 20 000 Ω /voltio en el rango de 25 voltios, esto significa que su resistencia interna es:

$$(20\,000\ \Omega/\text{voltio})(25\ \text{voltios}) = 500\ \text{k}\Omega$$

C. El ohmmímetro

Las medidas de resistencia requieren que el instrumento tenga su propia fuente de alimentación internamente. El ohmmímetro está constituido básicamente de una pila, un galvanómetro y una resistencia R_s en serie mediante la cual se selecciona el rango a medir. El elemento cuya resistencia R_x se desconoce completa el circuito (ver la figura 3).

Generalmente se incorpora una resistencia adicional variable, R_{adj} , para el ajuste del cero, es decir, para que la aguja del galvanómetro acuse la máxima deflexión cuando sus terminales están en contacto (cortocircuito).

En este caso, el *máximo de la escala corresponde al cero de resistencia*. La corriente máxima está relacionada con el voltaje E de la pila por:

$$i_{m\acute{a}x} (R_g + R_{adj} + R_s) = E$$

Por otra parte, cuando los terminales del ohmmímetro se unen mediante una resistencia incógnita R_x , la corriente es *menor* y se tiene:

$$iR_x + i (R_s + R_g + R_{adj}) = E$$

Combinando estas dos expresiones se obtiene el valor de la resistencia incógnita:

$$R_x = \left(\frac{i_{m\acute{a}x}}{i} - 1 \right) (R_s + R_g + R_{adj})$$

Observe que a mayor resistencia R_x , menor será la deflexión de la aguja.

Es importante recordar que no se debe usar el ohmmímetro cuando el circuito está "caliente", es decir, en estado activado. Recuerde que el medidor tiene su propia pila y cualquier otro voltaje externo invalidaría la medición y además se podría dañar el

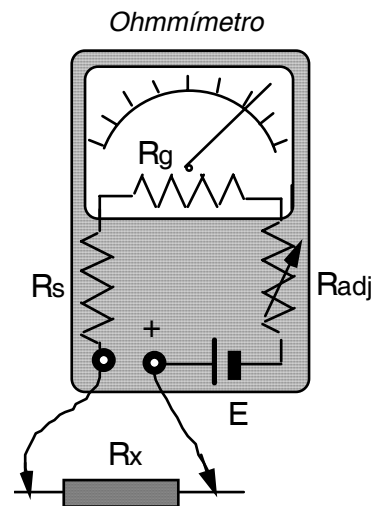


Fig. 3: Esquema de un ohmmímetro

instrumento. *Observe también que como el ohmmetro envía corriente al elemento a medir, no deben usarse en elementos delicados, tales como ciertos dispositivos semiconductores, con los cuales se corre el riesgo de dañarlos.*

D. Medición de corriente y voltajes alternos

Hasta ahora hemos considerado el galvanómetro de bobina móvil cuyo funcionamiento depende de la unidireccionalidad de la corriente (corriente directa o DC). ¿Qué sucedería si por el galvanómetro pasara una *corriente alterna* (o AC)? En este caso la corriente cambia continuamente de dirección y, debido a la inercia, la aguja no puede seguir los rápidos cambios de polaridad. Esta situación se resuelve al incorporarle al multímetro un circuito con diodos rectificadores, cuya función es hacer que la corriente fluya en una sola dirección.

En este caso la corriente unidireccional resultante produce una deflexión en la escala, la cual usualmente se calibra para que indique el *valor eficaz* (o rms) de la corriente alterna. Recordemos que el valor eficaz, I_{rms} , es igual al valor máximo dividido por $\sqrt{2}$. Por ejemplo, cuando decimos que la toma de corriente eléctrica doméstica es de 120 voltios nos referimos al voltaje rms o eficaz. Este voltaje alterno tiene un valor máximo de $120 \times \sqrt{2} = 170$ voltios.

E. Multímetros digitales

Los multímetros digitales usan circuitos basados en componentes semiconductores y tienen una pantalla de cristal líquido. Algunos no tienen conmutadores de rango y éste es seleccionado por el instrumento en forma automática.

Los voltímetros digitales poseen la ventaja de tener una resistencia interna elevada (≥ 10 M Ω), de aquí que introduzcan un menor efecto sobre el circuito bajo medición que aquellos multímetros de bobina móvil convencionales.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

Resuelva los siguientes problemas:

1. Diseño de un voltímetro: Un galvanómetro de resistencia $R_g = 100 \Omega$ da una lectura máxima cuando la corriente es 0,1 mA y ha de utilizarse como voltímetro con escalas máximas de 1 V, 10 V y 100 V, como indica la figura 4. Determine los valores de las resistencias R_A , R_B y R_C .

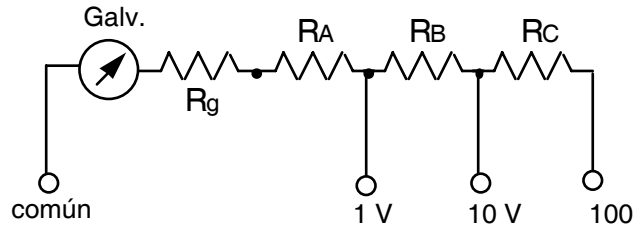


Fig. 4: Voltímetro de tres escalas

2. Diseño de un amperímetro: Se tiene un galvanómetro de resistencia $R_g = 25 \Omega$ que da una lectura máxima cuando la corriente es $0,1 \text{ mA}$ y ha de utilizarse como amperímetro con escalas máximas de $0,1 \text{ A}$, 1 A y 10 A , como indica la figura 5. Determine los valores de las resistencias R_A , R_B y R_C .

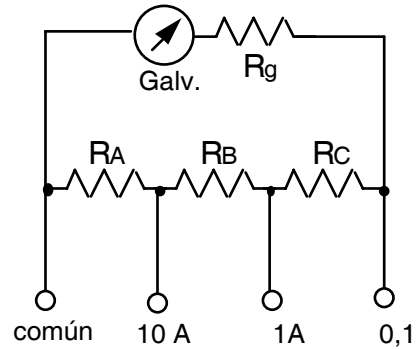


Fig. 5: Amperímetro de tres escalas

3. Corrección en la medición de resistencias: Se desea medir una resistencia incógnita mediante mediciones de voltaje y de corriente usando un voltímetro de resistencia R_v y un amperímetro de resistencia R_A . Para ello se dan las siguientes dos opciones, (a) y (b), de montaje del circuito:

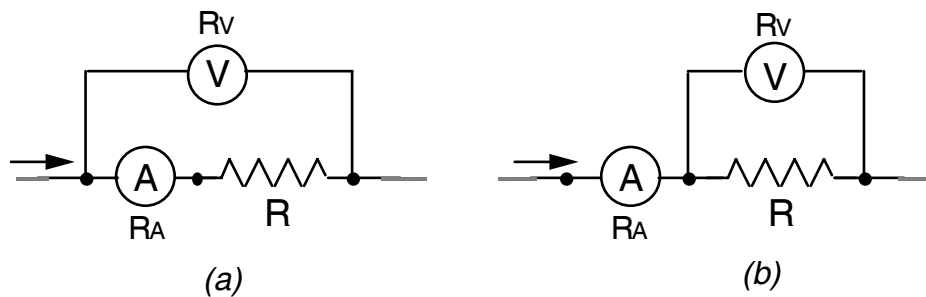


Fig. 6: Dos métodos para medir una resistencia

En cada caso, si V e i son las lecturas respectivas del voltímetro y del amperímetro, el valor *aparente* de la resistencia a medir sería V/i .

a) Demuestre que, cuando se conectan como en el *circuito (a)*, el *valor verdadero* de la resistencia a medir viene dado por:

$$R = \left(\frac{V}{i} - R_A \right)$$

b) Demuestre que, cuando se conectan como en el *circuito (b)*, el valor verdadero de la resistencia a medir viene dado por:

$$R = \frac{V}{i - V/R_V}$$

Note que $R \neq (V/I)$ en el caso (a) cuando $R_A \neq 0$, y en el caso (b) cuando $R_V \neq \infty$

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A. Medición de resistencias

Antes de usar el multímetro para medir resistencias deben tenerse presente ciertas precauciones:

- 1) Desconecte la energía del circuito bajo prueba. Recuerde que el medidor tiene una pila que suministra su alimentación internamente y cualquier otro voltaje externo invalidaría la medición y además podría dañar el instrumento.



**NUNCA CONECTE UN OHMMÍMETRO A UN CIRCUITO DONDE HAYA
VOLTAJES PRESENTES. EL INSTRUMENTO PUEDE DAÑARSE**

- 2) Si alguna parte del circuito queda en paralelo con el elemento cuya resistencia es la incógnita, la medición sería errónea ya que lo que realmente indicará el instrumento es la resistencia equivalente de la combinación paralela y no la resistencia del elemento en sí. Se recomienda desconectar el elemento antes de medirlo a fin de evitar indicaciones falsas.

A1. Inserte los cables de medición del multímetro: el cable negro en el receptáculo (-) común, y el cable rojo en el receptáculo (+).

A2. Ponga la perilla de funciones en *-DC* o *+DC* y, con la perilla de rango, seleccione el rango apropiado de la escala de resistencias de acuerdo a los multiplicadores: *Rx1*, *Rx100* o *Rx10000*, que dé el menor error relativo.

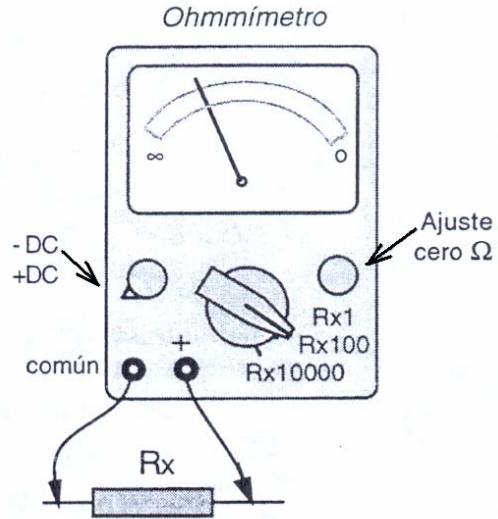


Fig. 7: Medición de una resistencia

A3. Ajuste el cero del medidor. Para ello junte las puntas de prueba y de vuelta a la perilla de "ZERO OHMS" hasta que la aguja indique cero. El ajuste de cero debe repetirse cada vez que se cambie de rango.

A4. Mida por separado las resistencias individuales en el tablero R_A y R_B .

A5. Mida la resistencia equivalente de la combinación *serie* de R_A y R_B .

A6. Mida la resistencia equivalente de la combinación *paralelo* de R_A y R_B .

R_A (Ω)	R_B (Ω)	R_A, R_B serie	R_A, R_B paralelo
.....

A7. Tomando en cuenta los errores en las mediciones, compare los valores medidos de las combinaciones serie y paralelo con las predicciones teóricas de las resistencias equivalentes.

B. Medición de voltajes alternos

Procederemos a medir voltajes alternos en un *transformador*. Recordemos que un transformador es un dispositivo que tiene aplicaciones prácticas muy importantes ya que permite elevar o reducir un voltaje alterno. Consta de dos bobinas de alambre

enrolladas sobre el mismo núcleo de hierro, pero aisladas entre sí. Una bobina conectada a la fuente de fem se llama primario; la otra conectada a la carga de consumo se llama secundario.

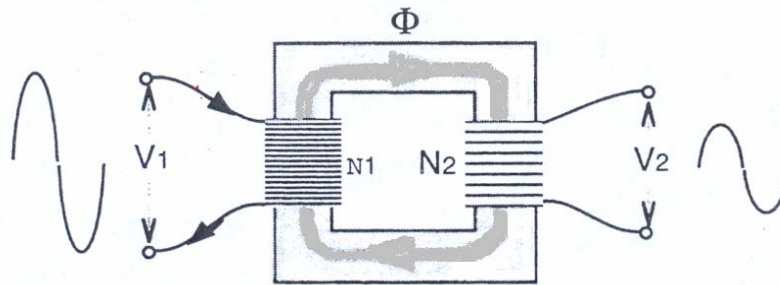


Fig. 8: Transformador de voltajes

La corriente alterna en el primario produce un flujo de campo magnético variable Φ en el núcleo, generándose una fuerza electromotriz V_1 en el primario, y V_2 en el secundario, respectivamente:

$$V_1 = - N_1 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right), \quad V_2 = - N_2 \left(\frac{d\Phi}{dt} \right)$$

De modo que la relación del voltaje secundario al primario, (V_2/V_1) , está determinada por la relación del número de vueltas (N_2/N_1) en las bobinas.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

B1. Proceda a conectar la salida AC (0 - 22 V) de la fuente de poder al primario del transformador. Previamente gire hacia la izquierda la perilla de la fuente para salida mínima.

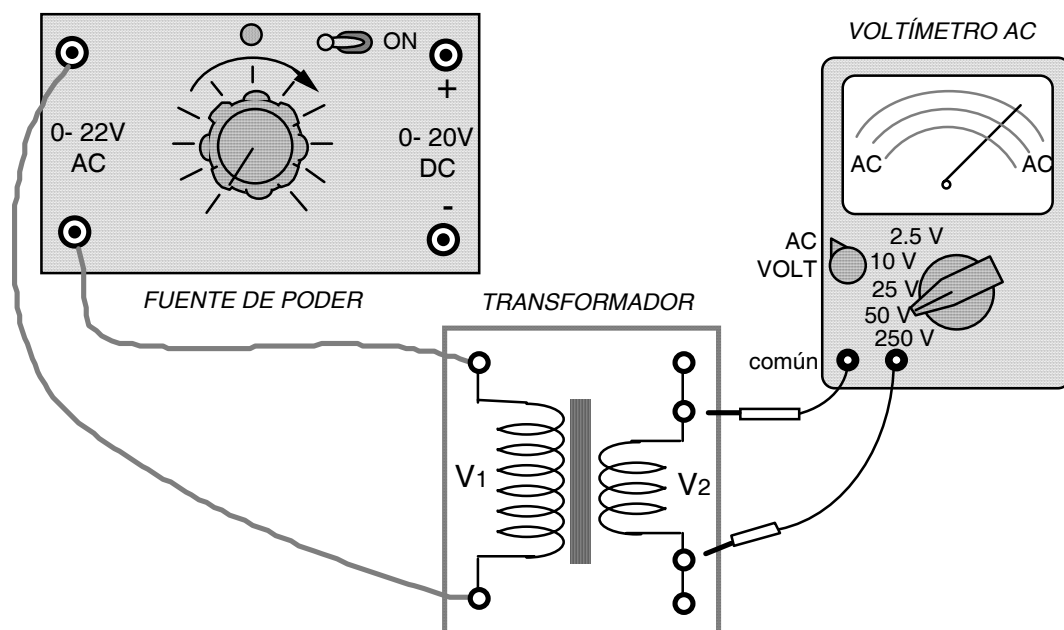


Fig. 9: Medición de voltajes alternos

- B2.** Coloque la perilla de funciones del multímetro en la posición *AC VOLTS*. Inicialmente coloque la perilla de rango en la escala más alta y luego baje hasta obtener la mayor sensibilidad posible.
- B3.** Mida los voltajes del primario V_1 y la del secundario V_2 para tres diferentes voltajes de salida de la fuente (1/2, 2/3 y máximo de la perilla).
- B4.** A partir de la relación del voltajes determine la relación (N_2/N_1) del número de vueltas de las bobinas.

C. Medición de corrientes y voltajes DC

Para un gran número de conductores el valor de la resistencia permanece constante, independientemente del valor del voltaje que se le aplique, es decir, $V/i = constante$. Este comportamiento lineal entre V e i se conoce como la ley de Ohm y los conductores que la obedecen reciben el nombre de *conductores óhmicos*.

Por otra parte, existen materiales para los cuales, al variar el voltaje aplicado, se modifica el valor de su resistencia y se dice que son conductores no óhmicos. Observe que la relación $V/i = R$ es válida independientemente de que el conductor obedezca o no la ley de Ohm. En el caso de un *conductor no óhmico*, el valor de R variará según sea el voltaje aplicado, y la gráfica de i vs V no será una línea recta.

A continuación procederemos a medir la corriente directa (DC) en función del voltaje para dos conductores: uno que obedece la ley de Ohm (resistencia R_A) y otro que no la cumple (un bombillo).

- C1.** Ponga la perilla de función del multímetro en *+DC*, y la perilla de rango de *CORRIENTE DC* en la escala más alta.
- C2.** Inserte los cables de medición del multímetro: el cable negro en el receptáculo (-) común, y el cable rojo en el receptáculo (+).
- C3.** Con la fuente de poder apagada, monte el circuito de medición que se muestra en la figura, conectando la salida *DC* de la fuente al elemento a medir, e intercalando el amperímetro en serie. El cable rojo del multímetro debe ir al lado positivo y el negro al lado negativo.



**EL AMPERÍMETRO SIEMPRE DEBE CONECTARSE "EN SERIE" CON EL
ELEMENTO CUYA CORRIENTE SE DESEA MEDIR.
¡SI SE EQUIVOCA EL INSTRUMENTO PUEDE DAÑARSE!**

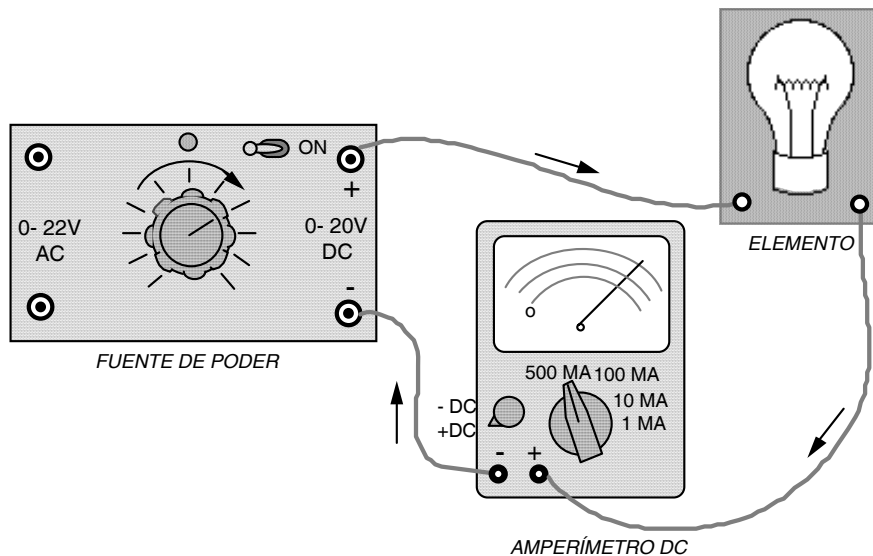


Fig. 9: Conexión del amperímetro en serie con la fuente y con el bombillo

- C4.** Una vez montado el circuito anterior conecte el *multímetro digital* en paralelo con el bombillo, para medir *voltajes DC*. Ponga previamente la perilla selectora del multímetro en DCV comenzando con la escala más alta. El cable rojo de medición ($V-\Omega$) va al terminal (+) y el negro (común) al terminal (-).
- C5.** Proceda a medir la corriente en función del *voltaje DC* entre 0 y 20 voltios DC, primero para el elemento lineal y luego para el bombillo (elemento no-lineal).

V (volt)	1	2	3	4	5	.....	20
i (mA)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

- C6.** En el computador haga las gráficas correspondientes de i vs V .
- a) Para el elemento lineal, de la gráfica i vs V obtenga el valor de la resistencia a partir de la pendiente de la recta.
- b) Para el elemento no lineal, ¿es la gráfica i vs V una línea recta?

Si conociéramos la naturaleza del fenómeno físico que está determinando la conductividad del material a medida que se calienta, podríamos intentar un ajuste a la función teórica que la describe y así determinar los parámetros físicos pertinentes. Sin embargo, en este caso usaremos la data que obtuvimos para generar una *función empírica* con base en el ajuste a funciones matemáticas conocidas.

Reporte sus resultados con base en dos diferentes ajustes:

i) a un polinomio de tercer grado

ii) a una ley de potencia: $i = A V^B$

Para esta última haga la gráfica linearizada $\log i$ vs $\log V$ y determine las constantes A y B. Alternativamente puede usar el programa Excel para hacer directamente el ajuste a la función potencial.

¿Cuál de las dos funciones provee un mejor ajuste de la data experimental?

PREGUNTAS

1. Explique brevemente por qué la resistencia interna de un voltímetro debe ser muy grande, mientras que la resistencia interna de un amperímetro debe ser muy pequeña.
2. En la escala de ohmios del multímetro, ¿cuál zona es más precisa: la mitad derecha o la mitad izquierda?
3. ¿Por qué, cuando un multímetro no está en uso, nunca debe dejarse la perilla selectora en los rangos de resistencias?
4. A partir de la relación del número de vueltas (N_2/N_1) que se ha determinado para el transformador, ¿cuál sería el voltaje V_1 en el primario si se aplicara al secundario 20 voltios AC?
¿Cuál sería el voltaje V_2 del secundario si se aplicara al primario 20 voltios DC?
5. Un estudiante decide instalar el alumbrado de su casa y se equivoca conectando dos lámparas *en serie* a la red de 120 V. Si uno de los bombillos es de 25 W y el otro de 60 W, ¿cuál brillará más?

(a) el de 25 W,

(b) el de 60 W,

(c) brillarán igual.

REFERENCIAS

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Caps. 32, 33, Ed. Continental (1995).
2. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 2, Cap. 22, Mc. Graw-Hill (1984).
3. R. A. Serway, *Física*, Tomo. 2, tercera edición, Caps. 27,28, Mc. Graw-Hill (1992).
4. P. A. Tipler, *Física*, Tomo. 2, segunda edición, Cap. 25, Editorial Reverté (1985).

CAMPOS ELÉCTRICOS

OBJETIVOS

- Verificar la uniformidad del campo eléctrico entre electrodos de placas paralelas.
- Determinar expresiones matemáticas empíricas que relacionan el potencial y el campo eléctrico con la posición espacial, para electrodos de simetría radial.
- Comprobar el apantallamiento electrostático de un conductor.

MATERIALES

1. Cuba de vidrio.
2. Electrolito.
3. Fuente de poder AC.
4. Voltímetro.
5. Cables con bananas.
6. Varillas con soportes aislantes.
7. Electrodos metálicos con diferentes geometrías.

TEORÍA

Un campo electrostático puede ser representado mediante líneas de fuerza (a las cuales el vector \vec{E} es tangente) o mediante superficies equipotenciales (puntos de igual potencial). Por ser el campo eléctrico una magnitud vectorial, en la práctica resulta más conveniente medir una diferencia de potencial, que es una magnitud escalar.

Sabemos que la componente E_r del campo en cualquier dirección $d\vec{r}$ es el negativo de la tasa de cambio del potencial con la posición en esa dirección:

$$E_r = -\frac{dV}{dr} \quad (1)$$

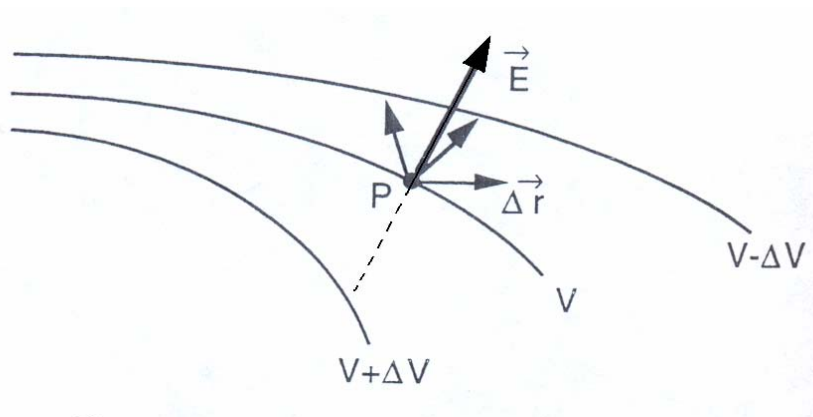


Fig. 1: Superficies equipotenciales y campos eléctricos

En particular, si $d\vec{r}$ apunta perpendicularmente a una superficie equipotencial, entonces la derivada (dV/dr) presenta su valor máximo y es justamente el valor de E en ese punto.

$$E = -\left(\frac{dV}{dr}\right)_{\text{máx}} \quad (2)$$

El signo menos indica que el vector \vec{E} apunta en la dirección de V decreciente.

El caso más simple es el de un campo uniforme (módulo y dirección constantes). Aplicando la expresión anterior, se obtiene para los módulos la relación lineal:

$$\Delta V = E \Delta l = E d \quad (3)$$

Siendo ΔV la diferencia de potencial entre dos puntos cualesquiera separados por una distancia d en la dirección del vector \vec{E} .

En general, si se establece un campo eléctrico en la vecindad de una configuración dada de cargas, se pueden trazar varias superficies equipotenciales, y de un análisis de este diagrama es posible deducir el mapa correspondiente del campo eléctrico.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

- Derive las expresiones teóricas que describen el campo eléctrico y el potencial eléctrico para las siguientes geometrías de electrodos:
 - a) Placas paralelas.
 - b) Esfera metálica hueca y una carga puntual en su centro.
 - c) Cilindro metálico hueco y una línea de carga en su eje.

 - Dibuje las superficies equipotenciales y las líneas de campo eléctrico correspondientes para cada geometría.
-

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este experimento se aplica una diferencia de potencial entre electrodos metálicos, los cuales se encuentran sumergidos en un medio ligeramente conductor (la solución).

El campo eléctrico que se establece provoca el movimiento de iones del electrolito, los cuales también están sujetos a la fricción del medio viscoso. Se establece así una corriente iónica cuyas líneas son equivalentes a las líneas del campo eléctrico que la provoca. Si el medio es homogéneo, la configuración de campos eléctricos es similar a la que se obtendría si dicho medio no existiese (el vacío) y es característica únicamente de la geometría particular de los electrodos.

El arreglo experimental está ilustrado en la figura 2. Consiste en una cuba hecha de anime, con un fondo de vidrio, que está llena con un electrolito. Debajo del vidrio se ha dispuesto un papel milimetrado que permite ubicar cada punto en relación con un sistema de coordenadas.

Se usa una fuente de poder AC y las conexiones eléctricas a los electrodos se realizan mediante unos contactos de puntas colocados sobre soportes aislantes. Las superficies equipotenciales se determinan introduciendo en el electrolito la punta de prueba de un voltímetro, estando la otra punta conectada a un terminal común en uno de los electrodos.

Antes de iniciar este experimento, debe familiarizarse con los diferentes componentes del montaje experimental y con el funcionamiento del voltímetro y la fuente.

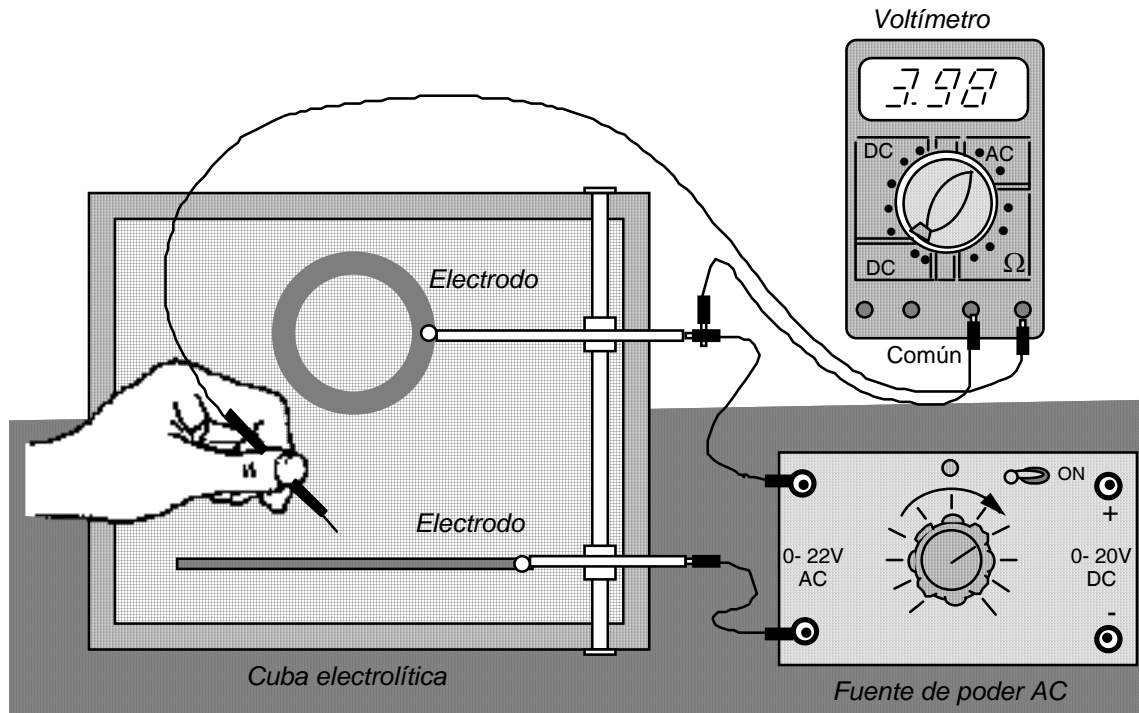


Fig. 2: Montaje experimental para la medición de campos eléctricos

A. Campo eléctrico uniforme

- A1.** Coloque, en la cuba, los dos electrodos rectos, en forma paralela y separados por una distancia $d = 20$ cm.

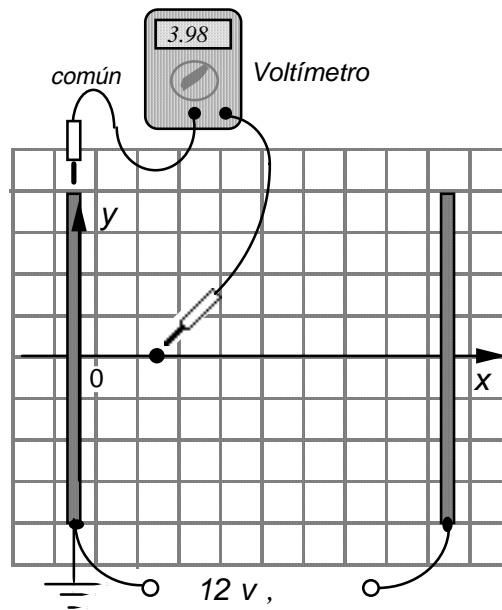


Fig. 3: Medición de un campo eléctrico uniforme

- A2.** Mediante los contactos de puntas, conecte los electrodos a la salida 12 v , de la fuente de poder (como indica la figura 3).
- A3.** Conecte el terminal común del voltímetro al electrodo de referencia y con la otra punta de prueba proceda a medir el potencial a lo largo del eje x.
- A4.** Tome sus lecturas en puntos separados por 1 cm y vaya dictando sus observaciones al compañero de equipo para que éste construya una tabla.

$X(m)$	$V(voltios)$

- A5.** Haga un gráfico del potencial en función de la distancia x y partir del gráfico determine el campo eléctrico. ¿Es el campo uniforme en esa región?

B. Campo eléctrico con simetría radial

- B1.** Quite los electrodos paralelos y coloque en la cuba un anillo metálico grande y un electrodo de punta en el centro del anillo (figura 4).
- B2.** Conecte el terminal de referencia de la fuente al anillo y el otro terminal al electrodo central de punta.

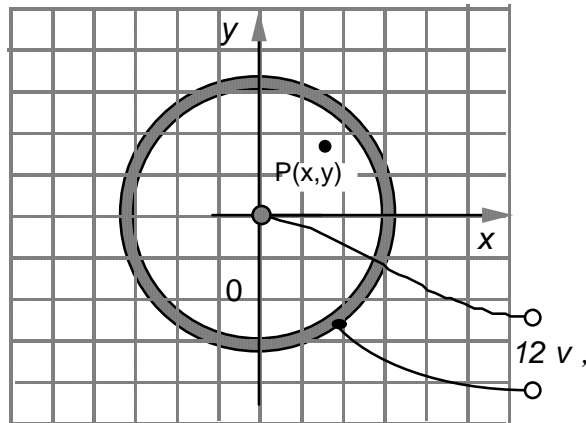


Fig. 4: Medición de un campo eléctrico con simetría radial

B3. Conecte el terminal común del voltímetro al terminal de referencia y con su otra punta de prueba busque los puntos que definen una línea equipotencial. Al mismo tiempo que va encontrando los puntos, cuyas coordenadas (x,y) vienen dadas por el sistema de referencia marcado en el fondo de la cuba, vaya dictando su posición a su compañero de equipo para que éste lo anote en una tabla. Obtenga un número razonable de puntos que definan claramente la línea equipotencial.

V(Volt)		V(Volt)		V(Volt)	
X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)

B4. Repita el procedimiento anterior hasta determinar al menos cinco líneas equipotenciales distribuidas de forma tal de que exista una diferencia de potencial fija entre ellas.

B4. Elabore el mapa de líneas equipotenciales, anotando sobre cada línea su potencial correspondiente.

B5. En la cuba electrolítica seleccione una línea radial y mida el potencial V en función de la distancia radial, r, al electrodo central, aproximadamente cada 0,5 cm sobre los ejes x e y. Incluya en esa tabla, los valores de $1/r$ y de $\log r$

V(Volt)	r(m)	1/r (m ⁻¹)	log r

B6. Grafique en una sola hoja de papel milimetrado dos curvas:

- a) V vs $1/r$
- b) V vs $\log r$

B7. Obtenga la función empírica que relaciona V con r .

B8. Escriba sus conclusiones.

C. Apantallamiento electrostático

C1. Coloque un electrodo recto enfrente de un electrodo de punta y conéctelos a la fuente, como se sugiere en la *figura 5a*.

C2. En la región alrededor del origen de coordenadas, mida la diferencia de potencial entre puntos separados por 2 cm, en dos situaciones diferentes:

- a) sin el anillo (*figura 5a*)
- b) con el anillo rodeando esos puntos (*figura 5b*).

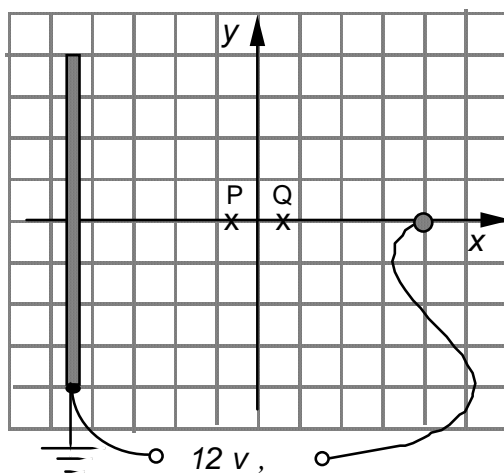


Fig. 5a

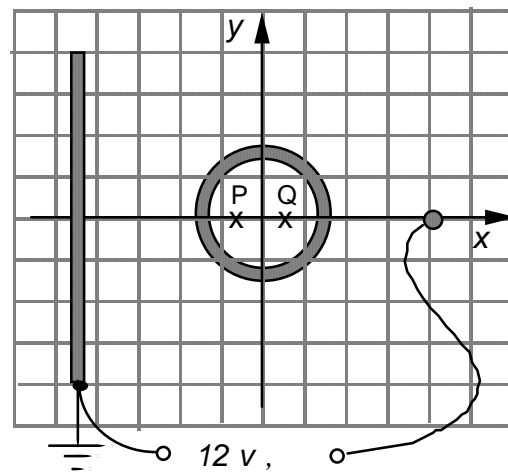


Fig. 5b

C3. Mueva el electrodo de punta para el centro del anillo y conéctelo a la fuente, como se sugiere en la *figura 6*.

C4. Mida con el voltímetro la diferencia de potencial entre los puntos P y Q ubicados *fuera del anillo* y separados por 2 cm.

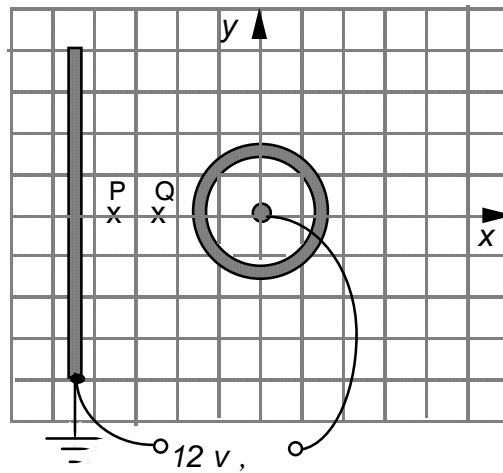


Fig. 6

C5. Explique los resultados de sus observaciones.

PREGUNTAS

1. ¿Una carga abandonada libremente en un campo eléctrico, se desplazará a lo largo de una línea de fuerza que pase por dicho punto inicial? Explique.
2. ¿Funcionaría este experimento con corriente continua? ¿Por qué?
3. ¿Por qué no pueden cruzarse dos líneas equipotenciales?
4. Si se conoce E en un punto del espacio, ¿basta este dato para calcular el potencial? En caso contrario, ¿qué otra información es necesaria?
5. En la determinación del campo eléctrico entre dos electrodos paralelos (sección A), ¿por qué el valor del campo en la región del líquido resulta menor que el valor que se obtendría directamente de la relación $E = V/d$, siendo d la distancia entre las barras y ΔV la diferencia de potencial aplicada?
6. ¿Por qué el apantallamiento electrostático funciona de afuera hacia adentro pero no al revés?. Por ejemplo, si estamos en la cavidad de un conductor, quedamos protegidos de tormentas eléctricas que ocurran afuera, pero si ocurriese una tormenta eléctrica dentro la cavidad, no quedaríamos protegidos cuando nos colocamos afuera.

REFERENCIAS

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Cap. 30, Ed. Continental (1995).
2. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 2, Cap. 21, Mc. Graw-Hill (1984).
3. R. A. Serway, *Física*, tomo 2, Tercera edición, Cap. 25, Mc. Graw-Hill (1992).

MEDICIONES ELÉCTRICAS CON EL OSCILOSCOPIO

OBJETIVOS

- * Estudiar los principios de operación del osciloscopio como instrumento de medidas eléctricas.
- * Familiarizarse con la operación y uso de generadores de señales.
- * Medición de amplitudes y diferencias de fase en señales eléctricas con el osciloscopio.

MATERIALES

1. Osciloscopio.
2. Fuente generadora de señales.
3. Transformador de línea (salida 6 V).
4. Tableros para conexiones eléctricas.
5. Cables.

EL OSCILOSCOPIO

El osciloscopio es un equipo que nos permite visualizar señales de voltaje en función del tiempo como trazos en una pantalla de tubo de rayos catódicos. Por su función es uno de los equipos de más amplio uso en el laboratorio, en especial cuando se trabaja con señales transitorias o que cambian en tiempos muy cortos.

Por tal razón se considera absolutamente necesario que el estudiante se familiarice con su uso.

La pantalla del osciloscopio es un plano cartesiano de 10 cuadros horizontales por 8 verticales, cada uno con cinco subdivisiones menores. El haz de electrones del tubo de rayos catódicos se desplaza desde la parte posterior del aparato hasta el plano de la

pantalla, marcado un punto sobre ésta. Los movimientos verticales y horizontales del punto son independientes y están controlados por funciones específicas del aparato.

El osciloscopio cuenta con tres grandes bloques de controles:

- los controles generales del osciloscopio, justo debajo la pantalla;
- los controles que determinan el movimiento vertical del haz, y
- los controles que determinan el movimiento horizontal del haz.

Controles generales del osciloscopio (Ver diagrama de un osciloscopio. Última página de esta guía)

El bloque de controles generales contiene el interruptor de encendido con una lámpara indicadora, y tres botones tipo perillas para la intensidad y el enfoque del haz, y para la iluminación de la retícula de la pantalla. Con la finalidad de preservar la vida útil del tubo, es recomendable usar un nivel intermedio de la intensidad del haz.

Controles de movimiento vertical

El bloque de controles que determinan el movimiento vertical está subdividido en tres subgrupos de controles: dos de ellos llamados canales, que son las entradas de las señales de voltaje al osciloscopio, tienen características similares y pueden ser acondicionadas independientemente; y el tercer subgrupo llamado MODE o VERTICAL MODE, ubicado entre los dos canales, está constituido por un control que permite seleccionar con qué canal se trabaja.

Los canales se denominan CH1 y CH2. Cuentan con una entrada mediante un conector del tipo BNC de dos terminales concéntricos o coaxiales, en el cual la parte externa es un conductor conectado a un potencial común del equipo (y, en la mayoría de los osciloscopios, la tierra del instrumento), y la parte interna es el conductor que lleva la señal a ser observada hasta un amplificador interno que tiene como referencia el potencial común del osciloscopio (ver figura 1).

Cada canal también tiene: una perilla que permite seleccionar la escala de voltaje del amplificador que va de 5 V/div a 5 mV/div, con la posibilidad de valores intermedios determinada por un potenciómetro de calibración; una perilla para mover verticalmente la ubicación del trazo del canal en la pantalla, y, por último, un control para seleccionar la modalidad de entrada al amplificador (DC, entrada directa; AC, entrada pasando por un condensador que deja pasar solamente voltajes alternos o variantes en el tiempo, y GND

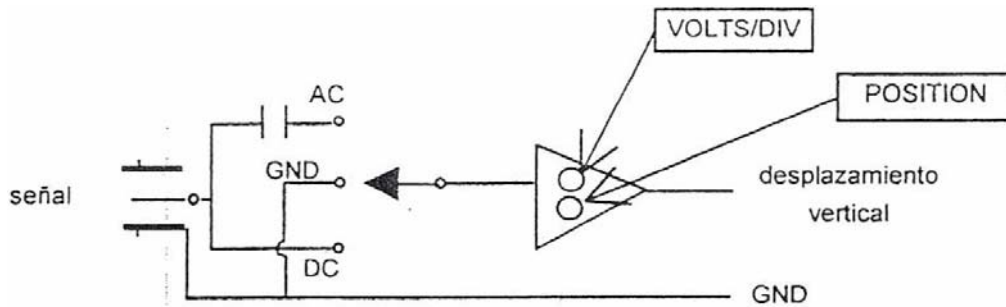


Fig. 1: Esquema del circuito de un canal del osciloscopio

que conecta la entrada del amplificador al potencial de referencia para efectos del ajuste de la posición horizontal del trazo del canal). El control MODE permite seleccionar si trabajamos con CH1, con CH2, o con ambos. Esta última condición se logra colocando el interruptor en una de las posiciones ALT o CHOP. La diferencia entre estas dos modalidades se discutirá cuando presentemos el movimiento horizontal de haz.

El resultado neto de la operación de los controles de movimiento vertical es ubicar la posición del haz en algún punto intermedio dentro del rango de voltajes asociados a la dimensión vertical de la pantalla. Este rango puede ser ajustado, en cuanto a su magnitud, con la perilla de VOLTS/DIV, obteniéndose en la pantalla los voltios que resultan de multiplicar el valor de la escala por las ocho divisiones de la pantalla. Por ejemplo, si la perilla está en 2 V/div, el rango máximo del voltaje posible de observar es de 16 V. Con la perilla de posición puede controlarse la polaridad de ese rango de voltajes, de forma tal que, si ubicamos la referencia de cero voltios en el extremo inferior de la pantalla (para hacer esto se coloca la entrada en GND y se gira la perilla POSITION hasta que el trazo se ubica en el extremo inferior de la pantalla), podremos observar voltajes entre 0 y 16 V; si ubicamos la referencia de cero voltios en el centro de la pantalla, podremos observar el rango de voltajes de 8 a -8 V; Y finalmente, si ubicamos la referencia de cero voltios en el extremo superior de la pantalla, podemos observar el rango de 0 a -16 V.

A manera de recomendación, para iniciar su trabajo se sugiere ubicar la referencia en el centro de la pantalla, usando la escala de mayor número de voltios por división que tenga el osciloscopio. Luego puede ir aumentando la sensibilidad del osciloscopio reduciendo la escala y ubicando la referencia de cero en el nivel más apropiado, de acuerdo a las características de la señal que observa.

Controles de movimiento horizontal

Los controles que determinan el movimiento horizontal están ubicados en la parte superior derecha del osciloscopio, alrededor de una perilla grande distinguida con el nombre TIME/DIV.

Antes de entrar en los detalles de las funciones específicas de cada uno de los controles, debemos aclarar que existen dos modalidades diferentes de generar el movimiento horizontal del haz. La primera es controlar su posición con un voltaje en forma análoga como se hace en el movimiento vertical, y la otra alternativa con un desplazamiento a velocidad constante del punto que produce el haz sobre la pantalla, con lo cual se logra que la posición horizontal sea proporcional al tiempo transcurrido desde que sale en el extremo izquierdo de la pantalla. En la primera modalidad nos referimos al modo X-Y del osciloscopio, mientras que la segunda la conocemos como el modo V vs t, o de barrido en el tiempo.

La modalidad X-Y, relativamente menos usada, permite visualizar en el plano cartesiano de la pantalla el punto de coordenadas X-Y que viene determinado por las magnitudes de las señales de voltaje que controlan el eje horizontal y vertical del osciloscopio. A medida que las señales de voltaje cambian, el punto se desplaza sobre el plano de la pantalla. Si las señales varían lentamente en el tiempo se puede observar la trayectoria del punto sobre la pantalla del osciloscopio; si lo hacen rápidamente, la persistencia de la luminosidad que produce el haz sobre la pantalla hace que la trayectoria quede marcada como una curva continua sobre el plano de la pantalla.

Para operar el osciloscopio en la modalidad X-Y, basta con rotar la perilla (TIME/OIV) que determina la velocidad de desplazamiento del haz hasta la posición designada x-y en su dial. Al hacer esto, la señal del canal uno (CH1/X) determina el movimiento horizontal del haz y la del canal dos (CH2/Y) la del movimiento vertical. Para desplazar la posición del origen de coordenadas en la dirección vertical se usa la perilla POSITION del CH2, y en la posición horizontal con la perilla POSITION adyacente la perilla TIME/OIV. Observe que la perilla POSITION del canal uno no cumple ninguna función en este caso.

La modalidad V vs t es la más común y permite estudiar, al producirse un barrido del haz horizontalmente, la dependencia en el tiempo de la señal de voltaje que se observa. En este caso hay dos consideraciones básicas para dominar la operación. Éstas son: el intervalo de tiempo que se desea observar y el instante en el cual se desea iniciar la observación.

El intervalo de tiempo que se desea observar está determinado por la velocidad a que se realiza el barrido del haz por la pantalla. Para seleccionarlo se usa el control de TIME/OIV el cual fija el tiempo que demora desplazarse una de las 10 divisiones mayores horizontales de la cuadrícula de la pantalla. El control POSITION permite ajustar el punto de inicio del barrido del haz. El control VARIABLE permite modificar continuamente la velocidad del barrido, con lo cual perdemos un conocimiento exacto del tiempo por división que demora el barrido pero podemos optimizar la visión de la forma de la señal para discriminar algún detalle. Como norma debe mantenerse este control en la posición de calibrado para tener certeza acerca del tiempo por división del barrido.

El segundo aspecto a considerarse es el relativo al sincronismo que se desea para el barrido, es decir, la fijación del instante que determina el disparo o "trigger" del inicio del desplazamiento. El mecanismo de disparo se activa con una señal de voltaje. El control

SOURCE permite seleccionar entre cuatro alternativas: la señal que se tiene en el canal 1 (CH1), la señal que se tiene en el canal 2 (CH2), la señal de 60 ciclos de la línea de alimentación del osciloscopio (LINE), o una señal externa (EXT) que se alimenta al osciloscopio por el conector BNC adyacente identificado como EXT TRIGGER IN.

Una vez definida la señal que determinara el disparo (triggering), el control COUPLING permite filtrar la señal que se está usando. En la posición AC se elimina una componente de voltaje directo, en HF REJ se eliminan componentes de voltajes alternos de alta frecuencia, en IF REJ se eliminan componentes de voltajes alternos de baja frecuencia, y en DC se deja pasar la señal sin filtrado alguno.

El control MODE permite seleccionar si se desea un disparo automático cada vez que se tenga un pulso (AUTO), o si se desea imponer condiciones al pulso con que se va a iniciar el barrido (NORM). En este caso se dispone del control TRIGGER LEVEL que permite ajustar: a) el mínimo en el voltaje, respecto a cero y relativo a la escala de voltajes usada, que tiene que alcanzar la señal para que se produzca un disparo, el cual puede ser positivo o negativo, y b) el valor de la pendiente respecto al tiempo de la señal en el instante deseado para que se produzca el disparo.

Por último, el control HOLD OFF permite retrasar el inicio del barrido, manteniendo constante el instante de disparo, con lo cual se pueden observar distintos puntos de señales repetitivas.

Cuando se opera en la modalidad V vs t, y el MODE del movimiento vertical está en CH1 o CH2, el barrido muestra precisamente la señal que se ha seleccionado. Si el control MODE está en las opciones ALT o CHOP, se pueden observar dos trazos independientes que corresponden a las señales en los canales 1 y 2. La diferencia entre las dos alternativas radica en que en la primera opción el osciloscopio realiza un barrido con el movimiento vertical del CH 1 y, cuando lo completa, realiza un segundo barrido con el movimiento vertical del CH2 para luego repetir el ciclo; mientras que en la segunda opción, durante un único barrido, el movimiento vertical va alternándose entre los canales 1 y 2 con una frecuencia de 250 KHz, es decir, que a medida que el haz se desplaza horizontalmente, 2 μ s corresponden a la señal del CH1 y los siguientes 2 μ s corresponden a la señal del canal 2, repitiendo el ciclo hasta terminar el barrido. De esta forma, en la opción CHOP se garantiza la simultaneidad de la observación, pero si la señal es de frecuencias relativamente altas (digamos superiores a 30 KHz) pueden observarse interrupciones en el trazo de cada canal. Para altas frecuencias se recomienda la opción ALT, siempre y cuando se pueda asegurar la repetibilidad de la señal.

Procedimiento de operación

Una vez que se enciende el aparato, el mismo debe mantenerse encendido hasta concluir con las mediciones propuestas. No es necesario apagarlo por lapsos cortos.

Con las entradas en GND, el modo vertical en CHOP y el modo horizontal en AUTO, deben ajustarse los controles de posición hasta identificar los dos canales. Luego pueden ajustarse la intensidad, a un nivel visible mas no excesivamente luminoso, y el foco hasta alcanzar una nitidez del haz. Seguidamente deben ajustarse los modos de entrada (AC o DC) y la sensibilidad de los canales de acuerdo a las señales que se esperan tener.

Por último, de acuerdo a la observación que se planifica, deben ajustarse los controles de velocidad de barrido (TIME/DIV) y modalidad de disparo (TRIGGER).

A título de ejemplo, listamos a continuación una serie de medidas típicas que son posibles con un osciloscopio:

- Observación de una señal vs tiempo para medir amplitudes y formas temporales.
- Observación y comparación de dos señales simultáneas para medir diferencias en amplitudes, formas temporales y fases.
- Observación de una señal que está originada por algún evento independiente pero que se produce con un retardo en el tiempo respecto al evento inicial.
- Observación de la representación x-y de dos señales que cambian en el tiempo.

En general, el dominio y conocimiento de todas las posibilidades de medida con un osciloscopio son sólo producto de la práctica y de la actitud que tengamos.

FUNCIONES ARMÓNICAS

A continuación revisaremos algunos conceptos básicos de las funciones armónicas por cuanto las mismas serán usadas en la presente práctica. Sean Y y t las variables dependiente e independiente de la función y ; A , ω y ϕ , tres constantes. Las funciones armónicas son aquellas cuya relación funcional es:

$$Y(t) = A \text{ sen}(\omega t - \phi)$$

En física, generalmente la variable independiente t es el tiempo y la variable Y corresponde a cualquier magnitud física, la cual varía armónicamente en el tiempo, por ejemplo: posición, potencial, etc. A la constante A se le llama la amplitud de la función porque determina los valores máximos y mínimos que puede tomar la variable, y dado que la función seno es adimensional, la constante A debe tener las dimensiones de la variable Y .

Ahora, recordemos que el argumento de la función seno es un ángulo. En física los ángulos son expresados en términos de la unidad "radián", la cual se define

considerándose como 2π radianes la totalidad del ángulo descrito por el arco de una circunferencia (360°). De esta forma, el producto de ωt y la constante ϕ deben estar expresados en radianes. La variable t tiene dimensiones de tiempo (s), entonces, la constante ω debe tener dimensiones de (radianes / s), por lo cual se le llama frecuencia

angular. A la constante ϕ se le llama fase de la función armónica. Veamos una representación gráfica de una función armónica tomando $A = 1$, $\omega = 1$ rad/s y $\phi = 0$:

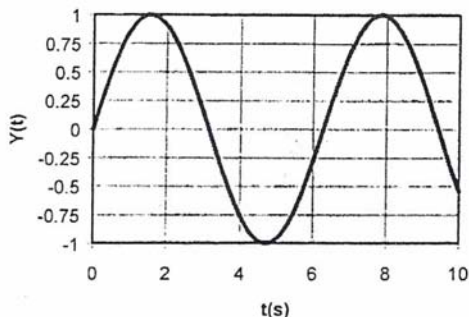


Fig. 2: Representación de una función armónica

En la gráfica podemos observar que los valores extremos corresponden a ± 1 , los cuales vienen determinados por el valor de A , la amplitud. En algunos casos se habla de la diferencia entre los valores máximos y mínimos de la función, que en este caso es de 2, como la amplitud “pico a pico”. El período T es el intervalo de tiempo Δt_0 desde un instante dado hasta que la función se empieza a repetir por vez primera. En la figura anterior $T = 2\pi \Delta t_0$ s (6,28 ... s). Determinando el período, se puede determinar la frecuencia angular y la frecuencia ($f = 1/T$) de acuerdo a la siguiente relación:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi / T$$

En las figuras que se muestran a continuación ilustramos el efecto de la fase en la función armónica. En la gráfica de la izquierda, la línea punteada corresponde a la función con la fase $\phi = 0$ rad y período T , y la línea sólida es una función con la fase $\phi = 1$ rad. En este caso decimos que la curva sólida está retrasada un tiempo Δt respecto a la curva de puntos. En la gráfica de la derecha, la línea punteada corresponde a la función con la fase $\phi = 0$ rad, y la línea sólida es una función con la fase $\phi = -1$ rad. En este caso decimos que la curva sólida está adelantada respecto a la curva de puntos.

Una aplicación interesante es la superposición de dos funciones armónicas en direcciones perpendiculares. Para ilustrar esta aplicación consideremos las funciones armónicas $X(t)$ e $Y(t)$ que se dan a continuación:

$$Y(t) = A_1 \text{sen}(\omega_1 t - \phi_1) \quad X(t) = A_2 \text{sen}(\omega_2 t - \phi_2)$$

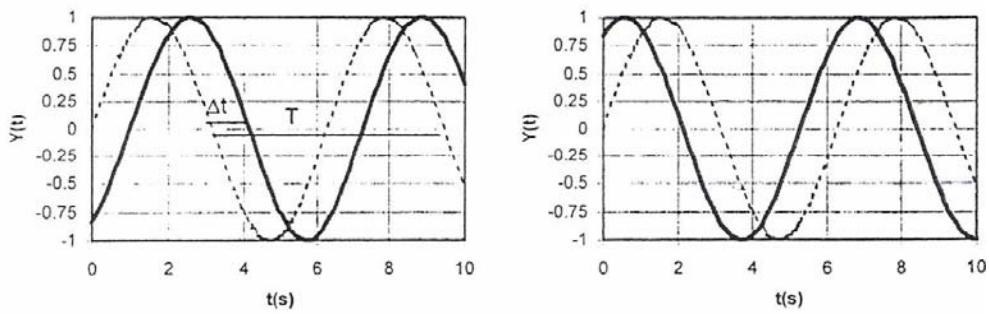


Fig. 3: Ilustración del efecto del ángulo de fase

Si en el instante t representamos en un plano cartesiano X - Y un punto cuyas coordenadas vienen dadas por los valores de las funciones armónicas $X(t)$ e $Y(t)$, a medida que transcurre el tiempo, el punto se desplazará por el plano describiendo una trayectoria. El camino que se obtiene en el plano cartesiano se le llama figura de Lissajous. Ejemplos de ellas se muestran en la figura 4.

En la primera fila se muestran figuras de Lissajous para el caso en que ambas funciones armónicas tengan la misma frecuencia angular y amplitud, pero diferentes ángulos de fase. El parámetro $\delta = \phi_1 - \phi_2$ representa la diferencia en el ángulo de fase entre las dos funciones y se cambia horizontalmente, tomando los valores $0, \pi/4, \pi/2,$

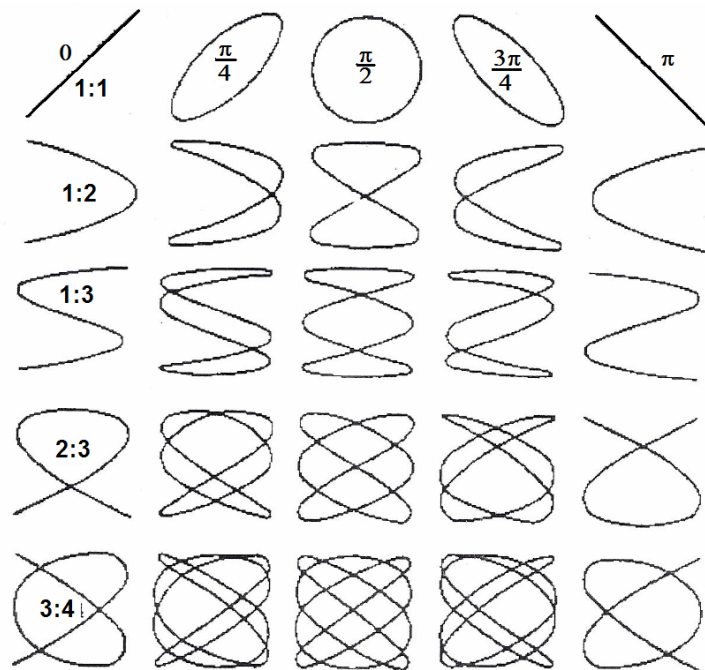


Fig. 4: Figuras de Lissajous (tomado del Alonso y Finn).

$3\pi/4$ y π , respectivamente, en las cinco columnas. Se pueden observar líneas rectas para los casos en que las diferencias de fase son de 0 y π radianes, una circunferencia para el caso de una diferencia de fase de $\pi/2$ radianes y elipses en los casos de diferencias de fase de $\pi/4$ y $3\pi/4$ radianes.

Las restantes filas muestran patrones de figuras de Lissajous cuando las funciones armónicas tienen diferente frecuencia. En los casos que se tienen relaciones simples entre las frecuencias, como 1:2, 1:3, 2:3 y 3:4, cada cierto número de períodos de la frecuencia menor coincide exactamente con otro número de períodos de la función de mayor frecuencia. Esto trae como consecuencia que los patrones sean líneas cerradas estables, que se repiten.

NOTA: El texto de Alonso y Finn usa funciones coseno para la superposición de funciones armónicas en direcciones normales. Esto sólo produce rotación en la posición relativa de la figura, y valores diferentes para las diferencias de fase entre ambas funciones.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

1. Antes de asistir a la sesión de práctica debe leer cuidadosamente la descripción del osciloscopio de forma tal que cuando inicie su trabajo tenga una idea clara de los diferentes tipos de controles que va a ensayar. Igualmente debe leer la información suministrada sobre el generador de señales en la introducción del procedimiento experimental.

2. Represente en un sistema de coordenadas cartesiano la curva descrita por los puntos $X(a)$ e $Y(a)$, cuando en ángulo a . se varía de 0 a $2n$, en los siguientes casos:

a) $X = \text{sen}(\alpha)$ e $Y = \text{sen}(\alpha)$

d) $X = \text{sen}(\alpha)$ e $Y = 0,5 \text{sen}(\alpha - \pi/2)$

b) $X = \text{sen}(\alpha)$ e $Y = 0,5 \text{sen}(\alpha)$

e) $X = \text{sen}(\alpha)$ e $Y = \text{sen}(2\alpha)$

c) $X = \text{sen}(\alpha)$ e $Y = \text{sen}(\alpha - \pi/2)$

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En esta práctica se propone una serie de mediciones que lo familiarice con el uso del osciloscopio. El otro equipo que usará en esta sesión de práctica es el generador de señales. A continuación se describen las funciones más relevantes de este equipo.

Este equipo es análogo a una fuente de poder o batería pero que, en lugar de producir un voltaje constante, genera un voltaje que varía con el tiempo en forma periódica. El voltaje de salida se produce entre dos terminales tipo banana, de los cuales uno es el neutro o tierra, o en un conector tipo BNC, como el de las entradas del osciloscopio, en el cual el conductor central lleva la señal que tiene como referencia de tierra la parte metálica exterior.

El primer control de interés es el que se usa para determinar la forma funcional del voltaje de salida. Generalmente se incluyen formas de ondas sinusoidales, cuadradas y triangulares. y en los casos de equipos más sofisticados, se pueden cambiar aspectos de la forma de onda para introducir asimetrías dentro de un período.

El equipo también trae controles que permiten ajustar la amplitud del voltaje de salida, y la frecuencia de la señal generada. Generalmente la amplitud del voltaje de salida puede ajustarse entre 0 y ± 15 V, y la frecuencia puede variarse entre 10Hz y 100 KHz. Los valores del equipo que Ud. dispondrá en su mesa de trabajo pueden diferir ligeramente.

El ajuste de frecuencia se hace mediante dos controles, una perilla que fija la potencia en base diez y un dial que permite ajustar con una precisión de dos cifras significativas el coeficiente del término potencial. Adicionalmente, algunos generadores de señal pueden traer un control para añadir una componente de voltaje constante (DC OFFSET). Ésta permite cambiar el nivel de referencia de la señal desde una condición totalmente positiva hasta una totalmente negativa, incluyendo la posición intermedia de referencia cero en la cual las amplitudes de la señal son simétricas. Cuando opere un generador debe verificar el estado de este control para no incurrir en errores. Se recomienda tenerlo desactivado, a menos que se desee usarlo específicamente.

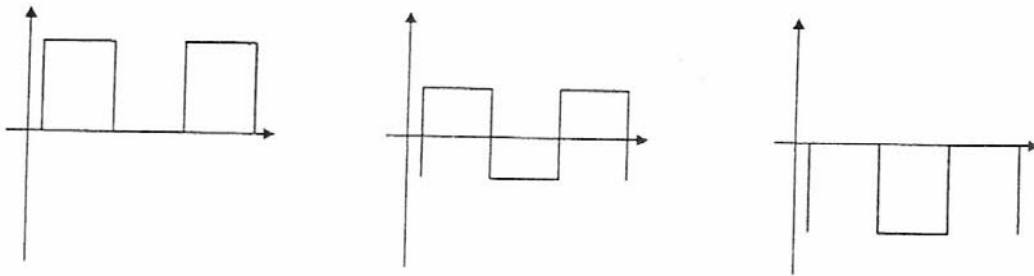


Fig. 5: Ilustración del efecto de la variación del nivel de referencia

Por último, el generador de señales trae otros controles que permiten hacer ajustes finos a la frecuencia (por lo tanto, no tome el equipo como un patrón de frecuencia), y programación de barridos en frecuencia. Sin embargo, una explicación de su funcionamiento escapa del propósito de esta práctica.

A. Medida de voltajes A C y DC

En este ensayo se busca que Ud. identifique las distintas funciones que hemos descrito anteriormente tanto para el osciloscopio como para el generador de señales.

A 1.- Encienda el osciloscopio con las dos entradas en GND, el modo vertical tal que se vean los dos canales (CHOP o DUAL) y el modo de disparo (trigger) en AUTO. Identifique los dos trazos correspondientes a los canales 1 y 2. Ajuste intensidad y foco. Ajuste la posición vertical y horizontal del haz. Ajuste el tiempo de barrido horizontal a 1 ms/div. (1div = 1cm)

A2.- IMPORTANTE: Antes de encender el generador, conecte la salida del generador de señales al circuito. Proceda a encender el generador de señales. Ajústelo para un voltaje de salida a mitad del rango del control, con una onda sinusoidal de 1 KHz y con una referencia en cero voltios (OFF SET apagado).

A3.- Ponga la entrada del canal 1 en DC y la sensibilidad en 5 V/div. Conecte la salida del generador de señales al canal 1 del osciloscopio. **CUIDADO: Evite que los terminales de salida del generador de señales se toquen. Para este fin enchufe los terminales en el circuito. Un cortocircuito pudiera dañar los instrumentos** .Deberá observar en pantalla una señal sinusoidal con un período de aproximadamente 1 división horizontal. Si la señal no está estabilizada (por ejemplo, lo que ocurriría si pusiera el SOURCE del barrido horizontal en LINE), ensaye variando el TRIGGER LEVEL, o, aún mejor, cambie el modo horizontal a NORM y varíe el TRIGGER LEVEL. Haga que la señal ocupe al menos 6 divisiones verticales cambiando la sensibilidad del osciloscopio o el nivel de salida del generador de señales. Con el modo horizontal en NORM, observe cómo puede variar el instante de disparo del haz para iniciar la observación en diferentes puntos de la señal sinusoidal ajustando el nivel de disparo. Ensaye el cambio de pendiente del instante de disparo sacando el control del nivel de disparo. Ensaye otras velocidades de barrido cambiando el tiempo por división.

A4.- Mida el período de la señal sinusoidal para los siguientes valores de la frecuencia en generador de señal: 100 KHz, 10KHz, 1 KHz, 100 Hz y 10Hz. Compare la frecuencia del generador con la obtenida a partir del período medido con el osciloscopio.

A5.- Ensaye cambiando las formas funcionales de la salida del generador de señales. Con una señal sinusoidal de 1 KHz, póngale un OFFSET. Determine con el osciloscopio la magnitud de las componentes AC y DC de la señal. Vea la diferencia de trabajar con la entrada en DC y AC.

A6.- Con la entrada del canal del osciloscopio en DC, observe la señal de una onda cuadrada de 1 KHz, 100 Hz, 10Hz y 1 Hz. Repita las observaciones con la entrada en AC. Haga figuras que ilustren sus observaciones. ¿Hay alguna diferencia entre ambos modos de observación? Explique.

B. Medidas de diferencias de amplitud y fase entre señales

El propósito de esta sección es estudiar el procedimiento para comparar señales. Con este propósito usaremos el circuito RC que se muestra a continuación:

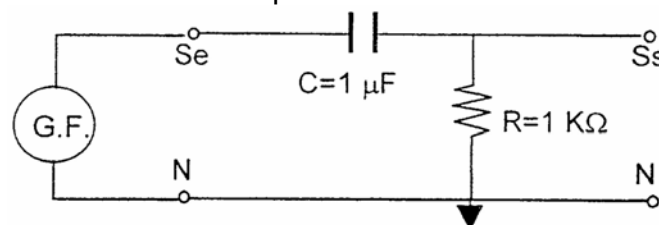


Fig 6: Circuito RC

Para conectar el circuito debe conectar el conductor externo de la salida del generador de señales al punto N del circuito y el conductor central al punto Se, el cual identificaremos como señal de entrada Se. La diferencia de potencial a los extremos de la resistencia la identificaremos como la señal de salida, esto es, Ss. Use una onda sinusoidal de 10KHz.

B1.- Ajuste el osciloscopio con el modo vertical en CHOP para que tenga en la mitad superior de la pantalla del osciloscopio el trazo del canal 1 y en la inferior el del canal 2. Centre los trazos con las entradas en GND. Dispere el barrido horizontal con el SOURCE en CH1, COUPLING en AC y el MODE en NORMAL, produciendo el disparo con un nivel de trigger positivo lo más cercano a cero posible.

B2.- Observe con el canal 1 la señal de entrada, Se. Ajuste la amplitud de la señal de entrada para que ocupe algo menos de cuatro divisiones y afine el nivel de disparo para que el instante de disparo ocurra lo más cercaría al cero con pendiente positiva. Debe observar una señal como la que se tiene en la figura 2.

B3.- Observe ahora en el canal 2 la señal de salida, Ss. ¿Cómo se compara la amplitud de la señal de salida respecto a la de entrada? ¿Cómo se ubica en el tiempo la señal de salida respecto a la de entrada?

B4.- Repita la observación de la señal de salida a una frecuencia de la señal de entrada 1 KHz y a 100 Hz. ¿Qué diferencia aprecia en estas observaciones respecto a la que hizo a

10KHz? Describa los resultados de la secuencia de cambios para las tres observaciones. Si la señal de entrada la representamos como $V_e = V_{oe} \sin(\omega t)$, la señal de salida puede ser expresada, entonces, como $V_s = V_{os} \sin(\omega t - \phi)$, donde ϕ es el ángulo de fase de la señal de salida respecto a la de entrada. El signo negativo que precede a ϕ es por convención, de forma tal que cuando la salida está retardada respecto a la entrada ($\Delta t < T$) como se indica a la izquierda en la figura 3, el ángulo de fase es positivo; y cuando el voltaje de salida está adelantado respecto a la señal de entrada, entonces el ángulo de fase es negativo, como se indica a la derecha de la figura 3. Para calcular el ángulo de fase debemos establecer que un período completo de la señal corresponde a 2π radianes, o 360° . Un corrimiento en tiempo Δt de la señal de salida respecto a la de entrada ($\Delta t < T$) corresponde a un ángulo de fase ϕ igual a $2\pi \times \Delta t / T$ radianes, o $360 \times \Delta t / T$ grados, y el signo será positivo si se retrasa en tiempo respecto a la entrada y negativo si se adelanta en tiempo.

B5.- Elabore un gráfico de la relación V_{os} / V_{oe} vs la frecuencia y otro gráfico del ángulo de fase ϕ vs la frecuencia, en el rango desde 100Hz hasta 100 KHz. Note que una escala logarítmica para el eje x, en ambos casos debe ser la mas conveniente. Este gráfico debe tener por lo menos 10 puntos 100 Hz, 500 Hz, 1 KHz, ... ETC.

B6.- Comenzando por la señal de 10KHz, ajuste el osciloscopio tal como lo tenía en el paso **B3**.

B7.- Cambie el control de TIME/DIV a la posición X-Y. Use el control de posición del barrido horizontal para desplazar el trazo en el eje x y el control de posición del canal 2 para moverlo en el sentido vertical. Ajuste la sensibilidad de los canales para maximizar el tamaño del trazo. Describa su observación.

B8.- Variando la frecuencia desde 20 KHz hasta 10 Hz, describa y explique los cambios en el trazo que tiene en pantalla. Puede variar la amplificación del canal 2 para que ambas señales queden de igual amplitud en la pantalla del osciloscopio.

Para el caso de ángulos de fase entre 0 y $\pi/2$, la figura va desde una recta hasta un círculo. Midiendo la amplitud máxima y la amplitud para $x = 0$, tal como se muestran en la figura 6, se puede calcular el ángulo de fase de la señal vertical respecto a la señal horizontal mediante la siguiente relación:

$$\delta = \phi_1 - \phi_2 = \text{sen} (y_0 / y_M)$$

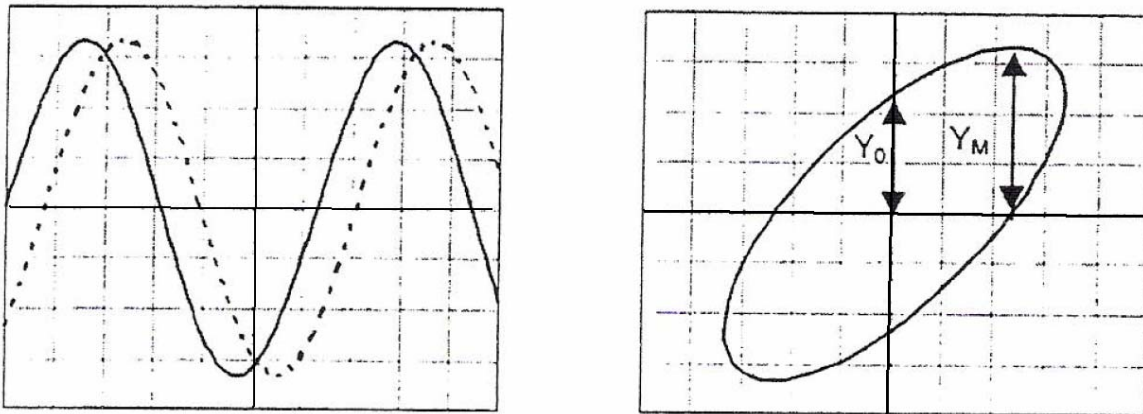


Fig. 7: Visualización en pantalla de dos señales desfasadas $\pi/4$ rad.
Izquierda: modalidad v vs t; derecha: modalidad x-y

B9.- Ubique el generador de funciones a una frecuencia de 200 Hz. En la modalidad v vs t del osciloscopio, mida el período T y el corrimiento, Δt entre ambas señales para determinar la diferencia del ángulo de fase entre ambas señales. Luego, con la figura de Lissajous, centrada respecto los ejes de coordenada de la pantalla, mida y_0 e y_M para determinar la diferencia del ángulo de fase entre ambas señales por el método de la figura de Lissajous. ¿Como se comparan ambas mediciones? ¿Coinciden dentro de los límites de error de cada medición?

PREGUNTAS

1. Discuta las posibles fuentes de error para medir frecuencias con el osciloscopio.
2. Describa las posibles formas de medir desfasaje entre señales usadas en la práctica.
3. Discuta bajo qué condiciones podría usar las figuras de Lissajous como un método para medir frecuencia.

REFERENCIAS

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, física, Vol. 2, Ed. Continental (1995).
2. M. Alonso y J. Finn, física general, Vol. 2.

APÉNDICE: SIMULACIÓN EN EXCEL DE FIGURAS DE LISSAJOUS

Un uso importante de la computadora en física es la simulación. Para mostrar como se puede hacer una simulación con la computadora utilizaremos el EXCEL para simular las figuras de Lissajous.

La simulación consiste en hacer un grafico en el cual en el eje X programamos una función sinusoidal y en el eje Y programamos otra función sinusoidal. Las funciones programadas tienen una relación de frecuencia y de fase tal que producen una figura de Lissajous. Cambiando estas variables se pueden producir una variedad de imágenes que tienen una gran belleza, particularmente cuando las vemos en tiempo real en un osciloscopio.

Siga las siguientes instrucciones para producir una imagen sencilla. Luego puede experimentar para obtener otras imágenes más complejas.

Para esto abrimos una hoja de cálculo de EXCEL y seguimos los siguientes pasos:

1.- Definimos nombres para las variables, n , que representa la relación entre las frecuencias, y f (radianes) la fase de la segunda señal respecto a la primera.

Para esto usamos la opción Define de la columna Insert en las celdas C1 y C2, una a la vez.

2.- Titulamos tres columnas: la A con t para indicar el tiempo; la B con $V_x = \sin(t-0)$ para representar la señal 1 que graficaremos en el eje X; y la C con $V_y = \sin(nxt-f)$ para representar la señal 2 que graficaremos en el eje Y.

3.- La columna t la iniciamos con un cero, y las siguientes celdas son iguales a la anterior más 0,2, hasta llegar a 15 radianes. (Escribir, en la celda debajo del 0 lo siguiente: $=A4+0,2$) Luego duplicar esa instrucción hasta que el valor es 13.2 radianes (Seleccionar la celda, poner el cursor sobre el extremo inferior derecho de la celda, cuando el cursor se convierte en una cruz, Hacer clic y arrastrar hacia abajo)

4.- La columna $V_x = \sin(t-0)$ la llenamos con los valores de $\sin(\text{columna de } t)$, (Hacer clic en la celda B4, INCERTAR, seleccionar FUNCION, seleccionar SENO, aceptar, escribir A4 en la ventana que aparece, aceptar.

Duplicar este valor hasta que el ángulo sea 15 (Seleccionar la celda, poner el cursor sobre el extremo inferior derecho de la celda, cuando el cursor se convierte en una cruz, Hacer clic y arrastrar hacia abajo)

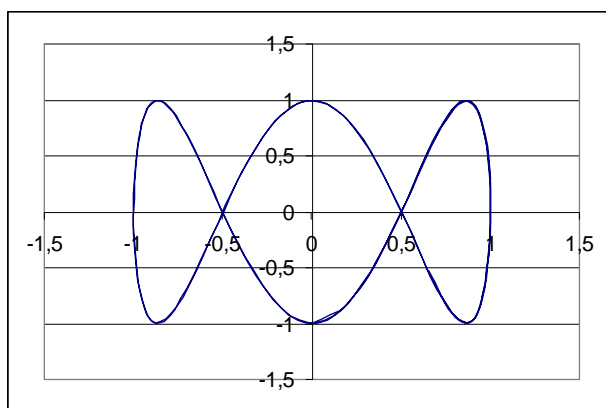
5.- La columna $V_y = \sin(nxt-f)$ la llenamos con los valores de $\sin(nxt-f)$ Escogiendo valores para n y para f . Por ejemplo usar $n=3$ y $f = 1,57$.

La página EXCEL debe verse como la figura siguiente:

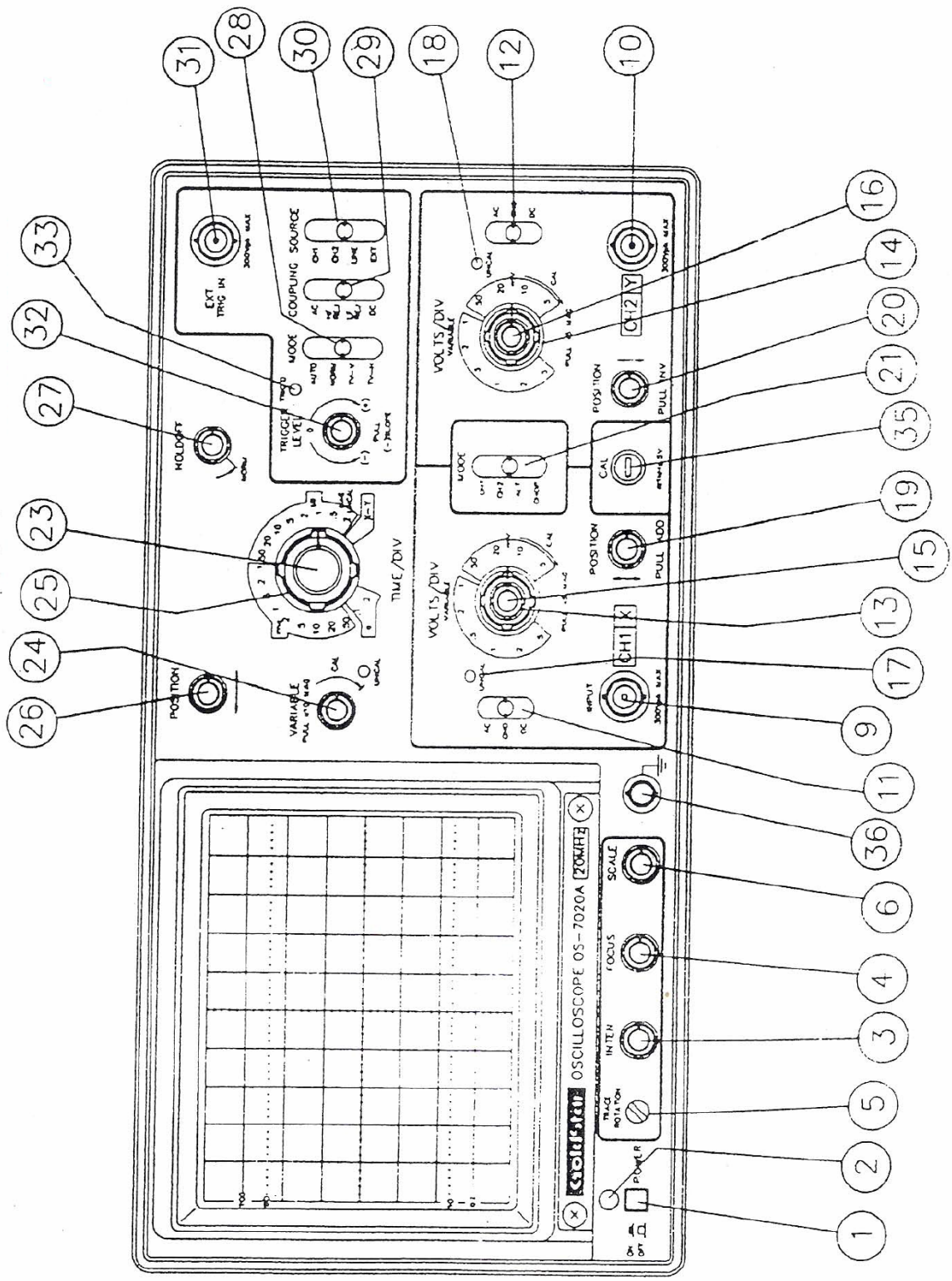
	A	B	C	D
1	n= relacion de frecuencias			
2	f = diferencia de fase (radianes)			
3	Tiempo (Se $V_x = \text{sen}(t-0)$ $V_y = \text{sen}(nt-f)$)			
4	0	0	-1	
5	0,2	0,198669331	-0,824886	
6	0,4	0,389418342	-0,361615	
7	0,6	0,564642473	0,227978	
8	0,8	0,717356091	0,737931	
9	1	0,841470985	0,990105	

* Una vez que se tienen definidas las columnas, se procede a crear un gráfico tipo Dispersión (Scatter) con los datos de las dos columnas B y C. Para el tipo de gráfico selecciones líneas continuas.

El resultado debe ser una gráfica como la que se indica a continuación:



Cambiando los valores de n, puede obtener frecuencias del doble, el triple o la mitad de la frecuencia de la señal 1 ($n = 2, 3, 0.5$). Cambiando la fase f puede lograr las diferentes formas que va tomando el trazo en la pantalla del osciloscopio a medida que la señal 2 se desfasa respecto a la señal 1 ($f = 0, 1,57, 3,14, 6,28, \text{etc.}$). Esta simulación lo ayudará a contestar las preguntas de la sección D de la práctica.



LEYENDA

(1) Encendido ON-OFF

(2) Encendido Indicación.

(3) IN TEM control

(4) FOCUS control

(5) control ROTACION

(6) LLUMINACION control

(9) CH1 o X IN. Conector canal 1

(10) CH2 o Y IN. Conector canal 2

(11) CH1 AC/GND/DC control

(12) CH2 AC/GND/DC control

(13) CH1 VOLTS/DIV control

(14) CH2 VOL TS/DIV control

(13)(15)(14)(16) Control VARIABLE de SENSIBILIDAD eje VERTICAL

(15)(16) HALAR x5 MAGNIFICACION controles

(17)(18) NO CALIBRADO lámparas

(19) CH 1 POSICION control

(19) PULL ADD switch conector

(20) CH2 POSICION control

(20) Halar control para invertir señal

(21)V MODE control

(23)TIEMPO/DIV control

(24)TIEMPO VARIABLE control

(24)HALAR x 10 MAGNIFICACION DEL BARRIDO

(23)(25)Control variable del barrido HORIZONTAL

(26) Horizontal POSICION control

(27)HOLD OFF control

(28) Trigger MODE control

(29) Trigger ACOUPLE control

(30) Trigger SOURCE control

(31) EXT TRIG IN conector

(32) Trigger LEVEL. Control del nivel de disparo.

(32) Trigger PENDIENTE control

(33) TRIGD lampara

(34) EXT BLANKING INPUT

(35) CAL conector

(36) Tierra conector

DINÁMICA DE ROTACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL MOMENTO ANGULAR

OBJETIVOS

- 1) Estudiar el movimiento circular uniformemente acelerado.
- 2) Estudiar la relación entre la fuerza, el brazo de aplicación y la aceleración angular.
- 3) Verificar el principio de la conservación del momento angular.

MATERIALES

1. Mesa con eje fijo, polea y alimentación de aire comprimido.
2. Discos de diferentes masas.
3. Pesos y soporte.
4. Computadora con interfase para medir velocidades angulares.
5. Balanza.
6. Cables.

TEORÍA

El tema central de esta práctica será el estudio del movimiento de cuerpos rígidos alrededor de ejes fijos. Este tipo de movimiento es muy importante porque es el que se tiene en cualquier sistema de poleas o engranajes ya sea libres, adosados a motores o con cargas que retarden su movimiento.

Si el movimiento es absolutamente libre, es decir, el torque total sobre el sistema es cero, se tiene un movimiento circular uniforme que se puede describir con la relación:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \text{Constante}$$

donde $\Delta\theta$ es el ángulo girado en el intervalo de tiempo Δt y ω es la velocidad angular del sistema.

Si sobre el sistema actúa un torque, que viene dado por la relación vectorial

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

entonces, existe una aceleración angular α

$$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

que se relaciona con el torque, mediante la expresión:

$$\vec{\tau} = I\vec{\alpha}$$

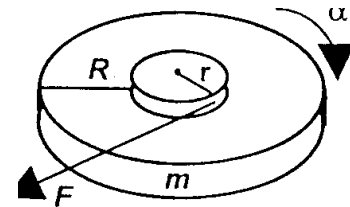


Fig. 1: Sistema de poleas

Si el torque es constante en el tiempo, el movimiento se le llama: circular uniformemente acelerado, el cual se puede describir en una dimensión mediante las ecuaciones,

$$\Delta\theta = \omega_0\Delta t + \frac{1}{2}\alpha(\Delta t)^2$$

$$\alpha = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t}$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\Delta\theta$$

En términos de variables energéticas y siguiendo la analogía con el movimiento de traslación, se puede demostrar que la contribución a la energía cinética de un cuerpo rígido con momento de inercia I que rota sobre un eje fijo, viene dada por:

$$E_K = \frac{1}{2}I\omega^2$$

Si sobre nuestro sistema actúan sólo fuerzas conservativas, la energía mecánica (cinética + potencial), permanece constante en cualquier etapa del movimiento. Si por el contrario, existen fuerzas no conservativas (roce), la variación en energía mecánica del sistema es igual (a partir del teorema del trabajo y la energía) al trabajo hecho por estas fuerzas no conservativas.

También, en forma análoga a la dinámica traslacional, el torque viene dado por la derivada respecto al tiempo del momento angular \vec{L}

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d(\vec{r} \times \vec{p})}{dt}$$

Cuando el torque total que actúa sobre el sistema es cero, entonces el momento angular se conserva, es decir \vec{L} permanece constante.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

1. Estableciendo las relaciones dinámicas para el montaje propuesto en el experimento **B**, Calcular la aceleración de la masa que cae, en términos de la masa del disco M_d su radio R_d , la masa m , el radio de la polea b_F y la gravedad g .
- 2, Partiendo del montaje presentado en el experimento **B**, y suponiendo que m recorre una altura máxima H_c calcular la energía total (cinética y potencial) del sistema masa + disco, justo antes de soltar la masa m , y en el instante en que alcanza su máxima velocidad. Como se comparan estas dos energías, sin roce y en presencia de un roce constante.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este experimento usaremos un sistema (ver figura 2) que consta de una unidad central o mesa con una base, la cual define el eje fijo del experimento. La unidad posee una entrada para la alimentación con aire comprimido a 10 psi (libras por pulgada cuadrada), a fin de minimizar el roce cuando giran los discos alrededor del eje.

Sobre la base debe colocarse el disco de acero marcado especialmente para que vaya en la parte inferior. Sobre este disco se coloca un segundo disco para el cual se tienen dos alternativas (uno de acero y otro de aluminio).

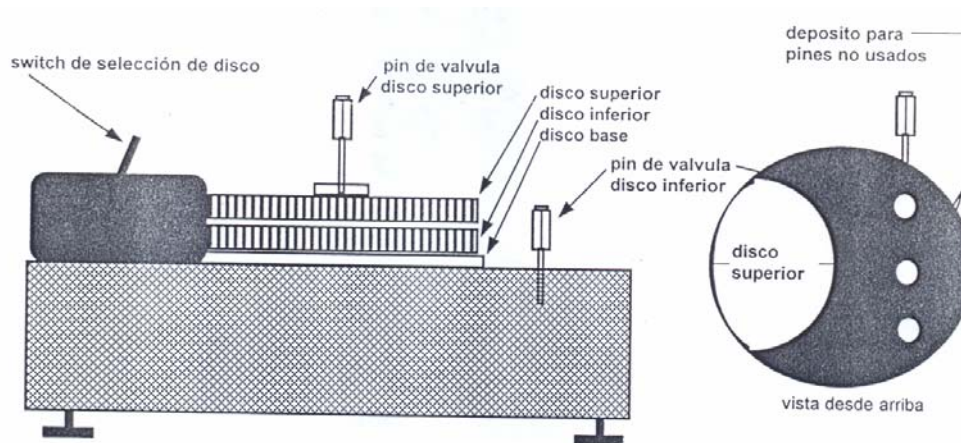


Fig. 2: Diagrama de la mesa para estudio del movimiento circular

Para controlar el giro de los discos se colocan pines en orificios (uno en la superficie plana de la unidad central y el otro en el centro del eje de giro) con lo cual se redirecciona el flujo de aire comprimido. Si se tapa solamente el orificio sobre la superficie plana se hacen rotar ambos discos en forma solidaria. Si se tapa solamente el orificio en el eje de giro el disco inferior permanece fijo y rota el disco superior. Y si se colocan ambos pines, entonces ambos discos rotan independientemente.

En la parte adyacente al borde de los discos se tiene un dispositivo electrónico el cual permite determinar la velocidad angular (en revoluciones por segundo) a la que está girando el disco superior o inferior, según sea la posición del interruptor. El dispositivo también tiene una conexión con la computadora desde la cual se controla la medición, el cual describiremos en detalle más adelante.

Inicie el trabajo experimental familiarizándose con cada uno de los elementos antes descritos. En primer lugar identifique la unidad central y proceda a nivelarla. Seguidamente identifique la entrada del aire comprimido y aliméntela con una presión de 10 psi. Coloque el par de discos y verifique las posibles modalidades de rotación colocando los pines en los orificios correspondientes.

Conecte la alimentación eléctrica del dispositivo electrónico para medir velocidades angulares, y seleccione con el interruptor uno de los discos que este girando. Verifique su funcionamiento mediante el indicador de cristal líquido en él, e interprete el valor que reporta en término de una velocidad angular.

Verifique la conexión del dispositivo electrónico para medir velocidades angulares con el computador. Encienda el computador en WINDOWS y proceda a activar el programa de control del dispositivo. (Icono identificado como DinaRot). Todas las medidas se realizarán con este programa. El instructivo del programa se encuentra en el Apéndice A3 en esta guía. **“INTERFAZ Y SOFTWARE DE ADQUISICIÓN PARA EL EQUIPO ROTATIONAL DYNAMICS APPARATUS PASCO MODEL ME-9279a”**

Antes de proceder con la realización de la práctica ensaye varias mediciones realizando los cambios en los parámetros del programa que considere necesarios. Tome datos, gráfíquelos, haga ajustes de mínimos cuadrados con todos o parte de los datos, etc .. En lo sucesivo haga todos los registros de los ensayos que practique usando la computadora. Guarde los resultados en archivos en el subdirectorío PRACTICA que está en el directorío ROTACION.

A. Medida de la fricción del sistema.

En este ensayo estudiaremos la fricción del disco superior mientras está rotando. El torque debido a las fuerzas de fricción se originan tanto en el eje como sobre toda la superficie del disco. La primera tarea será verificar si es constante en el tiempo, y si depende de la velocidad angular o de la masa del disco que rota.

- A 1.- Seleccione el disco de acero. Ajuste en el menú principal opción S las condiciones para hacer un registro de la velocidad angular durante 120s y hacer seguimiento al disco superior.
- A2.- Imprímale diferentes velocidades angulares al disco y haga registros con la opción del software en la computadora. Gráfíquelos, hágale ajuste de mínimos cuadrados para determinar la aceleración y la velocidad inicial con sus respectivos errores. Extraiga la información de la pantalla de la computadora y haga un gráfico de la aceleración angular en función de la velocidad angular inicial.
- A3.- Repita los pasos A 1 Y A2 usando el disco de aluminio.
- A4.- ¿Cuáles son sus conclusiones acerca del roce del sistema, en función de sus mediciones?
¿Cómo se comparan las aceleraciones en los dos discos?

B. Estudio de la acción de un torque constante.

El propósito de esta sección es estudiar todos los aspectos cinemáticos y dinámicos del movimiento de un sistema constituido por un disco de radio R_d y masa M_d , que gira en torno a un eje fijo bajo la acción de un torque constante, de brazo b_F , producido por una polea (de masa despreciable), en torno a la cual se enrolla un cordel, y en cuyo extremo cuelga una masa m , que cae una distancia h_e bajo la acción de la gravedad.

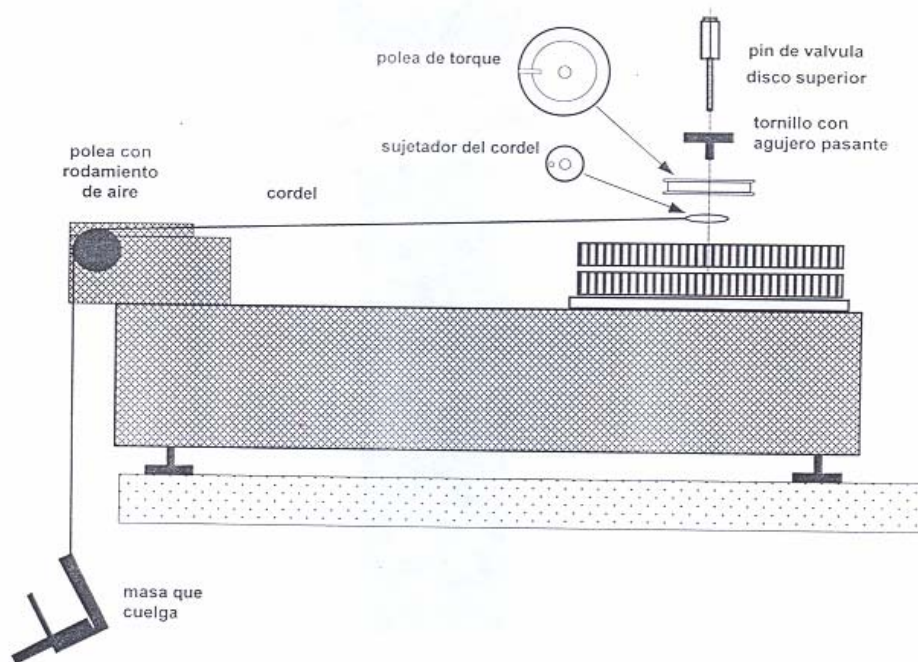


Figura 3: Montaje experimental

B1.- Monte el sistema de la figura 3 en el cual solo el disco superior es libre de moverse. Al hacerlo tome nota de la masa del disco. Ajuste el largo del cordel de forma tal que no llegue al suelo la masa cuando cae, y anote la distancia que recorre desde el punto que lo va a soltar hasta que se desenrolle todo el cordel.

Use la polea de radio pequeño para enrollar el cordel, el cual es el brazo de la fuerza.

B2.- Ajuste los parámetros del software que controla la adquisición de datos para que tome suficientes mediciones desde poco antes del instante que suelta la masa hasta justo después que se detiene cuando se desenrolla el cordel.

B3.- Interpretando los datos del gráfico que produce el software, extraiga la información que se indica en la tabla que se da a continuación. Repita las mediciones para tres masas m diferentes (10, 20 Y 40 g). Para cada magnitud que mida recuerde reportar el error que tienen asociado, así como los errores que genera el programa cuando haga ajustes de regresión lineal.

$M_d =$

$R_d =$

$b_F =$

$H_c =$

	$m_1 =$	$m_2 =$	$m_3 =$
velocidad angular inicial,			
velocidad angular final, ω_f			
Tiempo de caída. $t = t_f - t_i$			
aceleración angular del disco, α			

B4.- Con la información de la tabla anterior calcule la aceleración de la masa que cae, completando la siguiente tabla:

	m_1	m_2	m_3
aceleración tangencial en $r = b_F$, $a_b = \alpha b_F$			
aceleración del bloque que cae, $a_b = 2H_c / t^2$			
Cálculo de la aceleración del bloque en base A, M_d, R_d, m_p, b_F y g .			

Compare sus resultados entre si y con el cálculo de cual debe ser la aceleración del bloque cayendo y concluya.

B5.- Calcule la energía cinética máxima de rotación del disco, la energía cinética máxima de traslación de la masa m_p (considere que la velocidad de traslación es igual a la velocidad

tangencial del disco a un radio b_F , es decir $V_{bf} = \omega_F b_F$, Y la variación de energía potencial del sistema al recorrer m_f una distancia H_c

	m_1	m_2	m_3
E_K de rotación del disco			
E_K de traslación de la masa m_i			
ΔE_o por caída de la masa m_i			

¿ Cuáles son las conclusiones sobre sus resultados en términos de la variación de la energía mecánica?

B6.- Para un conjunto de condiciones iniciales de su elección, haga el experimento de dejar caer libremente la masa. Sin embargo, en este caso extienda la adquisición de datos por varios ciclos de desenrollado y enrollado del cordel mientras la masa m baja y sube. Grafique los datos.

B7.- Para un número de ciclos determinado, calcule el cambio de energía mecánica total por la variación de la altura hasta la cual llega la masa m . Compare ese cambio de energía con la energía cinética rotacional del disco en su punto de máxima velocidad, cuando la masa m pasa por el reposo al cambiar su dirección de movimiento.

B8.- Compare el cambio de energía mecánica del paso anterior con el trabajo realizado por la fuerza de fricción durante el intervalo que estaba oscilando el sistema, y determine además, la potencia disipada por el roce en este intervalo.

NOTA: Para calcular el trabajo por unidad de tiempo que realiza la fuerza de fricción evalúe el cambio de energía cinética de rotación del disco libre durante cierto intervalo de tiempo y divídalo entre ese lapso. Lo que obtiene de esta manera se le llama la potencia disipada por efecto de la fuerza de fricción.

C. Verificación de la conservación del momento angular.

En esta última parte de la práctica se verificará la conservación del momento angular al hacerse cambiar el momento de inercia de un sistema, adosándole otro disco en un estado inicial de movimiento diferente.

C1.- Use los dos discos de acero. Coloque las clavijas de control de forma tal que ambos discos puedan girar independientemente. Seleccione en el software de adquisición de datos la alternativa de seguimiento de los dos discos con la opción "O" (Selection Disk).

C2.- Manteniendo manualmente el disco inferior fijo, ejecute la opción "M" del software y tome datos por algunos segundos. Libere el disco inferior y retire la clavija en el eje de giro. Esto provocará que el disco superior caiga sobre el inferior, y este último empiece a girar. Después que hayan transcurrido varios segundos desde que se unieron los discos, las velocidades de ambos discos se habrán estabilizado. Detenga

la adquisición de datos.

C3.- Graficando los datos extraiga la siguiente información:

$$M_{DINF} = \quad MD_{sup} = \quad R_{DINF} = \quad R_{DSUP} =$$

	D_{sup}	D_{INF}
Velocidad angular ω_o justo antes de la unión.		
Velocidad angular ω_f justo des pues de la unión.		
Momento angular inicial.		
Momento angular total inicial del sistema.		
Momento angular total final del sistema.		

Concluya sobre sus mediciones y compare las velocidades angulares medidas con los resultados que deberían obtenerse teóricamente.

C4.- Repita los pasos C1 al C3 usando el disco inferior de acero, y el superior de aluminio.

PREGUNTAS

1. ¿Explique los factores que determinan la aceleración angular debido al roce?
2. Describa en términos de la tensión del cordel lo que ocurre cuando la masa m , de la parte B de la práctica, llega al punto más bajo de su movimiento.
3. ¿Por qué el proceso de unión del disco de acero con el de aluminio tarda un tiempo considerablemente más largo que en el caso de los dos discos de acero?

REFERENCIAS

- 1.- D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, Física, Vol. 1, Caps. 11, 12 Y 13, Ed. Continental (1995).
- 2.- "Rotational Dynamics Apparatus", manual 012-04329C, editado por PASEO scientific, (1992). (Hay copias de este manual en el Laboratorio)
- 3.- Manual del Usuario: Interfaz y Software de Adquisición para el Equipo Rotational Dynamics Apparatus PASCO Model ME-9279 A. Ver apéndice A3 de esta guía

PÉNDULO DE TORSIÓN

OBJETIVOS

- Determinar la constante de torsión de un péndulo.
- Estudiar la dependencia del período de oscilación con el momento de inercia.
- Determinar experimentalmente el momento de inercia de un objeto en forma de volante.

MATERIALES

1. Aparato de torsión.
2. Hilo de torsión.
3. Disco.
4. Barra.
5. Dos pesas.
6. Volante.
7. Cronómetro.
8. Vernier.
9. Balanza.
10. Juego de llaves Allen.

TEORÍA

Un péndulo de torsión consiste, en su forma más sencilla, en un cuerpo rígido suspendido por medio de un alambre (hilo de torsión) el cual está sujeto a un soporte fijo, como indica la *figura 1*. Cuando el cuerpo se aparta de su posición de equilibrio, haciéndolo girar en torno al eje, el alambre se tuerce y ejerce un torque de restitución τ sobre el cuerpo y éste tenderá a volver a la posición de equilibrio, ejecutando una serie de oscilaciones.

Para ángulos de torsión pequeños el torque resulta proporcional al desplazamiento angular θ (versión de la Ley de Hooke análoga a $F = -kx$), es decir:

$$\tau = -k\theta \quad (1)$$

en donde k se conoce como la constante de torsión del alambre.

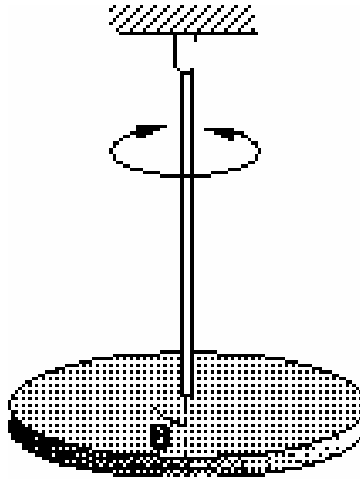


Fig. 1: Un péndulo de torsión

El torque recuperador τ proporciona una aceleración angular α y, de acuerdo a la 2ª ley de Newton para el movimiento de rotación,

$$\tau = I\alpha = I\left(\frac{d^2\theta}{dt^2}\right) \quad (2)$$

siendo I el momento de inercia del péndulo de torsión alrededor del eje perpendicular que pasa por su centro de masa.

Igualando las ecuaciones (1) y (2) se tiene:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\left(\frac{k}{I}\right)\theta \quad (3)$$

Podemos identificar esta ecuación como la de un movimiento armónico simple, cuya frecuencia angular es: $\omega = \sqrt{k/I}$ y el período correspondiente es:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{k}} \quad (4)$$

El péndulo de torsión tiene una variedad de aplicaciones. Por ejemplo, las oscilaciones por torsión constituyen la base de funcionamiento de relojes mecánicos y también de galvanómetros de laboratorio.

Se puede utilizar el péndulo de torsión para determinar la constante de torsión de un alambre. Si a partir de otras medidas o cálculos conocemos el momento de inercia del sistema, la medida del período de oscilación nos da de inmediato el valor de k , con ayuda de la ecuación (4).

Una vez determinada la constante de torsión, también podemos utilizar el péndulo como un instrumento sensible para medir pequeños torques y pequeñas fuerzas. Como hecho curioso Cavendish, en 1798, utilizó un péndulo de torsión para determinar la constante G de gravitación universal y con este valor pudo así indirectamente, *pesar la Tierra!*

ACTIVIDADES PRELIMINARES

En la sección B se considera un cuerpo constituido por una barra y dos pesas ubicadas simétricamente (figura 2). La expresión que se usa para el momento de inercia, respecto a su eje perpendicular de simetría, es una aproximación. Deduzca la expresión teórica exacta para el momento de inercia que toma en cuenta todas las dimensiones de los objetos.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El aparato de torsión que usaremos en este experimento consiste en un soporte con su base, del cual se sujeta firmemente un alambre delgado, por su extremo superior. En el extremo inferior del alambre, pueden suspenderse objetos de formas geométricas variadas, los cuales pueden oscilar libremente. El aparato también está provisto de una escala graduada y de un indicador angular del objeto que oscila. Los períodos de oscilación del péndulo se miden mediante un cronómetro electrónico, accionado manualmente.

Antes de iniciar el experimento, usted debe familiarizarse con las diferentes partes del aparato y con el funcionamiento del cronómetro.

A. Determinación de la constante de torsión

A1. Tome el disco y determine su masa M (en kg) y su radio R (en metros) para calcular su momento de inercia.

$$I_{\text{disco}} = \frac{1}{2}MR^2$$

Determine el correspondiente error.

A2. Proceda a instalar el disco en el extremo de la varilla.

A3. Haga oscilar el péndulo y determine el período de las oscilaciones (en segundos). Para ello se recomienda medir el tiempo que tarda en realizar 10 oscilaciones.

A4. Repita el procedimiento anterior *10 veces* (¿para qué?) y calcule el promedio, la desviación estándar (σ) y la desviación estándar de la media (σ / \sqrt{N}).

A5. Calcule la constante de torsión k del péndulo y su correspondiente error.

B. Variación del período de oscilación del péndulo con el momento de inercia

Una barra de masa M y largo L tiene un momento de inercia respecto de su eje:

$$I_b = \frac{1}{12}ML^2$$

Si le agregamos dos pesas de masa m , a distancia r de su centro como en la figura 2, el momento de inercia total será:

$$I = \frac{1}{12}ML^2 + 2mr^2$$

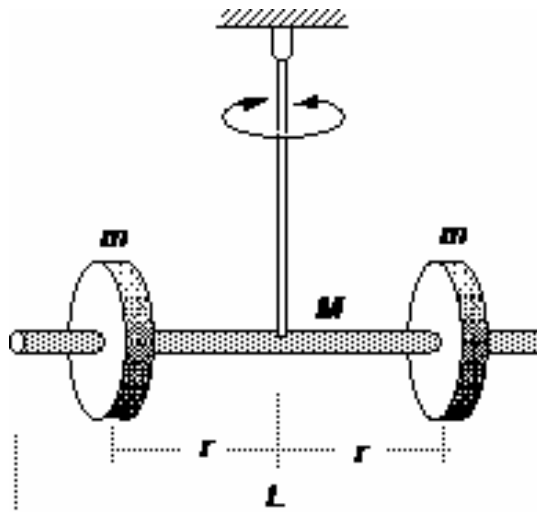


Fig. 2: Péndulo constituido por barra y dos pesas

Sustituyendo esta expresión en la ecuación 4, se obtiene la siguiente ecuación para el período de rotación de este sistema respecto de su eje:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{12}ML^2 + 2mr^2}{k}}$$

Elevando al cuadrado ambos miembros de esta ecuación, se obtiene:

$$T^2 = \frac{\pi^2 ML^2}{3k} + \left(\frac{8\pi^2 m}{k}\right)r^2 \quad (5)$$

Esta ecuación expresa la dependencia del cuadrado del período en función del cuadrado de la distancia de las pesas al centro de rotación.

- B1.** Desmonte el disco del aparato y coloque en su lugar la barra. Coloque en la barra las dos pesas de manera que queden equidistantes del eje de simetría.
- B2.** Proceda a medir el período de oscilación del péndulo en función de la distancia radial r de las pesas. Para ello debe cambiar la posición de las pesas por lo menos en 10 mm para cada medida y realizar 10 medidas del período en cada una de estas posiciones. Determine la desviación estandar de la media (σ / \sqrt{N}) para el período correspondiente a cada posición de las pesas.
- B3.** Construya una tabla con los datos de la distancia radial r a las pesas y de los períodos T correspondientes. Agregue a la tabla columnas con los valores del cuadrado de los períodos y de la distancia radial, así como con los errores correspondientes.
- B4.** Elabore un gráfico lineal del cuadrado del período (*en s^2*) en función del cuadrado de la distancia radial (*en metros*). Incluya barras de error en las dos variables.
- B5.** Determine la pendiente de la recta y su intersección con el eje de T^2 . Para ello haga un ajuste de mínimos cuadrados a los datos y determine la ecuación empírica de la recta.
- B6.** Mida la longitud de la barra y las masas de la barra y de las pesas y con estos valores calcule el valor teórico de la pendiente y la intersección de la recta.
- B7.** Compare los valores experimentales y teóricos de la pendiente e intersección de la recta. Justifique las discrepancias que puedan existir con base en los errores de medición que usted ha estimado en este experimento.

C. Determinación del momento de inercia de un volante

- C1.** Proceda a suspender de la varilla el objeto en forma de volante (figura 3).
- C2.** Determine el período de oscilación del volante.
- C3.** Usando los resultados anteriores, determine el momento de inercia del volante y estime el correspondiente error.

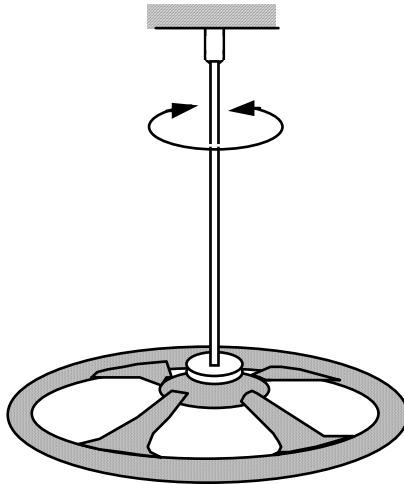


Fig. 3: Un volante como péndulo

PREGUNTAS

1. En el péndulo físico la validez de la expresión del período (Ec. 4) está condicionada a ángulos de oscilación pequeños (aproximación $\text{sen } \theta \approx \theta$). ¿Por qué no existe esta restricción para el péndulo de torsión?
2. ¿Cómo influye en sus medidas el hecho de que haya movimientos superpuestos a la oscilación torsional y qué precauciones hay que tomar para minimizar estos movimientos?
3. ¿Por qué no se toma en cuenta el momento de inercia del alambre del péndulo?
4. ¿Podrían determinarse en esta práctica momentos de inercia de cuerpos irregulares, como una llave inglesa, un martillo, etc..? ¿Cómo determinaría el punto de suspensión apropiado?

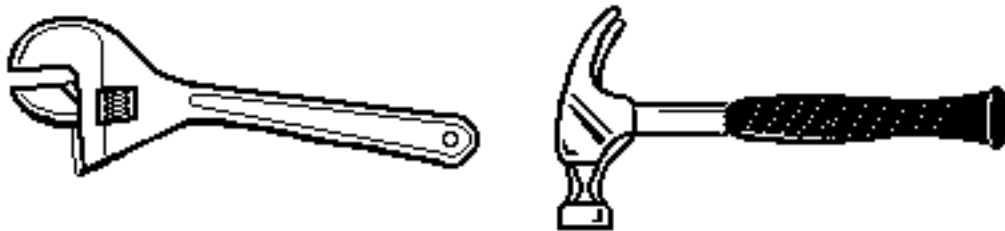


Fig. 4: Llave inglesa y martillo

- P5.** ¿Cuál es el momento de inercia del volante respecto de un eje E_A que pase por su borde radial y paralelo el eje de simetría?

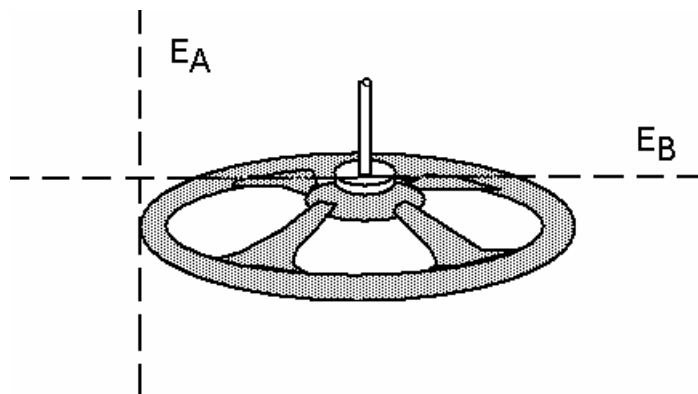


Fig. 5

P6. ¿Por qué no se puede aplicar el teorema de los ejes perpendiculares para calcular el momento de inercia del volante respecto de un eje E_B que pase por su centro y sea perpendicular al eje de simetría?

REFERENCIAS

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 1, Cap. 15, Ed. Continental (1995).
2. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 1, Cap. 10, Mc. Graw-Hill (1983).
3. R. A. Serway, *Física*, tomo. 1, Cap. 13, Mc. Graw-Hill (1992).

PÉNDULO REVERSIBLE

OBJETIVOS

- Estudio del movimiento de un péndulo físico reversible.
- Determinación precisa de la aceleración de gravedad con tres cifras significativas exactas.

MATERIALES

1. Péndulo reversible de Kater.
2. Cronómetro eléctrico.
3. Sistema de contactos magnéticos.
4. Catetómetro.

TEORÍA

El péndulo reversible de H. Kater fue ideado para medir la aceleración de gravedad con gran precisión. Recordemos que un péndulo físico es cualquier cuerpo rígido libre de oscilar alrededor de un eje. El período del *péndulo físico* para pequeñas oscilaciones viene dado por la expresión:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mgh}} \quad (1)$$

siendo m la masa del cuerpo, I su momento de inercia respecto al eje de suspensión y h la distancia de éste al centro de masa.

Comparemos esta expresión con la correspondiente a un *péndulo simple* (masa puntual suspendida de un hilo inextensible y sin peso) (*Fig. 1b*).

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2)$$

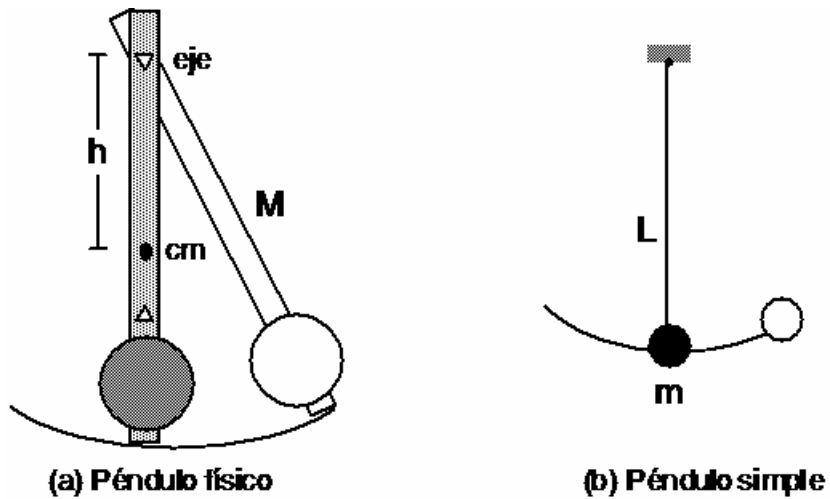


Fig. 1: Péndulo físico y péndulo simple

Vemos que un péndulo físico puede tener el mismo período que el péndulo simple si se cumple la relación:

$$L = \frac{I}{Mh} \quad (3)$$

La distancia L se llama *longitud reducida* del péndulo físico y tiene una propiedad interesante:

En el péndulo físico existe otro punto en la parte opuesta del centro de masa y a una distancia L del punto de suspensión anterior, respecto al cual el péndulo oscila con el mismo período.

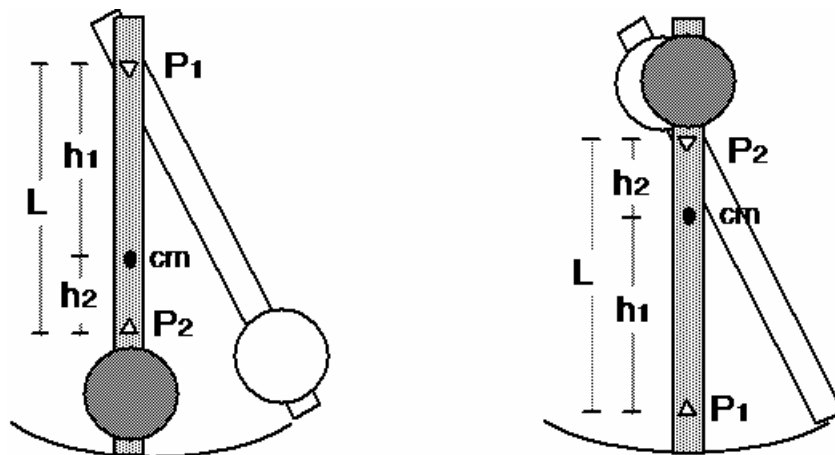


Fig. 2: Oscilaciones con igual período

Para demostrar esta propiedad, basta con aplicar el teorema de Steiner y escribir el momento de inercia respecto del punto de suspensión en términos del momento de inercia respecto del centro de masa I_{cm} . De esta manera la expresión anterior queda:

$$L = \frac{I_{cm} + Mh^2}{Mh}$$

Esta ecuación puede escribirse de la forma:

$$Mh^2 - MLh + I_{cm} = 0 \quad (4)$$

que es una ecuación cuadrática en h y evidentemente tiene dos raíces: h_1 y h_2 , que deben cumplir con las siguientes relaciones:

$$\text{producto :} \quad h_1 h_2 = \frac{I_{cm}}{M} \quad (5)$$

$$\text{suma :} \quad h_1 + h_2 = \frac{ML}{M} = L \quad (6)$$

De acuerdo a esta última relación ($h_1 + h_2 = L$) bastaría con medir el período T_1 del péndulo suspendido por P_1 , buscar el otro punto de suspensión P_2 (*no simétrico respecto del cm*) que cumpla la condición $T_2 = T_1 = T$ y la distancia entre estos dos puntos será la longitud equivalente del péndulo físico.

A partir de medidas precisas de longitud y tiempo, podemos determinar entonces el valor de la aceleración de gravedad, aplicando la relación:

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{4\pi^2 (h_1 + h_2)}{T^2} \quad (7)$$

En la práctica, resulta conveniente fijar el valor de la longitud reducida L utilizando un péndulo con los ejes de oscilación fijos y proceder a variar por tentativas el centro de masa, hasta lograr que se cumpla la condición de la igualdad de períodos de oscilación alrededor de estos ejes.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

- Derive usted la ecuación (1) de la práctica.
- Explique la razón por la cual esta experiencia pide medir el tiempo de 5 y hasta 50 oscilaciones del período en vez de pedir, simplemente, el correspondiente a una sola oscilación

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El péndulo que vamos a emplear consiste en una barra de acero de 1 m de longitud y con ranuras cada 1 cm. Sobre la barra se pueden deslizar y anclar cuatro masas. Las masas pequeñas m_1 y m_2 servirán de puntos de suspensión y por lo tanto permanecerán *fijas*. Una de las masas grandes, M_1 , se fija en un punto entre m_1 y el extremo libre de la barra. La otra masa grande, M_2 , se sitúa entre las dos masas pequeñas y su posición va a ser variada durante el experimento.

Para poner a oscilar el péndulo, se coloca la masa de suspensión (m_1 o m_2) con su parte plana reposando sobre cuchillas de acero en una plataforma que está fija a la pared.

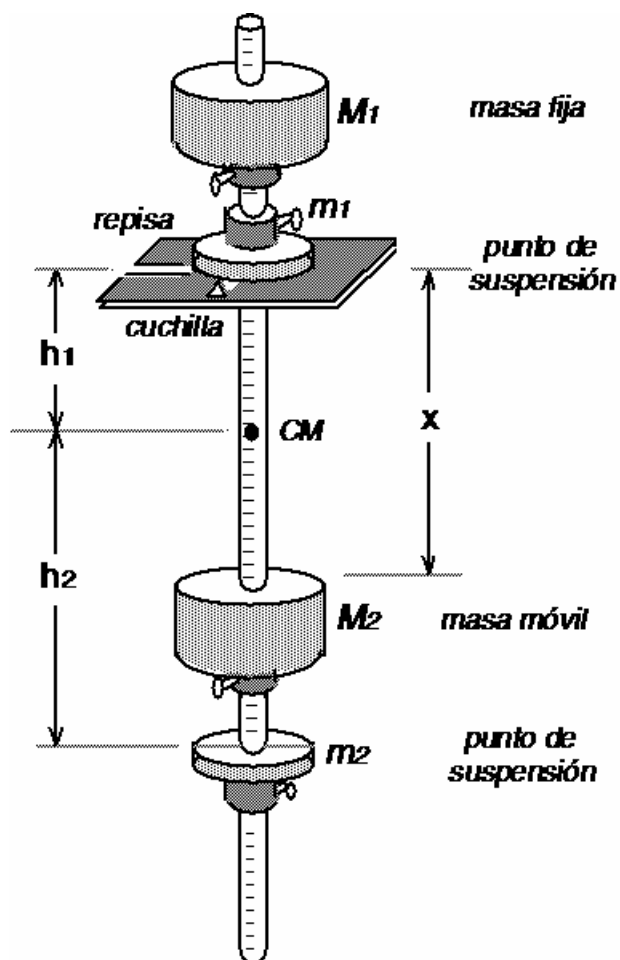


Fig. 3: El péndulo de Kater

El cronómetro

Los tiempos de oscilación se miden mediante un cronómetro eléctrico. El cronómetro se pone en marcha y se detiene mediante la apertura sucesiva de dos contactos eléctricos ubicados en un dispositivo debajo del péndulo. Los contactos son activados por el extremo inferior de la barra del péndulo cuando ésta pasa por el punto de

equilibrio. Previamente hay que deslizar manualmente el dispositivo a fin de que quede en la trayectoria del péndulo en el momento deseado.

Antes de iniciar el experimento, debe familiarizarse con el funcionamiento del cronómetro.

A. Determinación aproximada de los puntos de inversión

- A1.** Coloque las masas pequeñas m_1 y m_2 con sus partes planas a 20 cm de los extremos de la barra.
- A2.** Fije la masa grande M_1 con sus partes planas a 8 cm del extremo de la barra.
- A3.** Inicialmente coloque la masa grande M_2 con su parte plana a 5 cm de la masa de suspensión m_1 .
- A4.** En los pasos siguientes nos proponemos elaborar el siguiente gráfico:
- En el *eje horizontal* se va a representar la *posición x* de la parte plana de M_2 respecto de la parte plana de m_1 .
 - En el *eje vertical* se van a representar los *tiempos* para 5 oscilaciones.
- A5.** Suspenda el péndulo por m_1 y asegúrese de que las cuchillas reposen sobre las ranuras labradas. Póngalo a oscilar con amplitudes moderadas.
- A6.** Cuentel tiempo para 5 oscilaciones.
- A7.** Deslice la masa M_2 en 5 cm más abajo y vuelva a determinar el tiempo para 5 oscilaciones.
- A8.** Siga deslizando la masa M_2 en pasos sucesivos de 5 cm hasta donde sea posible y para cada punto determine el tiempo de 5 oscilaciones.

x_1 (cm)	5	10	15	20	25	.....
$t = 5T$ (s)	.....				

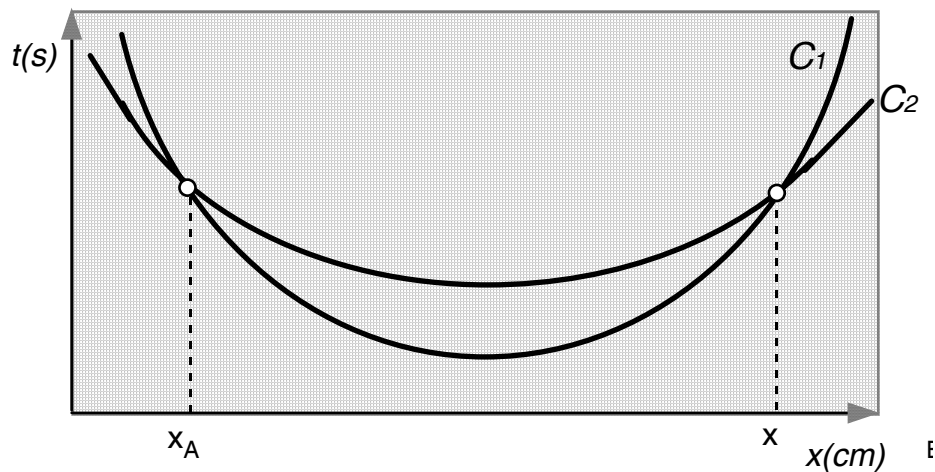
- A9.** Haga la gráfica del tiempo de una oscilación T vs x , *ahora mismo*. Notará que la curva desciende, pasa por un mínimo y vuelve a ascender continuamente.
- A10.** Dejando la masa M_2 en la posición donde quedó en el último paso anterior, ahora proceda a desmontar el péndulo y a suspenderlo por la otra masa pequeña m_2 . Determine el tiempo para 5 oscilaciones.

A11. Repita las mediciones del tiempo de 5 oscilaciones para cada una de las diferentes distancias x , medidas entre las partes planas de M_2 hasta m_1 . Tome las mediciones de 5 en 5 cm hasta alcanzar la posición más cercana (al igual que antes, la masa m_1 permanecerá fija y se cambiará de posición a M_2).

Observe que esta última posición corresponde a la posición inicial cuando el péndulo estaba suspendido por m_1 (paso **A3**)

$x(\text{cm})$	5	10	15	20	25	.....
$t = 5T (\text{s})$	.....				

A12. Haga la representación gráfica T vs x sobre el mismo gráfico del paso **A9**. Tenga en cuenta que la primera determinación de la sección A11 corresponde a la misma posición x de la última de la sección A8. Provea al gráfico de un fondo reticular.



Observe que la nueva curva posee las mismas características que la anterior, pero es más plana y además se cruzan en dos puntos de coordenadas X_A y X_B . En general, el cruce de las curvas no siempre debe ocurrir. El hecho de que en este caso las curvas se crucen es una consecuencia directa de la posición que "a priori" hemos escogido para la masa fija M_1 .

A13. Los puntos de inversión del péndulo están en X_A y X_B . Esto significa que si se coloca M_2 en cualquiera de los puntos, en X_A o en X_B , se está ubicando el centro de masa de tal forma que el período del péndulo sea el mismo, ya sea que se suspenda por m_1 o por m_2 .

Una vez que se ha elegido uno de estos dos puntos para M_2 , el paso siguiente es proceder a ajustar su ubicación en forma más fina.

B. Determinación precisa del punto de inversión

- B1.** Coloque M_2 en X_A o en X_B , según su preferencia y ponga el péndulo a oscilar. Determine el tiempo para 5 oscilaciones. Hágalo tres veces consecutivas para verificar la reproducibilidad de sus medidas, las cuales no deben discrepar en más de dos centésimas de segundo.
- B2.** Invierta el péndulo y repita el paso anterior. Seguramente encontrará discrepancias en los tiempos para 5 oscilaciones.
- B3.** Desplace ligeramente la masa M_2 en cualquier dirección y repita los pasos anteriores. Si la discrepancia aumenta, mueva M_2 en la dirección opuesta.

Nota: Como la curva C_1 tiene mayor pendiente que la C_2 , se podría predecir en qué dirección hay que mover M_2 para que los períodos se aproximen.

- B4.** Repita los pasos anteriores de manera sistemática hasta conseguir que la diferencia en los tiempos esté dentro de un margen no mayor de dos centésimas de segundo.
- B5.** Proceda a determinar el tiempo para 50 oscilaciones. Hágalo tres veces para cada lado. Si las seis lecturas caen dentro del margen de las 2 centésimas de segundo continúe adelante; de lo contrario haga nuevas correcciones a M_2 hasta lograr la precisión deseada.
- B6.** Calcule el *período del péndulo* y estime el correspondiente error.
- B7.** Deje el péndulo suspendido pero *sin oscilar* y utilice el catetómetro para determinar la distancia entre las partes planas de las masas de suspensión m_1 y m_2 .

C. Medición de la distancia entre los puntos de suspensión mediante el catetómetro

El catetómetro es un instrumento que se emplea para determinar diferencias de nivel entre dos puntos, con una precisión de una centésima de milímetro. Consta esencialmente de una barra vertical montada sobre una base trípode, que tiene marcada una escala milimétrica. A lo largo de la barra se puede deslizar un telescopio horizontal y un nonio que está superpuesto a dicha escala.

- C1.** Verifique previamente que la barra del catetómetro esté efectivamente vertical y que el telescopio tenga su eje horizontal. Para ello asegúrese que la burbuja del nivel quede centrada para cualquier dirección de la visual.

- C2.** Mientras se sujeta el carro con una mano, afloje con la otra el tornillo de presión y muévelo sobre la columna, hasta que mirando por el anteojo se pueda ubicar la parte plana de una de las masas de suspensión. Se fija luego el carro con el tornillo de presión.
- C3.** Enfoque el telescopio hasta lograr una clara definición del plano a medir, y, mediante el tornillo de ajuste vertical fino, haga coincidir el plano con el hilo horizontal del retículo. Se lee a continuación la escala con ayuda del vernier.

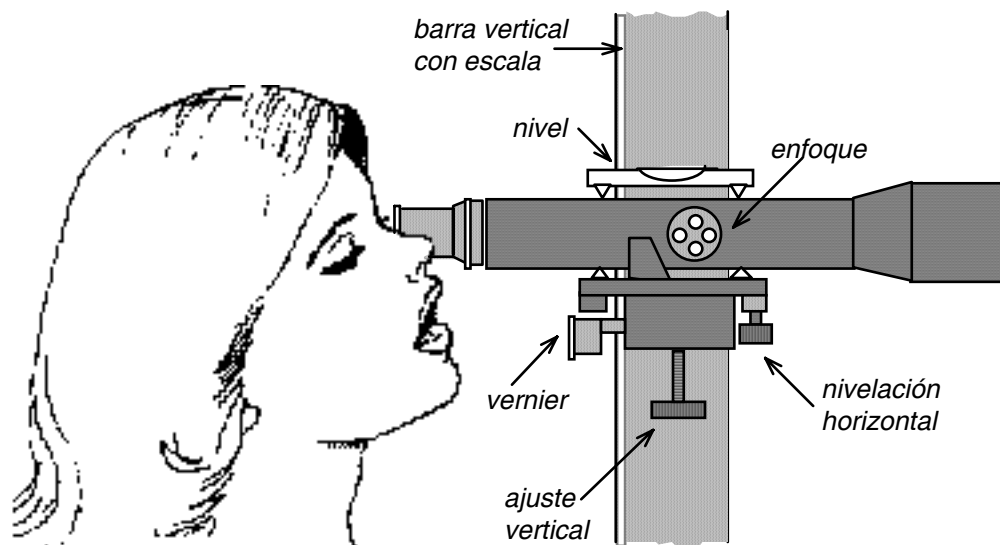


Fig. 4: El catetómetro

- C4.** Siguiendo los pasos anteriores, proceda a determinar la posición de la parte plana de la otra masa de suspensión. La diferencia entre las dos lecturas es la distancia entre los puntos de suspensión o longitud reducida ($h_1 + h_2 = L$).

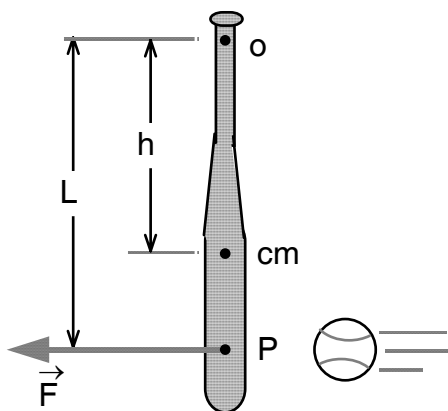
D. Cálculo de la aceleración de la gravedad

- D1.** Usando la fórmula (7) del período del péndulo, proceda a calcular la aceleración de la gravedad. Determine el correspondiente error en su medida.
- D2.** Compare su resultado con el valor conocido de la aceleración de gravedad en Sartenejas ($g = 9,777828 \text{ m/s}^2$).

PREGUNTAS

1. Considere el péndulo físico formado por una regla de un metro que cuelga de un clavo a través de un orificio situado junto a uno de sus extremos. Si se quiere construir un péndulo simple con una esferita de hierro que cuelga de un hilo:

- a) ¿Cuál deberá ser la longitud de la cuerda para que tenga el mismo período que la regla?
- b) ¿Cuál sería este período?
- c) ¿Por cuáles otros puntos podría suspenderse la regla para que oscile con este mismo período?
2. Una aplicación interesante de las propiedades del péndulo físico que usted ha estudiado en esta práctica ocurre en el juego de béisbol. El bateador que sostiene el bate por el punto *O* siente una reacción cuando golpea la pelota, a menos que lo haga en un punto especial del bate.



Demuestre que para que no se ejerza una reacción en el punto pivote *O* debe golpearse la pelota por el punto *P*, ubicado a una distancia *L* dada por la ecuación 3:

$$L = \frac{I}{Mh}$$

De la misma manera, si se sostiene el bate por este punto *P*, para no sentir la reacción, la pelota debe golpearse por el punto *O*. El punto *P* se llama *centro de percusión*.

REFERENCIAS

1. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 1, Cap. 10, Mc. Graw-Hill (1983).
2. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 1, Cap. 15, Ed. Continental (1995).
3. F. Tyler, *A Laboratory Manual of Physics*, 4th ed., E. Arnold Pub. (1970).

PUENTE DE WHEATSTONE

OBJETIVOS

- Familiarizarse con la técnica de puente de Wheatstone para la medición de resistencias.
- Determinar la resistencia eléctrica de algunos elementos.
- Determinar la resistividad del material de un alambre.

MATERIALES

1. Montaje de alambre de resistencia con escala.
2. Caja de resistencias en décadas, con tolerancia de 0,5%.
3. Fuente de poder de 6v DC.
4. Galvanómetro.
5. Cables con bananas.
6. Tablero base para conexiones del galvanómetro y resistencias a determinar.

TEORÍA

El puente de Wheatstone es un instrumento que permite mediciones precisas de resistencias. El aparato consiste esencialmente en una disposición de cuatro resistencias R_x , R_C , R_1 y R_2 conectadas a una batería E , como indica la *figura 1*. La resistencia R_x es la que se trata de determinar, R_C es una resistencia patrón conocida

y las resistencias R_1 y R_2 son las dos partes de un alambre AB. Entre los puntos P y Q se conecta un galvanómetro G.

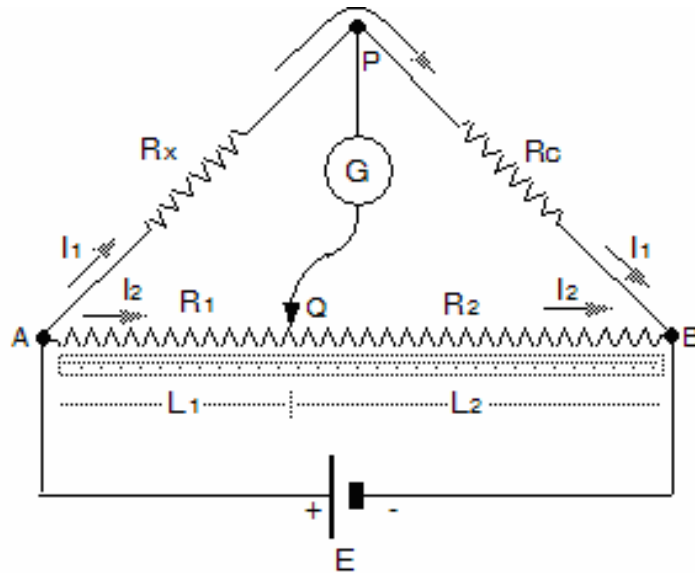


Fig. 1: El puente de Wheatstone

La corriente suministrada por la batería se ramifica en el punto A, de modo que I_1 sigue por la rama de R_x e I_2 sigue por la rama de R_1 . Si se ajusta el cursor deslizante Q en el alambre hasta que no fluya corriente por el galvanómetro, entonces P y Q estarán al mismo potencial y la caída de potencial en R_x será igual a la caída de potencial en R_1 :

$$I_1 R_x = I_2 R_1 \quad (1)$$

Por la misma razón, se cumple:

$$I_1 R_c = I_2 R_2 \quad (2)$$

Dividiendo la ecuación (1) entre la (2), obtenemos:

$$\frac{R_x}{R_c} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

Si el alambre AB es uniforme, las resistencias R_1 y R_2 son proporcionales a las longitudes respectivas L_1 y L_2 .

$$R_1 = aL_1 \quad \text{y} \quad R_2 = aL_2$$

siendo a la resistencia por unidad de longitud del alambre. Por lo tanto:

$$R_x = R_C \left(\frac{R_1}{R_2} \right) = R_C \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \quad (4)$$

Esta relación se cumple cuando el puente está *equilibrado* y permite determinar fácilmente la resistencia incógnita R_X si se conoce la resistencia patrón R_C y se mide la relación entre longitudes en el alambre (L_1/L_2).

ACTIVIDADES PRELIMINARES

Si R_X es la resistencia incógnita, R_C es la resistencia conocida, de acuerdo a la condición de equilibrio del puente, se cumple:

$$R_x = R_C \left(\frac{L_1}{L_2} \right)$$

El error fraccional en R_X viene dado por:

$$\frac{\Delta R_X}{R_X} = \frac{\Delta R_C}{R_C} + \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2}$$

Demuestre que, para un dado valor de ΔL , la máxima precisión se obtiene con $L_1 = L_2$. Esto significa que debemos tratar de equilibrar el puente escogiendo valores de R_C de modo que el punto deslizante del alambre quede en su zona intermedia.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El montaje del puente está esquematizado en la *figura 2*. Como parte del circuito, se emplea un alambre de resistencia colocado sobre una regla graduada lo cual permite, mediante un contacto deslizante, dividirlo en dos secciones de longitudes conocidas.

Como resistencia patrón R_C se emplea una combinación de resistencias en serie escogida de una caja de décadas (que tiene una tolerancia del 0,5%). En el otro brazo del puente se conecta la resistencia incógnita. Esta resistencia es una de las que están instaladas en el tablero mostrado en la *figura 3*.

En el mismo tablero se provee de un interruptor pulsado S_p que cierra la conexión mientras esté presionado y un suiche S que permite intercalar una resistencia de protección R_p en la rama del galvanómetro.

Se recomienda que la conexión móvil del alambre (punto Q) quede en la zona intermedia; de esta manera el puente operará con mayor precisión.

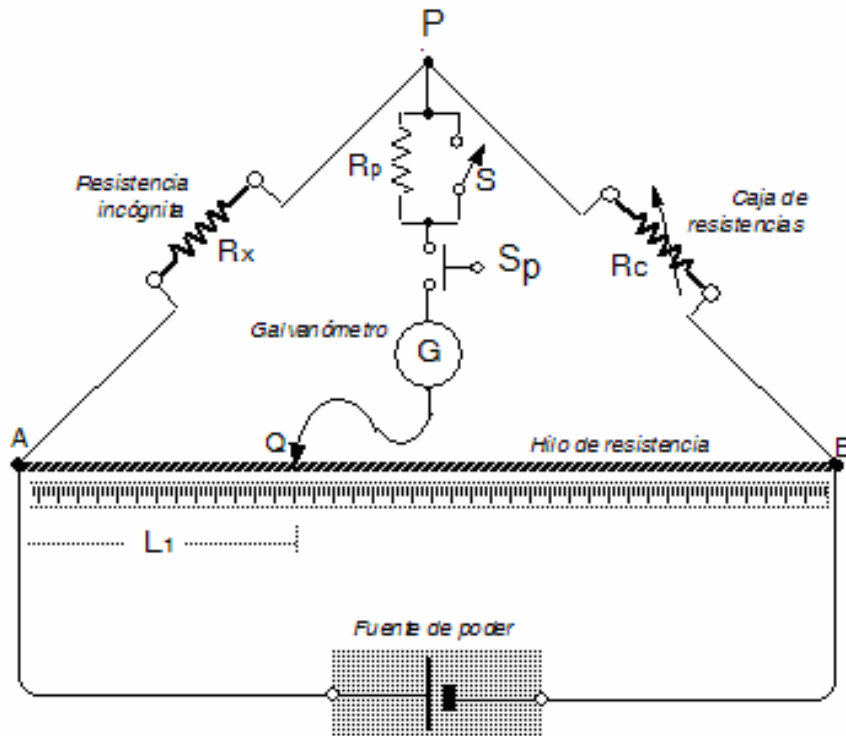


Fig. 2: Montaje experimental del puente de Wheatstone

El galvanómetro es un instrumento sumamente delicado y debe tomar las precauciones para no dañarlo. Antes de proceder de conectar la fuente al circuito, éste debe ser revisado por el profesor.

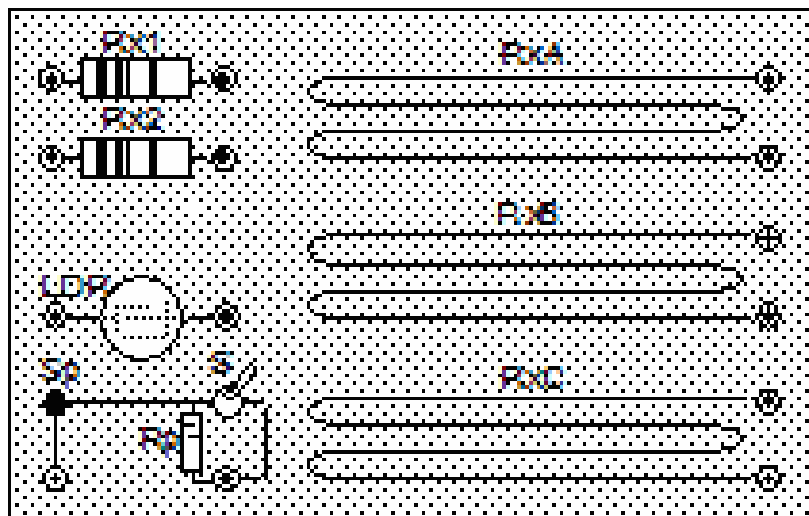


Fig. 3: Tablero con elementos resistivos

A. Medida de resistencias de carbón

Comenzaremos con la determinación de las resistencias de algunos resistores de carbón (R_{X1} , R_{X2} , R_{X3}) que tienen sus valores indicados por los colores de sus bandas.

- A1.** Realizado el montaje prescrito, instale la resistencia problema R_X en el brazo correspondiente del puente.
- A2.** Conecte el punto móvil del puente de manera que las longitudes L_1 y L_2 en el alambre no sean muy dispares, y comience con un valor R_C de la caja de resistencias, con un valor aproximado dado por la condición:

$$R_X R_2 \approx R_C R_1$$

- A3.** Coloque el suiche S en la posición que intercala la resistencia R_p de protección del galvanómetro. Pulse el interruptor S_p y observe la desviación del galvanómetro.
- A4.** Si la desviación del galvanómetro es grande, cambie la resistencia R_C de la caja y vuelva a pulsar. Repita esta operación hasta minimizar la desviación del galvanómetro.
- A5.** Mueva el cursor del alambre hasta que el galvanómetro no acuse paso de corriente. Repita esta operación después de cortocircuitar la resistencia de protección R_p con el suiche S .
- A6.** Mida las longitudes L_1 y L_2 y aplique la condición de balance del puente, para determinar la resistencia desconocida.

$$R_X = R_C \left(\frac{L_1}{L_2} \right)$$

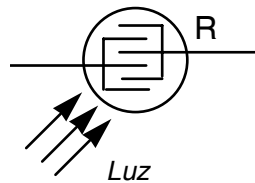
- A7.** Anote los valores obtenidos para las diferentes resistencias de carbón (o combinaciones de ellas).

R (Ω) indicado	R (Ω) medido	ΔR (Ω)
.....

- A8.** Compare sus resultados con los valores especificados por las bandas de colores. ¿Están sus valores comprendidos dentro del rango especificado por la banda de color que indica la tolerancia de la resistencia?

B. Medición de resistencias que depende de alguna variable física

Un LDR (light dependent resistor) es un dispositivo semiconductor cuya resistencia depende de la intensidad de la luz incidente. Entre sus aplicaciones prácticas puede emplearse como sensor para controlar el encendido automático del alumbrado público y en cámaras fotográficas automáticas para controlar la intensidad de luz incidente.



- B1.** Un LDR presenta un amplio rango de variación de resistencias. Si deseamos medir el valor de R que corresponde a una iluminación dada, para conseguir el balance del puente es necesario partir de algún valor de R_C y proceder por ensayo y error, siguiendo los pasos indicados en la sección A.
- B2.** Instale el LDR y proceda a medir su resistencia para diferentes condiciones de luminosidad.
- Sala del laboratorio con las lámparas encendidas.
 - Cubriendo el LDR parcialmente (Por ejemplo: Con un papel)
 - Cubriendo el LDR completamente.

C. Resistividad de un alambre

La resistencia de un conductor depende de sus características geométricas y de propiedades intrínsecas del material que la constituye (la resistividad ρ). Para un conductor lineal homogéneo la resistencia viene dada por:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right)$$

siendo $\rho(\Omega.m)$ la resistividad, $A(m^2)$ el área transversal y $L(m)$ la longitud. En términos del diámetro $d(m)$ del alambre, la resistividad viene dada por:

$$\rho = R \left(\frac{A}{L} \right) = R \left(\frac{\pi d^2}{4L} \right)$$

Para determinar la resistividad de un material procederemos a medir las resistencias R_{XA} , R_{XB} y R_{XC} para tres alambres hechos del mismo material, con igual longitud pero con diámetros diferentes.

C1. Proceda a medir la resistencia de los alambres y anote los valores en una tabla:

Alambre	$d(m)$	$L (m)$	$R_X (\Omega)$
A			
B			
C			

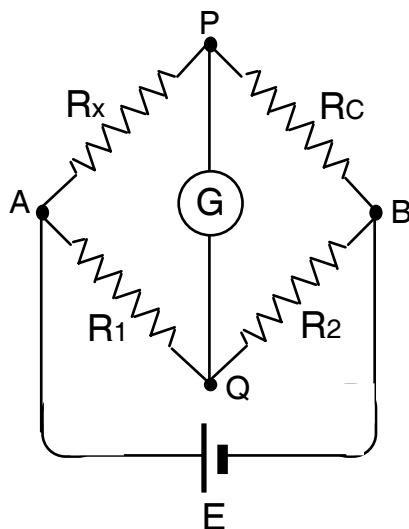
C2. Haga un gráfico de R_X vs d^{-2} y determine la resistividad del alambre con el correspondiente error porcentual.

PREGUNTAS

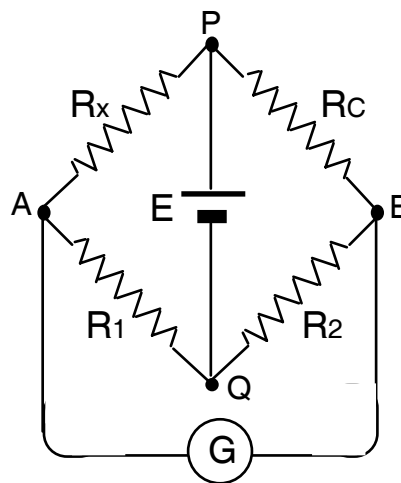
1. Considere un puente de Wheatstone equilibrado, es decir, se cumple la condición:

$$R_x R_2 = R_C R_1$$

Si en el circuito de la figura a, intercambiamos el galvanómetro con la batería, como se sugiere en la figura b, ¿cuál será la nueva condición de equilibrio?



(Fig. a)



(Fig. b)

2. Es probable que el alambre del potenciómetro no sea uniforme, especialmente la región donde se desliza el contacto, que está sometida a un desgaste continuo.

¿Por qué es esto una fuente de error?

¿Se podría reducir este error tomando siempre una segunda medición después de intercambiar R_X con R_C ?

3. Si el voltaje de la fuente varía, ¿se modifica el balance del puente? ¿Varía la sensibilidad?

REFERENCIAS

1. C. H. Bernard and C. D. Epp, *Laboratory Experiments in College Physics*, 5th ed. John Wiley (1980).
2. F. Tyler, *A Laboratory Manual of Physics*, 4th ed., E. Arnold Pub. (1970).

ELECTRONES EN UN CAMPO MAGNÉTICO Y MEDICIÓN DE e/m

OBJETIVOS

- Observar las órbitas de los electrones en un campo magnético.
- Identificar el tipo de polo magnético de las caras de un imán.
- Determinar la relación *carga/masa* para el electrón.

MATERIALES

1. Un tubo de vidrio que contenga gas helio.
2. Una fuente con dos salidas: 1) bajo voltaje (0 - 6 V AC) para calentamiento del filamento, 2) alto voltaje (0-300 V DC) para aceleración del haz.
3. Un par de bobinas de Helmholtz.
4. Una fuente de (0-12 V DC) para las bobinas Helmholtz.
5. Un multímetro digital para corriente DC.
6. Un multímetro digital para voltaje DC.
7. Juego de cables de conexión.
8. Una capa de tela.
9. Un imán.

TEORÍA

La fuerza que ejerce el campo eléctrico E y magnético B sobre una carga q en movimiento con velocidad u la da la “Fuerza de Lorentz”

$$F = q\vec{E} + q\vec{u} \times \vec{B}$$

A) Movimiento de partículas cargadas en campos magnéticos

En ausencia de un campo eléctrico una partícula cargada que se mueve con velocidad \vec{u} en presencia de un campo magnético \vec{B} experimenta una fuerza magnética dada por el producto vectorial:

$$\vec{F} = q \vec{u} \times \vec{B}$$

en donde la dirección de \vec{F} es perpendicular tanto a \vec{u} como a \vec{B} y el sentido viene dado por la regla de la mano derecha (figura 1).

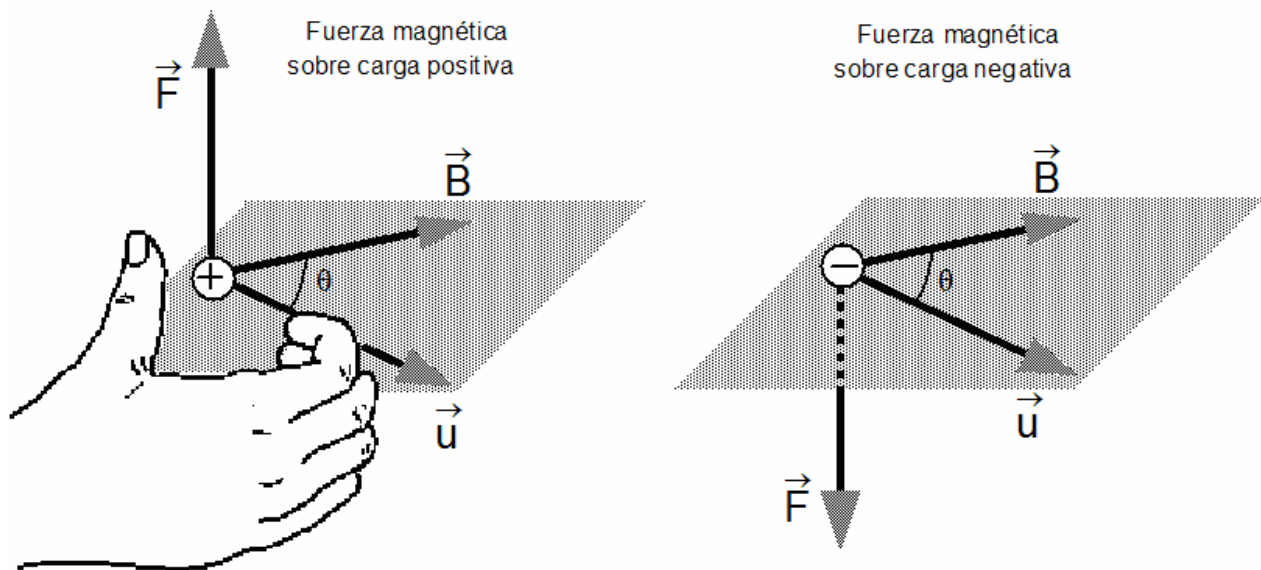


Fig. 1: Orientaciones relativas de los vectores \vec{F} , \vec{u} , y \vec{B} según la regla de la mano derecha

El módulo de la fuerza magnética es:

$$F = quB \sin \theta$$

en donde θ es el ángulo entre los vectores \vec{u} y \vec{B} . De esta expresión se deduce que \vec{F} es cero cuando \vec{u} es paralela a \vec{B} ($\theta = 0^\circ$ o $\theta = 180^\circ$). Por otra parte, la fuerza tendrá su valor máximo ($F = quB$) cuando \vec{u} es perpendicular a \vec{B} ($\theta = 90^\circ$).

Supongamos que las partículas cargadas se mueven en un campo magnético externo uniforme y su velocidad inicial es perpendicular al campo (figura 2). En este caso la fuerza magnética forma un ángulo recto con \vec{u} y \vec{B} y tiene una magnitud constante quB .

La fuerza magnética es radial y cambia la dirección de la velocidad, sin afectar su módulo o la energía cinética de la partícula.

Si \vec{B} está dirigido perpendicularmente y entrando a la página, el *movimiento circular* de los electrones (carga $-e$) está orientado en el sentido de las agujas del reloj.

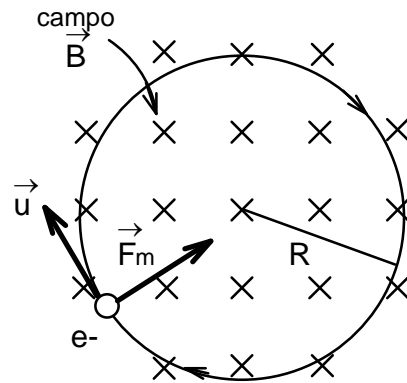


Fig. 2. Trayectoria circular

Con base en la 2a. ley de Newton se puede igualar la fuerza magnética a la masa por la aceleración centrípeta:

$$F_m = euB = \frac{mu^2}{R}$$

La relación carga a masa del electrón es: $\frac{e}{m} = \frac{u}{BR}$ (1)

Esta relación (e/m) es una de las constantes fundamentales en física. La primera medida directa de esta constante fue realizada por J.J. Thomson en 1897 usando un tubo de rayos catódicos.

En el caso más general la velocidad, de la partícula puede tener una dirección arbitraria respecto al campo magnético. El movimiento perpendicular al campo es independiente del movimiento paralelo al campo.

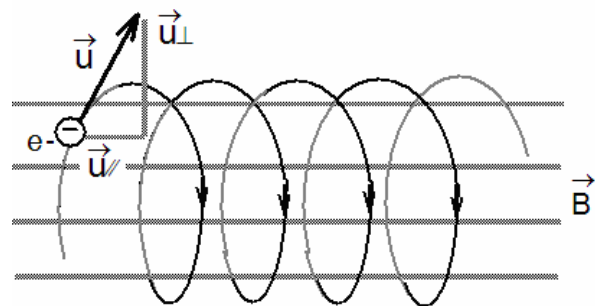


Fig. 3: Trayectoria helicoidal

Como resultado la trayectoria es una *hélice* que tiene su eje a lo largo del campo. En este caso la velocidad u en la fórmula anterior sería la proyección de la velocidad que es perpendicular al campo.

B) Campo magnético producido por bobinas de Helmholtz

En este experimento, el campo magnético es producido mediante un par de bobinas circulares con el eje común (bobinas de Helmholtz), por las cuales circula una corriente.

Las bobinas son idénticas, tienen un cierto número de vueltas y sus centros se encuentran separados por una distancia igual a sus radios.

Con esta configuración se logra un campo magnético que es aproximadamente uniforme en la región central y viene dado por:

$$\vec{B} = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \left(\frac{N\mu_0 i}{a}\right) \hat{x} \quad (2)$$

donde:

- B = campo magnético (tesla)
- i = corriente (amperes)
- a = radio de las bobinas (metros)
- N = número de vueltas (130 vueltas)
- μ_0 = constante = $4\pi \times 10^{-7}$ (T·m/A)

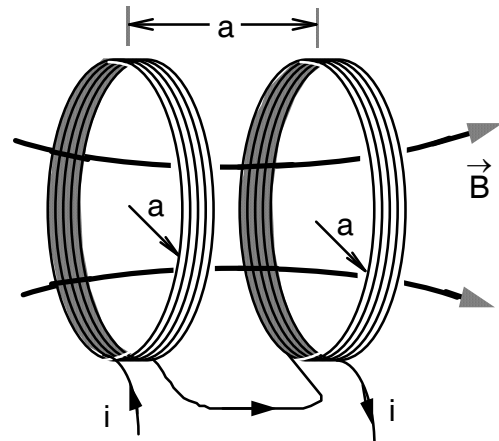


Fig. 4: Un par de bobinas de Helmholtz

ACTIVIDADES PRELIMINARES

Cálculo de la relación e/m

Cuando los electrones son acelerados por una diferencia de potencial V , adquieren una energía cinética que es igual a eV .

a) Exprese la velocidad u en términos del voltaje acelerador V .

b) Sustituya esta relación y la expresión (2) del campo magnético en la ecuación (1) de (e/m) y demuestre la siguiente expresión:

$$\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{2V(5/4)^3 a^2}{(N\mu_0 i R)^2}$$

- V = potencial acelerador (v)
- a = radio de las bobinas (m)
- N = N° de vueltas de las bobinas (130)
- μ_0 = constante = $4\pi \times 10^{-7}$ (T·m/A)
- i = corriente de las bobinas (A)
- R = radio de la órbita de electrones (m)

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Para la observación de las órbitas de los electrones, se dispone de un tubo redondo de vidrio de 30 cm de diámetro. El tubo contiene un cañón electrónico y placas deflectoras. Un filamento calienta un cátodo el cual emite electrones (figura 5). Entre el cátodo y el ánodo existe una diferencia de potencial V aplicada, la cual genera un campo eléctrico E . Los electrones emitidos por el cátodo caliente son acelerados por el campo eléctrico con una fuerza: $F = q \cdot E$, tal que, al atravesar el campo, adquieren una energía: $e \cdot V$ (electrón voltios)

Los electrones son acelerados por una diferencia de potencial aplicada entre el cátodo y el ánodo.

Entre estos electrodos existe una rejilla que está a un potencial positivo con respecto al cátodo y negativo con respecto al ánodo, lo cual permite enfocar el haz de electrones.

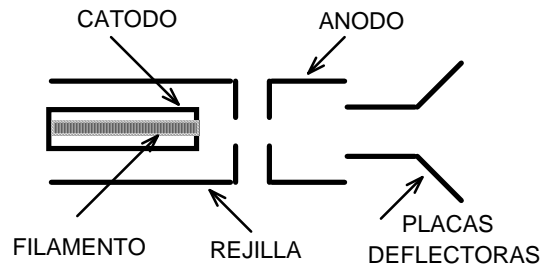


Fig. 5: Cañón electrónico

La ruta de los electrones es claramente visible porque el tubo contiene gas helio a la presión de 10^{-2} mm Hg. Las colisiones inelásticas de los electrones del haz con los átomos de He provocan excitación en los electrones atómicos, los cuales al desexcitarse producen la emisión de luz visible. El haz de electrones emitidos es horizontal, paralelo al plano de las bobinas de Helmholtz y perpendicular al campo magnético B . Ver la figura 4.

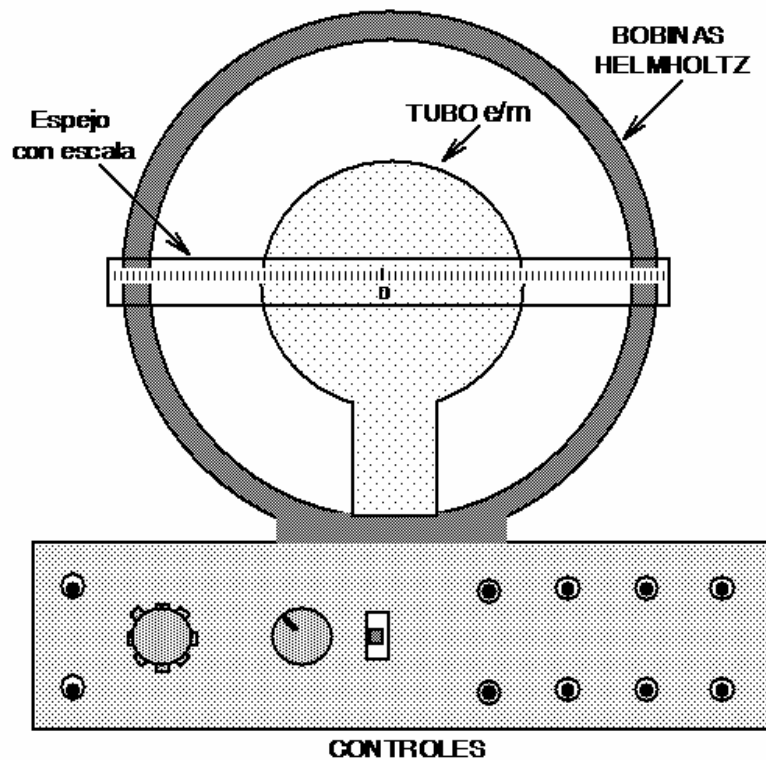


Fig. 6: El aparato para medir e/m

El tubo puede ser rotado de forma tal que el campo magnético de las bobinas forme diferentes ángulos con el haz de electrones.

A. Observación cualitativa de las órbitas de las trayectorias de los electrones

Antes de empezar el experimento, es importante que te familiarices con los diferentes componentes del montaje experimental e identifiques claramente los diferentes controles y puntos de conexión. El tubo e/m es un aparato muy delicado y debe ser tratado con extremo cuidado.

A1. Coloque el suiche selector en la posición para medir e/m .

A2. Con las fuentes de alimentación previamente apagadas, conéctelas al panel frontal del aparato.

PELIGRO

El máximo voltaje para calentamiento del cátodo es 6,3 voltios.
Si te equivocas y aplicas un voltaje mayor, el tubo puede destruirse

A3. Conecte el voltímetro y el amperímetro al panel frontal del aparato (e/m).

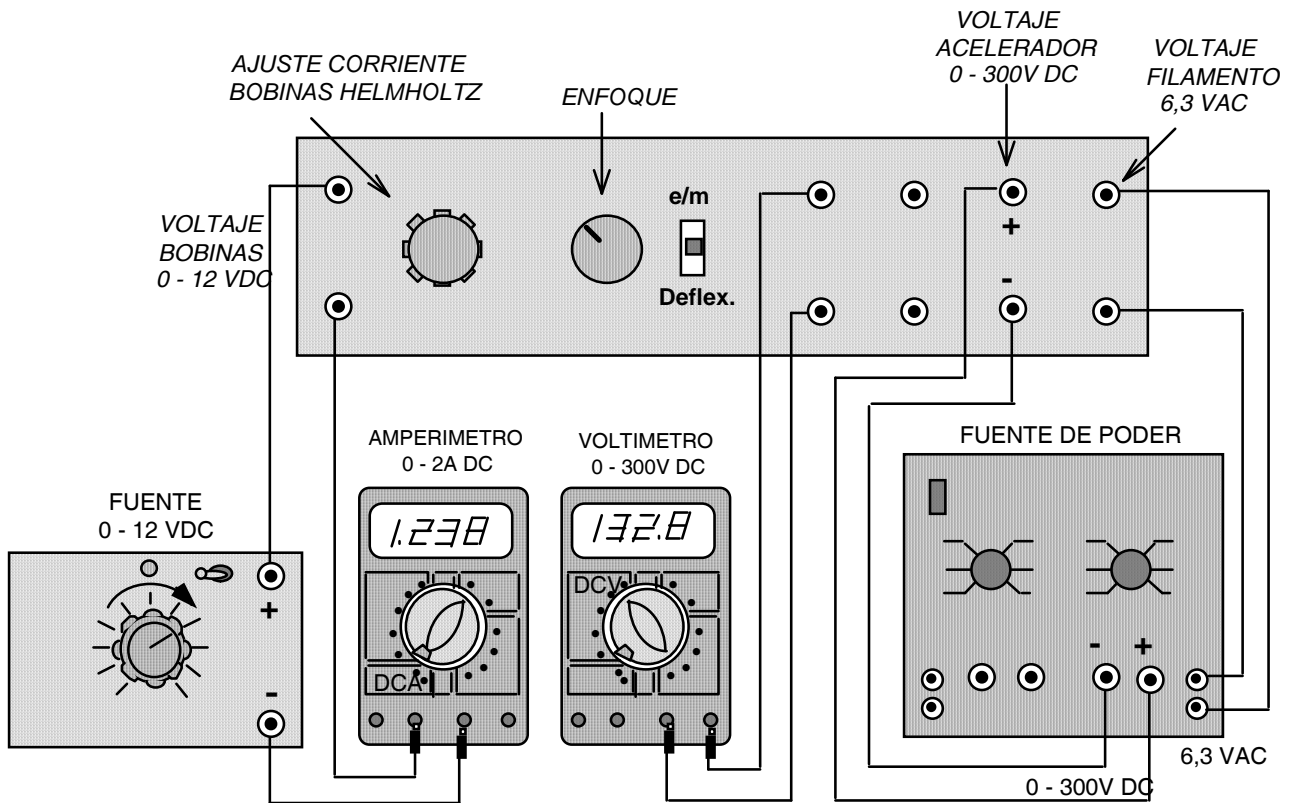


Fig. 7: Diagrama de conexiones

A4. Antes de encender los aparatos, pídele a tu profesor que revise las conexiones.

A5. Con todos los controles de voltaje en cero, encienda las fuentes y espere varios minutos hasta que el cátodo esté caliente. Ajuste el voltaje acelerador a un valor inicial entre 120 y 150 voltios. Observe la trayectoria rectilínea del haz de electrones. Use el control de enfoque para obtener una mejor definición del haz.

Se recomienda cubrir el tubo de vidrio con la capa de tela y trabajar en la oscuridad.

- A6.** Coloque, en la cercanía del haz, el pequeño imán y observe su efecto sobre la trayectoria de los electrones. Coloque el imán primero por una cara y luego por la otra. A partir de sus observaciones determine el tipo de polo (norte o sur) de la cara pintada del imán.
- A7.** Aumente gradualmente la corriente en las bobinas de Helmholtz y observe su efecto sobre el haz de electrones. Gire el tubo y observe el efecto sobre las trayectorias helicoidales. Deje el tubo orientado respecto del campo magnético para que se observe una trayectoria puramente circular.

B. Medición de (e/m)

Para determinar la relación (e/m) se emplea la siguiente expresión:

$$\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{2V(5/4)^3 a^2}{(N\mu_0 i R)^2}$$

- V = potencial acelerador (v)
 a = radio de las bobinas (m)
 N = N° de vueltas de las bobinas (130)
 μ_0 = constante = $4\pi \times 10^{-7}$ (T·m/A)
 i = corriente de las bobinas (A)
 R = radio de la órbita de electrones (m)

En este experimento, hay dos variables independientes que podemos controlar a voluntad: el potencial acelerador V y la corriente i de las bobinas (que determina el campo magnético). Para cada par de valores (V, i) se obtiene una correspondiente órbita circular con un determinado valor del radio R .

B1. El objetivo de esta parte es verificar experimentalmente las predicciones teóricas de la expresión anterior:

- Para un potencial acelerador fijo, ¿cómo varía el radio de la órbita circular a medida que aumenta la corriente de las bobinas?
- Para una corriente fija de las bobinas, ¿cómo varía el radio de la órbita circular a medida que aumenta el potencial acelerador?

Para determinar el valor de (e/m) se procede de tres maneras diferentes:

B2. Ajuste el voltaje acelerador a un valor fijo de modo que al variar la corriente de las bobinas se puedan medir por lo menos cinco valores diferentes de R . Grafique una

función conveniente $R = f(i)$ y de allí obtenga la relación (e/m) con su respectivo error.

Para medir el radio de la órbita, con el menor error de paralaje posible, mueva la cabeza hasta alinear el haz de electrones con su reflexión proveniente del espejo.

B3. Ajuste la corriente en las bobinas a un valor fijo conveniente de modo que al variar el voltaje acelerador se puedan medir por lo menos cinco valores diferentes de R . Grafique una función conveniente $R = f(V)$ y de allí obtenga la relación (e/m) con su respectivo error.

B4. Escoja un valor fijo del radio de la órbita, R , conveniente, y obtenga cuatro pares diferentes de valores (i, V) que resulten en el mismo radio de la órbita. Grafique una función conveniente $V = f(i)$ y de allí obtenga la relación (e/m) con su respectivo error.

PREGUNTAS

1. ¿Cómo se comparan cada uno de los valores medidos de la relación (e/m) con el valor aceptado que aparece en las tablas?

$$e/m = 1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

¿Se podrían justificar las discrepancias con la precisión de este experimento? Identifique cualquier error que pueda explicar tales discrepancias.

2. ¿Cómo afecta el campo magnético terrestre a este experimento?

3. ¿Por qué no se usa directamente el campo magnético terrestre para determinar la relación e/m ?

4. ¿Cuáles diferencias experimentales habría que considerar si el tubo produjera un haz de protones en vez de electrones?

REFERENCIAS

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Caps. 34, 35, Ed. Continental (1995).
2. P. Fishbane, S. Gasiorowicz y S. Thornton, *Física*, Vol. 2, Caps. 29, 30, Prentice-Hall Hispanoamericana (1994).
3. R. A. Serway, *Física*, tomo 2, tercera edición, Caps. 29, 30 Mc. Graw-Hill (1992).
4. P. A. Tipler, *Física*, tomo 2, segunda edición, Caps. 27, 28, 29, Editorial Reverté (1985).

PRÁCTICA DE LABORATORIO **II-09**

TRANSIENTES EN CIRCUITOS RC y SU APLICACION A LA MEDIDA DE CAPACITANCIAS

OBJETIVOS

Estudiar los fenómenos transientes que se producen en circuitos RC de corriente directa.

Medición de capacitancias basada en las características de fenómenos transientes.

MATERIALES

1. Fuentes de poder:
2. Osciloscopio.
3. Generador de señales.
4. Resistencia de precisión.
5. Voltímetro digital.
6. Condensadores con magnitud conocida.
7. Condensadores de magnitud desconocida.
8. Cables.
9. Cronómetro

TEORÍA

El tema central de esta práctica será el análisis de los fenómenos transientes que se producen en circuitos de corriente directa cuando se introducen condensadores, y sus aplicaciones para determinar parámetros del circuito a partir de la medición de sus características.

- En primer lugar estudiaremos las características de los transientes. Para ello consideremos el circuito del a figura 1.

Supongamos que las condiciones iniciales del circuito son corriente cero, por estar él interruptor abierto, carga cero en el condensador, y el potencial V_T es la referencia de tierra. Tan pronto se cierra el interruptor S_1 , aparecerá una corriente, I , en el circuito que viene dada por la relación entre la diferencia de potencial $V = V_B - V_1$ y la resistencia R . Con el paso de la corriente el condensador acumula carga que hace que aparezca una diferencia de potencial en él, y por ende, que el potencial V_1 empiece a aumentar. Como consecuencia, disminuye la corriente, tendiendo asintóticamente a cero mientras V_1 tiende al voltaje V_B de la batería.

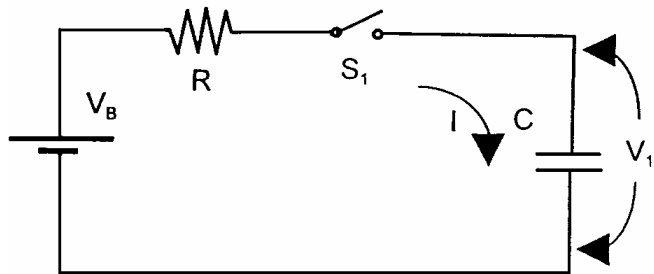


Figura 1, Circuito RC con corriente directa

Cuantitativamente esto se expresa considerando la ecuación

$$V_1 + V_c = RI + Q/C = R dQ/dt + Q/C = V_B$$

ya que $i=dQ/dt$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$Q = Q_0 [1-\exp(-t/RC)]$$

donde $Q_0= CV_B$. La corriente, I , se puede obtener derivando la expresión para Q , lo cual nos da

$$I(t)= I_0 \exp(-t/RC)=(V_B / R) \exp(-t/RC),$$

y el voltaje V_1 se puede obtener directamente a partir de Q , dando,

$$V_1(t) = V_B [1-\exp(-t/RC)]$$

ambas expresiones describen cuantitativamente el transiente y se corresponden con la descripción fenomenológica que dimos inicialmente.

El tiempo $\tau_c = RC$ se le denomina tiempo característico de la carga del capacitor.

Si empezamos a contar el tiempo desde cero, en el instante que se inicia la carga, entonces $V_1 (t = \tau_c = V_B (1 - e^{-1}) = 0.63 V_B$. A partir de la medición del instante en que el voltaje alcanza un valor de 63% del valor máximo, el cual corresponde al tiempo característico, podemos calcular la magnitud de uno de los componentes si conocemos la del otro.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

Derive la expresión del voltaje en función del tiempo para la descarga de un condensador siguiendo el procedimiento usado en la sección anterior.

Calcule el voltaje final V_f que tendrá el sistema que se indica a continuación después de que se conecten los dos condensadores

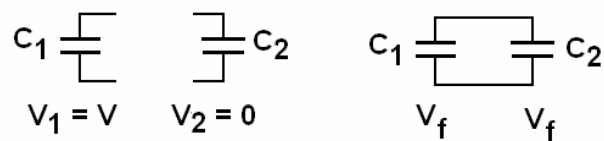


Figura 2. Sistema de dos condensadores

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este experimento usaremos un tablero donde están ubicados los componentes que se usarán para el montaje de los circuitos de los diferentes ensayos. Estos componentes son: resistencias de precisión de valor conocido, y otras de valor desconocido; condensadores de valores conocido y desconocidos; un interruptor de dos vías y doble polo; y una batería. Los cables con terminales bananas se conectan directamente a los componentes para facilitar el trabajo en el laboratorio

A.-Medida de un transiente en un circuito RC.

El primer ensayo tiene el objeto de estudiar la naturaleza del transiente que se produce cuando se cierra el interruptor en un circuito DC que contiene un condensador. El fenómeno físico corresponde a la carga del condensador. Con este propósito monte el circuito que se indica en la figura 3 usando los componentes de valores conocidos

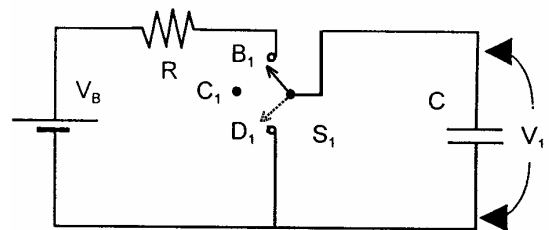


Figura 3 Circuito para estudiar la carga del condensador

A1.- Determine el voltaje de salida de la batería usando el voltímetro del mesón de trabajo.

A2.- Mida el voltaje en el condensador. Si este no es cero, colocando el interruptor en la posición D_1 para cortocircuitar el condensador lo descarga totalmente. Esta es una práctica importante porque de lo contrario puede introducir un error sistemático en su medición.

A3.- Cambie el interruptor de la posición D_1 a la posición B_1 . ¿Qué observa? Diseñe una estrategia para hacer la medición del voltaje en función del tiempo (por ejemplo, mida el

tiempo para el cuando se alcanzan ciertos valores de V , o mida el voltaje para ciertos tiempos predeterminados). Haga una tabla del tiempo, t , y los valores del voltaje V_1 . Debe ser cuidadoso para realizar lo mejor posible las medidas de los primeros tiempos por cuanto V cambia rápidamente.

A4.- Haga un gráfico de V_1 vs t . Hágale un ajuste por mínimos cuadrados y determine el tiempo característico T_c . Compare su valor con el obtenido de los valores de los componentes del circuito.

Ahora se propone estudiar la descarga del condensador. Para esto modifique el circuito para montar el que se indica en la figura 4.

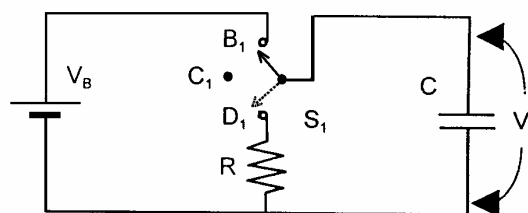


Figura 4. Circuito para estudiar la descarga de un condensador.

A5.- Colocando el interruptor S_1 en la posición B_1 carga el condensador hasta el valor del voltaje de la batería en un breve tiempo (¿por qué?). Anote ese valor del Voltaje

A6.- Repita los pasos **A3** y **A4**, pero ahora pasando el interruptor de la posición B_1 a la posición D_1 .

A7.- Cargue de nuevo el condensador. Ahora pase el interruptor S_1 de la posición B_1 a la posición C_1 . Esto equivale a dejarlo aislado con la carga que se le dio. Mida el voltaje V_1 durante varios minutos. ¿Qué observa? Explique sus resultados

B. Medida de la capacitancia de un condensador

En esta sección se determinará el valor de la capacitancia de un condensador desconocido por varios métodos. El primero, a partir del tiempo característico del transiente de descarga del condensador; el segundo, a partir de la descarga parcial del capacitor al conectarlo en paralelo con otro condensador conocido; y tercero, a partir de la medición directa con un instrumento comercial, si su medidor lo permite.

B1.- Monte el circuito de descarga de la figura 4 usando la resistencia de precisión y el condensador desconocido, C_{01} . Mida el tiempo característico (paso **A6**) y determine el valor C_{01} de la capacitancia con su respectivo error.

B2.- Cargue el condensador desconocido y áislelo, tal como se procede en el paso **A7**. Midiendo el potencial V_1 , conecte el condensador conocido al condensador desconocido que se encuentra cargado. La carga almacenada en el condensador desconocido se redistribuye entre ambos condensadores de forma tal que ambos

tengan el mismo voltaje. A partir del valor final del voltaje V_1 , calcule la capacitancia C_{O1} con su respectivo error.

B3.- Determine directamente con el instrumento de medición la capacitancia del condensador C_{O1}

B4.- Compare el resultado de las diferentes mediciones de la capacitancia del condensador desconocido.

B5.- Repita los pasos **B1 al B3** para el condensador desconocido C_{O2}

C. Combinación en serie de condensadores

C1.- Conecte en serie los dos condensadores desconocidos y mida la capacitancia del sistema por el método del tiempo característico (paso B1).

C2.- Compare y discuta su resultado en términos del valor que obtuvo en la medición del sistema, y del que debe obtener aplicando los conceptos teóricos para una combinación en serie de condensadores

D. Transientes en circuitos rápidos

Los ejemplos considerados en las secciones anteriores involucran voltajes DC. Si el circuito en consideración tiene voltajes variables o alternos, también se pueden observar efectos producidos por transientes. En esta sección ilustraremos el mismo transiente producido por el tiempo de carga o descarga de un condensador, pero usando un voltaje variable alterno.

D1.- Conecte la salida del generador de señales al circuito y a un osciloscopio. Ajuste la salida para producir una salida del tipo onda cuadrada, con un OFFSET que la haga variar entre 0 y 5V.

D2.- Monte el circuito ilustrado en la Fig. 5, usando la salida del generador que ajustó en el paso anterior. Conecte el canal 1 del osciloscopio al punto V_1 y el canal 2 al punto V_2 .

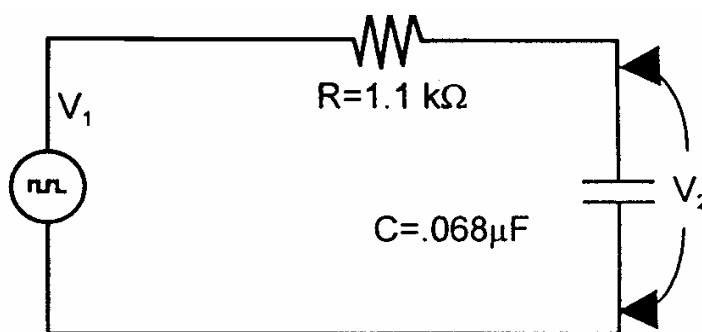


Figura 5. Circuito RC alimentado con un voltaje variable alterno

D3.- Observe V_1 y V_2 a: 500 Hz, 10KHz y 100 KHz. Haga un diagrama de los tres pares de señales

D4.- Con la señal de 10KHz, mida el tiempo τ para la carga y descarga del condensador. Compare su resultado con el que debería tener de acuerdo con los componentes del Circuito.

PREGUNTAS

1. ¿Cuál sería un estimado de la menor capacitancia posible de ser medida por la técnica del transiente de descarga con un medidor electrónico de resistencia interna $10\text{ M}\Omega$? ¿Y con un medidor de aguja de resistencia interna de $50\text{ K}\Omega$?
2. Discuta los errores que se introducen cuando se mide el voltaje del condensador con un voltímetro, simultáneamente mientras se carga.

REFERENCIAS

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, Física, Vol. 1, Capítulos. 31 y 33, Ed. Continental (1995).

CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA

1. OBJETIVOS

Estudiar el comportamiento de los elementos básicos en los circuitos de corriente alterna y determinar los parámetros del circuito.

2. MATERIALES

- Osciloscopio
- Multímetro
- Resistencia
- Inductor
- Capacitor
- Cables de conexión

3. TEORÍA

Los circuitos de corriente alterna constituyen un tema de suma importancia para la ciencia y la tecnología, por muchas razones, entre las cuales podemos destacar: 1) La casi totalidad de la energía eléctrica que se genera en todo el mundo para las industrias y uso doméstico es de este tipo. 2) Cualquier corriente, por complicada que sea su variación en el tiempo, puede ser analizada como una superposición de corrientes senoidales de diferentes frecuencias (análisis de Fourier).

Un generador de CA opera mediante la rotación de una bobina de alambre dentro de un campo magnético a velocidad angular constante, ω . Se induce una fuerza electromotriz (fem) que varía con el tiempo en forma sinusoidal:

$$V(t) = V_m \text{sen} \omega t \quad (1)$$

Donde V_m es el voltaje máximo o valor pico (figura 1) y $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, siendo f la frecuencia expresada en Hertz.

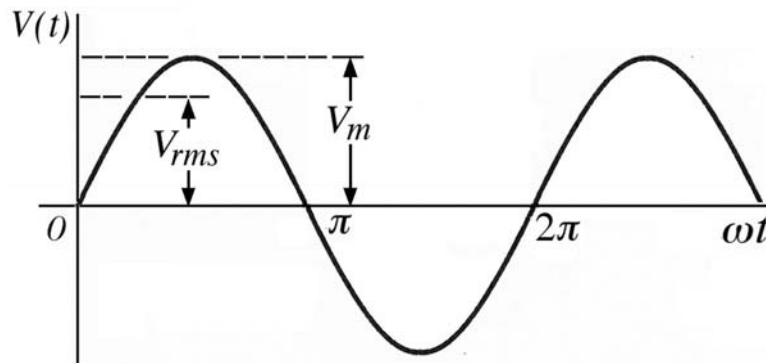


Figura 1: Valor eficaz V_{rms} del voltaje alterno

Resulta interesante preguntarse: ¿cuál es el valor del voltaje o de la corriente alterna que determina el ritmo de generación de calor en una resistencia, es decir, el valor que equivale al de una corriente continua en el efecto de calentamiento? Este es el llamado *valor eficaz* o *rms* (raíz cuadrática media o root mean square en inglés) y podemos demostrar que equivale al valor máximo dividido por la raíz cuadrada de 2:

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

En las especificaciones de voltaje de una fuente alterna, siempre se hace referencia al voltaje eficaz o rms. Así, cuando decimos que el voltaje de la red doméstica es de 110 voltios, esto corresponde a un voltaje pico de 156 V, es decir 110 V multiplicado por la raíz cuadrada de 2. Por otra parte, es importante indicar que los voltímetros y amperímetros de corriente alterna lo que miden son valores eficaces.

Diagramas de fasores:

Una manera práctica de representar y visualizar el comportamiento relativo de la corriente y el voltaje alterno en un circuito es mediante un *diagrama de fasores*.

Un *fasor* es un vector que gira con una frecuencia angular constante ω , en el sentido contrario a las agujas del reloj (figura 2), y tiene las siguientes propiedades:

- 1) Su módulo es proporcional al valor máximo de la cantidad representada.
- 2) Su proyección sobre el eje vertical da el valor instantáneo de dicha cantidad.

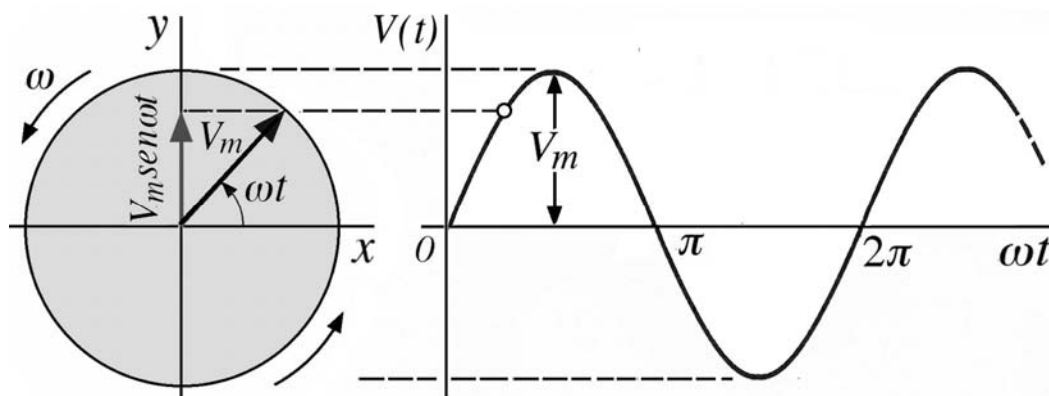


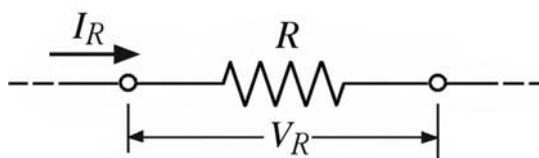
Figura 2: Representación fasorial de un voltaje alterno

En un circuito de corriente alterna que consiste de una combinación de elementos: generador, resistencia, inductor y condensador, la descripción fasorial proporciona una visión geométrica clara del papel de cada uno de estos elementos en el circuito, como veremos a continuación.

3a. Elemento resistivo: Consideremos una resistencia como único elemento de un circuito, de modo que la caída de potencial (voltaje) a través de ella es:

$$V_R = V_m \text{sen } \omega t \quad (3)$$

donde V_m es el voltaje máximo.



La corriente en la resistencia es:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_m \text{sen } \omega t}{R} = I_m \text{sen } \omega t \quad (4)$$

Donde I_m es el valor máximo de la corriente, $I_m = V_m / R$

Las ecuaciones 3 y 4 indican que en una resistencia la corriente I_R y el voltaje V_R alcanzan sus valores cero y pico al mismo tiempo. Luego, *en una resistencia la corriente y el voltaje están en fase*. Sus fasores presentan la misma dirección y sentido rotando con la misma frecuencia angular, ω (Figura 3). Dada esta condición, en lo

sucesivo, será indistinto referirse a I_R o a V_R como elemento de referencia.

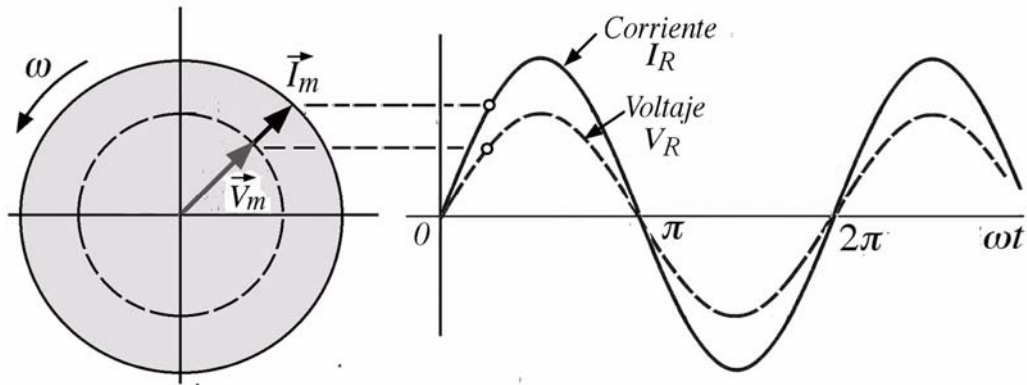
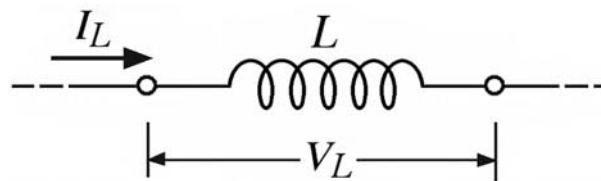


Figura 3: En una resistencia V_R e I_R están en fase

Mientras esto es cierto para una resistencia, veremos a continuación que en los inductores y los condensadores la corriente y el voltaje se desfasan.

3b. Elemento inductivo: Consideremos la parte de un circuito que contiene una inductancia pura L .



El voltaje instantáneo en la autoinducción es,

$$V_L = V_m \text{sen} \omega t$$

y está relacionado con la corriente de acuerdo a la expresión:

$$V_L = V_m \text{sen} \omega t = L \frac{dI_L}{dt} \quad (5)$$

Para obtener la corriente, integramos esta expresión:

$$I_L = \frac{V_m}{L} \int \text{sen} \omega t dt = -\frac{V_m}{\omega L} \text{cos} \omega t$$

Si se utiliza la identidad $\cos(\omega t) = -\text{sen}(\omega t - \pi/2)$, la ecuación anterior puede expresarse de la forma:

$$I_L = \left(\frac{V_m}{\omega L}\right) \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

Es decir: *En un inductor la corriente se atrasa en 90° con respecto al voltaje, o bien el voltaje se adelanta en $\pi/2$ con respecto a la corriente.*

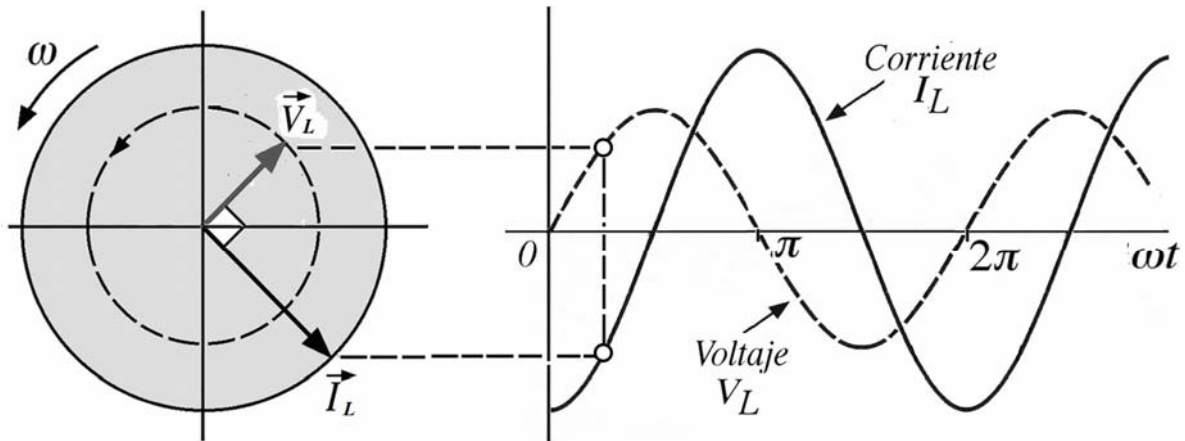


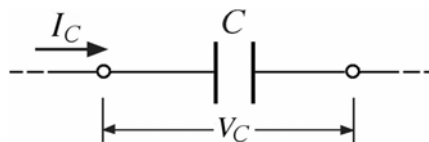
Figura 4: En un inductor I_L se retrasa en 90° con respecto a V_L

La corriente máxima en la inductancia está dada por la relación:

$$I_m = \frac{V_m}{\omega L} = \frac{V_m}{X_L} \quad (7)$$

donde la $X_L = \omega L$ se denomina reactancia inductiva. La reactancia es análoga a la resistencia y se mide en las mismas unidades (ohms)

3c. Elemento capacitivo: Consideremos la parte de un circuito que contiene un condensador C .



Si el voltaje a través del condensador es $V_C = V_m \text{sen} \omega t$, la carga instantánea en las placas es:

$$Q = CV_C = CV_m \text{sen} \omega t$$

Puesto que la corriente en el condensador es la rapidez temporal de la carga en sus placas, se tiene:

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = \omega CV_m \cos \omega t$$

Utilizando la identidad trigonométrica $\cos(\omega t) = \text{sen}(\omega t + \pi/2)$, podemos escribir la ecuación anterior en la forma:

$$I_C = \omega CV_m \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

En conclusión: *En un condensador la corriente se adelanta en 90° al voltaje*, o bien el voltaje en el condensador se retrasa en 90° con respecto a la corriente.

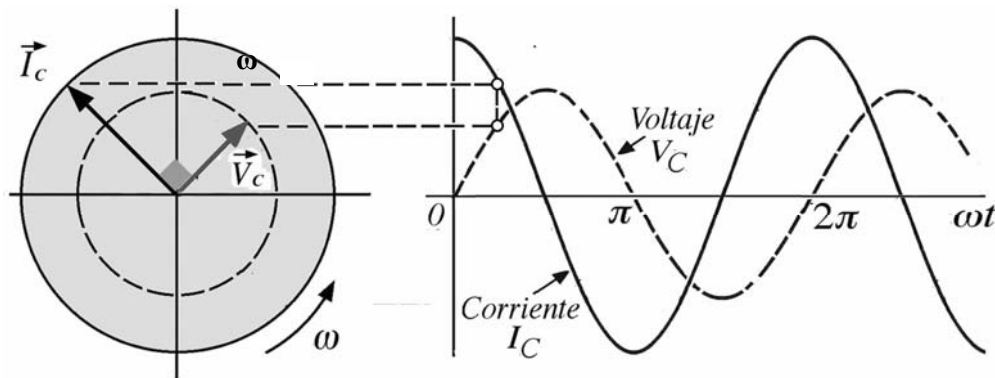


Figura 5: En un condensador la corriente I_C se adelanta en 90° respecto a V_C .

La corriente máxima en el capacitor está dada por la relación:

$$I_m = \omega CV_m = \frac{V_m}{X_C} \quad (8)$$

Donde $X_C = 1/\omega C$ se denomina *reactancia capacitiva* y se expresa también en *ohms*. En general, se puede hablar de la *impedancia* de un circuito para incluir tanto resistencias como reactancias. Podemos resumir los resultados anteriores en la siguiente tabla:

Tabla I

Elemento	Impedancia	Relación de amplitud	Fase de I respecto a V
Resistencia R	R	$V_m = I_m R$	en fase
Inductor L	X_L	$V_m = I_m X_L$	se atrasa en 90°
Capacitor C	X_C	$V_m = I_m X_C$	se adelanta en 90°

3d. Circuito serie R-L-C: En el circuito serie R - L - C , la corriente I en cada elemento es la misma para cualquier instante y el voltaje V_R en la resistencia está en fase con dicha corriente (fig. 3). Por otra parte, el voltaje V_L en el inductor se adelanta a la corriente en 90° (fig.4), mientras que el voltaje V_C en el capacitor se atrasa respecto de la corriente en 90° (fig.5).

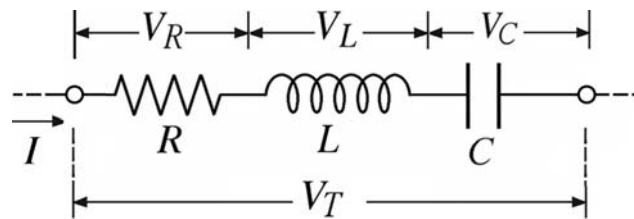


Figura 6

Tomando en cuenta la figura 6 y usando la representación fasorial el voltaje resultante se obtiene mediante la expresión:

$$\vec{V}_T = \vec{V}_R + \vec{V}_L + \vec{V}_C \quad (9)$$

Como indica la figura 7a, los fasores \vec{V}_L y \vec{V}_C apuntan en sentidos opuestos y el fasor resultante entre ellos es la diferencia: $\vec{V}_{LC} = \vec{V}_L - \vec{V}_C$ (Fig. 7b).

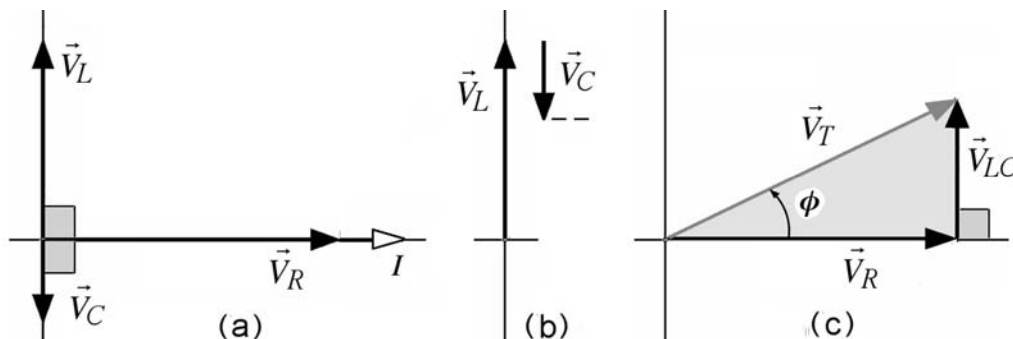


Figura 7

Como en todo instante de tiempo los fasores \vec{V}_{LC} y \vec{V}_R quedan en ángulo recto, fig. 7c, el modulo del fasor voltaje total será:

$$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_{LC}^2} = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad (10)$$

Sustituyendo $V_R = IR$, $V_L = IX_L$ y $V_C = IX_C$, podemos escribir el voltaje total en términos de la corriente:

$$V_T = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ \quad (11)$$

Donde la impedancia del circuito (en ohms) es:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (12)$$

Y el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje viene dado por:

$$\text{tg}\phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (13)$$

ACTIVIDADES PRELIMINARES

a) Construya el *diagrama de fasores* para un *circuito paralelo L-R-C*, mostrando la corriente en cada uno de los elementos: I_R , I_L , I_C , la corriente total I_T y el voltaje V aplicado por la fuente.

b) Demuestre que la *amplitud* de la corriente total suministrada por la fuente es:

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

c) Demuestre que el *ángulo de fase* entre el voltaje y la corriente total está dado por:

$$\text{tg}\phi = R\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$$

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este experimento disponemos de un tablero con los elementos R , L y C instalados, pero no están conectados entre si (figura 8).

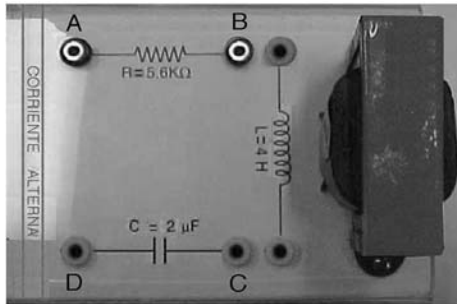


Figura 8: Tablero



Figura 9: Fuente de voltaje

El circuito es alimentado por una fuente de voltaje alterno a la frecuencia de 60 Hz (figura 9)

Para la medida de los voltajes alternos dispondremos: de un *multímetro*, para la medida de los *valores eficaces* y de un *osciloscopio* de *dos canales* que permite monitorear simultáneamente dos señales en función del tiempo, permitiéndonos medir los *voltajes pico* y determinar la *diferencia de fases* entre ellas. Los principios de funcionamiento y características del osciloscopio están descritos en la *Practica 3: El Osciloscopio*.

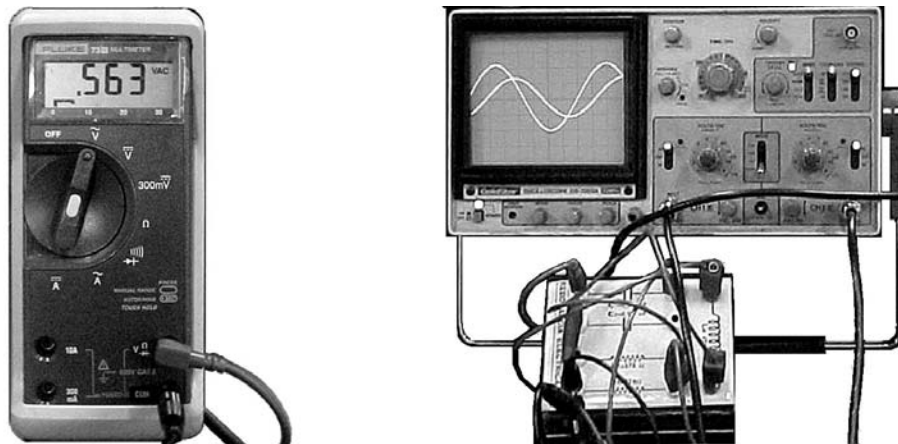


Figura 10: Multímetro y osciloscopio

En la práctica del osciloscopio, *sección B*, se hicieron medidas de la amplitud y se determinó la diferencia de fases entre señales. Ese mismo procedimiento lo aplicaremos en el transcurso de esta práctica.

A. Circuito serie R-L

Circuito serie R-L: Comenzaremos el estudio de un circuito sencillo que consiste de una fuente alimentando una resistencia en serie con un inductor.

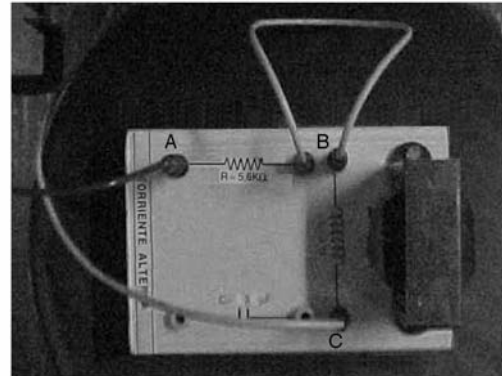
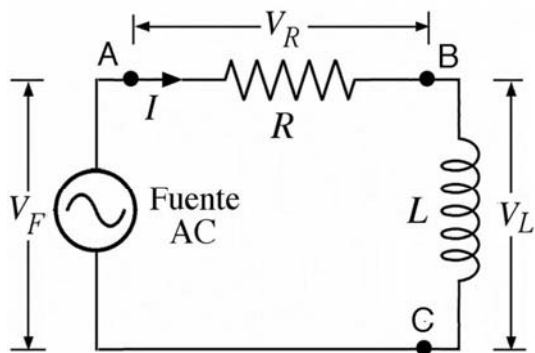


Figura 11: Circuito en serie $R-L$

A1. De acuerdo a la figura 11, en el punto **B**, conecte con un cable un terminal de la resistencia con uno del inductor. Conecte la fuente al terminal de entrada **A** y al terminal del inductor en el punto **C** y, una vez encendida, ajuste su voltaje a un valor próximo a 9 voltios.

A2. Utilice el *multímetro* para medir el *valor eficaz* de los voltajes alternos de la fuente V_F , de la resistencia V_R y del inductor V_L , (Tabla II)

Tabla II

V_F (V)	V_R (V)	V_L (V)

A3. ¿Por qué, el voltaje de la fuente, V_F , *no* es la suma de los valores de las caídas de potencial V_R y V_L , lo cual está en aparente contradicción con la regla de Kirchhoff del circuito cerrado?

A4. Sin modificar el voltaje de salida de la fuente utilizaremos ahora el osciloscopio. Conecte el terminal común de las puntas de prueba del osciloscopio al punto **B**. Conecte la otra punta de prueba **CH1X** al punto **A** y la otra punta de prueba del **CH2Y** al punto **C**, (Fig. 12).

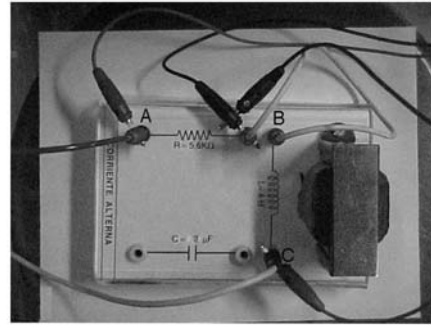
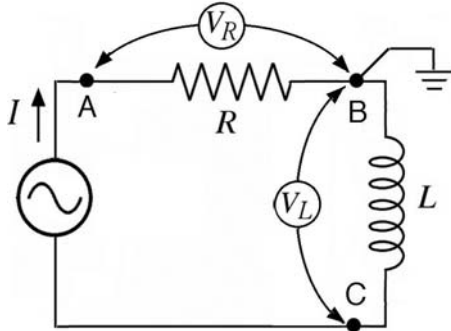


Figura 12

A5. Haga los ajustes necesarios en el osciloscopio para una obtener una señal *simétrica* respecto del eje horizontal en la pantalla. Coloque el suiche TIME/cm en una posición que permita mostrar una onda completa de ambas señales abarcando toda la pantalla. En el osciloscopio deben aparecer señales similares a la de la figura 13.

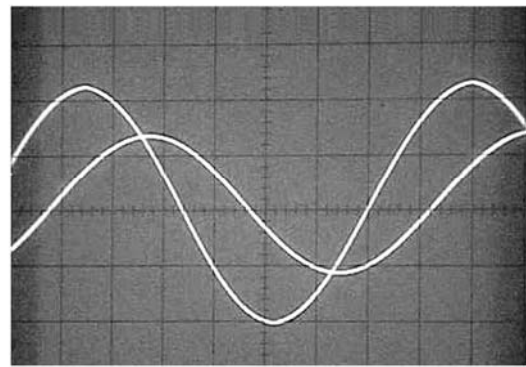
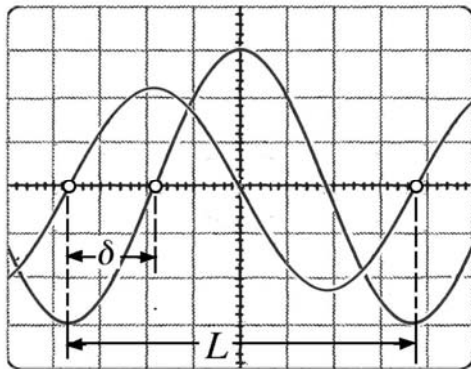


Figura 13

A6. Haga en su hoja de trabajo una figura similar, identifique las ondas y copie en ella las medidas de los valores pico de V_R y V_L , así como los valores δ y L . La diferencias de fase $\Delta\phi$, entre dos señales se determina por el corrimiento δ en comparación con la longitud L de un ciclo, y usando la relación lineal:

$$\Delta\phi = 360^\circ \left(\frac{\delta}{L} \right) \quad (14)$$

Como ejemplo haga el calculo numérico indicado en la figura 13.

Nota:

Para la determinación de las diferencias de fase, es importante tomar en cuenta la polaridad de los voltajes medidos, es decir, en cuáles puntos deben estar colocadas las puntas de prueba.

A7. Mueva el terminal común de las puntas de prueba del osciloscopio al punto **A**. Conecte la otra punta de prueba de **CH1X** al punto **B** y la otra punta de prueba del **CH2Y** en el punto **C**,(Fig.14).

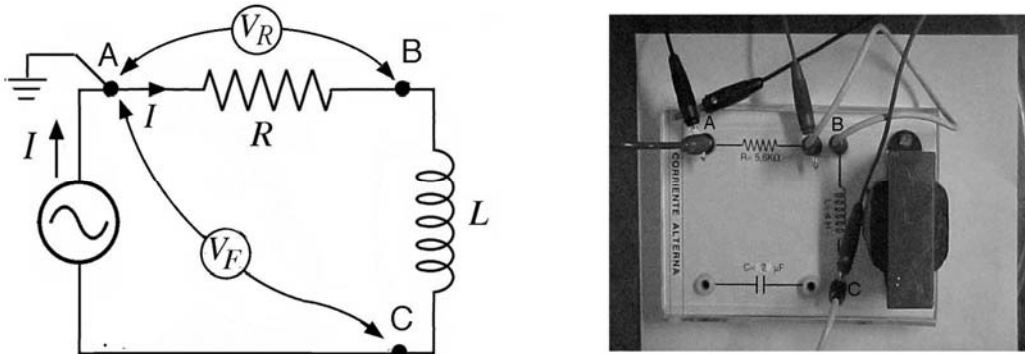


Figura 14

A8. Al igual que en el caso anterior haga una figura similar a la observada, identificando las ondas y copie en ella las medidas de los valores pico de V_R y V_F , así como los valores δ y L medidos. Determine la diferencia de fases entre las ondas observadas. Escriba sus resultados en la tabla III:

Tabla III

$V_F(V)$	$V_R(V)$	$V_L(V)$	$\Delta\phi_L$ (grados)	$\Delta\phi_F$ (grados)

Comparando los valores de V_F , V_R y V_L que se tienen en las **Tablas II** y **III**. ¿Existe alguna relación entre ellos? Justifique su respuesta.

Diagrama de Fasores

A9. Según se indica a continuación, en la figura 15, con los voltajes medidos en el osciloscopio, construya el triángulo fasorial. Primero dibuje, a escala, el lado horizontal **ab** correspondiente a \vec{V}_R , usando la misma escala, con un compás, a partir del punto **a**

trace un arco correspondiente a \vec{V}_F y a partir del punto **b**, el arco correspondiente a \vec{V}_L . Los arcos así trazados se interceptarán en el punto **c**.

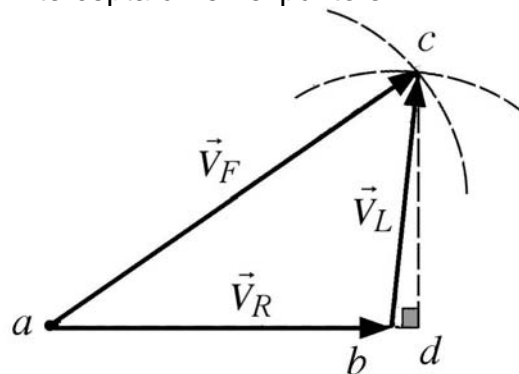


Figura 15

En el triángulo obtenido mida, con un transportador, los ángulos de \vec{V}_F , \vec{V}_L respecto a \vec{V}_R , y compare estos valores con las diferencias de fases medidas en la pantalla del osciloscopio. ¿Existe alguna relación entre ellas? Explique su respuesta.

Usualmente los fasores \vec{V}_L y \vec{V}_R no forman exactamente un ángulo de 90° y el efecto puede ser atribuido a la resistencia interna del inductor. Si este es el caso, el voltaje en el inductor puro es la proyección **cd** de \vec{V}_L en la perpendicular a \vec{V}_R . En la figura 15 hemos ilustrado este efecto

A10. Usando el triángulo anterior, demuestre la siguiente relación para la inductancia L , en términos de la resistencia R y la frecuencia f :

$$L = \left(\frac{cd}{ab}\right) \frac{R}{2\pi f}$$

A11. Mida con el multímetro el valor de la resistencia R y determine a partir de la relación anterior el valor de la inductancia L (en Henrios). En principio, también es posible obtener, a partir de la medida de la longitud del segmento **cd**, la resistencia interna del inductor.

B. Circuito serie R–C

B1. De acuerdo a la figura 16 conecte con un cable los terminales **B** y **C** de la resistencia y el condensador, respectivamente. Conecte la fuente a los terminales de entrada **A** y **D** del circuito.

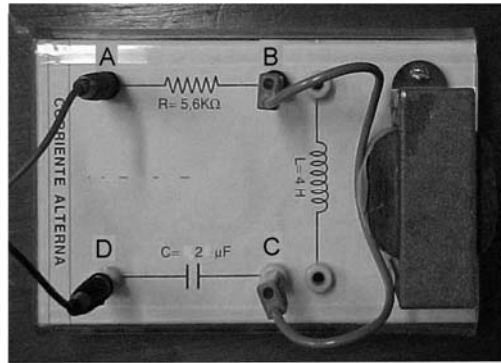
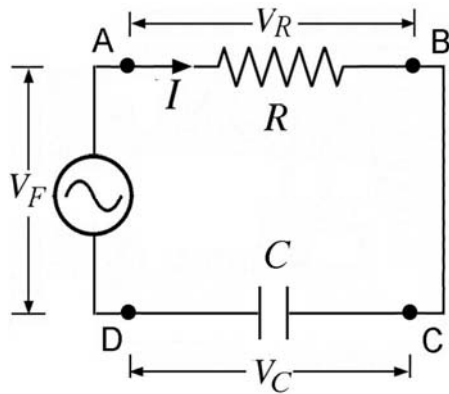


Figura 16

B2. De acuerdo al circuito de la figura 17, conecte el terminal común de las puntas de prueba del osciloscopio al punto **B**. Conecte la otra punta de prueba del **CH1X** al punto **A** y la otra punta de prueba del **CH2Y** al punto **D**. En el osciloscopio deben aparecer las señales correspondientes. Haga en su hoja de trabajo una figura similar, identifique las señales y copie en ella las medidas de los valores pico de V_R y V_C , así como los valores δ y L . Determine la diferencia de fases entre las dos sinusoides.

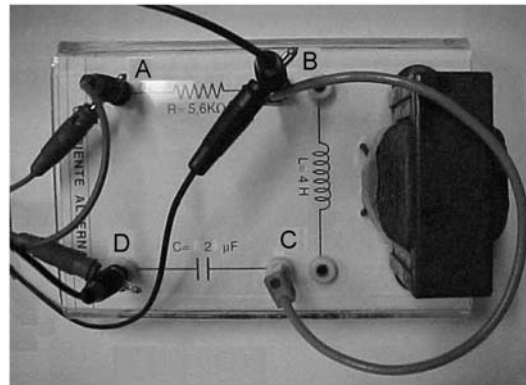
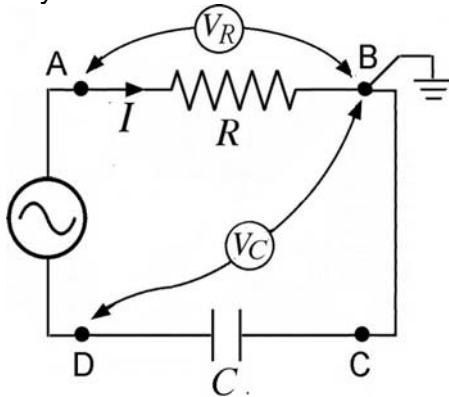


Figura 17

B3. Mueva el terminal común de las puntas de prueba del osciloscopio al punto **A**. Conecte la otra punta de prueba del **CH1** al punto **B** y mantenga la otra punta de prueba del **CH2** en el punto **D**, figura 18. En el osciloscopio deben aparecer las señales correspondientes, haga en su hoja de trabajo una figura similar, identifique las ondas y copie en ella los valores V_R , V_F , δ y L . Determine la diferencia de fases entre las ondas observadas. Escriba sus resultados en la tabla **IV**.

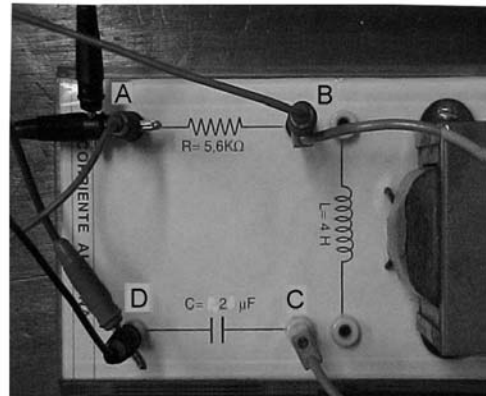
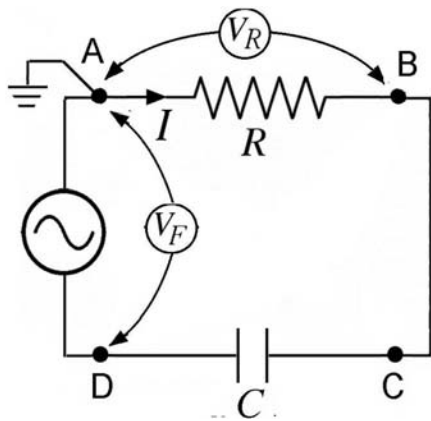


Figura 18

Tabla IV

$V_F (V)$	$V_R (V)$	$V_C (V)$	$\Delta\phi_C$ (grados)	$\Delta\phi_F$ (grados)

B4. Según se indica a continuación (figura 19), con los voltajes medidos en el osciloscopio, construya el triángulo fasorial. Primero dibuje, a escala, el lado horizontal ab correspondiente a \vec{V}_R , usando la misma escala, con un compás, a partir de a trace un arco correspondiente a \vec{V}_F y a partir de b el arco correspondiente a \vec{V}_C . Los arcos así trazados se interceptarán en el punto c .

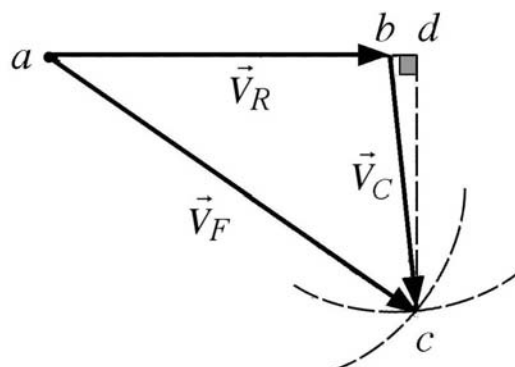


Figura 19

En el triángulo obtenido mida, con un transportador, los ángulos de \vec{V}_F , y de \vec{V}_C respecto a \vec{V}_R . Compare estos valores con las diferencias de fases medidas en la

pantalla del osciloscopio, ¿existe alguna relación entre ellas? Explique su respuesta.

B5. Usando el triángulo anterior, demuestre la siguiente relación para la capacitancia C , en términos de la resistencia R y la frecuencia f :

$$C = \left(\frac{ab}{cd}\right) \frac{1}{2\pi f R}$$

B6. Calcule a partir de la relación anterior el valor de la capacitancia C (en μF)

C. Circuito serie R- L- C

C1. Considere finalmente el circuito en serie R - L - C . Para ello, de acuerdo a la figura 20, en el punto **B** conecte con un cable la resistencia y el inductor. Haga lo mismo con el inductor y el condensador en el punto **C** y cierre el circuito conectando la fuente a los terminales de entrada **A** y **D** del circuito.

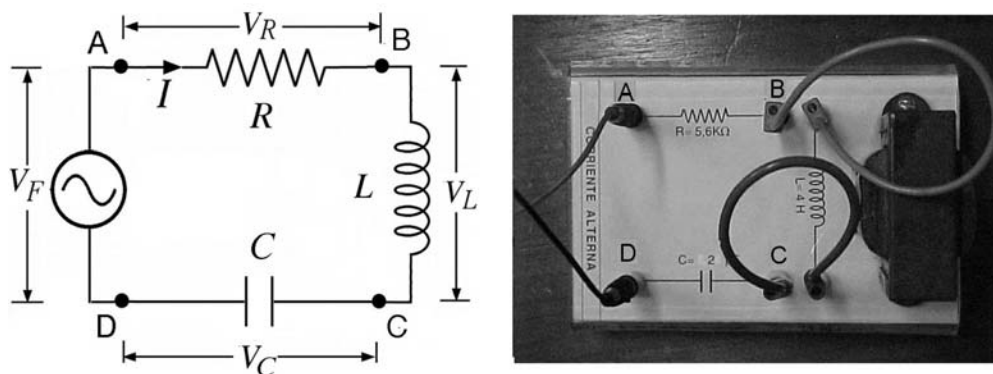


Figura 20

C2. Empleando los mismos procedimientos seguidos para estudiar los circuitos R - L y R - C vamos a realizar los montajes que nos permitirán analizar el presente caso. En primer lugar, instalaremos el circuito indicado en la figura 21.

Conecte el terminal común de las puntas de prueba del osciloscopio al punto **B**. Conecte la otra punta de prueba del **CH1X** al punto **A** y la otra punta de prueba del **CH2Y** al punto **D** la otra punta de prueba al punto **D**.

En el osciloscopio deben aparecer las señales correspondientes. Haga en su hoja de trabajo una figura similar, identifique las señales y copie en ella los valores V_R ,

V_{LC} , δ y L . Determine la diferencia de fases entre las sinusoides observadas.

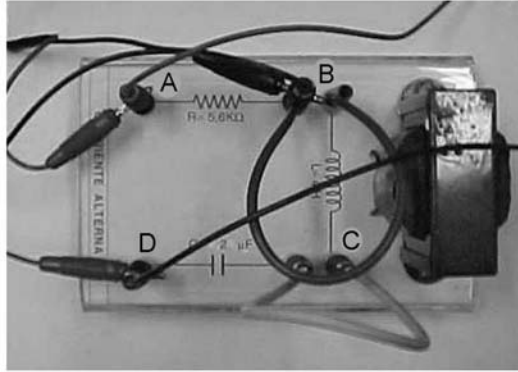
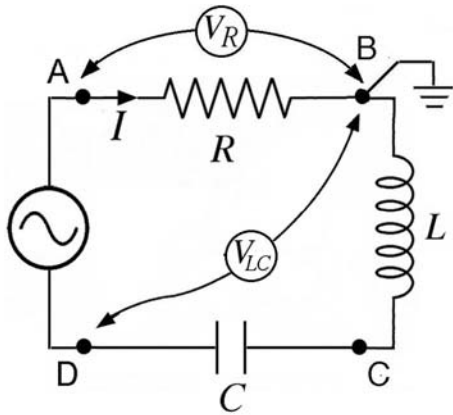


Figura 21

C3. Mueva el terminal común de las puntas de prueba del osciloscopio al punto **A**. Conecte la otra punta de prueba del **CH1** al punto **B** y mantenga la otra punta de prueba del **CH2** en el punto **D** (figura 22).

En el osciloscopio deben aparecer las señales correspondientes, haga en su hoja de trabajo una figura similar, identifique las señales y copie en ella los valores V_R , V_F , δ y L . Determine la diferencia de fases entre las señales observadas. Escriba sus resultados en la tabla **V**.

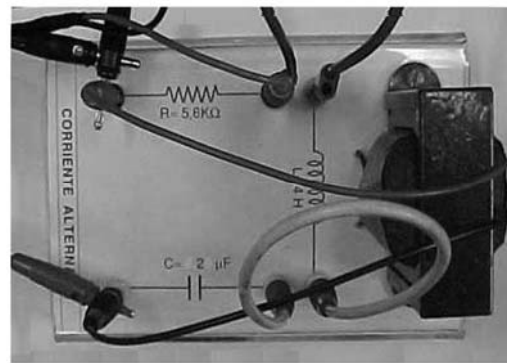
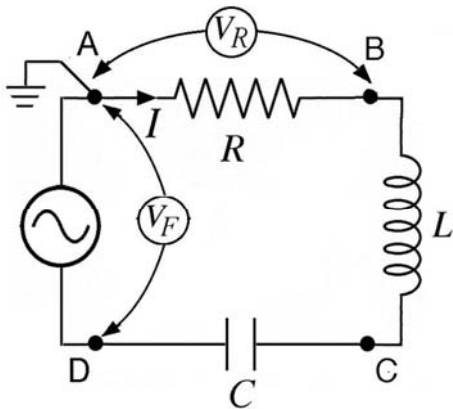


Figura 22

Tabla V

$V_F(V)$	$V_R(V)$	$V_{LC}(V)$	$\Delta\phi_{LC}$ (grados)	$\Delta\phi_F$ (grados)

C4. Proceda a construir el diagrama de fasores de \vec{V}_R , \vec{V}_{LC} y \vec{V}_F .

C5. Con el valor de R medido en **A11**, determine el valor de la corriente.

C6. Determine la impedancia del circuito $Z = V_F / I$, con el valor de la corriente I determinado en **C5** y el valor medido de V_F .

C7. De acuerdo a lo estudiado en **3d**, calcule el valor de la impedancia del circuito, mediante la expresión:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (12)$$

Usando los valores de los parámetros R (medido), X_L y X_C (calculados) mediante las expresiones

$$X_L = \omega L = 2\pi fL, \text{ es la reactancia inductiva y}$$

$$X_C = 1/\omega C = 1/2\pi fC, \text{ es la reactancia capacitiva}$$

C8. Compare los valores de la impedancia Z determinados en **C6** y **C7**.

C9. Asimismo, calcule el ángulo ϕ entre el voltaje V_F y la corriente I tomando en cuenta la expresión:

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (13)$$

¿Qué relación guarda este ángulo con el desfase $\Delta\phi_F$?

Preguntas

P1. ¿Porqué un inductor permite el paso de corrientes de frecuencias bajas pero impide el paso de corrientes a altas frecuencias?

P2. ¿Por qué un capacitor permite el paso de corrientes de frecuencias altas pero impide el paso de corrientes a bajas frecuencias?

P3. ¿En qué condiciones la impedancia de un circuito $L-R-C$ es mínima?

Bibliografía

D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Cap. 39, Ed. Continental (1995)

R. A. Serway, *Física*, Tomo. 2, Tercera edición, Cap. 33, Mc. Graw - Hill (1992).

RESONANCIA ELÉCTRICA

OBJETIVOS

- Estudiar la respuesta de frecuencia de un circuito serie R-L-C.
- Determinar la frecuencia de resonancia y el factor de calidad.
- Estudiar la influencia del valor de R sobre el factor de calidad.

MATERIALES

1. Generador de frecuencia variable.
2. Osciloscopio de dos canales.
3. Tablero de conexiones conteniendo los elementos L, R y C.
4. Cables de conexión.

TEORÍA

La resonancia es un fenómeno que tiene aplicaciones muy importantes en diversos campos de la física y la tecnología. Quizás la más común aplicación de la resonancia es como selector de frecuencia. La resonancia está presente cuando ajustamos la frecuencia natural de oscilación de un circuito receptor hasta igualarla a la frecuencia de las ondas de una estación de radio o TV. En este proceso estamos desechando una gran cantidad de señales de otras estaciones recibidas por la antena, al quedar fuera de resonancia y así seleccionamos únicamente la frecuencia de la estación que deseamos

sintonizar. En este experimento analizaremos la resonancia de un circuito sencillo constituido por una bobina, un condensador y una resistencia conectados en serie.

A. Respuesta de frecuencia de un circuito serie RLC

Consideremos el circuito serie R-L-C alimentado por una fuente de variación periódica con el tiempo: $V(t) = V_0 \cos \omega t$. De acuerdo con la regla de Kirchhoff, la suma de los voltajes: (1) en la bobina $L(di/dt)$, (2) en la resistencia (IR) y (3) en el condensador (Q/C) , es igual al voltaje total aplicado $(V_0 \cos \omega t)$. Por lo tanto se cumple la ecuación diferencial:

$$L\left(\frac{di}{dt}\right) + Ri + \frac{Q}{C} = V_0 \cos \omega t$$

La solución general para la corriente $I(t)$ es la superposición de una parte transitoria que decae en el tiempo y una parte estacionaria que oscila a la misma frecuencia de la fuente. Una vez transcurrido un tiempo suficientemente largo la solución transitoria es despreciable y basta considerar sólo la solución estacionaria.

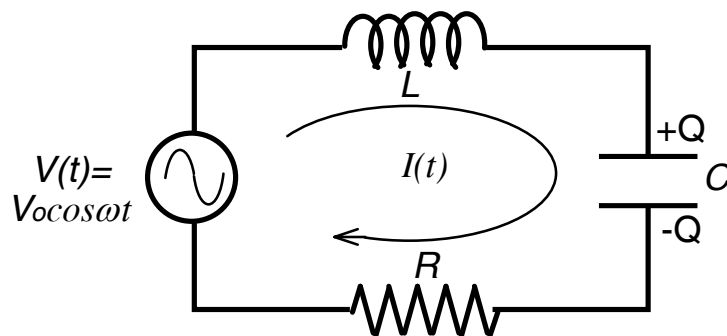


Fig. 1: Circuito serie R-L-C

Para analizar los circuitos de corriente alterna con elementos lineales, una técnica muy útil consiste en representar las cantidades físicas involucradas en notación compleja. Por ejemplo, el voltaje de la fuente puede representarse como:

$$\hat{V}(t) = V_0 e^{i\omega t}$$

Esta cantidad compleja se llama un *fasor* y puede visualizarse gráficamente como vector que rota en el plano complejo a la frecuencia angular ω . Después de operar matemáticamente sobre los fasores, podemos recuperar las correspondientes cantidades físicas, proyectándolos sobre el eje real. Es decir:

$$V(t) \text{ (físico)} = \text{Re}\{\hat{V}\} = \text{Re}\{V_0 e^{i\omega t}\} = V_0 \cos \omega t$$

Para hallar la corriente $I(t) = dQ/dt$, derivamos la ecuación diferencial anterior respecto del tiempo.

$$L\left(\frac{d^2\hat{I}}{dt^2}\right) + R\left(\frac{d\hat{I}}{dt}\right) + \frac{\hat{I}}{C} = i\omega V_0 e^{i\omega t}$$

Si suponemos que $I(t)$ tiene una variación sinusoidal a la frecuencia angular ω , su representación compleja debe ser de la forma: $\hat{I}(t) = \hat{I}_0 e^{i\omega t}$. Así, cualquier diferencia de fase entre la corriente y el voltaje está incluida en la constante compleja \hat{I}_0 . Sustituyendo $\hat{I}(t)$ y sus derivadas en la expresión anterior:

$$(-\omega^2 L \hat{I}_0 + i\omega R \hat{I}_0 + \frac{\hat{I}_0}{C}) e^{i\omega t} = i\omega V_0 e^{i\omega t}$$

cancelando los factores exponenciales $e^{i\omega t}$ y despejando \hat{I}_0 , tenemos:

$$\hat{I}_0 = \frac{V_0}{R + i(\omega L - 1/\omega C)} = \frac{V_0}{R + i(X_L - X_C)}$$

siendo $X_L = \omega L$ la reactancia inductiva de la bobina y $X_C = 1/\omega C$ la reactancia capacitiva del condensador.

La cantidad en el denominador se denomina *impedancia compleja* y se puede representar mediante:

$$\hat{Z} = R + i(X_L - X_C) = Z e^{i\delta}$$

El módulo Z viene dado por:

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

y la fase δ viene dada por:

$$\delta(\omega) = \text{Arctg}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) = \text{Arctg}\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right)$$

Podemos determinar la constante compleja de la corriente \hat{I}_0 :

$$\hat{I}_0 = \frac{V_0}{\hat{Z}} = \frac{V_0}{Z} e^{-i\delta} = I_0 e^{-i\delta}$$

Por lo tanto, la expresión completa para la corriente compleja es:

$$\hat{I} = \hat{I}_0 e^{i\omega t} = I_0 e^{i(\omega t - \delta)}$$

Finalmente, para recuperar la expresión "física" de la corriente, tomamos la parte real de su representación compleja:

$$I(t) = \text{Re}\{\hat{I}(t)\} = I_0 \cos(\omega t - \delta)$$

donde $I_0 = V_0 / Z$ es la amplitud de la corriente y " δ " representa la diferencia de fase de la corriente respecto del voltaje de la fuente. Estas relaciones se ilustran en el diagrama de fasores mostrado a continuación:

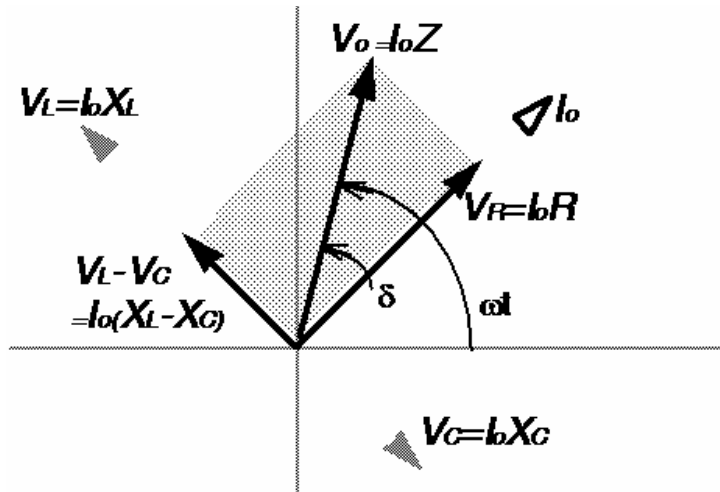


Fig. 2: Diagrama de fasores

B. Resonancia

Si consideramos la expresión para la corriente, tanto su amplitud I_0 como su diferencia de fase δ dependen de la frecuencia del voltaje de la fuente. La corriente presenta un máximo cuando $X_L = X_C$ y el circuito se comporta como si la bobina y el condensador no existieran (sus voltajes están 180° fuera de fase y se cancelan). En esta situación la corriente queda limitada únicamente por el valor de la resistencia.

$$I_0(\text{máx}) = \frac{V_0}{R}$$

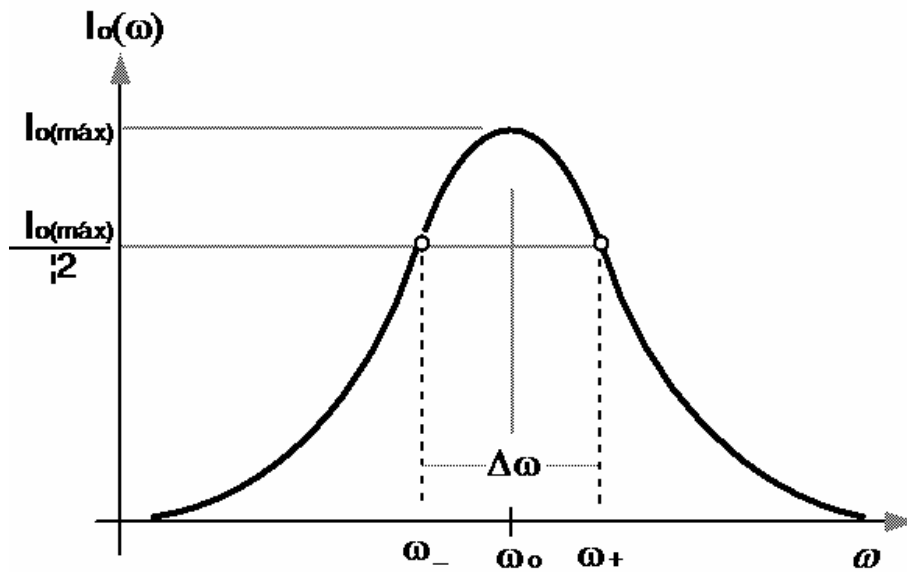


Fig. 3: Amplitud de la corriente en función de la frecuencia angular

Este fenómeno en el cual la respuesta es máxima para un valor particular de la frecuencia de la señal excitadora es conocido como resonancia. La frecuencia angular de resonancia $\omega = \omega_0$ viene dada por la condición:

$$X_L = \omega L = X_C = 1 / \omega C$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Otra propiedad importante de la curva de resonancia es su *ancho relativo*. Podemos definir un factor adimensional Q (llamado factor de calidad o de mérito) como el inverso del ancho relativo:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \text{Factor de calidad}$$

donde se define el ancho de banda $\Delta\omega = (\omega_+ - \omega_-)$ como la diferencia entre las frecuencias para las cuales, a cada lado de la frecuencia de resonancia ω_0 , la amplitud de la corriente se reduce en un factor $\sqrt{2}$ respecto de su valor máximo.

El criterio para esta definición se basa en que cuando la amplitud de la corriente se reduce en un factor $\sqrt{2}$, la potencia disipada en el circuito es justamente "la mitad" de su valor máximo. Por esta razón estas dos frecuencias se denominan de potencia mitad. Las frecuencias angulares ω_+ y ω_- son aquellas en que la reactancia resultante

$|X_L - X_C|$ es numéricamente igual al valor de la resistencia. En efecto, para estos puntos tenemos:

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

De esta manera la amplitud de la corriente es:

$$I_o(\omega_{\pm}) = \frac{V_o}{Z} = \frac{V_o}{\sqrt{2}R} = \frac{I_o(\text{máx})}{\sqrt{2}}$$

Hallemos una expresión para el factor de calidad en términos de los valores de los elementos del circuito. Para cada frecuencia de corte se cumple $|X_L - X_C| = R$, es decir:

$$\omega_+L - \frac{1}{\omega_+C} = R, \quad \text{y} \quad \omega_-L - \frac{1}{\omega_-C} = -R$$

Sumando y restando estas dos relaciones se obtiene:

$$\omega_+\omega_- = \omega_0^2 \quad \text{y} \quad \omega_+ - \omega_- = \frac{2R}{L} - \frac{\omega_+ - \omega_-}{\omega_+ \omega_- LC}$$

Sustituyendo la primera de estas relaciones en la segunda, se obtiene para el ancho de banda:

$$\Delta\omega = \omega_+ - \omega_- = \frac{R}{L}$$

Por lo tanto, el factor de calidad viene dado por la relación simple:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\omega_0 L}{R}$$

Cuanto menor es la resistencia R , tanto mayor es el factor de calidad Q (el ancho de banda relativo es menor y la curva de resonancia es más pronunciada y angosta).

Por otra parte, la variación de la frecuencia no sólo influye en la amplitud de la corriente sino también en el desfase. De acuerdo a la expresión para $\delta(\omega)$, en resonancia $X_L = X_C$ y $\delta(\omega_0) = 0^\circ$. Es decir:

En resonancia, la corriente en el circuito oscila en fase con el voltaje de la fuente.

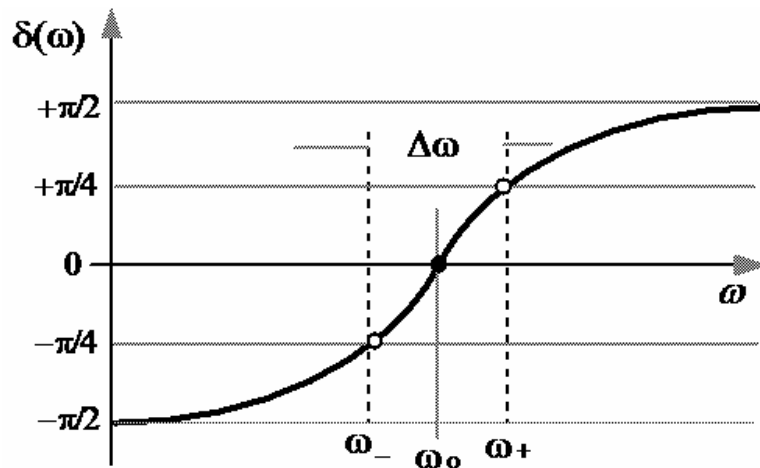


Fig. 4: Angulo de desfase de la corriente en función de la frecuencia

Para muy bajas frecuencias ($\omega \ll \omega_0$) la reactancia capacitiva domina ($\delta \approx -\pi/2$). Mientras que, para altas frecuencias ($\omega \gg \omega_0$), la reactancia inductiva domina ($\delta \approx +\pi/2$). También resulta interesante que cuando $|X_L - X_C| = R$ y se cumple que:

El desfase es $\delta = \pm\pi/4$ para los puntos de corte (ω_{\pm}) a cada lado de la resonancia.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

Resonancia en paralelo: Una resistencia, una bobina y un condensador están conectados en paralelo a una fuente de corriente alterna.

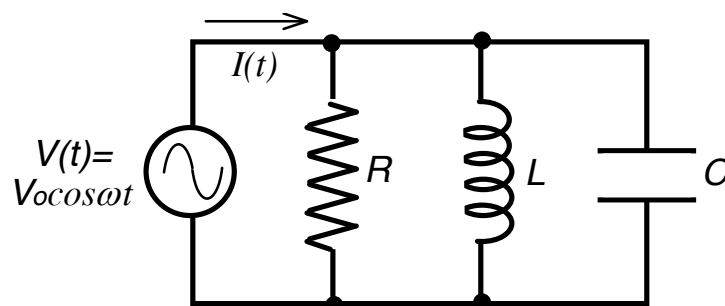


Fig. 5: Circuito paralelo R-L-C

a) Demuestre que la amplitud de la corriente total es:

$$I_o = V_o \sqrt{\frac{1}{R^2} + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}$$

y el ángulo de desfase entre la corriente y el voltaje viene dado por:

$$\delta = \text{Arctg}\left(\frac{\omega C - \frac{1}{\omega L}}{1/R}\right)$$

b) Dibuje un diagrama de fasores, mostrando las corrientes en los tres elementos.

c) Demuestre que en este caso la resonancia corresponde a $1/X_C = 1/X_L$, lo cual conduce de nuevo a la misma expresión para la frecuencia angular de resonancia:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Sin embargo, en el circuito resonante paralelo la corriente es un mínimo (en contraste con el circuito serie, en el cual la corriente alcanza un máximo).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A. Determinación de la curva de resonancia

En este experimento utilizaremos un generador de funciones de frecuencia variable el cual se operará en el modo de onda sinusoidal (\sim) y su terminal de salida ofrece una resistencia interna $R_j = 50 \Omega$.

*Para medir los voltajes en el circuito se emplea un osciloscopio de dos canales y es importante asegurarse de conectar el terminal común de tierra del osciloscopio con el terminal de "tierra" del generador (símbolo \perp). De esta manera todos los voltajes que se midan con las puntas de prueba serán referidos a este terminal común. **NOTA.** Evite confundir la frecuencia $f(\text{Hz}) = 1/T(\text{s})$ con la frecuencia angular $\omega (\text{rad/s}) = 2 \pi f$*

A1. Escoja uno de los condensadores y una de las resistencias a su disposición. Monte el circuito serie L-R-C a la fuente de manera que un lado de la resistencia quede conectado al terminal común de "tierra" del generador de ondas, como indica el esquema experimental.

$$\delta = \left(\frac{I}{I_0}\right) 2\pi$$

A6. Haga el gráfico del voltaje de la resistencia en función de la frecuencia. A partir de la curva determine la frecuencia de resonancia ω_0 y el factor de calidad. Compare estos valores con los valores teóricos. Superponga la gráfica experimental con la teórica. Observe que, debido al amplio rango de frecuencias de varios ordenes de magnitud, la escala de frecuencia se representa usualmente por conveniencia en forma logarítmica.

A7. Note que en la expresión para Q , la resistencia R_{total} es la total en serie en el circuito y es la suma de: la resistencia pura (R) que hemos colocado + la resistencia de la bobina (R_L) + la resistencia interna del generador ($R_g = 50\Omega$).

La resistencia R_L de la bobina a la frecuencia de resonancia se puede determinar notando que en esta condición ($X_L - X_C = 0$), y el circuito es puramente resistivo:

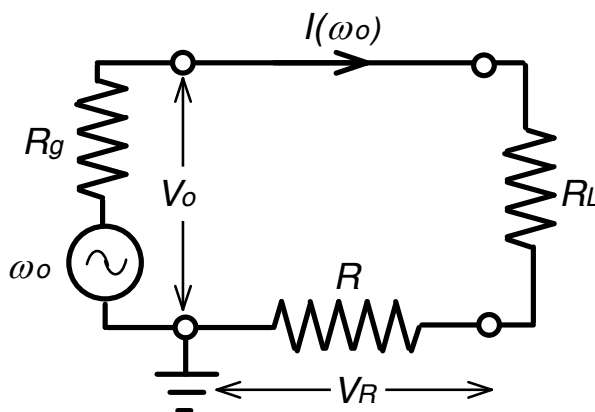


Fig. 7: Circuito equivalente para resonancia

Según este circuito, la resistencia R_L se determina a partir de las medidas del voltaje de la fuente V_0 y del voltaje en la resistencia V_R , y conocido el valor de R .

$$I(\omega_0) = \frac{V_0}{R_L + R} = \frac{V_R}{R} \Rightarrow R_L = R\left(\frac{V_0}{V_R} - 1\right)$$

A8. Haga un gráfico de la diferencia de fase δ , entre el voltaje V_R de la resistencia y el de la fuente V_0 , en función de la frecuencia. A partir de la curva determine la frecuencia de resonancia, ω_0 y el factor de calidad. Compare estos valores con los valores teóricos.

B. Medición del factor de calidad para otra resistencia

- B1.** Cambie la resistencia en serie con la bobina por otra resistencia de distinto valor. Determine de nuevo la frecuencia de resonancia y el factor de calidad Q del circuito. Para la determinación del nuevo Q no se le pide construir la curva de resonancia. Basta con buscar cuidadosamente los valores de frecuencia a cada lado de la resonancia tal que el voltaje en la resistencia caiga a un valor $V_R(\text{máx})/\sqrt{2}$ y la diferencia de fase δ sea $\pm \pi/4$.
- B2.** Tomando en cuenta los errores en sus mediciones, ¿sus resultados están acordes con los que predice la teoría?
- B3.** Finalmente, proceda a medir el voltaje en el condensador a la frecuencia de resonancia. Para ello previamente desconecte el circuito anterior y conecte de nuevo los elementos en serie en secuencia C-L-R, de manera que un lado del condensador quede conectado al terminal de tierra de la fuente.

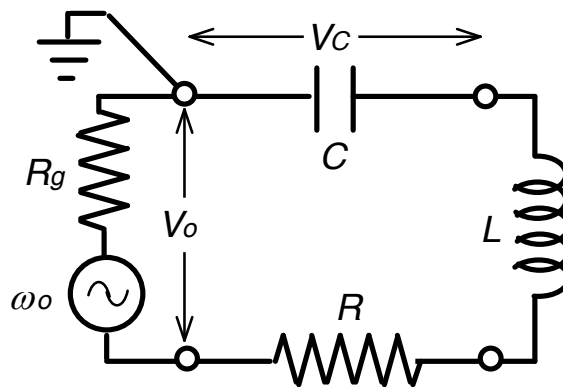


Fig. 8: Circuito serie C-L-R

- B4.** El voltaje en el condensador a la frecuencia de resonancia ¿puede llegar a ser mucho mayor que el voltaje de la fuente?
Justifique su respuesta incluyendo un diagrama de fasores.

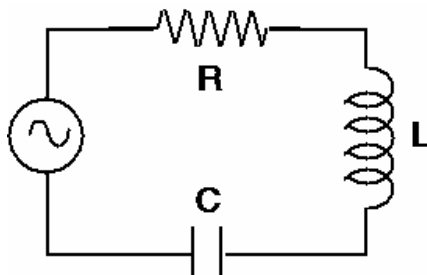
PREGUNTAS

1. Si tenemos dos circuitos serie diferentes: $L_1-R_1-C_1$ y $L_2-R_2-C_2$ que tienen una idéntica frecuencia de resonancia $\omega_1 = \omega_2$, y conectamos los seis elementos en serie, ¿cuál será la nueva frecuencia de resonancia del circuito combinado?
2. El comportamiento de la corriente en un circuito serie LRC es análogo a la respuesta de un sistema masa-resorte con amortiguamiento a medida que se varía la frecuencia de una fuerza excitadora. El diseñador de un automóvil debe tomar en cuenta el fenómeno de resonancia. El sistema de muelles juega el papel semejante

al condensador, la masa del automóvil juega un papel semejante a la inductancia y los amortiguadores juegan el papel de la resistencia.

Según su criterio, ¿cómo debería ser la curva de resonancia de un automóvil: aguda y alta o ancha y baja?

3. Considere el circuito serie R - L - C, alimentado por una fuente sinusoidal variable.



¿Cuáles de estas afirmaciones es correcta?

- (1) La impedancia aumenta si aumenta L.
- (2) La impedancia aumenta si disminuye C.
- (3) La impedancia aumenta si aumenta ω .
- (4) En resonancia, la fuente no realiza trabajo ya que la energía disipada en R es compensada por la energía almacenada en L y C.
- (5) En resonancia, el voltaje en la resistencia es igual al voltaje de la fuente.

REFERENCIAS

- 1. Berkeley Physics Laboratory, *Laboratory Physics -part A* , Mc Graw-Hill (1964).
- 2. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 2, cap. 26, Mc Graw-Hill (1984).

OSCILACIONES ELÉCTRICAS AMORTIGUADAS

OBJETIVOS

- Estudiar las oscilaciones eléctricas amortiguadas de un circuito serie R-L-C.
- Medir la frecuencia y el tiempo de relajación de las oscilaciones.
- Determinar la resistencia crítica del circuito.

MATERIALES

1. Generador de onda cuadrada.
2. Osciloscopio de dos canales.
3. Multímetro.
4. Tablero de conexiones conteniendo los elementos L y C.
5. Caja de décadas de resistencias.
6. Cables de conexión.

TEORÍA

En cualquier circuito en que se pueda almacenar energía, mediante condensadores cargados o bobinas con corrientes, si aplicamos o desconectamos bruscamente una fuente de voltaje, existe un período de tiempo durante el cual el circuito se adapta a las nuevas condiciones y después del cual los cambios tienden a desaparecer. Estos efectos temporales se denominan *transitorios* y se distinguen de los efectos *estacionarios* donde las corrientes tienen amplitudes estables. En este experimento analizaremos el régimen transitorio de un circuito RLC, cuyo comportamiento es

enteramente análogo a sistemas mecánicos, tanto desde el punto de vista físico como en su análisis matemático.

Régimen transitorio de un circuito serie RLC

Consideremos el circuito serie RLC, en el cual se aplica una diferencia de potencial constante V_0 en el instante inicial.

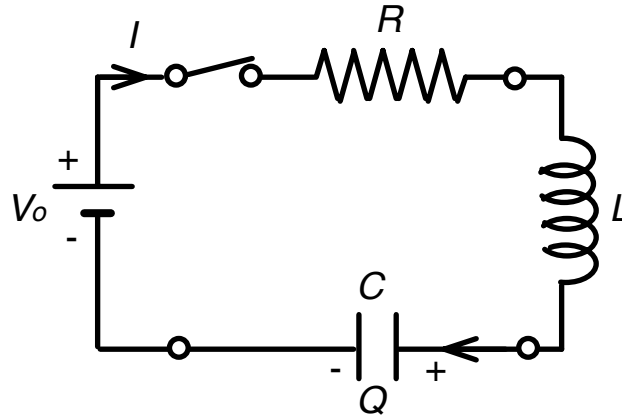


Fig. 1: Circuito serie RLC

Aplicando la regla de los voltajes de Kirchhoff, se tiene:

$$V_R + V_L + V_C = V_0$$

$$RI + L\left(\frac{dI}{dt}\right) + \frac{Q}{C} = V_0$$

Reemplazando la corriente en términos de la carga en el condensador ($I = dQ/dt$) se tiene:

$$L\left(\frac{d^2Q}{dt^2}\right) + R\left(\frac{dQ}{dt}\right) + \frac{Q}{C} = V_0$$

Esta ecuación diferencial tiene una solución particular $Q = Q_0 = CV_0$ que corresponde al valor de la carga del condensador transcurrido un tiempo muy grande, y la corriente se hace cero.

Para hallar la solución general de $Q(t)$, consideremos la función complementaria que es solución de la ecuación:

$$L\left(\frac{d^2Q}{dt^2}\right) + R\left(\frac{dQ}{dt}\right) + \frac{Q}{C} = 0$$

la cual sugiere una solución del tipo exponencial: $Q = Ae^{\lambda t}$. Sustituyéndola en la ecuación diferencial, hallamos:

$$(L\lambda^2 + R\lambda + \frac{1}{C})Q = 0$$

La cantidad entre paréntesis debe cumplir con la siguiente ecuación cuadrática:

$$L\lambda^2 + R\lambda + \frac{1}{C} = 0$$

la cual arroja dos valores para el parámetro λ :

$$\lambda = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

Por lo tanto, la solución dependiente del tiempo es del tipo:

$$Q(t) = Ae^{\lambda_1 t} + Be^{\lambda_2 t}$$

siendo A y B constantes que se determinan de las condiciones iniciales $I = 0$ y $Q=0$ cuando $t = 0$. Podemos escribir esta expresión en la forma:

$$Q(t) = e^{-\beta t} [Ae^{\gamma t} + Be^{-\gamma t}]$$

donde hemos sustituido: $\lambda = (-\beta \pm \gamma)$, siendo:

$$\beta = \frac{R}{2L}$$

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

Se observa que el comportamiento de la carga del condensador depende de los valores relativos de las constantes dentro de la raíz cuadrada y podemos distinguir tres casos:

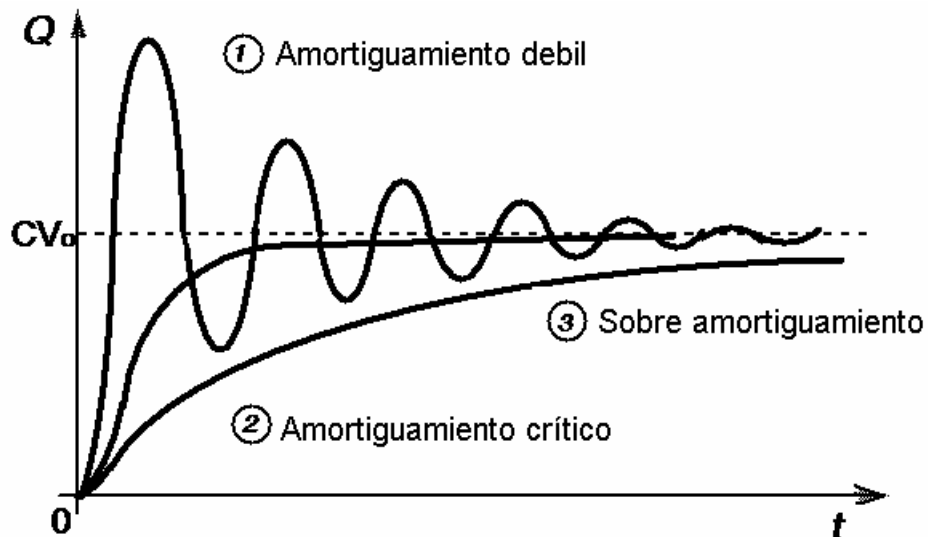


Fig. 2: Los tres casos de amortiguamiento

① **Amortiguamiento débil** ($R^2 < 4L/C$): En este caso γ es una cantidad imaginaria y se tiene:

$$Q(t) = e^{-\beta t} [Ae^{i\omega t} + Be^{-i\omega t}]$$

Por lo tanto, la expresión completa para la carga del condensador puede escribirse en la forma:

$$Q = CV_0 + CV_{\text{máx}} e^{-\beta t} \cos[\omega t + \delta]$$

donde la amplitud del voltaje del condensador, $V_{\text{máx}}$ y la fase δ son constantes. La carga del condensador oscila alrededor de su valor final $Q_0 = CV_0$, con una amplitud que decae en el tiempo. La frecuencia angular de oscilación ω es:

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

Se observa que esta frecuencia es inferior a la *frecuencia natural* de oscilación del circuito:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

La amplitud de las oscilaciones va disminuyendo en el tiempo con una constante de tiempo característica o *tiempo de relajación* τ :

$$\tau = \frac{1}{\beta} = \frac{2L}{R}$$

② **Amortiguamiento crítico** ($R^2 = 4L/C$): En este caso la constante γ es cero y la carga alcanza su valor final en el menor tiempo posible, pero sin llegar a oscilar. Este caso es de particular interés ya que, cuando un circuito o sistema mecánico es sacado de equilibrio por alguna perturbación y se desea que se recupere lo más pronto posible, sus parámetros deben ser ajustados para producir el amortiguamiento crítico.

③ **Sobre amortiguamiento** ($R^2 > 4L/C$): En este caso la constante γ es una cantidad real y la carga del condensador se acerca a su valor final de equilibrio en forma exponencial y de una manera mucho más lenta que en el caso del amortiguamiento crítico.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

Balance energético: Considerando de nuevo la ecuación diferencial para la carga del condensador en circuito *RLC*:

$$L \left(\frac{d^2Q}{dt^2} \right) + R \left(\frac{dQ}{dt} \right) + \frac{Q}{C} = V_0$$

Si multiplicamos ambos lados de la ecuación por la corriente, $I = dQ/dt$, ésta queda expresada de otra manera. Al hacer esto, describa cada término de manera que sea evidente que:

- 1) el primer término representa la variación temporal de energía en la bobina L
- 2) el segundo término es la potencia disipada por efecto Joule en la resistencia R
- 3) el tercero es la variación temporal de la energía en el condensador C

Con ello demuestre que la tasa a la cual la batería suministra energía ($V_0 I$) es igual a la tasa de disipación de energía en la resistencia más la suma de las tasas de almacenamiento de energía entre la bobina y el condensador.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

*En este experimento utilizaremos un generador de funciones de frecuencia variable con el cual se operará en el modo de onda cuadrada \square . De esta manera el generador funcionará como una batería en serie que impulsa periódicamente el oscilador *RLC*.*

Escoja el terminal de salida del generador que tiene una resistencia interna $R_i = 50 \Omega$.

Para medir los voltajes en el circuito se emplea un osciloscopio de dos canales y es importante asegurarse de conectar el terminal común de tierra del osciloscopio con el terminal de tierra del generador (símbolo \perp). De esta manera todos los voltajes que se midan con las puntas de prueba serán con respecto de este terminal común.

A. Oscilaciones amortiguadas débilmente

A1. Escoja uno de los condensadores y una de las bobinas a su disposición y conéctelos en serie con la caja de resistencias (inicialmente a un valor de resistencias bajo, ejemplo 200Ω). Conecte el circuito al generador de ondas de manera que un lado del condensador quede conectado al terminal común de tierra del generador, como indica el esquema experimental siguiente:

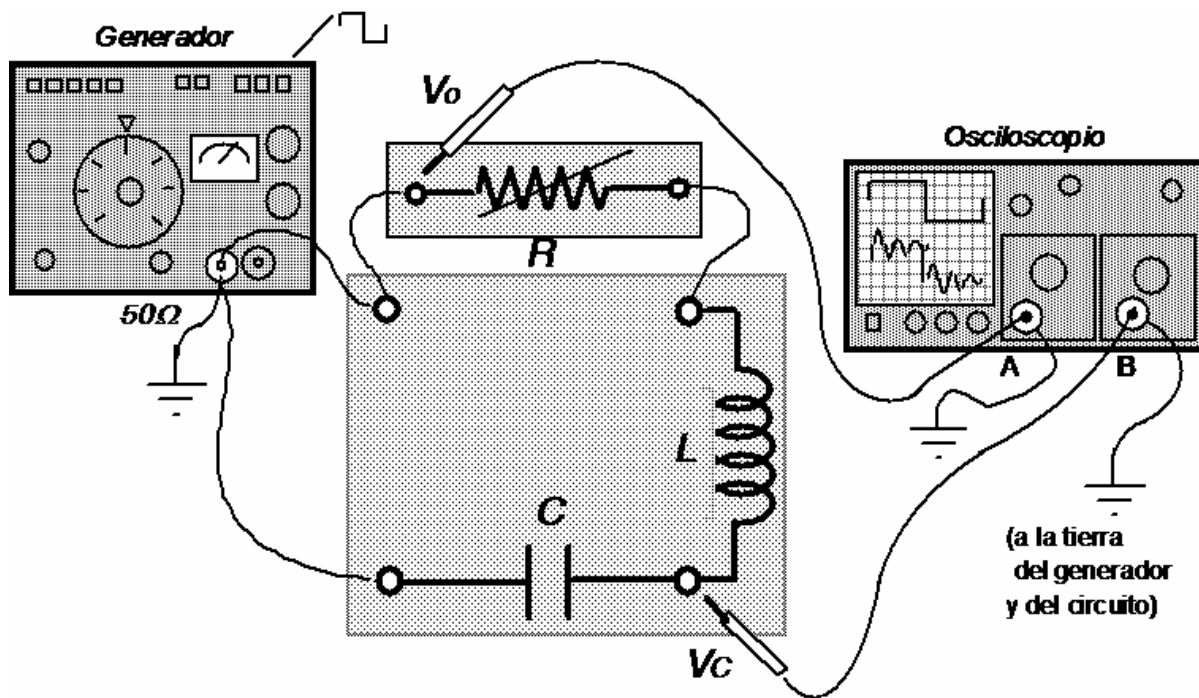


Fig. 3: Montaje experimental

- A2.** Conecte la punta de prueba de un canal del osciloscopio para medir el voltaje V_R del condensador V_C (que es proporcional a la carga) y la del otro canal para observar simultáneamente el voltaje V_0 de salida del generador. Ajuste la onda cuadrada del generador a una amplitud suficiente (ejemplo: 0,8 voltios p-p) y con una frecuencia conveniente (ejemplo: 200 Hz) para visualizar en forma completa las oscilaciones libres amortiguadas en el otro canal del osciloscopio.
- A3.** Utilizando la escala de tiempo del osciloscopio, mida el período T de las oscilaciones con la mayor precisión posible. Determine la frecuencia angular de la oscilación $\omega = 2\pi/T$.
- A4.** Para hallar el tiempo de relajación τ utilizaremos dos procedimientos diferentes. En el primer procedimiento, mida la amplitud de las crestas de las ondas sucesivas con la mayor precisión posible. Cada vez que sea necesario hacer un cambio de escala debe verificarse el cero de la traza del osciloscopio y la correspondencia de su lectura, antes y después del cambio. Tome un número no menor de 10 lecturas.
- A5.** Haga un gráfico de las amplitudes máximas de voltaje del condensador $V_{m\acute{a}x}$ en función del tiempo en cada oscilación. Note que los voltajes de la parte oscilatoria de V_C se miden respecto del nivel V_0 . Utilice una escala logarítmica ($\ln V_C$ vs t). De la pendiente del gráfico obtenga el valor de τ .

- A6.** Un procedimiento práctico que también se utiliza para obtener el tiempo característico τ , aunque es menos preciso que el anterior, consiste en utilizar solamente dos máximos sucesivos de oscilación (separados por un período: $T = 2\pi/\omega = t_2 - t_1$).

En efecto, para cada uno de estos máximos se cumple:

$$V(t_1) = V_{\text{máx}} e^{-t_1/\tau} \cos[\omega t_1 + \delta]$$

$$V(t_2) = V_{\text{máx}} e^{-t_2/\tau} \cos[\omega t_2 + \delta]$$

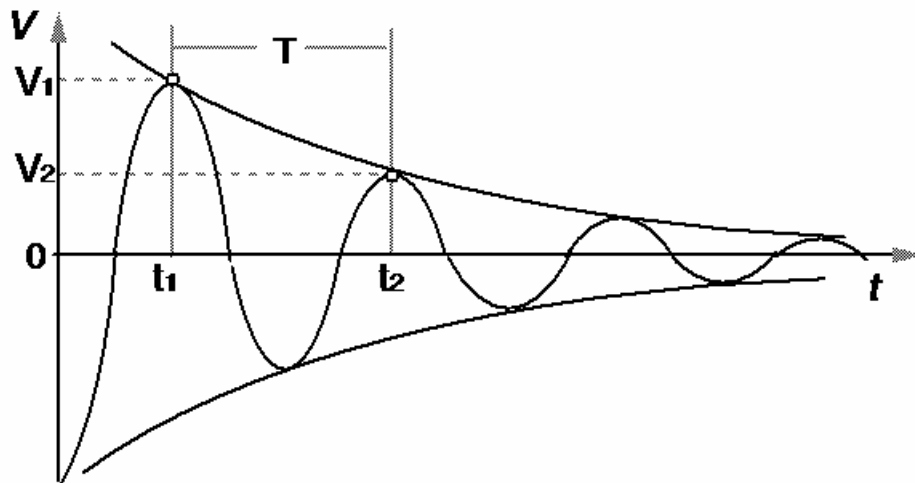


Fig. 4: Oscilaciones amortiguadas débilmente

Como los máximos son consecutivos: $\cos[\omega t_2 + \delta] = \cos[\omega t_1 + \delta]$, dividiendo una expresión por la otra y tomando logaritmos se tiene:

$$\tau = \frac{T}{\ln \left[\frac{V(t_1)}{V(t_2)} \right]}$$

Proceda a medir de nuevo el tiempo de relajación "aproximado" mediante este segundo procedimiento y compárelo con el valor obtenido de manera más precisa usando el primer método.

- A7.** Calcule los *valores teóricos* de ω y τ determinados por los elementos del circuito y compárelos con los valores obtenidos experimentalmente, tomando en cuenta los errores en sus determinaciones.

Recuerde que la resistencia R en las expresiones teóricas es la resistencia total serie, la cual incluye: la resistencia interna del generador, la resistencia de la

bobina y la de la caja de resistencias. Puede medirse directamente con el multímetro.

- A8.** Aumente la resistencia de la caja (a un valor que permita seguir observando las oscilaciones amortiguadas) y sin modificar los otros componentes del circuito, repita los pasos del **A3** al **A7**.

B. Amortiguamiento crítico y sobreamortiguamiento

- B1.** Aumente la resistencia de la caja hasta observar el amortiguamiento crítico. Trate de ajustar cuidadosamente la resistencia para determinar con la mayor precisión la situación crítica en que justamente desaparece la oscilación.

Determine la resistencia crítica del circuito, la cual incluye la resistencia interna del generador, la resistencia de la bobina y la de la caja de resistencias. Puede medirse directamente con el multímetro.

- B2.** Tomando en cuenta los errores en sus mediciones, compare el valor experimental de la resistencia crítica con el valor obtenido de la expresión teórica, conocidos los valores de L y C .

- B3.** Aumente la resistencia de la caja para obtener algún valor superior a la resistencia crítica. Dibuje la forma de la señal observada en el osciloscopio y explique sus observaciones.

PREGUNTAS

Analogías electromecánicas: El dibujo muestra un sistema mecánico que consiste en un pistón de masa M acoplado a un resorte de constante k , los cuales están dentro de un cilindro lleno de aceite. Cuando se aplica una fuerza impulsiva F se produce un movimiento rectilíneo del pistón. Suponga que el aceite ofrece una fuerza de fricción viscosa que es proporcional a la velocidad instantánea del pistón $F_{roce} = bv$.

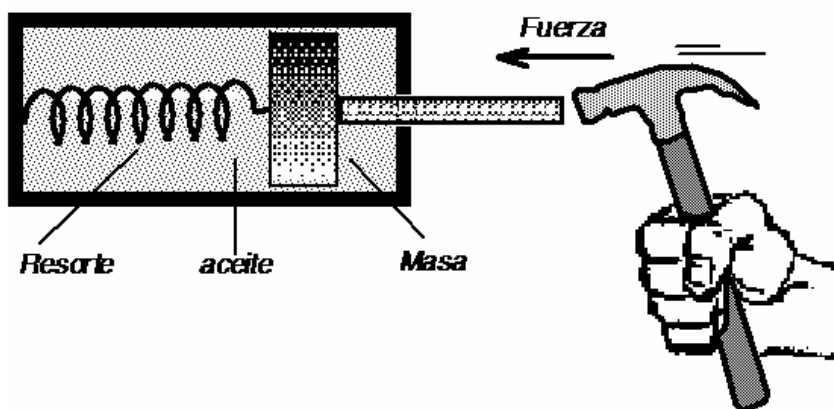


Fig. 5: Oscilaciones mecánicas amortiguadas

a) Establezca, en la siguiente tabla, las analogías de los elementos de este sistema mecánico con los elementos del circuito eléctrico serie LRC.

<i>Cantidad eléctrica</i>	<i>Unidades</i>	<i>Cantidad mecánica</i>	<i>Unidades</i>
Inductancia L	..		
Capacitancia C	..		
Resistencia R	..		
Voltaje V	Voltios		
Carga Q	..		
Corriente I	..		

b) Escriba la ecuación diferencial que describe el desplazamiento $X(t)$ del pistón desde su posición de equilibrio.

c) Escriba las condiciones para los tres tipos de amortiguamiento mecánico.

d) Diseñe un sistema mecánico que tenga las mismas características de frecuencia y amortiguamiento crítico del circuito eléctrico estudiado (escoja los valores de constante elástica k del resorte, masa M del pistón y constante b de fricción).

REFERENCIAS

1. Berkeley Physics Laboratory, *Part A - Laboratory Physics*, Mc Graw-Hill (1964).
2. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 2, Cap. 26, Mc Graw-Hill (1984).

EL POTENCIÓMETRO: APLICACIÓN A LA MEDIDA DE F.E.M.

OBJETIVOS

- Comprender el principio de operación de un potenciómetro.
- Aplicar el método del potenciómetro para la determinación de la fuerza electromotriz (f.e.m.) y la resistencia interna de una pila y una celda solar.

MATERIALES

- 1.Fuente de poder regulada de 5 V.
- 2.Galvanómetro.
- 3.Resistencias variables.
- 4.Potenciómetro de alambre.
- 5.Pila patrón.
- 6.Pila para calibrar y celda solar.
- 7.Década de resistencias.
- 8.Cables.

TEORÍA

Un potenciómetro es un componente de circuitos eléctricos que consiste en una resistencia, generalmente de alambre, con tres terminales. Dos de ellos están conectados a los extremos de la resistencia, y el tercero está conectado a algún punto intermedio de la resistencia el cual es ajustable manualmente (figura 1 a).

En ocasiones el potenciómetro se usa como una resistencia variable usando uno de los terminales extremos y el terminal intermedio, obteniéndose una resistencia que varía desde cero ohmio hasta su valor máximo (figura 1 b). Sin embargo, el uso más importante es como divisor de voltaje en un circuito (figura 1 c). En este caso se aplica un voltaje V_i entre los extremos de la resistencia y se obtiene un voltaje salida $V_o = X V_i$, donde x toma valores entre 0 y 1.

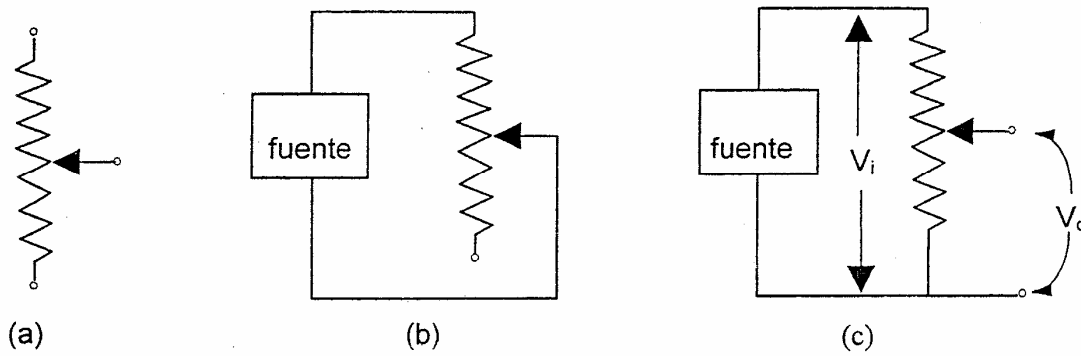


Figura 1 Montajes del potenciómetro

Antes de pasar a la discusión propiamente dicha del potenciómetro y sus aplicaciones, es conveniente analizar las características de una fuente de poder. En la práctica son más complicadas que un simple elemento que crea una diferencia de potencial o voltaje entre sus extremos. Si extraemos potencia de una fuente de poder, es decir, que aplicamos su diferencia de potencial a una resistencia para hacer circular cierta corriente, podemos observar que el voltaje de la fuente cae y que esta caída aumenta a medida que se hace mayor la corriente. Este "efecto de carga" se debe a que la fuente de poder tiene una resistencia interna conectada en serie con el elemento que genera la f.e.m. Por lo tanto, el esquema real de una fuente de poder debe ser como se indica a continuación:

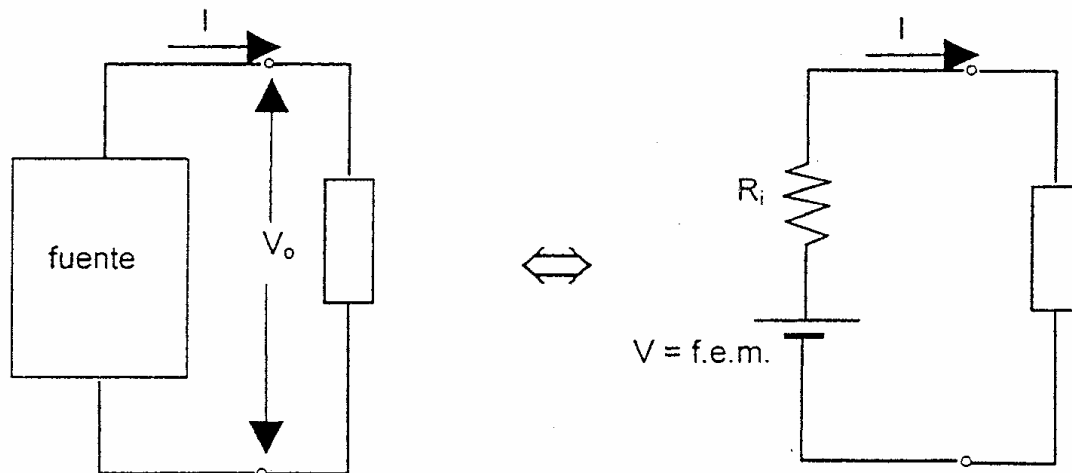
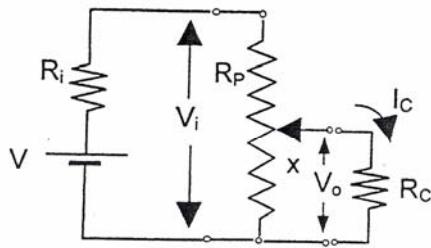


Figura 2 Resistencia interna y f. e. m. de una fuente.

Veamos ahora las características del potenciómetro como divisor de voltaje. Para esto consideremos el circuito de la derecha en la figura 1 pero, ahora, tomando en cuenta todos los elementos que intervienen. El circuito completo del potenciómetro es:



Si $R_c \gg R_p$

$$V_o \approx xV_i, \text{ donde } V_i = \frac{R_p V}{(R_p + R_i)}$$

o $V_o = \frac{xR_p V}{(R_p + R_i)}$

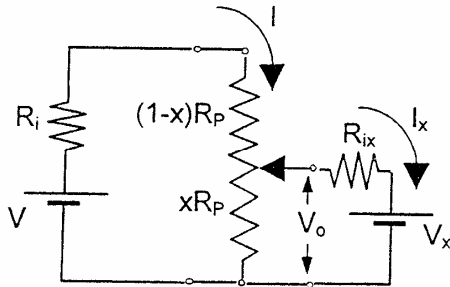
y, si $R_i \ll R_p$,

$$V_o \approx xV_i \approx xV$$

Figura. 3: Potenciómetro usado como divisor de voltaje.

Si la resistencia de carga R_c es comparable a la resistencia del potenciómetro, tanto V_o como V_i dependen del valor específico de ella, y el potenciómetro es un elemento pasivo más dentro del circuito. Ahora, si se cumple que $R_c \gg R_p$, entonces $V_o \sim xV_i$, y el potenciómetro se comporta efectivamente como un divisor del voltaje V_i , y si adicionalmente la fuente de poder es ideal ($R_i \ll R_p$), entonces $V_o \sim xV_i \sim xV$ y el potenciómetro se comporta como un divisor de los dos voltajes, V_i y V , que no depende de la resistencia de carga.

Otra aplicación importante del potenciómetro es la determinación de f.e.m. de fuentes de poder. Éste es el objetivo central de esta práctica. En este caso se reemplaza la resistencia de carga por la fuente de poder que se desea estudiar, como se indica en la figura 4. Para ver la fundamentación de esta aplicación consideremos las ecuaciones del circuito:



Las ecuaciones del circuito son:

$$V = I(R_i + R_p) + I_x(xR_p)$$

$$V_x = I_x R_{ix} + I_x xR_p + I_x R_p =$$

$$I(R_{ix} + xR_p) + I_x R_p$$

Fig. 4: Potenciómetro usado para determinar f.e.m.

Resolviendo el sistema de ecuaciones para la corriente I_x se obtiene:

$$I_x = \left[xR_p V - (R_i + R_p) V_x \right] \left[(xR_p)^2 - (R_i + R_p)(R_{ix} + xR_p) \right]^{-1}$$

En la expresión se observa que la magnitud y dirección de la corriente depende del valor de x . Por lo tanto, en la práctica debe ser posible variar x para que I_x se haga cero. Esta condición es óptima desde el punto de vista experimental por que las mediciones en las cuales la magnitud medida se hace cero permiten una alta precisión. Reemplazando R por su valor tenemos que, cuando existe la condición de cero corriente, se cumple la siguiente relación:

$$(R_i + R_p) V_x = x R_p V$$

Usando esta relación es posible determinar V_x en términos de los parámetros de la fuente de poder que alimenta el potenciómetro y de la resistencia total de éste, es decir, de V , R_i y R_p .

Esta misma relación se hubiese podido derivar observando que, si $V_o = V_x$, entonces I_x es cero, y la magnitud de V_o , y por lo tanto de V_x , es la misma que tiene un potenciómetro cuando no tiene carga ($R_c \rightarrow \infty$), la cual está calculada en la parte superior del recuadro de la figura 3.

Esta relación es muy importante ya que nos permite determinar la f.e.m. de una fuente de poder bajo la condición de no estar consumiendo corriente de ella, y sin necesidad de tener que conocer cuál es su resistencia interna.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

- Derive la relación para V_{EF} que aparece en el recuadro de la sección C del procedimiento experimental.
- A partir de la relación previa, derive la relación funcional que tendrá en el gráfico de V_{EF} vs I_{RC} . Calcule R_{IP} y V a partir de esa relación funcional.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este experimento usaremos un potenciómetro de alambre como se indica en el esquema de la figura 5. Consiste en un alambre continuo dividido en once secciones por terminales tipo banana en los extremos. Una de ellas (la primera) tiene una regla para determinar longitudes sobre esa sección del alambre. Dependiendo de la aplicación con que se trabaja, diferentes esquemas de conexión son posibles con el mismo equipo.

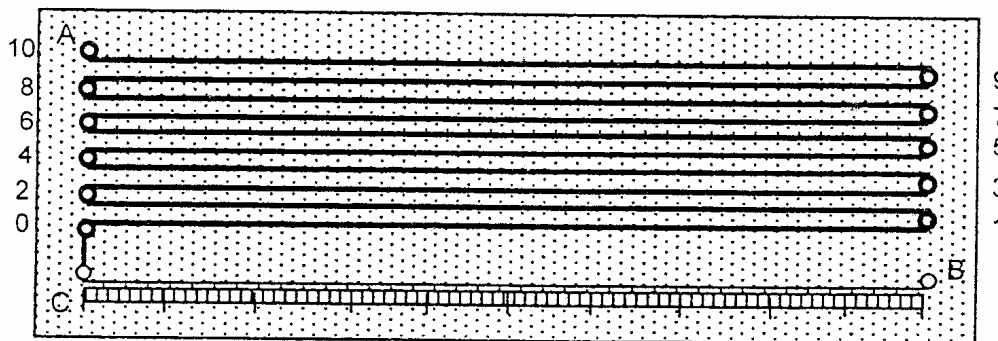


Fig. 5: Diagrama del potenciómetro del laboratorio

Adicionalmente cuenta con un tablero, el cual está esquematizado en la figura 6, donde están conectados de antemano algunos componentes para facilitar la realización de la práctica. En el tablero se encuentra un switch SA que en su posición superior conecta una fuente patrón a los terminales O y al switch Ss, Y en su posición inferior le permite conectar a los mismos puntos cualquier fuente que se conecte en los terminales E y F; el switch Ss que es un interruptor pulsado que cierra la conexión mientras lo tenga presionado y el conector Sc que le permite cerrar, en forma manual, la conexión entre, el switch Ss Y la banana G, bien pasando por la resistencia H o bien directamente.

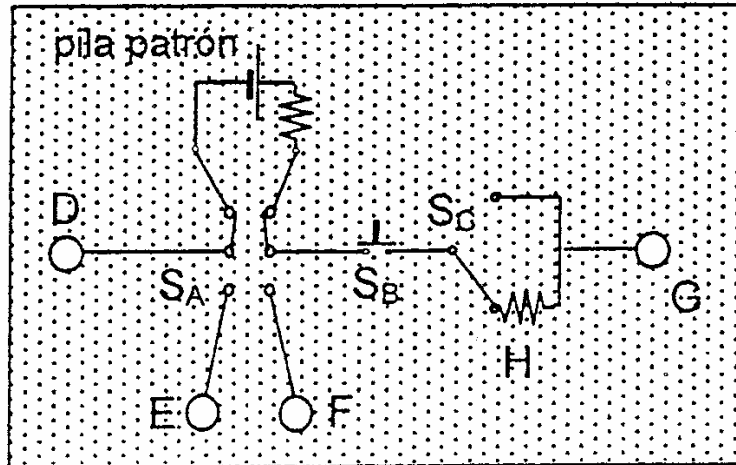


Fig. 6: Diagrama del tablero de conexiones

También tiene en el mesón un galvanómetro de aguja. Éste es un instrumento para medir corrientes. Es extremadamente *delicado* y debe usarse con cuidado, siguiendo las instrucciones de la guía para no dañarlo.

A. Calibración del potenciómetro

En este ensayo usaremos un circuito equivalente al de la figura 4 para la determinación de la f.e.m. de una pila comercial. Sin embargo, con anterioridad debemos calibrar el potenciómetro para determinar la constante de proporcionalidad, K, entre la relación x de la longitud de alambre que produce la corriente cero, L_x, a la longitud total de alambre, L_T. Esto es,

$$V_x = \left[\frac{R_p V}{(R_i + R_g + R_p)} \right] = \left(\frac{L_x}{L_T} \right) K$$

Usaremos el circuito que se da a continuación en la figura 7:

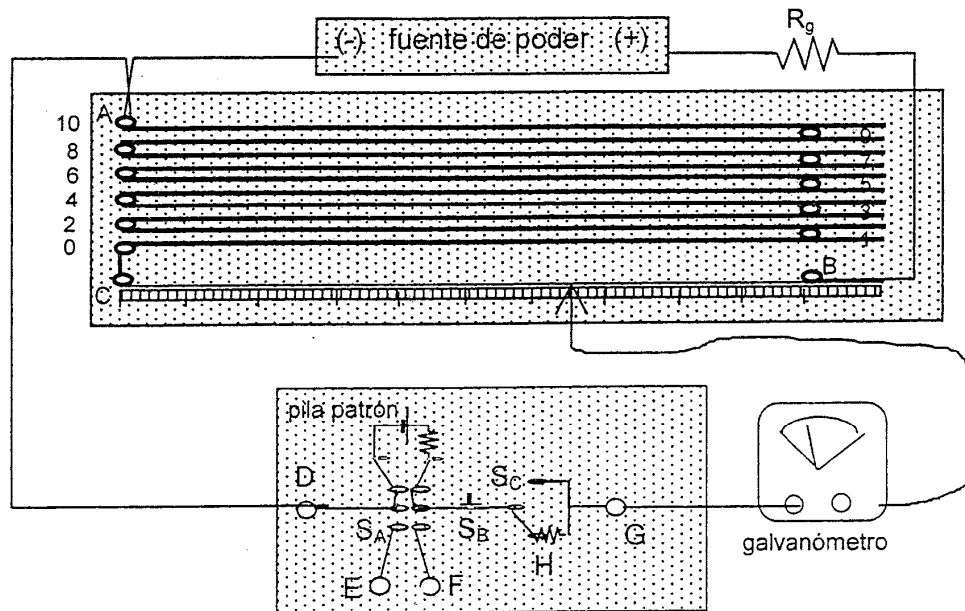


Fig. 7: Circuito de calibración del potenciómetro

A 1.- Monte la parte circuito que incluye el potenciómetro. Antes de continuar debe ajustar la resistencia variable R_g (0 a 50 Ω) que ha sido insertada para variar la diferencia de potencial aplicada entre los puntos A y B. Para esto el mejor criterio es conseguir que el mayor voltaje que se desea medir con el potenciómetro quede en algún punto del primer segmento (el que tiene la regla). Con esta consideración en mente proceda a ajustar la resistencia R_g , usando los once segmentos del potenciómetro para que el voltaje VAS sea ligeramente mayor que el mayor de los voltajes que se van a medir. En caso de que requiera un ajuste más fino, podrá utilizar una resistencia variable R_s (0 a 5 Ω) conectada en serie con R_g .

A 1.- Monte la parte circuito que incluye el potenciómetro. Antes de continuar debe ajustar la resistencia variable R_g (0 a 50 Ω) que ha sido insertada para variar la diferencia de potencial aplicada entre los puntos A y B. Para esto el mejor criterio es conseguir que el mayor voltaje que se desea medir con el potenciómetro quede en algún punto del primer segmento (el que tiene la regla). Con esta consideración en mente proceda a ajustar la resistencia R_g , usando los once segmentos del potenciómetro para que el voltaje VAS sea ligeramente mayor que el mayor de los voltajes que se van a medir. En caso de que requiera un ajuste más fino, podrá utilizar una resistencia variable R_s (0 a 5 Ω) conectada en serie con R_g .

A2.- De ahora en adelante no cambie los parámetros del circuito. Una vez que haya completado el ajuste proceda a conectar el tablero de conexiones. Mida primero la fuente patrón, de voltaje conocido. Para hacerlo, proceda siguiendo estas recomendaciones porque de lo contrario puede dañar el galvanómetro al hacersele pasar una corriente excesiva. Coloque el switch SA en la posición superior. Haga la conexión manual del switch Se de forma tal que la corriente pase por la resistencia H.

Manteniendo presionado el switch S_s , al tocar con la clavija el segmento con regla del potenciómetro, debe tener indicación de una corriente en el galvanómetro. Desplazando la clavija a lo largo del segmento esta corriente debe hacerse cero y cambiar de polaridad.

NOTA 1: Si el voltaje de la fuente patrón es menor que el de la fuente que se quiere medir, puede ocurrir que el menor voltaje que tenga en el segmento con regla se todavía demasiado grande para producir la corriente cero en el galvanómetro. En este caso puede cambiar la conexión entre D y 8 para que se use una longitud menor del potenciómetro, por ejemplo, cambiándola para que sea entre D y 8, o si se quiere aún menor el voltaje, digamos, entre D y 5.

NOTA 2: Las longitudes L corresponden a la suma de las longitudes de todos los segmentos utilizados para producir los voltajes en el potenciómetro. Recuerde que los segmentos sin regla tienen 99 cm cada uno y el segmento con regla tiene un total de 100 cm si se usa completo, o la fracción que indica la regla, si se está usando parcialmente.

A3.- Cuidadosamente encuentre la posición sobre el segmento con regla del potenciómetro en la cual se tiene cero corriente. Mida cinco veces la longitud L_x para la cual se tiene la condición de cero corriente. Elabore una tabla como la siguiente:

L_{xp}	L_{XT}	V_{xp}
.....

A4.- Con los valores de L_{TP} , L_{xp} y V_{xp} para la fuente patrón, proceda a calcular el valor de la constante K . Expresar su resultado con su respectivo error.

B. Determinación de la f.e.m. de una pila.

Usaremos el mismo montaje de la figura 7, sin cambiar ninguno de los parámetros del circuito.

B1.- Conecte ahora la fuente de poder desconocida a los terminales E y F, Y cambie el switch SA. Repita el procedimiento indicado en los pasos A2 y A3. Recuerde no cambiar ningún parámetro del circuito excepto el terminal con la clavija para encontrar la posición que produce la condición de cero corriente.

B2.- Mida cinco veces la longitud L_{XD} , y L_{TD} para la fuente desconocida, y calcule la f.e.m. de la fuente con su respectivo error.

C. Resistencia interna de una pila.

A continuación verificaremos que la diferencia de potencial medida entre los terminales de la pila de la sección B ésta variará al suministrar corriente a un circuito, esto es, la diferencia de potencial varía cuando la pila *trabaja* (haciendo circular corriente). Estudiaremos la variación de la diferencia de potencial con la corriente valiéndonos del potenciómetro que hemos calibrado, el cual es un aparato que puede medir *diferencias* de potencial sin drenar corriente del circuito o dispositivo al que se conecta.

Usando nuevamente el mismo montaje de la parte A, sin cambiar ninguno de los parámetros del circuito, y basándonos en el hecho de que la medición del voltaje se hace consumiendo cero corriente, mediremos el voltaje de la pila comercial con una resistencia en paralelo, tal como se indica en la Figura 8.

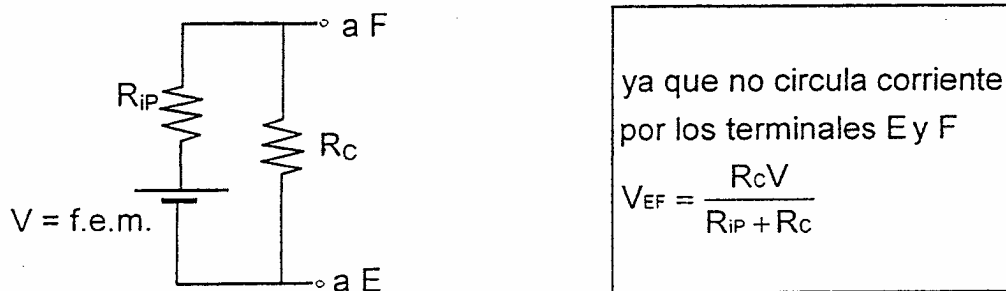


Fig. 8: Circuito equivalente pila-resistencia en paralelo

C1.- Para cinco valores de $R_e > 200 \Omega$, determine usando el potenciómetro el potencial entre los terminales F y E. Para ello determine la longitud L_x que produce la corriente cero en el galvanómetro.

C2.- Construya una tabla como sigue:

Rc	L _x	L _T	V _{EF}	I _{Re} = V _{EF} / R _e
.....			

C3.- Haga un gráfico de V_{EF} vs I_{Re} y del mismo obtenga el valor de R_{iP} y V determinando los parámetros de la relación funcional entre las variables por el ajuste que corresponda. ¿Cómo se compara el valor de V con el medido en la parte anterior?

C4.- Relaciones los resultados de las secciones B y C.

D. Medición de la f.e.m. generada por un transductor.

En esta última parte de la práctica aplicaremos el circuito de medida de potenciales en el potenciómetro a la determinación de voltajes, generados por fenómenos físicos, cuya magnitud sea función de algún parámetro físico, de naturaleza diferente a la eléctrica,

como son los casos de presión, temperatura, intensidad luminosa, entre otros. A los dispositivos que exhiben este comportamiento se les llama transductores. Generalmente esas diferencias de potenciales son muy pequeñas, o son generadas con resistencias internas muy grandes, por lo que resulta difícil hacer su medición. El método usando el potenciómetro es ideal porque, como ya vimos, no consume potencia de la fuente.

- D1.-** Monte en los terminales E y F el transductor, que en este caso es una celda solar, similar a la que se utiliza para alimentar las calculadoras que no usan pilas.
- D2.-** Teniendo cuidado de no hacer sombra sobre la celda solar, determine la f.e.m. del dispositivo, con su correspondiente error.
- D3.-** Conecte una resistencia de $1\text{ K}\Omega$ en paralelo con la celda solar, es decir entre los terminales E y F. Mida el voltaje que produce la condición de cero corriente en el galvanómetro.
- D4.-** Usando el valor de la f.e.m. de la celda y el voltaje que midió en la parte C3, determine la resistencia interna de la celda solar.
- D5.-** Varíe el nivel de iluminación sobre la celda y observe qué ocurre con la f.e.m. de ella.

PREGUNTAS

1. Derive las relaciones para V_a en el recuadro de la figura 3.
2. Derive el sistema de ecuaciones en el recuadro de la figura 4, y resuélvalo para I_x .
3. En qué se diferencia la medida de un voltaje de una fuente usando un potenciómetro de la hecha con un voltímetro común.

REFERENCIA

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, Física, Vol. 2, Cap. 33, Ed. Continental (1995).

INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

OBJETIVOS

- Estudiar el fenómeno de inducción electromagnética.
- Medir campos magnéticos mediante una bobina de exploración.
- Estudiar la variación del campo magnético en el eje de un solenoide.
- Determinar las características desconocidas de una bobina.

MATERIALES

1. Solenoide de calibración.
2. Solenoide de características desconocidas.
3. Bobina exploradora.
4. Soporte para posicionar la bobina exploradora.
5. Galvanómetro (escala min -25 y max +25)
6. Multímetro Digital y Multímetro Analógico.
7. Fuente de poder DC - AC
8. Reóstato.
9. Conmutadores.
10. Cables de conexión.

TEORÍA

El campo magnético que produce un alambre conductor depende de la geometría del alambre, de la corriente que circule por él y de la ubicación del punto donde se desee determinar el campo. Para geometrías sencillas podemos hallar expresiones teóricas para el campo magnético, aplicando la ley de Ampère o la ley de Biot -Savart.

A) Campo magnético de un solenoide

El solenoide es un tipo de configuración que tiene muchas aplicaciones prácticas y consiste en un alambre largo devanado en forma de hélice con espiras estrechamente espaciadas, como muestra la figura 1:

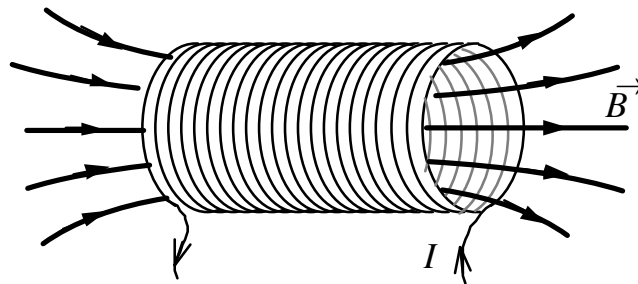


Fig. 1: Campo magnético de un solenoide

Para calcular el campo magnético producido en el eje de un solenoide, usamos la ley de Biot-Savart. Si la corriente que circula es i (*amperes*), el radio del solenoide es R (*metros*), su longitud es L (*metros*) y el número de vueltas es N , el campo magnético en *un punto del eje* está en la dirección de dicho eje y su magnitud está dada por la expresión:

$$B = \frac{\mu_0 Ni}{2L} [\cos\phi_1 + \cos\phi_2] \quad (\text{Tesla}) \quad (1)$$

donde los ángulos ϕ_1 y ϕ_2 son los que forman las líneas desde el punto en el eje a los extremos con el eje del solenoide, como indica la figura 2.

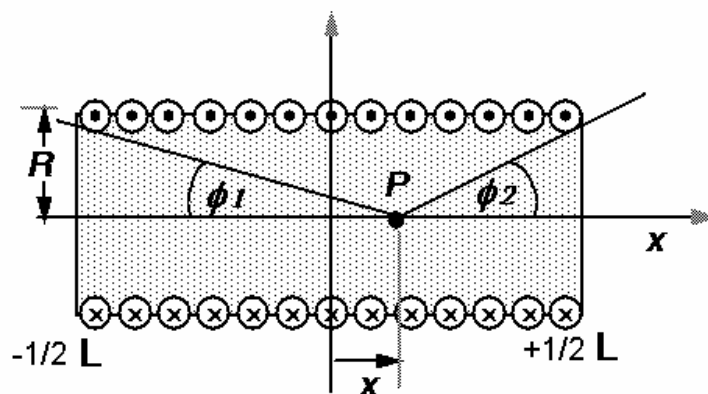


Fig. 2: Solenoide finito

La constante μ_0 tiene un valor de $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A y se denomina constante de permeabilidad magnética.

Si el *solenoides* es muy largo ($L \gg R$), podemos usar la aproximación $\phi_1 \approx \phi_2 \approx 0$, y el campo magnético es:

$$B \approx \frac{\mu_0 NI}{L} \quad \text{solenoides largo} \quad (2)$$

Esta expresión también podría haberse obtenido directamente usando la ley de Ampère, en vista de la uniformidad de B y de la simetría que presenta.

En este experimento usaremos solenoides que no son suficientemente largos como para considerar que la anterior expresión sea una buena aproximación. Por lo tanto usaremos la expresión (1) la cual es exacta y se cumple para *cualquier punto ubicado en el eje del solenoide*. De acuerdo a esta expresión, B tiene un máximo en el centro del solenoide y decrece monotónicamente con la distancia.

B) Inducción electromagnética

Para determinar el campo magnético experimentalmente haremos uso de una bobina exploradora, la cual es una bobina pequeña que puede ser colocada en diferentes posiciones en el campo magnético establecido.

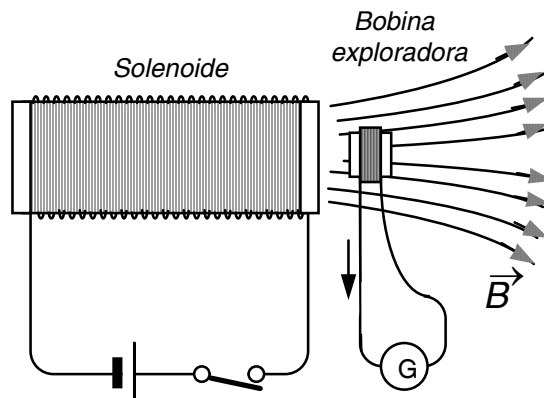


Fig. 3: Inducción de fem en una bobina exploradora

Si A_2 es el área de la bobina exploradora, el flujo que la atraviesa es $\Phi = BA_2 \cos \theta$, donde θ es el ángulo que forma su eje con la dirección del campo magnético. Cuando se produce una variación del campo magnético se induce una fem en la bobina, la cual, de acuerdo a la ley de Faraday, es igual a tasa de variación temporal del flujo magnético:

$$\text{fem} = -N_2 \left(\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right) = -N_2 A_2 \cos \theta \left(\frac{\Delta B}{\Delta t} \right) \quad (3)$$

donde N_2 es el número de vueltas de la bobina exploradora. Por lo tanto, la fem dependerá tanto de la variación temporal de B como también de las características

propias de la bobina (área, número de vueltas) y de su orientación relativa al campo magnético.

Si se cierra el circuito de la bobina exploradora mediante un galvanómetro, circulará una corriente que es proporcional a esta fem. En este experimento mediremos campos magnéticos indirectamente por la corriente que induce en la bobina exploradora, una variación del flujo magnético. Esta corriente es detectada por un galvanómetro a través de la deflexión δ de la escala del galvanómetro (*mm ó divisiones*).

Para que la desviación de la escala del galvanómetro nos proporcione una medida del cambio magnético, ésta debe ser calibrada previamente usando un solenoide de características conocidas.

Supongamos que se coloca la bobina exploradora en el *centro del solenoide de calibración*. De acuerdo a la expresión (1), para ese punto central ($\phi_1 = \phi_2$) y el campo magnético viene dado por:

$$B_{\text{centro}} = \frac{\mu_0 N I}{2\sqrt{R^2 + (L/2)^2}} \quad (4)$$

donde N es el número total de vueltas, L (metros) la longitud y R (metros) el radio del solenoide, respectivamente. Éstos son parámetros conocidos de la bobina de calibración. Si hacemos circular una corriente I (amperes) podemos calcular el campo magnético B (Tesla) mediante esta expresión.

Si se invierte rápidamente el sentido de la corriente, también se invierte el sentido del campo \vec{B} , produciéndose así una variación en el campo magnético a través de la bobina exploradora :

$$\Delta B = B - (-B) = 2B \quad (5)$$

Este cambio de flujo magnético induce una corriente en la bobina exploradora, y la deflexión δ del galvanómetro será proporcional a ΔB y de acuerdo a (5) también a B

$$B = C\delta \quad (6)$$

Midiendo δ (*mm*) para cada corriente I (amperes) que circula en la bobina primaria y calculando el campo B (en Tesla) en el centro de la bobina por medio de la Ec. (4), podemos usando la Ec. (6) podemos determinar C (*Tesla/mm*), la cual es la constante de calibración de nuestro sistema de medición.

ACTIVIDADES PRELIMINARES

1) Demuestre la expresión para el campo magnético en el eje de un solenoide

Sea un solenoide de radio R, longitud total L y número de vueltas N. Su eje coincide con el eje x, y uno de sus extremos se encuentra en $x = -OL$ y el otro en $x = +OL$. Si por el solenoide circula una corriente I, demuestre que el campo magnético B en cualquier punto del eje x viene dado por:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2L} [\cos\phi_1 + \cos\phi_2] \quad (7)$$

en donde los ángulos están especificados en la figura 2:

$$\cos\phi_1 = \frac{\left(\frac{L}{2} + x\right)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} + x\right)^2}}; \quad \cos\phi_2 = \frac{\left(\frac{L}{2} - x\right)}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2} - x\right)^2}}$$

Observe que para los puntos en el exterior del solenoide, $\cos\phi_2$ es negativo (para x positivo).

SUGERENCIA: Determine primero el campo magnético en el eje de una espira circular y luego sume (integre) los campos de todas las espiras.

2) Use las fórmulas anteriores para construir una tabla del campo magnético B en función de la posición x en el eje del solenoide. Use los siguientes valores $I=1A$, $N=540$, $L=0,145m$ y $R=0,025m$. Varíe x desde 0 cm hasta 10 cm en intervalos de 2 cm. Incluya también el punto en el borde del solenoide $x=7,25cm$. Haga el gráfico de B como función de x.

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

A. Determinación de la constante de Calibración (corriente DC)

- A1.** Introduzca la bobina exploradora en la barra en el eje del solenoide de calibración, de modo que quede *en el centro* del solenoide y con su cara perpendicular al flujo.
- A2.** Conecte el solenoide en serie con la fuente de DC y el amperímetro de DC a través del conmutador de inversión de polaridad, S_2 , como indica la figura 4. Observe

cómo se conecta este conmutador, el cual tiene dos posiciones y permite invertir alternadamente el sentido de la corriente que circula por el solenoide.

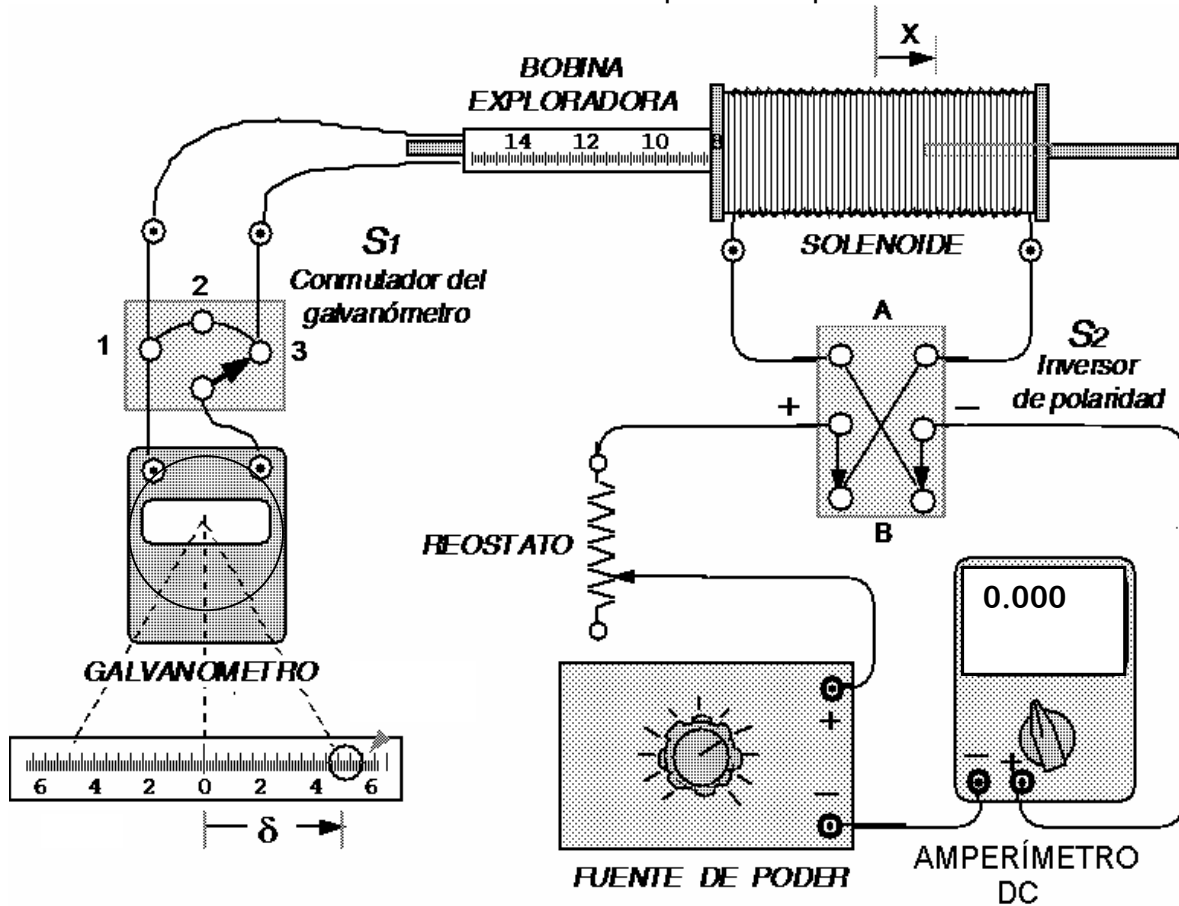


Fig. 4: Montaje experimental

A3. Conecte la bobina exploradora a los terminales del galvanómetro a través del conmutador de tres posiciones, S₁.



**EL GALVANÓMETRO ES UN INSTRUMENTO DELICADO.
EVITE DAÑARLO**

**ANTES DE ACTIVAR LA FUENTE SU CIRCUITO
DEBE SER REVISADO POR EL PROFESOR**

A4. Coloque S₁ en la posición 1 de cortocircuito del galvanómetro y verifique que la aguja esté en el centro.

- A5.** Antes de activar la fuente de DC, coloque el cursor del reóstato en la posición central. Prenda la fuente y suba la perilla hasta que la lectura del amperímetro sea de 0,2A.
- A6.** Pase el conmutador S_1 a la posición 3 que conecta la bobina exploradora al galvanómetro. Con el conmutador S_2 , invierta bruscamente el sentido de la corriente en el solenoide. Este cambio en el flujo magnético induce una corriente en la bobina exploradora. Observe y tome nota de la lectura máxima (en mm ó divisiones) del galvanómetro.
- A7.** Pase el conmutador S_1 a la posición 2, y luego páselo a la posición 1 de cortocircuito.
- A8.** Mantenga la misma corriente en el solenoide (0,2A). Prepare el galvanómetro para una nueva medición pasando S_1 a la posición 3, e invierta (con S_2) el sentido de la corriente del solenoide. Observe y tome nota de la nueva desviación máxima del galvanómetro. Esta lectura debe ser de magnitud muy cercana a la anterior pero en dirección opuesta. Tome *el promedio* de las dos lecturas.
- A9.** Repita los pasos desde **A6** hasta **A8** para valores de la corriente del solenoide desde 0,2A hasta 1,8A en pasos de 0,2A. Anote en una tabla la deflexión promedio (en mm ó divisiones) que corresponda a cada corriente:

I (A)	δ (mm) derecha	δ (mm) izquierda	δ (mm) promedio	B_{calc} (Tesla)
0,2				
0,4				
0,6				
....				
1,8				

- A10.** En esa misma tabla, incluya para cada corriente *el campo magnético en el centro* del solenoide de calibración, calculado a partir de la expresión teórica (Ec. 4).
- A11.** Grafique B (Tesla) como función de δ (mm), y de la pendiente de la recta determine la constante de calibración C (Tesla/mm), con su respectivo error.

B. Determinación del número de vueltas de un solenoide

- B1.** Desconecte el solenoide de calibración y sustitúyalo por el solenoide de características desconocidas.

- B2.** Instale la regla que sirve de soporte e introduzca la bobina exploradora en el eje del solenoide desconocido, de modo que pueda ser desplazada a lo largo de dicho eje.
- B3.** La posición de la bobina exploradora en el eje del solenoide se determina con ayuda de la escala milimetrada que tiene incorporada. Puede tomarse como marca de referencia uno de los bordes del solenoide. Ubique la bobina exploradora en el centro del solenoide ($x = 0$).
- B4.** Ajuste la corriente en el solenoide a un valor fijo (Se sugiere $I = 1\text{A}$) y prepare el galvanómetro para medir, pasando S_1 a la posición 3. Cambie S_2 y observe la deflexión del galvanómetro. Una vez que el aguja regrese al cero, cambie S_2 para invertir la polaridad. Anote la nueva deflexión δ (mm) del galvanómetro y saque el promedio de las dos lecturas.
- B5.** Usando el valor de δ (mm) y el de la constante de calibración C (Tesla/mm) obtenida en la sección anterior, determine el valor del campo magnético en el centro del solenoide. Usando este valor de B (Tesla) y conociendo la longitud L (m) y el radio R (m) del solenoide, utilice la expresión (4) para calcular su *número de vueltas*.

C. Determinación de la constante de Calibración (corriente AC)

Si la fuente de suministro es una fuente de corriente alterna, la intensidad I en la relación (4) será de la siguiente forma:

$$I = I_0 \text{ Sen } (\omega t + \delta)$$

Donde I_0 es la amplitud de la corriente o corriente máxima, ω es la frecuencia angular, t el tiempo y δ un ángulo de fase. En este caso el campo magnético B en el interior del solenoide será una función sinusoidal del tiempo con la misma frecuencia angular y la misma fase, $B(t) = B_0 \text{ Sen } (\omega t + \delta)$. Con B_0 el valor máximo del campo magnético. En este caso la expresión (4) toma la forma siguiente:

$$B(t) = B_0 \text{ Sen } (\omega t + \delta) = \frac{\mu_0 N I_0 \text{ Sen } (\omega t + \delta)}{2\sqrt{R^2 + (L/2)^2}} \quad (5')$$

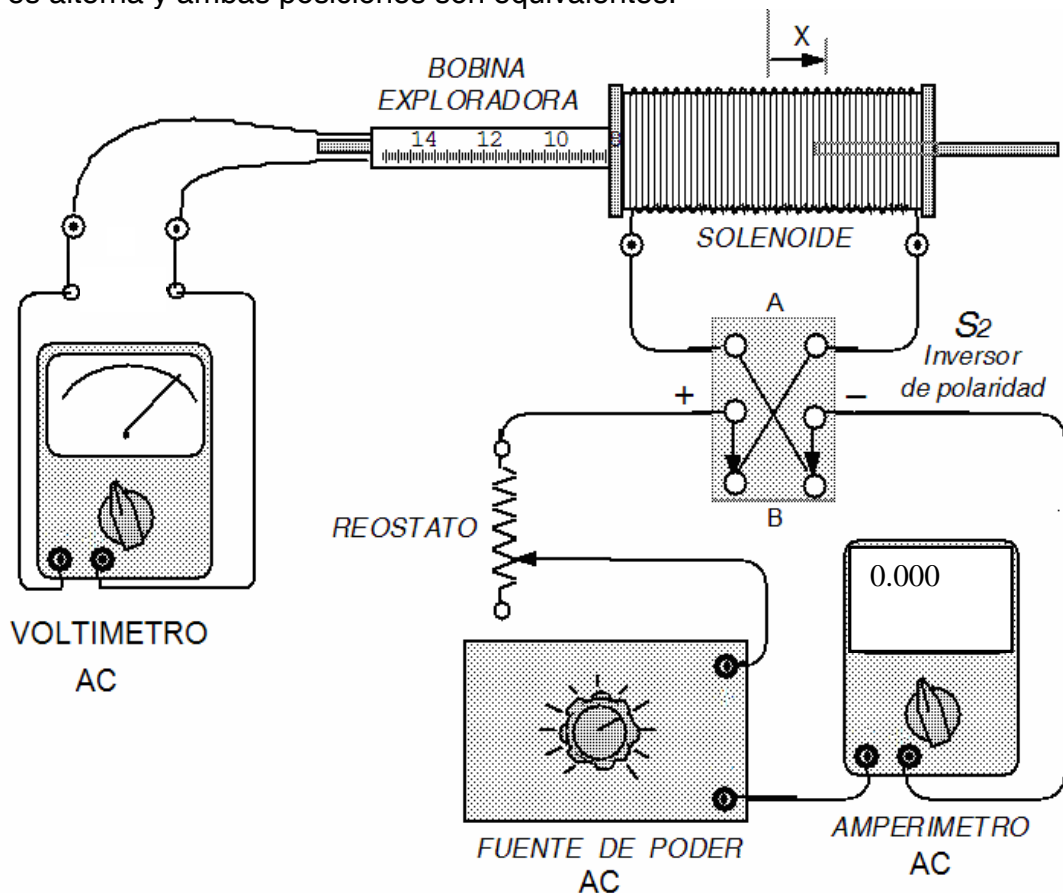
El campo magnético variable $B(t)$ induce en la bobina exploradora una corriente variable y esta produce, en una resistencia conectada a sus extremos, un potencial variable $V(t)$. Conectando a la resistencia un voltímetro AC este registrará un valor de voltaje que es el valor promedio V_{RMS} (Voltaje Root Mean Square ó voltaje medio cuadrático).

Una relación empírica entre la indicación del voltímetro V_{rms} y el campo magnético en el centro del solenoide es la siguiente:

$$B = K V_{\text{RMS}} \quad (6')$$

Donde K es una constante de calibración del sistema. (Las unidades de K son Tesla / Volts) Esta constante relaciona el campo magnético del solenoide con el valor de voltaje medido en la bobina exploradora. Una vez determinando el valor de esta constante K de calibración, podemos utilizar la bobina exploradora para determinar el valor del campo magnético a lo largo del eje del Solenoide.

- C1.** Introduzca la bobina exploradora en el eje del solenoide de calibración (cuyos valores característicos son conocidos), de modo que quede en el centro del solenoide y con su cara perpendicular al flujo.
- C2.** Conecte el solenoide en serie con la fuente de AC y el amperímetro digital en AC a través del conmutador de inversión de polaridad, S_2 , como indica la figura 4'. No cambie la posición del conmutador ya que la corriente que circula por el solenoide es alterna y ambas posiciones son equivalentes.



- C3.** Conecte la bobina exploradora a los terminales del VOLTIMETRO a través del conmutador de tres posiciones, S_1 . Colóquelo en la posición 3.

C4. Antes de activar la **fente de AC**, coloque el cursor del reóstato en la posición central. Prenda la fuente y suba la perilla hasta que la lectura del amperímetro sea de 0,2A. Anote el valor del voltaje inducido en la bobina captadora.

C5. Varíe la corriente moviendo el cursor del reóstato para valores de la corriente del solenoide desde 0,2A hasta 1,8A en pasos de 0,2A. Anote en una tabla el voltaje que corresponda a cada corriente y también el campo magnético calculado a partir de la fórmula teórica:

I (Ampere)	V (Voltios)	B_{calc} (Tesla)
0,2		
0,4		
0,6		
...		
1,8		

C6. Grafique B (Tesla) como función de V (voltios), y de la pendiente de la recta determine la nueva constante de calibración K (Tesla/ V), con su respectivo error.

D. Variación del campo magnético en el eje de un solenoide.

D1. Manteniendo constante la corriente en el solenoide de características conocidas ($I = 1A$), repita las medidas sucesivamente para *diferentes posiciones de la bobina exploradora*, a intervalos de 2 cm y a un lado del centro del solenoide hasta explorar todo el eje, incluyendo puntos afuera de los bordes. Varie x desde 0 cm hasta 10 cm en intervalos de 2 cm. Incluya también el punto en el borde del solenoide $x = 7,25$ cm.

$x(cm)$	V (Volts)	B (Tesla)
0,0		
2,0		
...		
10,0		

- C2.** Para cada posición x (cm), anote en una tabla los valores obtenidos y los correspondientes campos magnéticos B (Tesla), usando el valor de la constante K de calibración (Tesla/V) obtenida anteriormente.
- C3.** Haga una gráfica sus resultados experimentales de B en función de x , a lo largo del eje del solenoide.
- C4.** Usando los valores de L (m), R (m) y N del solenoide y el valor utilizado de i , grafique B en función de x , a lo largo del eje del solenoide, calculado mediante la expresión teórica. Compare la dependencia $B(x)$ vs x experimental con la predicción teórica, superponiendo ambas curvas en un mismo gráfico.

PREGUNTAS

1. Una bobina está enrollada alrededor de un solenoide como indica la figura 6. El solenoide está alimentado de una batería a través de un conmutador inversor de polaridad, y la bobina está conectada a un galvanómetro.

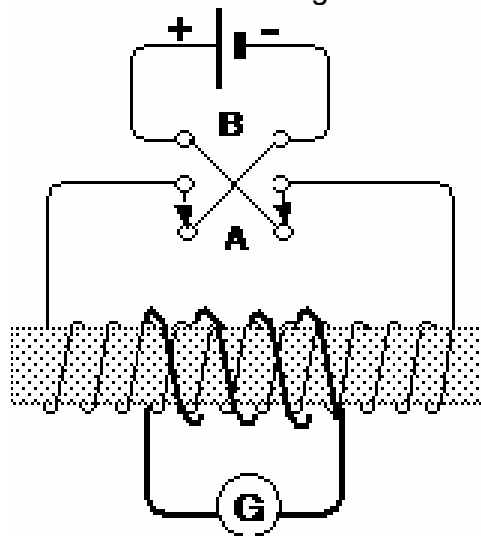


Fig. 6: Inducción de corriente en un galvanómetro

Determine en qué dirección circulará la corriente en el galvanómetro, considerando los siguientes casos:

- Con el circuito tal como está, funcionando durante un tiempo largo.
- El conmutador se cambia instantáneamente de la posición A a la posición B.
- El conmutador se cambia instantáneamente de la posición B a la posición A.
- Se desconecta instantáneamente la batería.

2. ¿Cómo se podría medir, mediante la bobina exploradora, el campo magnético producido por una corriente alterna en el solenoide?
3. ¿Cómo se podría determinar el número de vueltas de la bobina exploradora?

REFERENCIAS

1. D. Halliday, R. Resnick y K. Krane, *Física*, Vol. 2, Caps. 35, 36, 37, Ed. Continental (1995).
2. R. M. Eisberg y L. S. Lerner, *Física*, Vol. 2, Caps. 23, 24, 25, Mc Graw-Hill (1984).
3. R. A. Serway, *Física*, tomo 2, tercera edición, Caps. 30, 31, Mc Graw- Hill (1992).
4. P. A. Tipler, *Física*, tomo 2, segunda edición, Caps. 27, 28, 29, Editorial Reverté (1985).
5. Para ver experimentos o videos en INTERNET consulte las páginas:

Inducción magnética:

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/faraday2/>

<http://www.youtube.com/watch?v=PZNG8mwLNVU>

Sobre ley de Lenz:

<http://www.youtube.com/watch?v=zeQpHAJmbP4&NR=1>

<http://www.youtube.com/watch?v=bkSsgTQOXVI&feature=related>

Hay muchos videos en YOUTUBE. Revísalos.

APÉNDICE A1

EL INFORME DE LABORATORIO

OBJETIVO

- Ilustrar al estudiante sobre la redacción de un informe convenientemente estructurado y enfatizar la importancia de la comunicación escrita del trabajo experimental.

I. Motivación

Para un científico o un ingeniero es de vital importancia el desarrollar la capacidad de comunicar sus resultados en forma oral y escrita, de suerte tal que sean comprensibles aún por personas no involucradas directamente con el trabajo experimental.

El informe escrito suele ser el único material tangible que se le presenta a los superiores, clientes o colegas, y de él dependerá la valoración de la actividad profesional, así como también la toma de decisiones por parte de otras personas. De la misma manera, el informe escrito será la herramienta fundamental de evaluación de su actividad durante los cursos de laboratorio. Antes de pasar a detallar la estructura general del informe, queremos enfatizar que la *habilidad para la interpretación, relación y discusión de los resultados* es el rasgo distintivo de científicos o ingenieros capaces y pensantes.

II. El Informe

El informe deberá ser claro, **CONCISO** y **BIEN ESTRUCTURADO**. Igualmente el informe debe ser explícito y argumentado; en particular, debe presentar claramente los resultados. Carece de sentido y a la vez denota una actitud desconsiderada para el lector, el presentar simplemente una colección de ecuaciones, tablas y figuras, que no estén enmarcadas dentro de un texto que las explique claramente dentro de una secuencia lógica.

El informe debe explicar el contexto dentro del cual está enmarcado el trabajo en cuestión y también debe analizar y discutir los resultados.

Todas las tablas, figuras y gráficas deben tener un título o leyenda y estar numeradas secuencialmente. (Tabla 1, Tabla 2,....etc)

Finalmente, apuntamos que el informe se escribe de modo que colegas sin un

conocimiento previo del experimento o problema sean capaces de entenderlo plenamente. Por ello, el informe debe ser auto contenido.

A continuación presentamos un modelo de las partes de un informe de laboratorio: Este modelo no es rígido y se lo debe adaptar adecuadamente en cada caso.

1. Hoja de presentación.

Título de la práctica e identificación del autor o autores.

2. Introducción.

Definición del problema investigado. Debe brindarse una idea o panorama general así como también una breve reseña de los resultados y conclusiones más significativos reportados por otros autores.

La *introducción* debe concluir indicando de manera clara y concisa el propósito y la finalidad de la experiencia (o investigación) y los contenidos del informe.

3. Marco teórico.

Debe presentar un resumen del modelo teórico que permite describir el fenómeno estudiado con las ecuaciones asociadas. La teoría puede predecir resultados o bien puede explicarlos. En este laboratorio los marcos teóricos de las distintas prácticas se pueden encontrar en cualquier libro de física general. Es necesario que Ud. investigue y no se limite a copiar textualmente lo que aparece en esta guía. También deben darse otros detalles que puedan ser de relevancia en el contexto de la práctica, por ejemplo, el conocimiento de un valor muy preciso de alguna constante que se quiera determinar, velocidad de la luz, aceleración de la gravedad en el sitio, número de Avogadro, lo que permitirá concluir sobre la bondad de sus resultados.

4. Esquema del procedimiento experimental.

Debe presentarse el método usado para solucionar el problema que se ataca y dar una idea clara de cómo se ha realizado el experimento.

Se ha de describir del montaje experimental (incluyendo esquemas y/o dibujos).

Debe indicarse el rango y apreciación de los instrumentos de medición; Esta sección debe brindar la información requerida por el lector para reproducir los resultados, si así lo desea.

5. Resultados experimentales.

Los resultados de las mediciones con sus errores deben ser tabulados así como los promedios, desviaciones estándar, errores de la cantidad promediada. Los gráficos y su subsiguiente procesamiento (ajustes de curvas) deben ser parte medular del informe y nunca aparecer en anexo.

Debe enfatizarse (nuevamente) que toda cantidad calculada a partir de cantidades medidas debe estar acompañada *siempre* de su respectivo error, obtenido vía propagación.

Si algunos resultados provienen de la repetición de un mismo cálculo a partir de datos tabulados, es conveniente presentarlos a su vez en forma tabulada. En

este caso debe mostrarse en el pie de la Tabla un cálculo tipo para ilustrar cómo se obtienen los resultados tabulados.

6. Discusión y conclusiones.

Esta es la sección más importante del informe. Sin embargo, no es posible dar un esquema para un proceso intelectual como el de relacionar y discutir resultados con miras a concluir creando conocimiento o información; por lo anterior nos limitamos a apuntar que esta sección debe comprender al menos las siguientes consideraciones:

- a)** Una discusión de la precisión de los resultados. En particular debe discutirse la influencia de los errores (instrumentales y de observación) y las medidas adoptadas para disminuirlos.
- b)** Debe compararse el resultado experimental y la predicción teórica. Deben discutirse las discrepancias surgidas debido a las idealizaciones utilizadas para predecir algún resultado y la influencia de limitaciones físicas en el resultado real.
- c)** Cada curva debe ser discutida y explicada: debe siempre determinarse el posible significado de la forma de la curva, del área bajo la misma, de la dependencia (lineal o no) de una variable con respecto a otra.
- d)** Las dificultades experimentales pueden comentarse, así como también las posibles mejoras que se le puedan hacer a la solución experimental del problema. También pueden sugerirse ideas y posibles desarrollos al lector.

7. Bibliografía.

Nombre y autor(es) de los libros (y otras publicaciones) en los cuales se apoyó la realización o interpretación de la práctica o experiencia.

8. Apéndices.

Debe incluir los detalles que por razones de claridad en la presentación no se incluyen en el texto principal del informe.

IMPORTANTE

Si la práctica tiene dos partes independientes, (Parte A, Parte B) como por ejemplo la determinación de la constante de un resorte por métodos estáticos y dinámicos, entonces Ud. deberá tratar estas dos partes en forma sucesiva. Es decir que su informe tendrá **dos partes** bien distintas.

La primera constará, para el método estático, de Marco teórico, Procedimiento, Resultados, Cálculo de errores y análisis, Discusión y Conclusiones.

La segunda parte será relativa el método dinámico y se repetirán las partes señaladas anteriormente.

Una conclusión general del informe podría ser la comparación de los dos resultados obtenidos por distintos métodos de la constante o la cantidad física que se determinó por distintos métodos.

APÉNDICE **A2**

USO DE LA COMPUTADORA EN EL LABORATORIO

OBJETIVO

- Dar al estudiante algunos lineamientos básicos para el uso de la computadora en el laboratorio.

I. Introducción

Estos laboratorios incorporan la computadora como herramienta básica del trabajo experimental. Por tal hecho se considera absolutamente necesario que el estudiante se familiarice con su uso y las posibilidades que ella le ofrece. Durante las sesiones de práctica se usarán varios tipos de programas o software. Estos pueden clasificarse en dos grandes tipos: los que corren en el ambiente DOS y los que corren en el ambiente WINDOWS.

II. Ambiente WINDOWS

Activando la opción "Microsoft Excel", en la pantalla principal, se ejecuta en el ambiente Windows el programa de la hoja de cálculo que deberá usar en las prácticas que así lo requieran. De esta manera Ud. tendrá la hoja de cálculo inmediatamente disponible para proceder a usarla. Debe tener en cuenta que las unidades de disquetes y de pen drives están desactivadas para evitar la contaminación con virus y por consiguiente no podrá llevarse la información digital.

En EXCEL la pantalla contiene en la parte superior una lista de las siguientes categorías: "Archivo", "Edición", "Ver", "Insertar", "Formato", "Herramientas", "Datos", "Ventana" y "?", en las cuales se agrupan diversas funciones. Entre otras permiten guardar un archivo, formatear una página para impresión, imprimir, salir del programa, deshacer acciones, cortar, copiar, pegar, encontrar, reemplazar, ajustar las características de la barra de herramientas que aparece en pantalla, insertado de columnas y filas, funciones matemáticas y estadísticas,

definición de constantes, formato de celdas, reordenamiento de datos, y selección de hojas cuando se usa más de una hoja.

Inmediatamente por debajo de las categorías de funciones están las barras de herramientas que contienen íconos para llevar a cabo las funciones que tienen asignadas, y la barra de fórmulas que indica el contenido de la celda seleccionada por el apuntador. Por último, en el cuerpo central están las celdas de la hoja de cálculo. Las columnas están designadas por las letras del abecedario y las filas por números. Cada celda puede contener una expresión numérica, un texto o la indicación de una operación matemática que usa direccionamiento a celdas de contenidos numéricos, funciones matemáticas, constantes numéricas introducidas explícitamente o constantes contenidas en celdas cuyo direccionamiento ha sido definido con un nombre específico. Una vista de la hoja con un ejemplo de operaciones matemáticas sencillas se da a continuación: **A B C A B C**

	A	B	C		A	B	C
1		lado 1	lado 2	1	se entra texto		se entra texto
2	Medida 1	12,5	8,3	2	se entra texto	se entra número	se entra número
3	Medida 2	11,8	9,2	3	se entra texto	se entra número	se entra número
4	Medida 3	13,1	7,9	4	se entra texto	se entra número	se entra número
5	Medida 4	12,4	8,7	5	se entra texto	se entra número	se entra número
6	Media	12,5	8,5	6	se entra texto	=SUMA(B2:B5)/4	=SUMA(C2:C5)/4
7	Error med.	0,2	0,2	7	se entra texto	=DESVESTP(B2:B5)/RAIZ(4)	=DESVESTP(C2:C5)/RAIZ(4)
8	error relat.	1,9	2,8	8	se entra texto	=100*B7/B6	=100*C7/C6

Fig. 1: Note que por consistencia ha sido necesario utilizar la opción "disminuir decimales" de la barra de herramientas de Excel en las filas 6 a 7.

En el esquema se muestra del lado izquierdo el contenido propiamente dicho de las celdas de la hoja de cálculo, y, en el lado derecho, el tipo de función que se realiza. Por ejemplo, en toda la columna A y en toda la fila 1 se entran textos; en el rango definido por las celdas B2:C5 se entran números; en las celdas B6 y C6 se calcula la media aritmética de los cuatro números contenidos en los rangos B2:B5 y C2:C5, en el primer caso usando la función SUMA del rango correspondiente, y en el segundo listando las celdas a sumar, y en ambos casos dividiendo entre la constante 4; en las celdas B7 y C7 se inserta la función DESVESTP, que calcula la desviación estándar de una población, y se divide entre RAIZ(4), que es la raíz cuadrada de 4, para calcular el error absoluto de la media; y por último, en la celda B8, y en forma análoga en la celda C8, se multiplica el contenido de la celda B7 por 100 y se divide entre el contenido de la celda B6 para calcular el error porcentual de las cuatro medidas.

Las funciones definidas y las posibilidades de cómo combinar diferentes operaciones son ilimitadas y no podríamos cubrirlas en este breve resumen sobre el uso de la computadora en el laboratorio. La mejor forma de aprender a

conocer el alcance de una hoja de cálculo como es Excel es USÁNDOLA. No debe tener miedo a ensayar herramientas razonables. Como práctica para que no pierda su trabajo, con frecuencia, y en especial cada vez que termine el montaje de un paso en la hoja de cálculo, escriba sus archivo en el disco duro apretando el disquete en la barra de herramientas o utilizando la opción GUARDAR presente bajo la categoría “Archivo” del menú. El nombre genérico que tiene la hoja de cálculo al abrirse es “**Libro1.xls**”. La primera vez que solicite GUARDAR la hoja de cálculo, aparecerá una solicitud de información donde Ud. deberá, solamente, cambiar la palabra “**Libro1**” por el nombre de archivo que se indica a continuación: Su grupo: XX por ejemplo grupo 07 Su sección: YY por ejemplo: de la sección 14 Número de la práctica: ZZ por ejemplo, realizando la práctica número 05 Nombre genérico del archivo: **xx-yy- z z . x l s** Nombre del archivo en el ejemplo: **07 - 14 - 05 . x l s**

III. Graficando con Excel

Es importante que Ud. sepa elaborar un gráfico. Sin embargo, no podemos ignorar que existen recursos en las computadoras que nos ayudan considerablemente a elaborar gráficos de alta calidad. En particular, las ayudas para las pruebas de diferentes tipos de gráfico con sólo seleccionar unas pocas opciones, el trazado de barras de error y el cálculo de diferentes tipos de ajuste hacen que no podamos pasar por alto que deban conocer el arte de elaborar gráficas con tecnología moderna.

Cuando tenga en mente la elaboración de un gráfico con los resultados de sus mediciones, ordene apropiadamente la presentación de las magnitudes a ser representadas en el gráfico. Por ejemplo, puede hacer que el listado de valores que van en el eje de las “X”, y en el eje de las “Y”, queden en columnas o filas contiguas. Igualmente, haga que los errores absolutos de cada una de las mediciones, o los resultantes una vez que haya practicado la propagación de errores correspondiente, queden también en columnas o filas contiguas. La forma más sencilla de elaborar el gráfico es invocar el “Asistente para gráficos” (ícono en el primer nivel de la barra de herramientas que contiene un gráfico con barras de colores). Este es un procedimiento con el cual se genera un gráfico, pero el mismo puede ser modificado o completado en la forma que se desee una vez que se concluya.

El esquema insertado (Fig. 2) es una copia directa de una hoja Excel. El gráfico de la derecha fue elaborado marcando las celdas mostradas en el cuadro 1 de la Fig. 2 • Para hacer este gráfico se selecciona la herramienta “Asistente para gráficos”. De inmediato es presentada la primera pantalla de la elaboración del gráfico en la cual se puede seleccionar el tipo y el subtipo de gráfico deseados. • Para trabajo en el laboratorio usaremos sistemáticamente la opción “XY (Dispersión)”. Como subtipo usaremos sistemáticamente el que no presenta los puntos unidos por curvas o rectas pues la única recta o curva con validez será aquella emanada de un ajuste de la data por mínimos cuadrados. Se escoge la

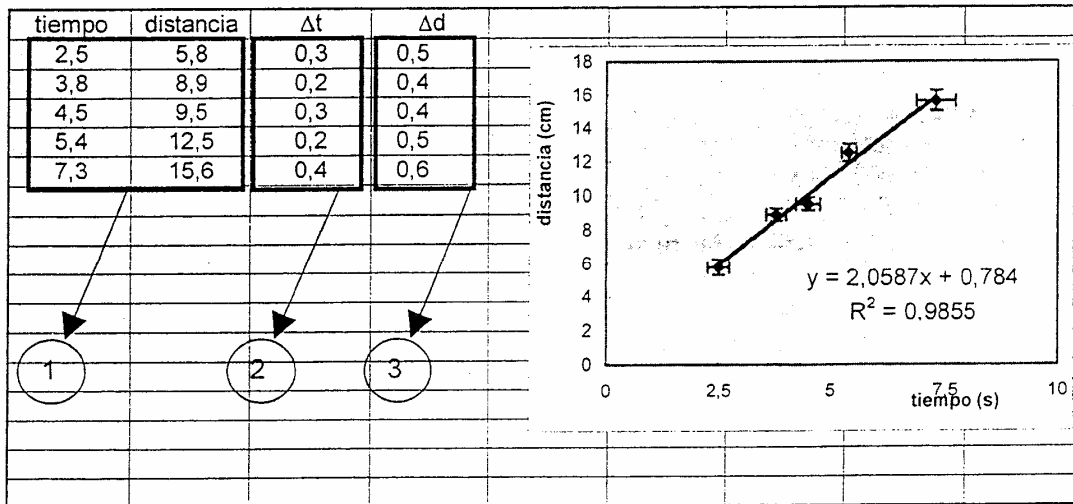


Fig. 2: Gráfico distancia vs. Tiempo con errores individuales para cada punto.

opción “Siguiente” y se pasa a la segunda pantalla de la elaboración del gráfico.

- En este paso (“Datos de origen”) se indica si su data está por columnas o filas. El programa está en capacidad de reconocer si los datos están encabezados por los nombres de las variables. Se escoge la opción “Siguiente” y se pasa a la tercera pantalla de la elaboración del gráfico.
- En el tercer paso (“Opciones de gráfico”) podrá asignar los títulos de los ejes en los recuadros “Eje de valores (X)” y “Eje de valores (Y)”. También se puede dar título al gráfico. Se escoge la opción “Siguiente” y se pasa a la tercera pantalla de la elaboración del gráfico.
- El cuarto paso permite ubicar el gráfico”) en la hoja que se desee. El procedimiento se concluye seleccionando “Terminar”.

En cualquier pantalla Ud. puede regresar a la anterior seleccionando la opción “Atrás”. Y en caso de que el gráfico se le haya escapado de control, simplemente escoja “Cancelar” y reinicie la elaboración del gráfico. El gráfico que Ud. acaba de elaborar puede ser modificado totalmente. Para ello doble presione con el apuntador sobre el área del gráfico, y el mismo será resaltado. Luego, presionando una vez con el botón izquierdo sobre cualquier detalle del gráfico, lo seleccionará, y presionándolo doble sobre él abrirá pantallas que le ofrecerán el menú completo de opciones relativas al detalle. De esta forma podrá cambiar escalas; ubicación de ejes, títulos y leyendas; escoger el tipo de símbolos de los puntos representados; unir o no los puntos con trazos rectos, entre muchos otros detalles. Solamente ensayándolo Ud. podrá conocerlo. De particular importancia para el curso es el trazado de barras de error. Para hacerlo, mientras está resaltado el gráfico, seleccione los puntos representados hasta que se resalte la serie completa. En este momento presione el botón derecho del ratón y seleccione la opción “Formato de serie de datos”. Aparecerá una pantalla dándole a escoger varias opciones, entre ellas “Barras de error” para X e Y. En estas últimas opciones podrá seleccionar el tipo de barra de error y la magnitud de las mismas. En este último aspecto puede optar por un error

igual para todos los puntos, un error porcentual o un error individual para cada punto. Esta última opción fue la que se optó en el esquema de la página anterior. Para introducirlos, se seleccionó la opción "Personalizada", y se copiaron los respectivos rangos calculados en la hoja de cálculo en los recuadros "+" y "-", tanto para las X's como para las Y's. Para ello, se colocó el apuntador en la casilla "+" de "Personalizada", se seleccionó la hoja de cálculo, se marcó un cuadrado sobre las cinco celdas que contenían la magnitud de los errores de cada punto (recuadro numerado 2 en el esquema), y automáticamente se copió el rango de las celdas en la casilla de la pantalla. Luego se procedió a colocar el apuntador en la casilla "-", y repetir el proceso, ya que supusimos barras de error iguales en ambos sentidos. Y por último se repitieron los pasos para introducir los errores en la dirección Y (recuadro numerado 3 en el esquema) y por último, repitiendo los mismos pasos que con las barras de error, pero seleccionando "Agregar línea de tendencia", se puede realizar un ajuste de mínimos cuadrados a la serie de datos representados en el gráfico. La pantalla de opciones presenta cinco diferentes tipos de ajustes (lineal, logarítmico, polinómico, de potencia y exponencial). Y, cambiando a la pantalla de "Opciones", se puede solicitar que pase por un punto en particular, si es pertinente, que presente la ecuación en el gráfico y la bondad del ajuste (o valor R cuadrado), que realice extrapolaciones en ambas direcciones y que le asigne identificación a la curva de ajuste. Un valor R cuadrado igual a uno indica que la ecuación describe un ajuste perfecto de la data.

V. 1-2-3 para proceder

Ya Ud. está listo para ensayar con la computadora. Siga los siguientes pasos:

- 1.** Encienda el CPU y el monitor. Espere a que se termine la inicialización, que es cuando aparece la pantalla principal. .
- 2.** Podrá seleccionar el programa "Tutorial de Física" o "Microsoft Excel" según sus necesidades.
- 3.** En el caso de emplear "Microsoft Excel" haga un primer GUARDAR con la herramienta cuyo icono es un disquete, y asígnele el nombre que corresponda en el recuadro "Nombre de archivo".
- 4.** Introduzca sus títulos, identificaciones, cantidades numéricas y operaciones matemáticas que desee realizar.
- 5.** Recuerde hacer GUARDAR periódicamente marcando el ícono del disquete.
- 6.** Al concluir seleccione "Salir" en la categoría "Archivo" en la línea superior de la pantalla

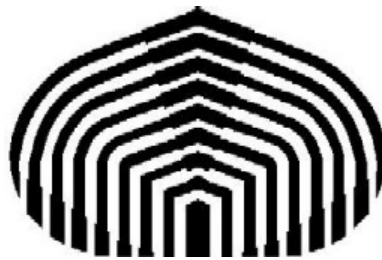
7. Antes de imprimir recurra siempre a la opción “Vista preliminar” que está en la categoría “Archivo del menú” con el objeto de asegurarse del número de páginas a imprimir y de la disposición de su contenido.

8. Para borrar su archivo al concluir la práctica, marque la opción “Borrar archivos” de la pantalla principal.

9. Seleccione “Apagar equipo” entre las opciones de la pantalla principal y esper que aparezca el mensaje que indica que puede apagar el CPU y el monitor.

Apague el CPU y monitor.

APÉNDICE **A3**



INTERFAZ Y SOFTWARE DE ADQUISICIÓN PARA EL EQUIPO ROTATIONAL DYNAMICS APPARATUS PASCO MODEL ME-9279A

MANUAL DEL USUARIO

Rev. 1.0

Universidad Simón Bolívar – Laboratorio D

TABLA DE CONTENIDOS

Tabla de Contenidos	2
Introducción.....	3
Contenido del Kit:	3
Requerimientos Mínimos del Software DinaRot:.....	4
Características de la Interfaz:	4
Características del Software DinaRot:	4
Instalación de la Interfaz y Software	5
Instalación de la Interfaz:	5
Instalación del Software DinaRot en el PC:	6
Adquisición de Datos Utilizando DinaRot	7
Controles e Indicadores de Adquisición de Datos:.....	8
Controles de Escala:	10
Controles e Indicadores de Opciones de Gráfico:.....	11
Opciones de Impresión y Visualización de Datos:	12
Controles de Inicio – Fin de Adquisición:.....	13
Solución de Problemas	14

INTRODUCCIÓN

Este manual contiene información sobre la instalación y el funcionamiento de la interfaz y el software de adquisición de datos **DinaRot**, diseñado para el equipo **Rotational Dynamics Apparatus Model ME-9279A**. Este kit ha sido diseñado para llevar a cabo satisfactoriamente una sesión de laboratorio acerca de dinámica rotacional utilizando este equipo, para la asignatura Laboratorio 2 de Física de la Universidad Simón Bolívar.

La interfaz entre el equipo **Rotational Dynamics Apparatus** y el PC es un circuito constituido principalmente por un microcontrolador, capaz de obtener la información digital proveniente del equipo de dinámica, empaquetar y enviar al PC los datos, utilizando un puerto serial **RS-232**.

El software obtiene los datos enviados por la interfaz física, y los procesa de manera adecuada para poder visualizar el gráfico de la velocidad angular de cada uno de los discos en el PC. Éste cuenta con diversas opciones para cambiar el modo de adquisición, la visualización y el post-procesamiento de los datos adquiridos por la interfaz.

Contenido del Kit:

- Manual del Usuario (este manual).
- Manual Técnico.
- Interfaz física entre el equipo **Rotational Dynamics Apparatus Model ME-9279A** y el PC.
- CD de Instalación del Software de Adquisición DinaRot para Windows.

- Tutorial Básico e interactivo para el uso del software DinaRot, en formato Flash Player.

Requerimientos Mínimos del Software DinaRot:

- Procesador Pentium III 500 MHz o equivalente (recomendado).
- Sistema Operativo Windows NT/2000/XP (no soporta Windows 95/98/ME).
- 64 Mb de memoria RAM (recomendado).
- 300 Mb de espacio libre en el Disco Duro.
- Puerto serial RS-232 (o puerto USB con conversor RS-232 – USB).
- Tarjeta de video aceleradora (recomendado).
- Resolución de pantalla de 800x600 píxeles (1024x768 recomendado).

Características de la Interfaz:

- Funciona con bajo voltaje de alimentación (5V – 100 mA).
- Comunicación serial con el PC, con capacidad de corrección de errores.
- Seis tiempos de muestreo distintos entre 0,5 s – 3 s.
- Watchdog encargado de verificar el funcionamiento del microcontrolador.

Características del Software DinaRot:

- Comunicación serial con la interfaz, capaz de corregir errores.
- Control de los modos de adquisición de la interfaz desde el PC.
- Visualización del gráfico de velocidad angular de un disco o ambos discos.
- Ajuste lineal de los datos adquiridos, mostrando la ecuación obtenida.
- Visualización e impresión de gráficos y tablas de datos adquiridos.
- Almacenamiento de datos en archivos y apertura de archivos de datos.
- Escalas del gráfico automáticas o ajustables manualmente.
- Selección del número de muestras a adquirir.
- Visualización de barras de error para cada gráfico por separado.

- Graficación "Real – Time" de la velocidad angular.

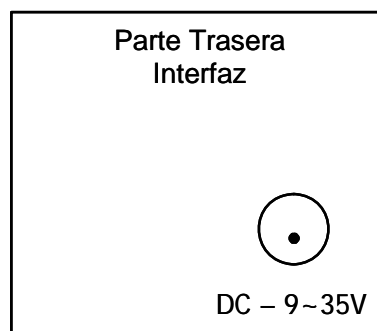
INSTALACIÓN DE LA INTERFAZ Y SOFTWARE

Este capítulo muestra paso a paso la instalación de la interfaz física entre el **Rotational Dynamics Apparatus Model ME-9279A** y el computador, y la instalación del software DinaRot en su PC.

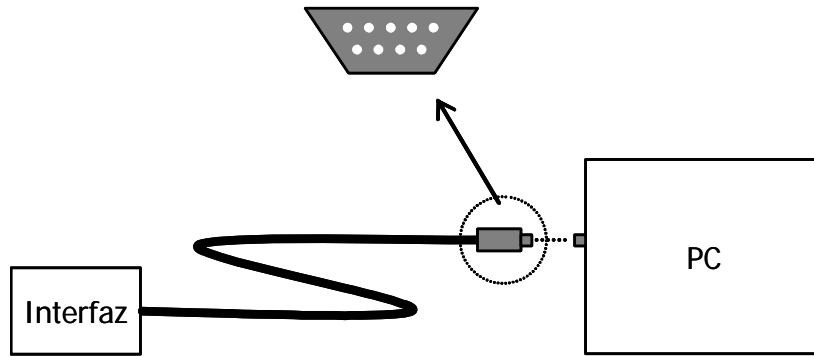
Instalación de la Interfaz:

Para llevar a cabo la instalación de la interfaz entre el PC y el **Rotational Dynamics Apparatus**, usted debe seguir los siguientes pasos:

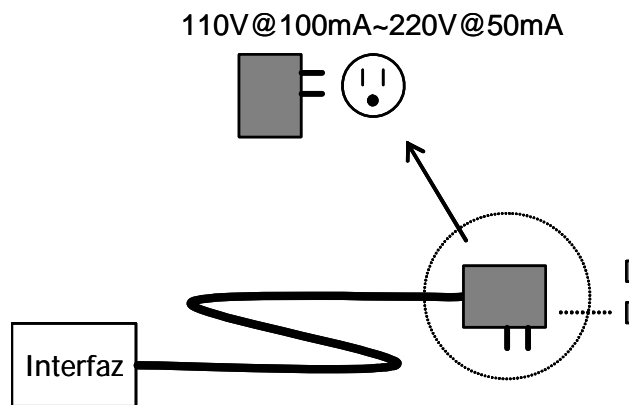
1. Conecte solamente el plug de alimentación a la interfaz.



2. Conecte el cable serial al puerto RS-232 de su PC (COM1) y a la interfaz.



3. Por último, conecte a la alimentación el transformador de la interfaz.



Instalación del Software DinaRot en el PC:

Para instalar el software en su PC, debe disponer del CD de instalación de DinaRot. Si su computadora cumple los requisitos mínimos del sistema, no debe tener problemas en su instalación, siguiendo los pasos a continuación:

1. Inserte el CD en la unidad lectora de CD, y espere a que ésta reconozca el mismo automáticamente.
2. Aparecerá una ventana del instalador del programa. Siga los pasos de éste para instalar el software. Éste le pedirá algunos datos como directorio de instalación, iconos en el menú inicio, etc.

3. Luego que el instalador copie los archivos necesarios y configure su PC, presione Finalizar para terminar la instalación.
4. Ejecute DinaRot para Windows presionando el icono en el menú inicio de su PC.

ADQUISICIÓN DE DATOS UTILIZANDO DINAROT

El software de adquisición de datos DinaRot se comunica con el equipo de dinámica rotacional **Rotational Dynamics Apparatus Model ME-9279A** a través de una interfaz, utilizando una conexión serial RS-232. DinaRot tiene una variedad de funciones de visualización y post-procesamiento de los datos adquiridos, la posibilidad de mostrar en tiempo real el gráfico de velocidad angular, y muchas opciones más.

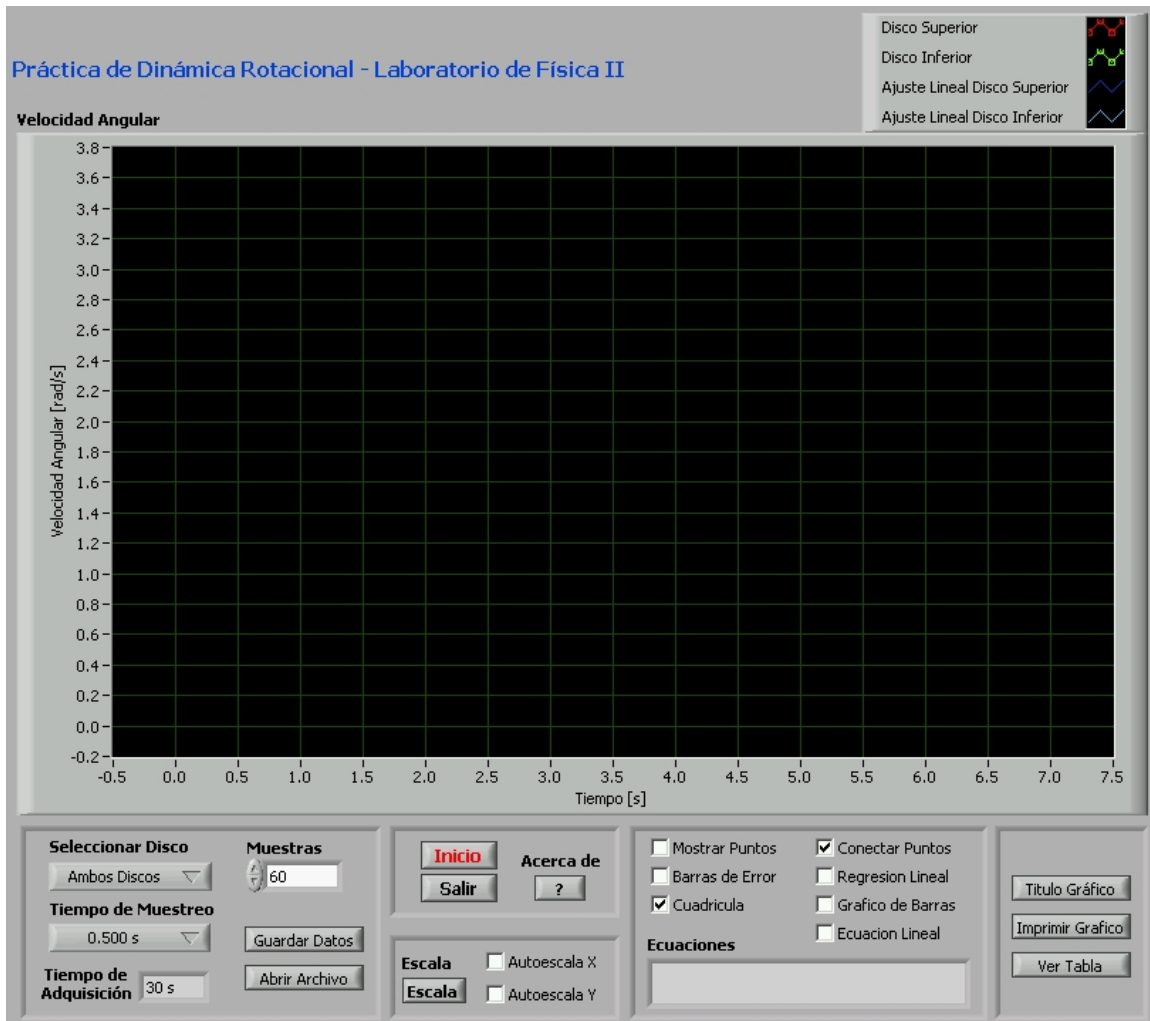


Figura 1: Panel Frontal de DinaRot

Controles e Indicadores de Adquisición de Datos:

1. **Seleccionar Disco:** Permite al usuario elegir una de las tres opciones de visualización de las curvas de velocidad angular adquiridas en el gráfico.
 - Disco Superior: Muestra solamente la curva de velocidad angular del disco superior. Si están activadas las barras de error o el ajuste lineal, muestra sólo las curvas correspondientes a este disco.

- Disco Inferior: Muestra solamente la curva de velocidad angular del disco inferior. Si están activadas las barras de error o el ajuste lineal, muestra sólo las curvas correspondientes a este disco.
 - Ambos Discos: Muestra las curvas de velocidad angular de ambos discos y sus barras de error y ajustes lineales (si están activados).
2. **Tiempo de Muestreo:** Permite al usuario cambiar el tiempo transcurrido entre dos muestras adyacentes de velocidad angular. Hay seis opciones que indican el tiempo (en segundos) entre una muestra y la siguiente. Este control varía el tiempo de adquisición.
- 0.500 s: La interfaz envía muestras cada 0.500 segundos.
 - 1.000 s: La interfaz envía muestras cada 1.000 segundos.
 - 1.500 s: La interfaz envía muestras cada 1.500 segundos.
 - 2.000 s: La interfaz envía muestras cada 2.000 segundos.
 - 2.500 s: La interfaz envía muestras cada 2.500 segundos.
 - 3.000 s: La interfaz envía muestras cada 3.000 segundos.
3. **Muestras:** Permite al usuario decidir el número de muestras de velocidad angular que desea solicitar a la interfaz. Se permite introducir un número entre 15 y 300.
4. **Tiempo de Adquisición:** Es un indicador que dice al usuario el tiempo que durará la adquisición de datos con el número de muestras y tiempo de muestreo seleccionado. Su valor cambia automáticamente al cambiar el número de muestras o el tiempo de muestreo, y no es modificable.
5. **Guardar Datos:** Permite al usuario guardar en un archivo los datos de velocidad angular adquiridos previamente. Al presionar este botón, se le preguntará al usuario la dirección y el nombre del archivo de tipo "Datos

de Dinámica Rotacional *.daq" a guardar. Si presiona cancelar, el archivo no se guardará y volverá al estado anterior.

6. **Abrir Archivo:** Permite abrir archivos de datos guardados previamente. Al presionar este botón, se le solicitará al usuario el nombre y la dirección del archivo que desea abrir, con los datos almacenados en el mismo. Si presiona cancelar, no se abrirá ningún archivo y se volverá al estado anterior. Si el usuario ha adquirido datos recientemente, sin guardarlos en un archivo, se preguntará si desea hacerlo en ese momento.



Figura 2: Controles de Adquisición de Datos

Controles de Escala:

7. **Autoescala X:** Permite al usuario elegir si desea que DinaRot ajuste automáticamente la escala del eje X, o desea mantener la escala actual.
8. **Autoescala Y:** Permite al usuario elegir si desea que DinaRot ajuste automáticamente la escala del eje Y, o desea mantener la escala actual.
9. **Escala:** El usuario puede introducir el valor máximo y mínimo para cada una de las escalas de forma manual. Al presionar el botón, un cuadro de diálogo solicitará al usuario los valores de las escalas. Si desea que una escala no cambie su estado actual, no inserte ninguno de los valores de

dicha escala. Lo mismo ocurrirá cuando inserte un valor máximo de la escala menor que el valor mínimo de dicha escala.

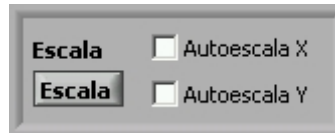


Figura 3: Controles de Escala

Controles e Indicadores de Opciones de Gráfico:

10. **Mostrar Puntos:** Cuando esta opción está activada, se marcará en el gráfico cada uno de los puntos adquiridos por la interfaz, en las curvas que se estén visualizando.
11. **Conectar Puntos:** Si esta opción se encuentra activada, aparecerá en el gráfico la curva que se desee visualizar, uniendo los puntos adquiridos con una línea recta.
12. **Barras de Error:** Al activar esta opción, se generan las barras de error de cada una de las curvas que mostradas en el gráfico. El tamaño de las barras de error es predefinido, y está dado por la apreciación de la medición de velocidad angular y el error de temporización de la interfaz.
13. **Regresión Lineal:** Cuando esta opción está activada, se muestra en el gráfico una línea recta correspondiente al ajuste lineal de los datos, para cada uno de los discos. Además, aparece en el indicador de **Ecuación**, la ecuación de cada una de las rectas (y el error en los parámetros).
14. **Cuadrícula:** Al permanecer activada esta opción, aparece en el gráfico una cuadrícula de acuerdo a las divisiones grandes de las escalas X y Y.

15. **Gráfico de Barras:** Si se activa esta opción, cada punto adquirido por la interfaz será visualizado como una barra, Para cada una de las curvas de velocidad que se visualicen.
16. **Ecuación Lineal:** Esta opción permite al usuario hacer el ajuste lineal de las curvas de datos adquiridos, mostrar la ecuación en el indicador de **Ecuación**, pero sin mostrar la recta obtenida en el gráfico. Esta opción es útil para visualizar o imprimir el gráfico de los datos obtenidos, junto a la ecuación de las rectas del ajuste lineal, sin mostrarlas en el gráfico.
17. **Ecuaciones:** En este indicador se muestran las dos ecuaciones de las rectas obtenidas por el ajuste lineal de las curvas de velocidad angular. Esto ocurre siempre que esté activada la opción de **Ecuación Lineal** o **Regresión Lineal**.

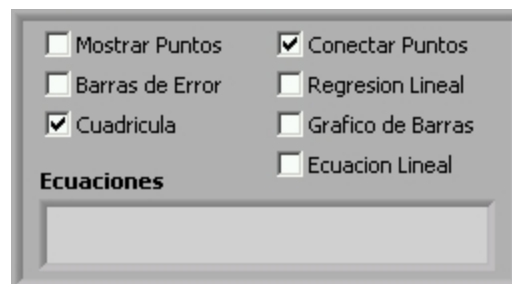


Figura 4: Opciones de Gráfico

Opciones de Impresión y Visualización de Datos:

18. **Título Gráfico:** Al presionar este botón, se le solicita al usuario que inserte un título para el gráfico. Si se presiona el botón cancelar, no se realiza ningún cambio.

19. **Imprimir Gráfico:** Esto permite al usuario imprimir el gráfico, junto a las ecuaciones de las rectas del ajuste lineal (si se encuentra activada la opción **Ecuación Lineal** o **Ajuste Lineal**). Se le solicitará que introduzca una identificación que quedará impresa en el encabezado de la página. En caso de presionar cancelar, no se imprime ninguna página y se regresa al estado anterior. Lo mismo ocurre cuando el gráfico se encuentra vacío, pero DinaRot avisa al usuario que el gráfico está vacío. Para imprimir, es necesario tener correctamente instalada una impresora en el PC (local o remota). El trabajo de impresión será enviado a la impresora configurada en el sistema como predeterminada.

20. **Ver Tabla:** El usuario puede examinar los datos adquiridos. Al presionar este botón, se abrirá una nueva ventana con la tabla de datos adquiridos. También posee un control llamado **Imprimir**, que le permite al usuario imprimir la tabla de datos. Se le pregunta al usuario una identificación para el encabezado de la página (al igual que al imprimir el gráfico).



Figura 5: Opciones de Impresión y Visualización de Datos

Controles de Inicio – Fin de Adquisición:

21. **Inicio/Fin:** Este botón permite al usuario comenzar a adquirir datos de la interfaz. Al presionar **Inicio**, comienza la adquisición de datos con los parámetros configurados previamente con los **Controles e Indicadores de Adquisición de Datos**. Durante la adquisición, se muestra(n) la(s)

gráfica(s) de velocidad angular (de acuerdo a las opciones), en "tiempo real". Esto quiere decir, que a medida que la interfaz envía datos al PC, DinaRot va mostrando los datos en pantalla, añadiéndolo a las curvas.

Durante la adquisición, todos los controles e indicadores se encuentran desactivados. Además, el usuario puede detener el proceso de adquisición presionando el botón nuevamente (que ahora se llama **Fin**).

Si por un tiempo mayor de 2 veces el tiempo muestreo, DinaRot no recibe datos a través del puerto serial (o los recibe con errores de transmisión), se detiene la adquisición automáticamente, mostrando un mensaje de error al usuario. La interfaz se reiniciará automáticamente en caso de que esto ocurra, por lo tanto, sólo deberá verificar que la conexión serial esté correctamente instalada y reiniciar el programa.

22.Salir: Al presionar este botón, se le preguntará al usuario si desea salir del programa. En caso de responder No, se vuelve al estado anterior del programa. Este control está disponible mientras no se estén adquiriendo.

23.Acerca de: Este botón muestra información acerca de la versión del programa y otros datos sobre su creación.



Figura 6: Controles de Inicio – Fin de Adquisición

SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Esta sección describe los problemas más frecuentes en la instalación y uso del software DinaRot y la interfaz física, y la solución aplicable en cada caso.

- Aparece un error de Comunicación Serial cuando desea adquirir datos.

Verificar el cable de conexión serial entre la interfaz y el PC. Si está bien instalado y el problema persiste, desconectar y volver a conectar la alimentación de la interfaz.

- Al iniciar DinaRot aparece un error de Puerto Serial.

Verificar que la interfaz esté bien conectada al PC. Además, asegurarse de que está conectada al puerto serial COM1, y de que éste no está siendo utilizado por otra aplicación.

- Para mostrar varias Curvas en el Gráfico, demora mucho tiempo.

Ubicar el puntero del mouse sobre una curva de la Leyenda del Gráfico. Al presionar el botón secundario, aparece un menú contextual con varias opciones. Desactivar la opción **Antialiasing**, y repetir el proceso para todas las curvas del gráfico.

Si posee una tarjeta de video aceleradora 3D con soporte de DirectX 8, y con capacidad de procesar **Antialiasing** (GeForce FX-5200, ATI Radeon 9600 o superior), no debería causar problemas si esta opción está activada. Verificar que otro software (por ejemplo un reproductor de video) no esté utilizando la tarjeta de video de manera intensa.

- Al imprimir una gráfica o una tabla, ocurre un Error de Impresora.

Entrar en el Panel de Control de Windows, y luego la carpeta impresoras. Verificar que hay instalada una impresora en su PC. Al seleccionar la impresora marcada como predeterminada, verificar la conexión. Si aparece **Imprimiendo** o **Listo**, intente de nuevo imprimir desde DinaRot. En caso de que no se pueda

conectar con la impresora, seleccionar como predeterminada otra impresora que si tenga conexión al PC, o instale una nueva impresora. El trabajo de impresión siempre es enviado a la impresora predeterminada del sistema.

- Desea cambiar los Colores del Gráfico, y no hay controles que lo permitan.

DinaRot fue programado con los colores predeterminados, para tener una mayor compatibilidad con monitores que soportan menor profundidad de colores y con impresoras a blanco y negro. Se puede cambiar el color de cada curva por separado, si se coloca el puntero del mouse sobre el indicador de la curva en la leyenda y se presiona el botón secundario. En el menú contextual, seleccionar la opción de color, y aparecerá una gama de colores para elegir.

El color de las barras de error no se puede cambiar de esta forma, ya que cada barra se corresponde a una curva distinta en el gráfico, y no aparecen en la leyenda.

El presente texto es el segundo de una serie de tres volúmenes denominada Laboratorios de Física, que sirve de guía y material de apoyo para la realización de prácticas en los cursos básicos de la especialidad en la Universidad Simón Bolívar. Esta serie representa un trabajo altamente significativo, desde el punto de vista metodológico, para la enseñanza en los cursos básicos de naturaleza experimental. A los profesores Douglas Figueroa y Alfredo Sánchez les correspondió la labor de preparar este segundo volumen, siguiendo los lineamientos metodológicos pautados por el grupo de docentes designados por la Jefatura del Laboratorio D en el año de 1995. El objetivo primordial fue darle significado y relevancia al aprendizaje que obtendrían nuestros alumnos al cursar las asignaturas de laboratorios de física.

La temática que se aborda en el texto está asociada con fenómenos mecánicos (tres prácticas), fenómenos electrostáticos y electromagnéticos (9 prácticas), e instrumentación (dos prácticas). Las prácticas de mecánica se han ubicado en este curso por el nivel de conocimientos que requieren para su realización. Las prácticas sobre fenómenos electrostáticos y electromagnéticos abordan los conceptos de campos eléctricos y magnéticos, así como los fenómenos electromagnéticos de inductancia, resonancia, oscilaciones amortiguadas, y aplicaciones a circuitos eléctricos en regímenes transientes, continuos y alternos. Finalmente, las prácticas sobre instrumentación están orientadas para que el estudiante aprenda como utilizar dos instrumentos de medida que son indispensables en el laboratorio de física: el multímetro y el Osciloscopio.



LABORATORIO D
UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR