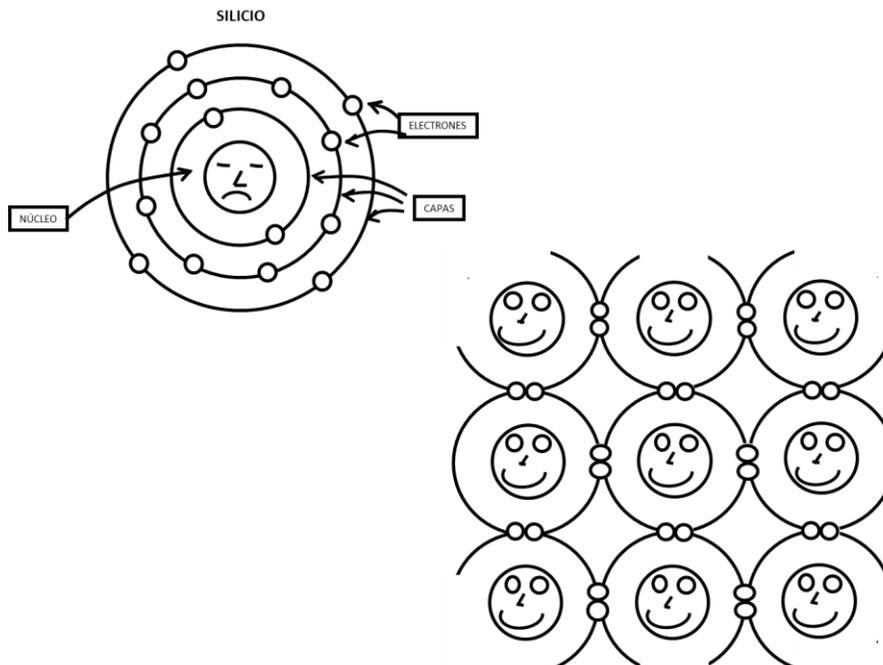




MÓDULO EXPERIMENTAL PARA EL APRENDIZAJE DE LOS PRINCIPIOS BÁSICOS DE ELECTRICIDAD



LABORATORIO PRÁCTICO

(QUINTO AÑO)

TRUJILLO, ESTADO TRUJILLO

MAYO-2013



Índice General

Créditos	3
Prefacio	4
Introducción	5
Equipos de medidas eléctricas	7
Análisis de circuitos eléctricos	10
Los condensadores	16
Los diodos semiconductores	22
EXPERIENCIAS	
Leyes de Kirchhoff	31
Circuito RC	34
El Diodo	39
El Transistor	43
Apéndice: Descripción del Módulo Experimental	46
Bibliografía	47



**Módulo experimental para el aprendizaje de los principios básicos de electricidad,
laboratorio práctico para el quinto año de educación media general.**

Primera edición, 2013
Libro sometido a arbitraje

Manuel Villarreal
Autor Principal

Hebert Lobo, Gladys Gutiérrez, Jesús Briceño, Jesús Rosario, Juan C. Díaz
Co-autores



Datos institucionales

Universidad de Los Andes, Núcleo Universitario “Rafael Rangel”
Departamento de Física y Matemática
Área de Física



Fondo Editorial

Grupo de Investigación Científica y de la Enseñanza de la Física
FE/GRINCEF
Trujillo, Venezuela, 2013
Impreso en Trujillo-Venezuela





Prefacio

Este manual es la guía didáctica que deben seguir los estudiantes de quinto año de educación media general para la realización de algunas experiencias prácticas, mediante un módulo elaborado sobre una lámina de baquelita y con elementos de circuito tales como resistencias, condensadores, diodos, entre otros, que conlleven a un aprendizaje de los principios básicos de electricidad.

Al comienzo del manual se abordan algunos conceptos sobre los equipos de medidas de magnitudes eléctricas. Luego, se presenta una teoría breve pero precisa de los condensadores, los diodos semiconductores y el transistor, junto a algunas experiencias a desarrollar en el aula de clases o el laboratorio de Física de la Institución.

Entre los objetivos didácticos a lograr en este manual, tenemos:

- Interpretar la disipación de calor en un elemento de circuito eléctrico.
- Realizar cálculos en circuitos eléctricos sencillos.
- Analizar el circuito RC.
- Analizar la curva característica de un diodo semiconductor.
- Analizar las características de un transistor.

El organismo responsable para el desarrollo del módulo experimental y los manuales fue el Grupo de Investigación Científica y de la Enseñanza de la Física (GRINCEF) adscrito al Departamento de Física y Matemática del Núcleo Universitario Rafael Rangel (NURR) de la Universidad de Los Andes en Trujillo, y su financiamiento se debe al Fondo Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (FONACIT) adscrito al Ministerio del Poder Popular para Ciencia Tecnología e Innovación (MppCTI) de nuestro país.

Finalmente, queremos expresar nuestro agradecimiento a las diferentes Instituciones de educación media general de los estados Trujillo, Mérida y Barinas donde nos permitirán implantar este proyecto.



Introducción

Desde la descripción de los primeros fenómenos eléctricos hasta hace poco más de dos siglos los avances que se han producido en el estudio de la electricidad fueron bastante lentos. En el siglo XVIII, Benjamín Franklin (1706-1790) voló una cometa con la intención de “capturar la electricidad” de las nubes tormentosas. A partir de aquí muchos científicos experimentaron con las cargas eléctricas en sus laboratorios y observaron que estas pueden originar chispas eléctricas. En 1787, Luigi Galvani (1737-1798) observó que al poner tejido de animal muerto en contacto con dos metales conductores, los músculos se contraían. Luego, Alessandro Volta (1745-1827) se enteró de este suceso, y en sus estudios posteriores consiguió desarrollar un instrumento capaz de producir cargas eléctricas al que llamó electróforo. En 1800 Volta anunció haber encontrado una fuente de electricidad: era la primera pila eléctrica. Una vez diseñada la pila eléctrica, los científicos contaron con una fuente estable de corriente eléctrica que les permitía continuar con sus investigaciones.

En 1820, Hans Christian Oersted (1777-1851) encontró que existe una relación muy estrecha entre los fenómenos eléctricos y magnéticos de la materia. Surgió así el electromagnetismo, y se inventó un dispositivo fascinante para la época, el electroimán. En las primeras décadas del siglo XIX, Michael Faraday (1791-1867) realizó importantes descubrimientos que permitieron comprender el electromagnetismo. Sus trabajos facilitaron el desarrollo del generador eléctrico y del motor eléctrico. En 1870, Thomas Alva Edison (1847-1931) fabricó bombillos y otros elementos para facilitar el uso de la energía eléctrica en los hogares. Se inventaron aparatos para hacer más fácil y cómoda la vida doméstica: planchas, estufas, cocinas eléctricas, entre otros.

Otro descubrimiento importante fue el del telégrafo, perfeccionado por Samuel Morse (1791-1872) en 1837. A partir de aquí se abrió una importante vía en el desarrollo de las comunicaciones.



En 1880, Heinrich Hertz (1857-1894), basándose en la teoría del electromagnetismo propuesta por James C. Maxwell (1831-1879), demostró la existencia de ondas que podían ser detectadas a distancia. Esto permitió un avance espectacular en el campo de las comunicaciones sin hilos. Se inventaron la radio y la televisión.

A partir del siglo XX, los avances en el estudio de la electricidad fueron más acelerados. Una de las derivaciones del *proyecto Manhattan* fue el impulso que recibió la electrónica, sentando las bases prácticas para el desarrollo de los computadores. Surge entonces la era electrónica propiamente dicha. Es Fleming quien introduce estudios a la electrónica de vacío en 1904 y crea la válvula de vacío diodo (primera generación en electrónica), y poco más tarde Lee de Forest (1873-1961) inventa en 1906 la válvula amplificadora tríodo. La Compañía System Bell da uso comercial en telefonía de la válvula amplificadora de vacío en 1915.

Se arriba a la era cibernética. Norbert Wiener (1894-1964) la define como *feed-back* (analogía del mecanismo de control en barcos de navegación) y funda la teoría del control automático en 1948; Shannon (1916-2001) por su parte funda la teoría de la información en 1948. Se llega a un momento culminante, donde Jhon Bardeen (1908-1991) y Brattain (1902-1987) inventan el transistor de contacto puntual en 1948 (segunda generación en electrónica). Esto induce a William Shockley (1910-1989) a mejorarlo con el transistor de unión (o también llamado de *juntura*) en 1951, determinando con ello la confección de distintos componentes electrónicos desde aproximadamente 1949 y es el inicio de la electrónica moderna. La ingeniería sigue en boga. Se logra la gran integración de materiales electrónicos semiconductores (tercera generación en electrónica), circuito integrado o “chip” que determinará la invención de la computadora (con “chip” y digital).



Equipos de medidas eléctricas

Medir, es la comparación de la magnitud que se está midiendo con un patrón de medidas. Los resultados de las medidas son números que, por diversas causas (que van desde el propio procedimiento hasta fallos del experimentador), presentan errores y son, por tanto, números aproximados. Lo importante en una medida es encontrar el número aproximado y estimar el error que se comete al tomar ese valor. En consideración a lo expuesto, es necesario definir algunos conceptos.

Apreciación

La apreciación de un instrumento de medida es la mínima variación de magnitud que se puede determinar sin error, es la menor división en la escala de un instrumento.

Un instrumento será tanto más preciso cuanto mayor sea el número de cifras significativas que puedan obtenerse con la apreciación. La apreciación de un instrumento en una sola escala se determina, escogiendo dos valores sobre la escala, que pueden ser consecutivos o no. Se hace la diferencia del valor mayor (n) menos el valor menor (m) y se divide entre el número de divisiones de la escala, esto es:

$$A_p = \frac{n - m}{\#divisiones}$$

Ejemplo 1

La figura 1 muestra un amperímetro con una escala de 0 a 5 miliamperios (mA) con 25 divisiones. La apreciación de este instrumento monoescala es:

$$A_p = \frac{5 - 0}{25} = 0,2$$

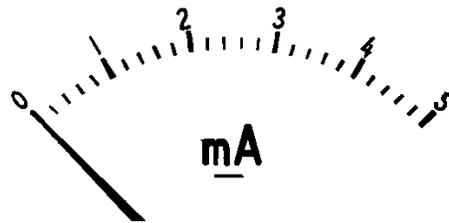


Figura 1: Amperímetro monoescala.

NOTA: Para los instrumentos de medida que posean más de una escala, el cálculo de su apreciación es distinto al utilizado en el ejemplo 1.

Sensibilidad

Es el cociente entre la resistencia interna del instrumento y el valor máximo del rango del instrumento, esto es:

$$S = \frac{R_i}{V_m}$$

La sensibilidad de un voltímetro es un factor importante al momento de medir voltajes en circuitos altamente resistivos; ya que si la sensibilidad es pequeña, el medidor reducirá la resistencia equivalente indicando un voltaje menor que el que existe entre esos dos puntos del circuito.

Calibración

Para garantizar la uniformidad y la precisión de las medidas, los medidores eléctricos se calibran conforme a los patrones de medidas aceptados para una determinada unidad eléctrica, como el ohmio (Ω), el amperio (A), el voltio (v) o el vatio (w).

Los instrumentos de medición se pueden clasificar en dos grupos: Analógicos y Digitales.



Instrumentos Analógicos

Son instrumentos que indican la lectura por medio de la posición de la aguja sobre una escala (Figura 1). Estos pueden ser electromecánicos y electrónicos. El componente básico de este tipo de instrumento es un galvanómetro que al incorporarle otros elementos se convierte en amperímetro o voltímetro, tanto de corriente directa (dc) como de corriente alterna (ac).

Instrumentos Digitales

Indican el resultado por medio de dígitos en una pantalla de cristal líquido; estos instrumentos eliminan el error de paralaje, reducen los errores de lectura y reducen el tiempo para obtener la respuesta. El multímetro a utilizar en las experiencias es un instrumento digital.



La construcción de medidores más exactos y versátiles ha sido posible gracias al gran avance tecnológico de los circuitos integrados. Estos instrumentos pueden ser de: rampa integrador, de balance continuo y de aproximación sucesiva.

Análisis de circuitos eléctricos

En 1845 el físico ruso Gustav Kirchhoff (1824-1887) enunció dos leyes aplicables al cálculo de voltajes, intensidades de corriente y resistencias en una malla eléctrica, entendidas como una extensión de la ley de la conservación de la energía.

Considera el circuito eléctrico de la figura 2. Los puntos a y d donde concurren más de dos conductores se denominan nodos. Las trayectorias cerradas, tales como abcda y afeda se denominan mallas. Las corrientes i_1 , i_2 e i_3 se han indicado de forma arbitraria, se considera que un conductor transportará la misma corriente mientras no encuentre un nodo; así la corriente i_1 circula desde el punto d pasando por R_1 y R_2 hasta llegar al nodo a donde se encuentra dos vías y se divide en i_2 e i_3 que circulan por R_3 y R_4 , V_2 y R_5 , respectivamente, hasta encontrarse en el nodo d donde se unen para formar otra vez la corriente i_1 .

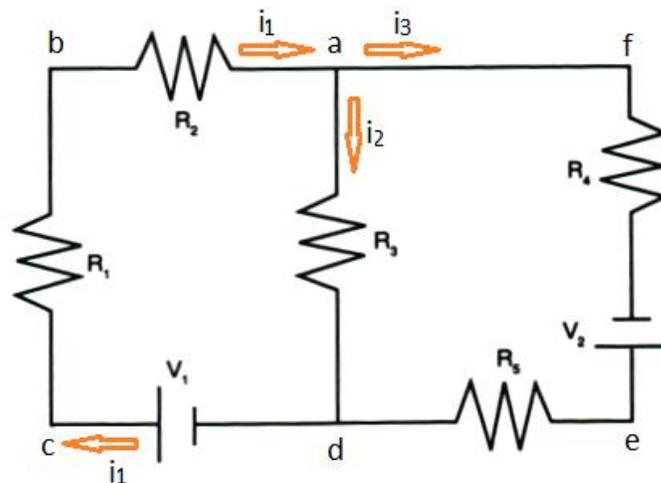


Figura 2: Circuito eléctrico de dos mallas.



Para analizar el circuito eléctrico de la figura 2, se hará uso de las dos leyes de Kirchhoff.

Leyes de Kirchhoff

Ley de los nodos: la suma de las corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen del mismo. En el nodo a se cumple:

$$i_1 = i_2 + i_3$$

Ley de las mallas: en una malla cerrada, la suma algebraica de las caídas de potencial en cada resistencia y los voltajes de las fuentes (pilas) es igual a cero.

Para efectuar la suma algebraica, hay que considerar los signos de las caídas de potencial y de los voltajes de las pilas, que por convención serán:

- (i) Al recorrer una resistencia en el mismo sentido de la corriente, el voltaje es $-iR$.
- (ii) Al recorrer una resistencia en el sentido contrario a la corriente, el voltaje es $+iR$.
- (iii) Al recorrer una fuente de corriente continua (pila) del terminal negativo al terminal positivo el voltaje es $+V$.
- (iv) Al recorrer una fuente de corriente continua (pila) del terminal positivo al terminal negativo el voltaje es $-V$.

El sentido recorrido en cada malla se elige en forma arbitraria (en el sentido de las agujas del reloj, sentido horario, o en el sentido opuesto, sentido anti-horario) y se anotan los voltajes que se van encontrando con su signo. En la figura 3 se ha elegido el sentido horario para las dos mallas del circuito de la figura 2. Así, el análisis del circuito se realiza describiendo las trayectorias en las dos mallas de la forma siguiente;

Malla I (abcd):

Los voltajes de las fuentes (pilas) son: V_1

Las caídas de potencial son: i_1R_1 , i_1R_2 e i_2R_3

Recorriendo la malla en el sentido indicado, se obtiene:

$$+ V_1 - i_1 R_1 - i_1 R_2 - i_2 R_3 = 0 \quad (1)$$

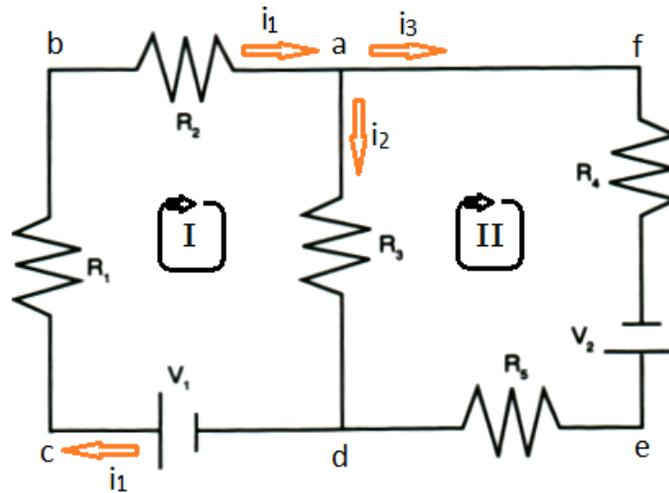


Figura 3: Elección del sentido del recorrido en las mallas de un circuito.

Malla II (afeda):

Los voltajes de las fuentes (pilas) son: V_2

Las caídas de potencial son: $i_3 R_3$, $i_3 R_5$ e $i_3 R_2$

Recorriendo la malla en el sentido indicado, se obtiene:

$$+ V_2 - i_3 R_3 - i_3 R_5 + i_3 R_2 = 0 \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) forman un sistema en el cual las incógnitas son las corrientes (generalmente se conocen los valores de las resistencias y los voltajes de las fuentes), que junto con la ecuación de la ley de los nodos puede resolverse para un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas.



Potencia eléctrica

La potencia eléctrica consumida en una resistencia es el producto de la caída de potencial en la resistencia y la corriente que circula por ella:

$$P = V \cdot i$$

Aplicando la definición de resistencia mediante la ley de Ohm, puede escribirse:

$$P = Ri^2 = V^2/R$$

En el sistema internacional de unidades, la unidad de potencia eléctrica es el vatio (w);

$$1 \text{ vatio} = 1 \text{ voltio} \times 1 \text{ Amperio}$$

Ley de Joule

La potencia eléctrica consumida por un elemento cualquiera entre dos puntos de un circuito se mide por la energía (W) que suministra el generador por unidad de tiempo, esto es:

$$P = W/t$$

Si el elemento conectado en el circuito es una resistencia, esta energía o trabajo se transforma en calor.

Para reducir unidades de trabajo a unidades de calor se multiplica por un coeficiente α , llamado equivalente térmico del trabajo, cuyo valor es $\alpha = 0,24 \text{ cal/Joule}$. Designando por Q la cantidad de calor equivalente al trabajo W, se cumple:

$$Q = 0,24 P \cdot t$$



La potencia es la rapidez con la cual se produce o transforma la energía, cuando se transforma en calor, como en las resistencias al multiplicar por el equivalente mecánico del calor, se obtiene el calor Q generado en la resistencia. De la definición de potencia, podemos escribir:

$$Q = 0,24 V \cdot i \cdot t \text{ (cal)} = 0,24 i^2 \cdot R \cdot t \text{ (cal)}$$

Ejemplo 1

Considera dos resistencias de 100Ω y 330Ω conectadas en paralelo a una pila de 9 voltios. Determina la intensidad de corriente total que pasa por el circuito y la resistencia equivalente.

Solución:

Para dos resistencias conectadas en paralelo, la resistencia equivalente viene dada por la ecuación:

$$R_e = (R_1 R_2) / (R_1 + R_2) = 76,7 \Omega$$

La corriente total que pasa por esta resistencia equivalente se determina mediante la ecuación que describe la ley de Ohm, ya que la pila le entrega un voltaje de 9 voltios a esta resistencia.

$$i = V / R_e = 0,12 \text{ A}$$

Ejemplo 2

Un bombillo de intensidad de corriente 0,5 A esta conectado a una pila de 12,0 v. Determina la potencia eléctrica y la energía que consume si esta encendido durante 10 minutos.



Solución:

De la definición de potencia eléctrica, se tiene:

$$P = V.i = 12,0 \text{ v} \times 0,5 \text{ A} = 6,0 \text{ w}$$

La energía que consume será:

$$W = P.t = 6,0 \text{ w} \times 600,0 \text{ s} = 3600,0 \text{ Joules}$$

ACTIVIDADES

1. Determina la resistencia equivalente y la potencia total para una asociación de resistencias serie-paralelo conectada a una pila de 5 v. La resistencia en serie es de 10Ω y el paralelo está formado por dos resistencias de 20Ω y 40Ω .

2. Un bombillo tiene la siguiente inscripción: 25 w, 110 v. Determina: (a) la intensidad de la corriente que pasa por él cuando está conectado a 110 v (b) La resistencia del filamento (c) la energía que consume en 2 horas (d) las calorías que desprende en 5 minutos.

3. Usted dispone de tres resistencias cuyos valores son 10Ω , 20Ω y 60Ω , respectivamente. ¿Cuál es el valor de la resistencia equivalente en cada uno de los casos siguientes? (a) si colocamos las tres resistencias en serie (b) si colocamos las resistencias en paralelo (c) si colocamos en serie las dos primeras con la tercera en paralelo.

4. ¿Cuál es la energía que consume en 10 minutos un bombillo de 60 w conectado a un voltaje de 110 v?

5. Una cocina eléctrica de 50Ω de resistencia se conecta a un voltaje de 110 v durante 20 minutos. Determina: (a) la intensidad de la corriente (b) la energía que se desprende en forma de calor.

6. Determina las intensidades de corriente en el circuito de la figura 2, considerando: $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$, $R_3 = 50 \Omega$, $R_4 = 100 \Omega$, $R_5 = 100 \Omega$, $V_1 = 5 \text{ v}$, $V_2 = 10 \text{ v}$.

Los condensadores

Existen muchos tipos de condensadores, pero todos ellos tienen la misma finalidad: almacenar electrones. Un condensador simple se forma por dos placas conductoras separadas por un material aislante llamado el dieléctrico.

La figura 4 muestra un esquema de un condensador simple. El dieléctrico puede ser papel, plástico, mica, vidrio, cerámico, aire o el vacío. Las placas conductoras pueden ser discos de Aluminio, láminas de Aluminio o películas delgadas de un metal colocadas a los lados opuestos del dieléctrico.

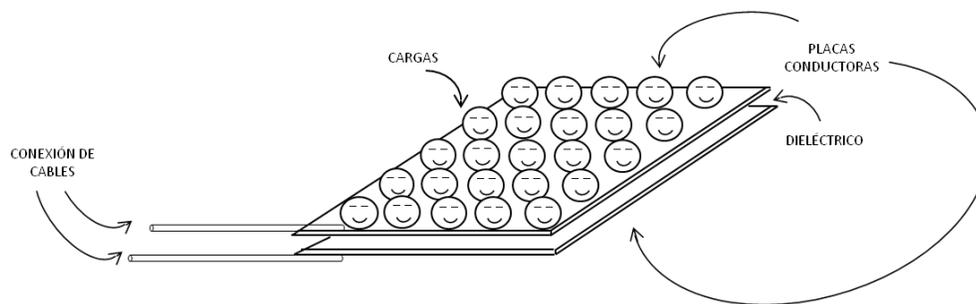


Figura 4: Esquema de un condensador simple.

Capacitancia de un condensador

La capacidad de un condensador para almacenar electrones es conocida como capacitancia. La capacitancia viene expresada en unidades de Faradios. Un condensador de un Faradio (1F) conectado a una fuente de un voltio (1V) puede almacenar $6,28 \times 10^{18}$ electrones. Por lo que la unidad de Faradio es muy grande, encontrando en los condensadores comerciales submúltiplos de esta unidad, esto es, picofaradios (pF) y microfaradios (μ F).



Los submúltiplos de la unidad Faradio mas utilizados son:

$$1 \text{ milifaradio} = 1\text{mF} = 1 \times 10^{-3} \text{ F}$$

$$1 \text{ microfaradio} = 1\mu\text{F} = 1 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$1 \text{ picofaradio} = 1\text{pF} = 1 \times 10^{-9} \text{ F}$$

PRECAUCIÓN

Debe asegurarse de que el condensador que va a utilizar cumple o excede el voltaje nominal requerido. De lo contrario, su dieléctrico puede ser dañado por la carga almacenada. El voltaje nominal generalmente viene impreso sobre el condensador.

Precaución al sustituir un condensador



Tipos de condensadores

Los condensadores son etiquetados de acuerdo con sus dieléctricos. Así, se pueden encontrar referencias de condensadores cerámicos, de mica, polietileno y muchos otros. Estos condensadores tienen un valor fijo. Algunos condensadores tienen una capacitancia variable y una clase especial de condensadores fijos tiene mucho más capacitancia que otros condensadores.

Los condensadores variables usualmente tienen una o más placas conductoras fijas y una o mas placas conductoras moviéndose. La capacitancia cambia la rotar una varilla colocada a un lado de las placas móviles. Este tipo de condensador es usado para sintonizar los receptores y transmisores de radio. El dieléctrico en ellos es el aire. La figura 5 muestra un esquema de estos tipos de condensadores.

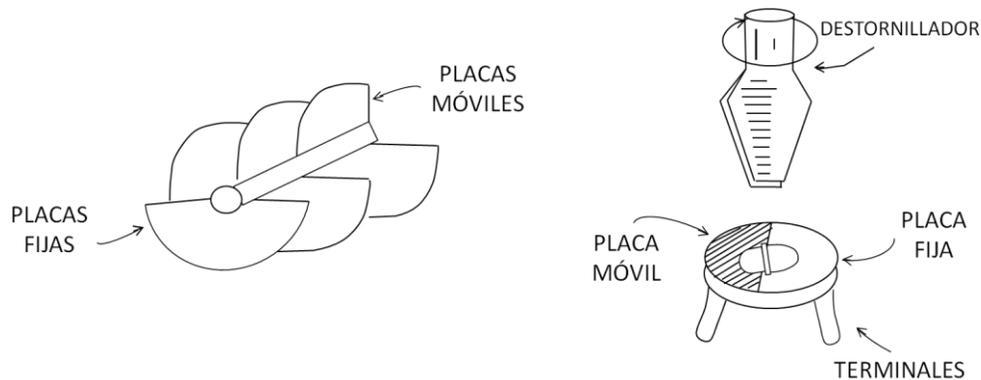


Figura 5: Esquema de condensadores variables.

Condensadores Electrolíticos

En estos condensadores el dieléctrico es una capa fina de óxido formada sobre una lámina de aluminio o tantalio. Poseen una mayor capacitancia que los condensadores tipo no-electrolíticos.

Los condensadores electrolíticos de tantalio tienen mayor capacitancia por volumen y un mayor tiempo de vida útil que los condensadores electrolíticos de aluminio, pero son más costosos. La mayoría de los condensadores electrolíticos están polarizados, es decir, tienen un terminal negativo y otro positivo que deben conectarse al circuito en la dirección apropiada. La figura 6 muestra un esquema de los condensadores electrolíticos.

CONDENSADORES ELECTROLÍTICOS

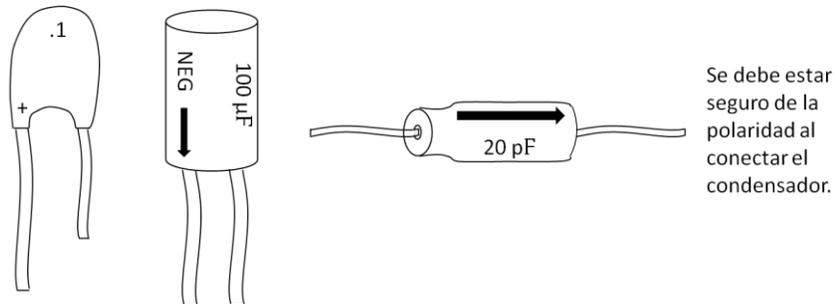
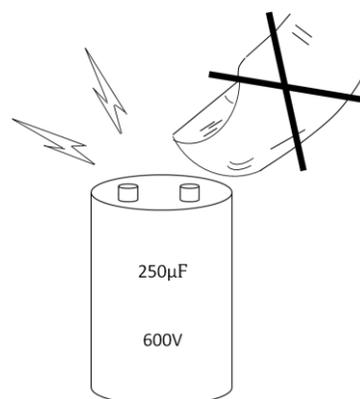


Figura 6: Esquema de condensadores electrolíticos.

¡ADVERTENCIA!

Los condensadores pueden almacenar una carga por un tiempo considerable, después que la potencia a ellos haya sido desconectada. Esta carga puede ser PELIGROSA en un gran condensador electrolítico cargado a tan solo 5 o 10 Voltios, pudiendo fundir la punta de un destornillador que se coloque entre sus terminales. Los condensadores de alto voltaje, como los usados en los televisores, pueden almacenar una carga letal. NUNCA toque los cables que van a los terminales de tal condensador.





Simbología de un condensador

En la figura 7 se representa la simbología (eléctrica) de un condensador fijo y un condensador variable.

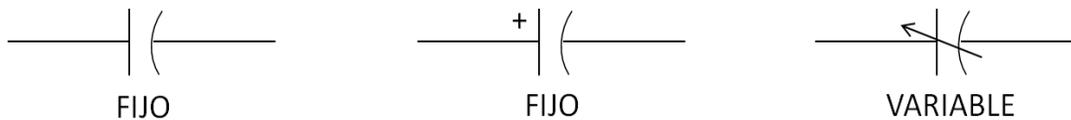
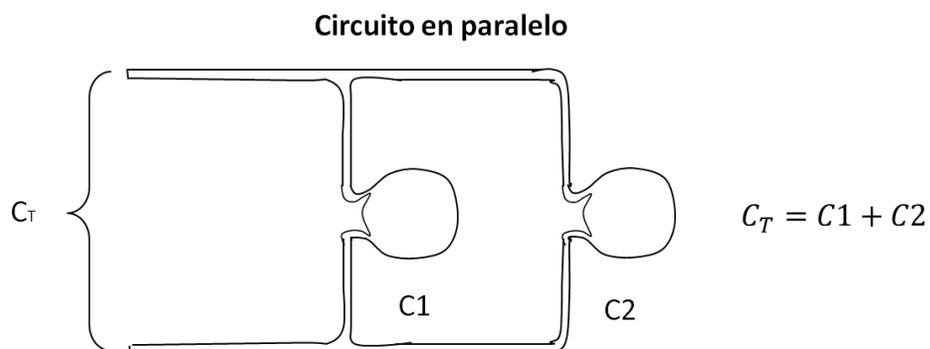


Figura 7: Simbología de un condensador fijo y uno variable.

Condensadores en paralelo

En un circuito de condensadores en paralelo, la capacitancia total es la suma de las capacitancias individuales.



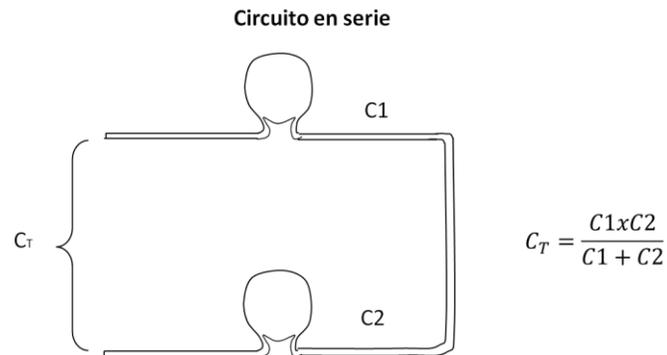
Para un circuito de dos condensadores en paralelo se cumple:

$$C_T = C_1 + C_2$$



Condensadores en serie

En un circuito de condensadores en serie, el inverso de la capacitancia total es la suma de los inversos de las capacitancias individuales.



Para un circuito de dos condensadores en serie se tiene:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

que luego de algunas operaciones se convierte en:

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

ACTIVIDADES

1. Determine la capacitancia total para dos condensadores de 100 μF ; (a) conectados en serie y (b) conectados en paralelo.
2. Determine la capacitancia total para dos condensadores de 330 μF ; (a) conectados en serie y (b) conectados en paralelo.
3. Determine la capacitancia total para dos condensadores de 100 μF y 330 μF ; (a) conectados en serie y (b) conectados en paralelo.



Los diodos semiconductores

Los componentes electrónicos más interesantes e importantes están hechos de cristales llamados semiconductores. Dependiendo de ciertas condiciones, un semiconductor puede actuar como un conductor o como un aislante.

EL SILICIO

Existen diversos materiales semiconductores, pero el Silicio (el ingrediente principal de la arena) es el más popular. Un átomo de Silicio tiene cuatro electrones en su capa más externa (también llamados electrones de valencia), pero le gustaría tener ocho. Por lo tanto, un átomo de Silicio se unirá con cuatro de sus vecinos para compartir sus electrones.

Un grupo de átomos de Silicio que comparten sus electrones externos, forman una disposición regular llamada un cristal. La figura 8 muestra un esquema del átomo de Silicio junto a una vista ampliada de un cristal de Silicio. Para mantener las cosas simples, solo se muestran los electrones externos de cada átomo.

¡Sabias qué!

El Silicio forma un 27,7% de la corteza terrestre. Solo el Oxígeno está presente en mayor porcentaje. Nunca se encuentra en el estado puro. Cuando se purifica, su color es gris oscuro.

El Silicio y el Diamante tienen la misma estructura cristalina y otras propiedades, pero el Silicio no es transparente como lo es el Diamante.

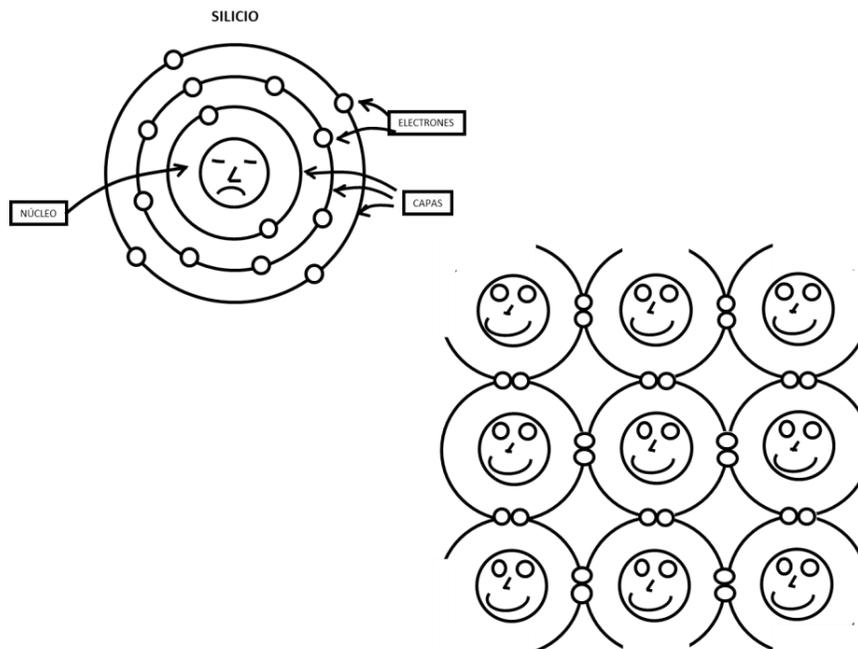


Figura 8: Esquema del átomo de Silicio junto a una vista ampliada de un cristal de Silicio.

El Silicio puro no es muy útil, es por eso que los fabricantes de semiconductores de Silicio, “condimentan” sus recetas con una pizca de Fosforo, Boro y otros elementos químicos. Esto se conoce como dopando el Silicio. Cuando se crecen cristales de Silicio dopado, estos adquieren propiedades electrónicas muy útiles.

Semiconductores de Silicio tipo-p y tipo-n

El Boro, el Fosforo y otros átomos de ciertos elementos químicos, pueden unirse con átomos de Silicio para formar cristales. Lo que sucede es lo siguiente: un átomo de Boro solo tiene tres electrones en su capa mas externa, mientras que un átomo de Fosforo tiene cinco electrones en su capa mas externa. El Silicio con electrones extra de los átomos de Fosforo es llamado tipo-n (negativo), mientras que el Silicio con un electrón deficiente de los átomos de Boro es llamado silicio tipo-p (positivo).

La figura 9 muestra un esquema de un semiconductor de Silicio dopado con Boro (tipo-p) y dopado con Fosforo (tipo-n).

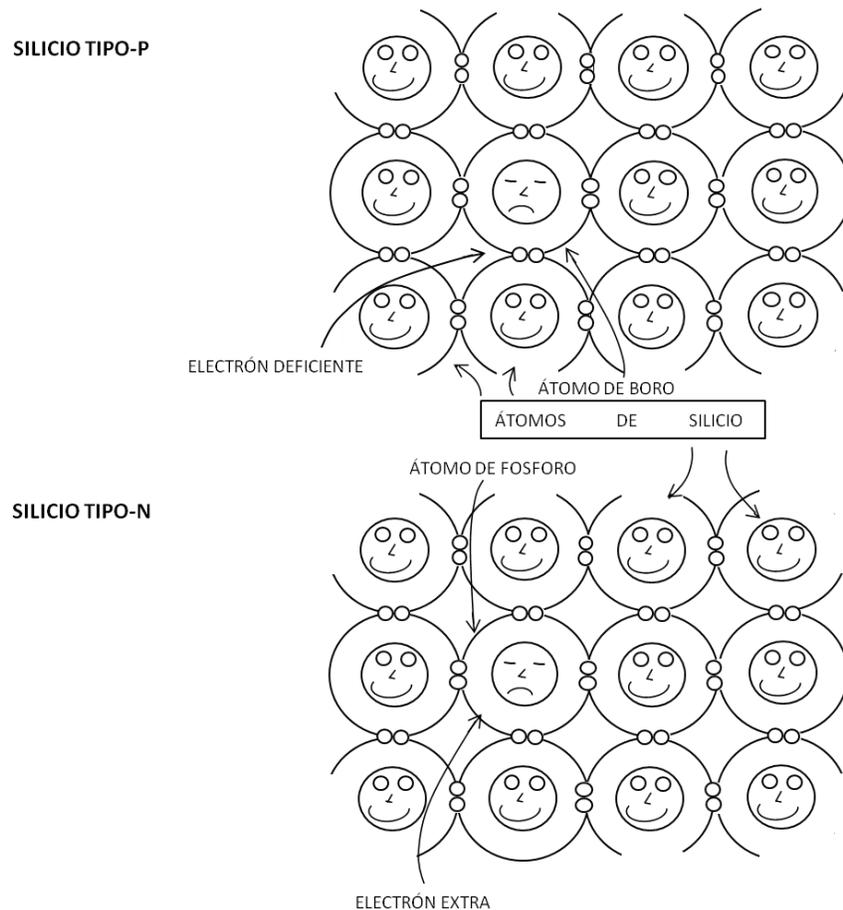


Figura 9: Esquema de un semiconductor de Silicio dopado con Boro y Fosforo.

Un átomo de Boro en un grupo de átomos de Silicio deja una abertura de electrones vacantes llamado un hueco. Es posible que un electrón de un átomo vecino caiga dentro del hueco. Por lo tanto, el hueco se ha movido a una nueva ubicación. Los huecos pueden moverse a través del cristal de Silicio (así como las burbujas se mueven a través del agua).



EL DIODO

Tanto el Silicio tipo-p como el tipo-n conducen electricidad. La resistencia de ambos tipos (de Silicio) está determinada por la proporción de huecos o el exceso de electrones. Por lo tanto, ambos tipos pueden funcionar como resistores y podrían conducir electricidad en cualquier dirección.

Mediante la formación de algunos cristallitos de Silicio tipo-p en un cristal de Silicio tipo-n, los electrones podrán fluir (moverse) a través del cristal de Silicio en una sola dirección. Este es el principio del diodo. La intercara entre los cristales p y n es llamada unión p-n.

¿Cómo funciona un diodo semiconductor?

Existe una explicación simplificada de cómo un diodo conduce electricidad en una dirección (polarización directa) mientras bloquea el flujo de corriente en la dirección opuesta (polarización inversa).

En la polarización directa, la carga de la pila repele los huecos y los electrones hacia la unión. Si el voltaje excede 0,6 voltios (para el Silicio), entonces los electrones atravesarán la unión y se combinarán con los huecos. Así, la corriente fluirá en el diodo.

En la polarización inversa, la carga de la pila atrae los huecos y los electrones lejos de la unión. Por lo tanto no hay flujo de corriente en el diodo. La figura 10 muestra un esquema de la polarización directa e inversa de un diodo.

El diodo común

Los diodos generalmente están confinados en pequeños cilindros de vidrio. Una banda oscura señala el terminal del cátodo (negativo) y el terminal opuesto es el ánodo (positivo). La corriente fluye en el diodo cuando el ánodo es más positivo que el cátodo.

La figura 11 muestra un esquema del diodo junto a su simbología eléctrica.

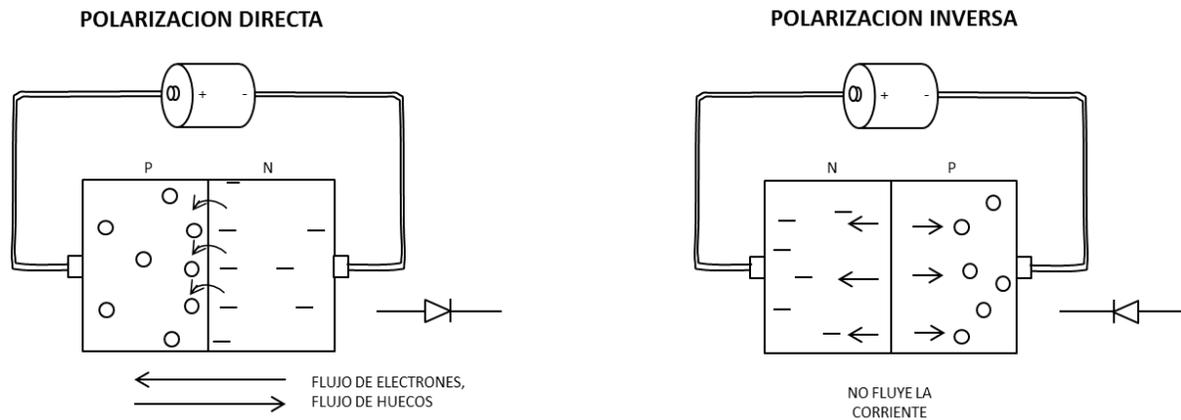


Figura 10: Polarización directa e inversa de un diodo.

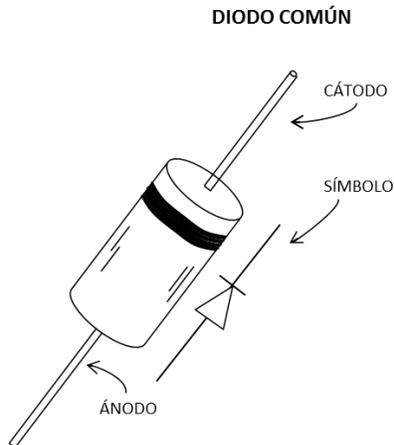


Figura 11: Esquema de diodo común junto a su simbología eléctrica.

Tipos de diodos

Algunos de los principales tipos de diodos se describen a continuación.



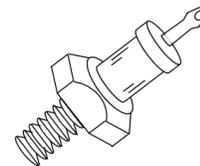
Diodo Rectificador de Señal: se utilizan para transformar corrientes alternas (ca) bajas a corrientes continuas (cc), detectar señales de radio, multiplicar voltajes, absorber picos de tensión, entre otros.

DIODO DE PEQUEÑA SEÑAL



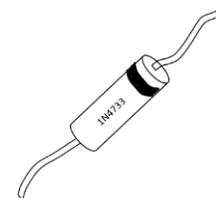
Diodo Rectificador de Potencia: funciona de manera similar al diodo rectificador de señal, pero puede conducir corrientes mayores. Están instalados en grandes paquetes metálicos que absorben el exceso de calor y lo transfieren a un disipador térmico de metal. Se utilizan principalmente en fuentes de alimentación (fuentes de potencia).

DIODO RECTIFICADOR DE POTENCIA



Diodo Zener: está diseñado para tener una tensión de ruptura inversa específica (conducción). Esto significa que un diodo Zener puede funcionar como un interruptor sensible a voltaje. Los diodos Zener tienen voltajes de ruptura (V_z) de aproximadamente 2 voltios a 200 voltios.

DIODO ZENER



Diodo Emisor de Luz: algunos diodos formados de ciertos semiconductores, como el Galio y el Arseniuro de Fósforo, emiten considerablemente más radiación que los diodos de Silicio. Estos son conocidos como diodos emisores de luz o LED por sus siglas en inglés (Light Emitter Diode).

DIODO EMISOR DE LUZ



Fotodiodos:

Todos los diodos responden en cierto grado cuando son iluminados. Los diodos diseñados específicamente para detectar luz son llamados fotodiodos. Estos diodos incluyen una ventana de vidrio o plástico a través de la cual la luz entra.

FOTODIODO



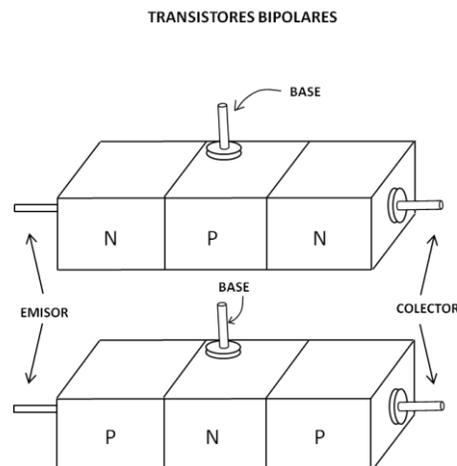


EL TRANSISTOR

Los transistores son dispositivos semiconductores con tres terminales (conductores). Una corriente muy pequeña (o voltaje) en uno de los terminales puede controlar una corriente mucho mayor que fluye a través de los otros dos terminales. Esto significa que los transistores pueden ser usados como amplificadores e interruptores. Existen dos familias de transistores principales: los bipolares y los de efecto de campo.

Los Transistores Bipolares

En estos transistores se agrega una segunda unión a un diodo de unión p-n para formar un sándwich de silicio de tres capas. Este sándwich puede ser n-p-n o p-n-p. De cualquier manera, la capa intermedia actúa como una compuerta que controla la corriente que se mueve a través de las tres capas.

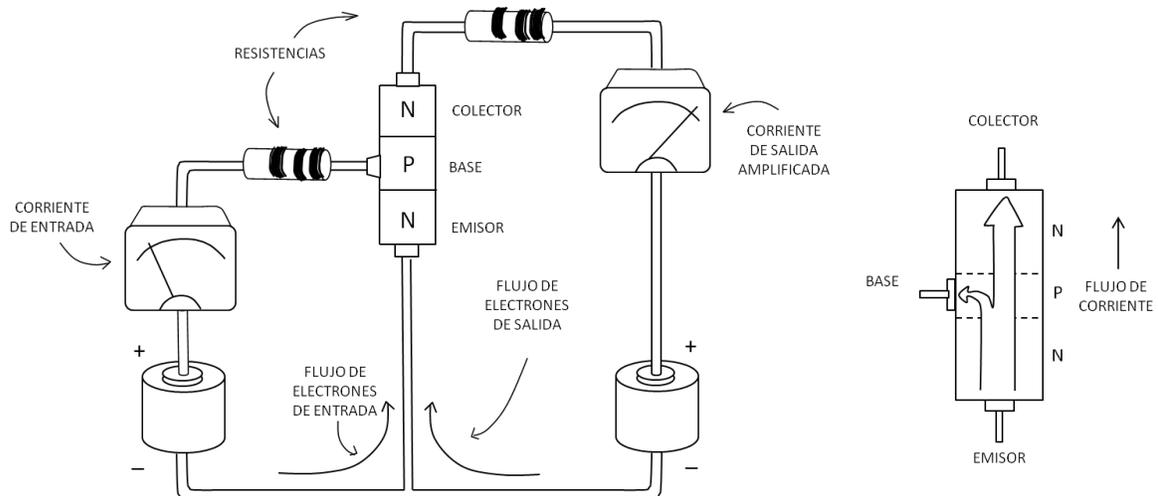


¿Cómo funciona un transistor bipolar?

Las tres capas de un transistor bipolar son conocidas como el emisor, la base y el colector. La base es muy delgada y posee un número menor de átomos de dopaje que el emisor y el colector. Por lo tanto, una corriente de emisor-base muy pequeña provocará una corriente de emisor-colector mucho más grande para fluir.

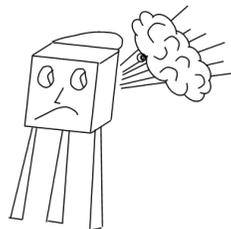
Por otra parte, las resistencias protegen los transistores de un exceso de corriente, que puede causar un calor excesivo y dañarlos.

FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSISTOR BIPOLAR



Otros aspectos a tener en cuenta sobre el funcionamiento de un transistor son:

1. La unión base-emisor (o diodo) no conduce hasta que el voltaje excede los 0,6 v.
2. Demasiada corriente hará que el transistor funcione de manera incorrecta.
3. Demasiada corriente o voltaje puede dañar o destruir permanentemente el chip semiconductor que forma un transistor. Si el chip no se ve perjudicado, sus diminutos cables de conexión pueden derretirse y separar el chip.

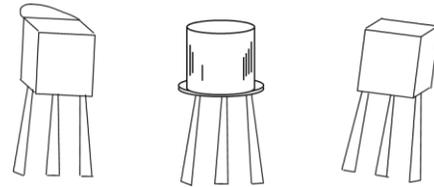




Tipos de transistores bipolares. Los mas importantes son:

Transistores amplificadores de señal y de conmutación: los transistores amplificadores se utilizan para amplificar señales de bajo nivel. Los transistores de conmutación están diseñados para funcionar totalmente en encendido o apagado.

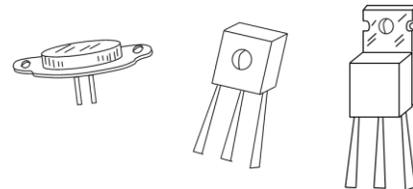
TRANSISTORES AMPLIFICADORES Y CONMUTADORES



Algunos transistores pueden tanto amplificar como conmutar de igual forma.

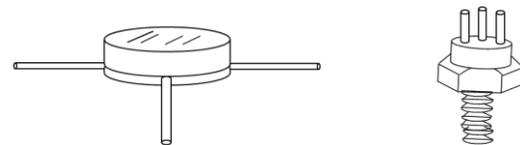
Transistores de potencia: se utilizan en amplificadores de alta potencia y fuentes de alimentación. Son de gran tamaño y las superficies metálicas expuestas deben mantenerse frescas.

TRANSISTORES DE POTENCIA



Transistores de alta frecuencia: funcionan a las frecuencias de radio, televisión y microondas. La región de la base es muy delgada y el chip actual es muy pequeño.

TRANSISTORES DE ALTA FRECUENCIA



La figura 12 muestra un esquema del transistor bipolar junto a su simbología eléctrica.

SIMBOLOGÍA DEL TRANSISTOR BIPOLAR

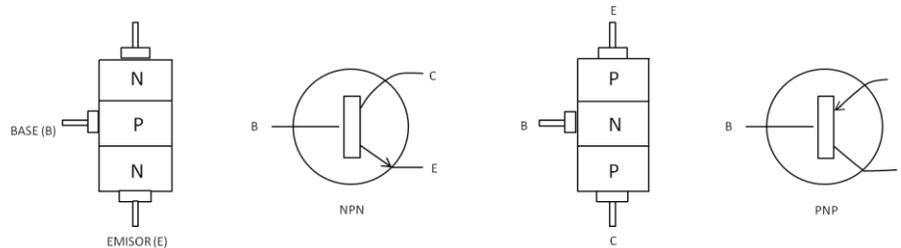


Figura 12: Esquema de un transistor bipolar junto a su simbología.



Leyes de Kirchhoff

OBJETIVO

Demostrar experimentalmente las leyes de Kirchhoff.

INTRODUCCIÓN

Las reglas que postulo Kirchhoff sirven para analizar un circuito eléctrico y son las siguientes:

1^{era} ley o ley de los nodos.

La suma algebraica de las intensidades de corriente que concurren en un nodo es igual a cero. Esto es, las corrientes que llegan a un nodo son iguales a las que salen de él.

$$\sum i = 0$$

2^{da} ley o ley de las mallas.

La suma algebraica de las fuerzas electromotrices (fem) o voltajes de las fuentes y las caídas de tensión en las resistencias conectadas en una malla es igual a cero.

$$\sum \varepsilon - iR = 0$$

ACTIVIDADES

1. Conecte el circuito que se muestra en la figura 13.a, utilizando cualquiera de las resistencias que se encuentran en el módulo, excepto la de 220 K Ω . Use la figura 13.b como referencia. Anote los valores de las resistencias utilizadas en la tabla 1. Con la pila desconectada mida el valor de la resistencia total del circuito entre los puntos A y B.



2. Con el circuito conectado a la pila, mida el voltaje a través de cada resistencia y anote los resultados en la tabla 1. Sobre el diagrama de la figura 13.b indique la polaridad de cada resistencia colocando “+” ó “-” en sus extremos.

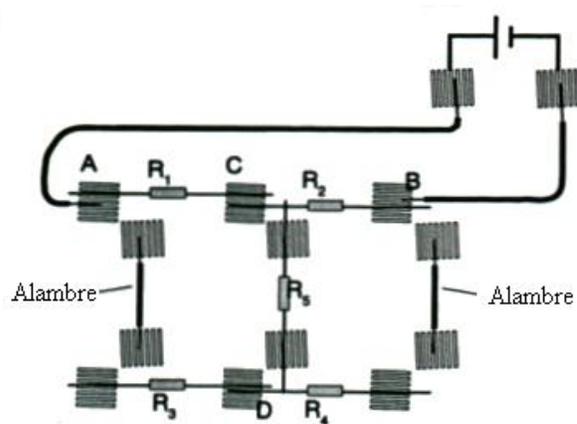


Figura 13.a: Montaje del circuito.

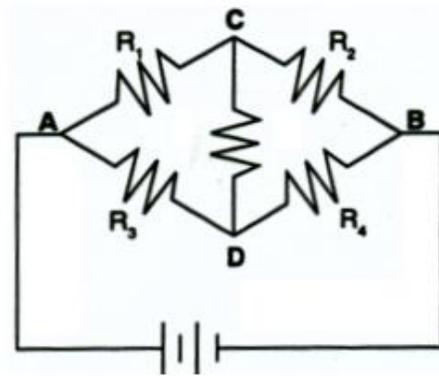


Figura 13.b: Puente de Wheasthone.

3. Mida la corriente a través de cada resistencia. Interrumpa el circuito colocando el multímetro en serie para obtener la medida. Asegúrese de anotar cada una de las corrientes individuales, como también la corriente principal del circuito, I_T .

4. Determine (teóricamente) la corriente neta que fluye a través de cada uno de los cuatro nodos del circuito.

5. Determine (teóricamente) la caída de voltaje a través de cada una de las resistencias.

6. Use sus resultados experimentales para analizar el circuito construido en términos de las leyes de Kirchhoff. Compare los resultados experimentales con los teóricos. Sea específico y postule la evidencia de sus conclusiones.



Resistencias (Ω)	Voltaje (v)	Corriente (A)
$R_1 =$	$V_1 =$	$I_1 =$
$R_2 =$	$V_2 =$	$I_2 =$
$R_3 =$	$V_3 =$	$I_3 =$
$R_4 =$	$V_4 =$	$I_4 =$
$R_5 =$	$V_5 =$	$I_5 =$
$R_T =$	$V_T =$	$I_T =$

Tabla 1: Puente de Wheasthone.



CIRCUITO RC

OBJETIVO

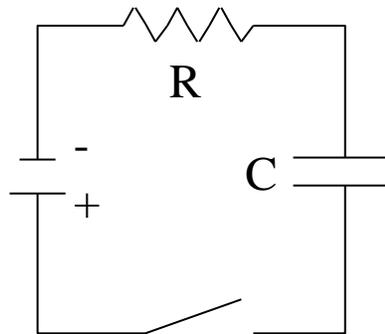
Determinar el comportamiento de un circuito RC.

Analizar las asociaciones de los condensadores en serie y en paralelo.

INTRODUCCIÓN

Un condensador o capacitor es un dispositivo que tiene como función almacenar energía eléctrica (dentro de un campo eléctrico) para su posterior utilización. Un circuito RC es una combinación en serie de un condensador y una resistencia. En estos circuitos la corriente puede variar con el tiempo.

Cuando una fuente de voltaje (pila) se conecta a un condensador descargado, la velocidad a la cual el condensador se carga disminuye con el tiempo.



Al principio, el condensador se carga fácilmente porque hay una carga pequeña entre las placas. Pero cuando la carga se acumula entre las placas, la fuente de tensión debe "hacer más trabajo" para poner carga adicional en las placas porque las placas ya tienen una carga del mismo signo.



Como resultado, el condensador se carga exponencialmente, rápidamente en el comienzo y más lentamente cuando el condensador llega a estar completamente cargado. La carga en las placas en cualquier tiempo está dada por:

$$q = q_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

donde: q_0 es la carga máxima en las placas y τ es la constante de tiempo capacitiva ($\tau = RC$, siendo R es la resistencia y C la capacidad).

NOTA: El valor nominal del condensador puede variar como mucho un $\pm 20\%$ del valor actual. Tomando los límites extremos, observe que cuando $t = 0$, $q = 0$ lo cual significa que no hay carga en las placas inicialmente. También observe que cuando t tiende a infinito (se hace muy grande), q tiende a q_0 lo cual significa que se necesita un tiempo infinito para cargar completamente el condensador.

El tiempo que se requiere para cargar el condensador a la mitad de la carga se llama vida media y se relaciona con la constante de tiempo capacitiva de la manera siguiente:

$$t_{1/2} = \tau \ln 2$$

En esta experiencia la carga del condensador se medirá indirectamente midiendo el voltaje en el condensador dado que estos valores son proporcionales uno al otro, esto es, $q = CV$.



ACTIVIDADES

1. Monte el circuito mostrado en la figura 14, usando una resistencia de $100\text{ K}\Omega$ y un condensador de $100\ \mu\text{F}$. Conecte el multímetro de tal forma que la tierra del mismo coincida con el terminal negativo del condensador el cual a la vez esta conectado al terminal negativo de la pila. La lectura máxima del voltaje en el condensador será 9 voltios.
2. Comience la experiencia sin voltaje en el condensador (el alambre que va al suiche del circuito esta desconectado). En caso de que exista un voltaje remanente (residual) en el condensador, use una pieza de alambre para interrumpir sus extremos y drenar cualquier carga remanente. Coloque los extremos del alambre en los puntos B y C que se muestran en la figura 14 para descargar el condensador.
3. Cierre el suiche conectando un alambre. Observe la lectura del voltaje en el multímetro, el voltaje a través del condensador. ¿Cómo describiría la forma en la cual el voltaje cambia?
4. Abra el suiche quitando el alambre, el voltaje presente el condensador decaerá muy levemente con respecto del tiempo. Esto indica que la carga que se coloca en el condensador no tiene manera (camino) de regresar a neutralizar el exceso de carga en las placas del condensador.
5. Conecte un alambre entre los puntos A y C del circuito, permitiendo que la carga (corriente) fluya a través de la resistencia. Observe la lectura del voltaje en el multímetro en este momento. ¿Cómo describiría la forma en la cual el voltaje cambia?
6. Repita los pasos anteriores hasta que obtenga una buena observación experimental para el proceso de carga y descarga del condensador a través de una resistencia.

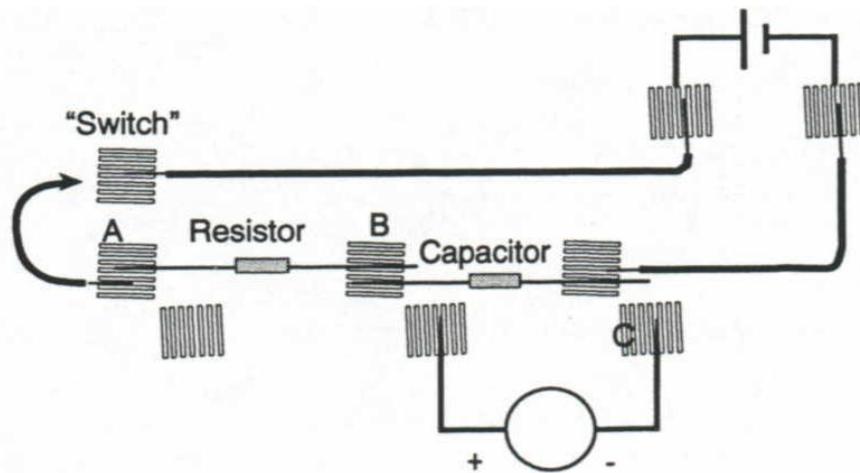


Figura 14: Circuito Resistencia-Condensador.

NOTA: Sería razonable que esquematice o muestre sobre un gráfico la forma en la cual el voltaje aumenta o disminuye con el tiempo.

7. Nuevamente repita los dos últimos pasos, pero esta vez anotando el tiempo que toma para ir de 0,0 a 5,0 v en el proceso de carga, t_c , y el tiempo que toma en ir de 5,5 a 0,5 v mientras descarga, t_d . Anote los resultados en la tabla 2.

8. Reemplace el condensador de 100 μF por uno de 330 μF . Repita el paso 7, anotando los tiempos de carga y descarga en la tabla 2.

9. Reemplace la resistencia original de 100 $\text{K}\Omega$ por una de 220 $\text{K}\Omega$ en el circuito. Repita el paso 7 y anote sus resultados.

10. Regrese al resistencia original de 100 $\text{K}\Omega$, pero use el condensador de 100 μF en serie con el de 330 μF . Repita el paso 7 y anote sus resultados en la tabla de datos.

11. Ahora repita el paso 7, pero con los condensadores 100 μF y 330 μF en paralelo.



	Resistencia (Ω)	Condensador (μF)	t_c	t_d
1				
2				
3				
4				
5				
6				

Tabla 2: Tiempos de carga y descarga de un condensador.

RESPONDA

¿Cuál es el efecto sobre los tiempos de carga y descarga si la capacitancia aumenta?

¿Cuál es el efecto sobre los tiempos de carga y descarga si la resistencia aumenta?

¿Cuál es el efecto sobre la capacitancia total si los condensadores son combinados en serie? ¿Cuál, si son combinados en paralelo? Tome como referencia los resultados.

¿Cuál es la máxima carga para un condensador en esta experiencia?

¿Cuáles son algunos de los factores que se podrían considerar para el porcentaje de diferencia entre los valores nominal y experimental?



El Diodo

OBJETIVO

Determinar experimentalmente algunas características operacionales de los diodos semiconductores.

INTRODUCCIÓN

Los semiconductores son materiales cristalinos, como el germanio y el silicio, que gracias a un cierto tratamiento en su fabricación se les ha aportado o extraído un número determinado de electrones en algunos de sus átomos (a este tipo de variaciones de las características de dichos cristales se les denomina dopados), desvirtuando su naturaleza atómica covalente, y de esta forma facilitando o impidiendo que la corriente encuentre camino para atravesarlos.

Un diodo es un elemento semiconductor constituido por dos cristales, uno tipo-p y otro tipo-n. Que un cristal sea tipo-p o, por el contrario tipo-n significa que dicho cristal tendrá electrones libres de vagar sin un enlace propio que carezca de electrones en algunos de sus enlaces y, por tanto, que sean los huecos (ausencia de electrones) los que tengan supremacía.

En la polarización directa del diodo, la transmisión de electrones desde el negativo de la pila encontrara cierta facilidad de atravesar el diodo, y llegar hasta el polo positivo de la pila. En la polarización inversa, los electrones que aporta el polo negativo de la pila reforzarán y agrandarán la barrera de iones negativos que de por sí aporta el cristal tipo-p, y no dejará que la corriente que intenta aportar la pila le atraviese.

ACTIVIDADES

- 1) Monte el circuito mostrado en la figura 15.a, usando el diodo 1N4007 y una resistencia de $1\text{ K}\Omega$. Utilice la figura 15.b como referencia para el montaje del circuito. Observe la dirección en que está orientado el diodo, con la banda gris cercana al punto B del circuito.
- 2) Con el suiche cerrado y la corriente fluyendo, ajuste el potenciómetro hasta que haya un voltaje de $0,05\text{ v}$ entre los puntos B y C (V_{BC}). Mida el voltaje a través del diodo (V_{AB}) y anota los resultados en la parte izquierda de la tabla 3 denominada polarización directa.
- 3) Ajuste el voltaje a través del potenciómetro hasta obtener para V_{BC} los valores siguientes: $0,2$; $0,4$; $0,6$; $0,8$; ... ; $4,0$ voltios. Mida el voltaje a través del diodo y anota los resultados obtenidos para cada caso.
- 4) Reemplaza la resistencia de $1\text{ K}\Omega$ por una de $330\ \Omega$. Repita los pasos 2 y 3, comenzando desde un voltaje $0,2$; $0,4$; $0,6$; ... ; $4,0$ voltios. Anota los resultados.

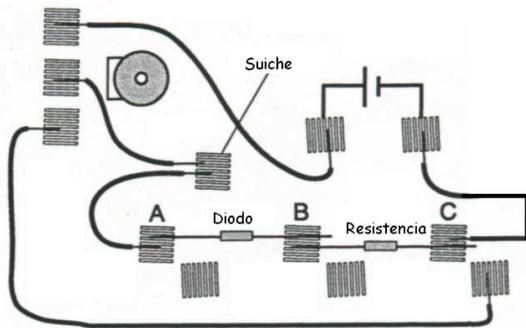


Figura 15.a: Montaje del circuito.

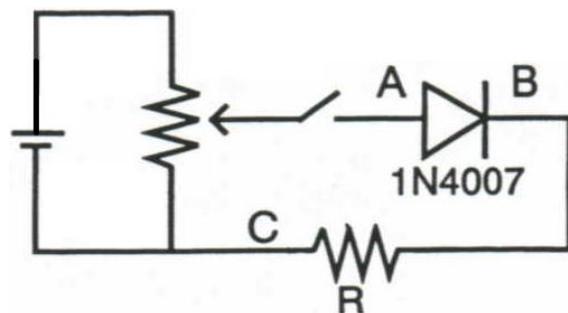


Figura 15.b: El diodo.



5) Invierta la orientación del diodo. Escoja un conjunto de valores (0,5; 1,0; ... ; 4,0 v) para el voltaje en el diodo (V_{AB}). Mida el voltaje en la resistencia (V_{BC}) para cada caso. Anota los resultados en la parte derecha de la tabla 3 denominada polarización inversa.

ANÁLISIS

1) Determine la corriente que fluye en cada caso, tanto en polarización directa como en polarización inversa, dividiendo el voltaje en la resistencia (V_{BC}) entre el valor de la misma.

2) Construya un gráfico de corriente en función del voltaje en el diodo, con el gráfico extendido hacia el segundo cuadrante para tener en cuenta los voltajes negativos en el diodo.

3) Realice el mismo análisis pero utilizando un diodo emisor de luz (LED).

RESPONDA

- 1) ¿Cuál es la diferencia que existe entre un diodo normal y un diodo emisor de luz (LED)?
- 2) Esperaría encontrar una curva semejante a la del diodo normal. ¿Por qué?
- 3) ¿Qué otros tipos de diodos existen?
- 4) Cumplen la ley de Ohm estos diodos.



Polarización directa				Polarización inversa			
R(Ω)	V _{AB} (v)	V _{BC} (v)	I (mA)	R(Ω)	V _{AB} (v)	V _{BC} (v)	I (mA)

Tabla 3: Característica operacional de un diodo.



El Transistor

OBJETIVO

Determinar experimentalmente algunas características operacionales de un transistor.

INTRODUCCIÓN

Un transistor es un elemento semiconductor, del cual salen tres terminales denominadas emisor, base y colector. Los TRT son de silicio y existen dos clases:

Los TRT p-n-p, que están formados por una doble unión p-n, donde la central es una unión n y que en este caso será la que está unida a la base del TRT.

Los TRT n-p-n, que están formados por una doble unión n-p, donde la central es una unión p y que en este caso será la que está unida a la base del TRT.

Los transistores pueden ser: equivalentes (aquellos que tienen características muy parecidas), complementarios (son los que tienen las mismas características según las tablas de los fabricantes, pero un TRT es p-n-p y el otro es n-p-n) y apareados (transistores complementarios que el fabricante, según los manuales o tablas, garantiza que son exactamente iguales pero uno es n-p-n y el otro es p-n-p). Los TRT tienen unas configuraciones según las conexiones de sus terminales; existen tres tipos de configuraciones y siempre en éstas un terminal del TRT va a ser común, tanto a la entrada como a la salida, siendo la corriente del colector mayor que la corriente de la base. Entonces: $I_{emisor} = I_{base} + I_{colector}$ es aproximadamente o igual a la $I_{colector}$.

ACTIVIDADES

- 1) Monte el circuito mostrado en la figura 16.a, usando el transistor 2N3904 y las resistencias $R_1 = 1\text{ K}\Omega$ y $R_2 = 100\ \Omega$. Utilice la figura 16.b como referencia para el montaje del circuito.

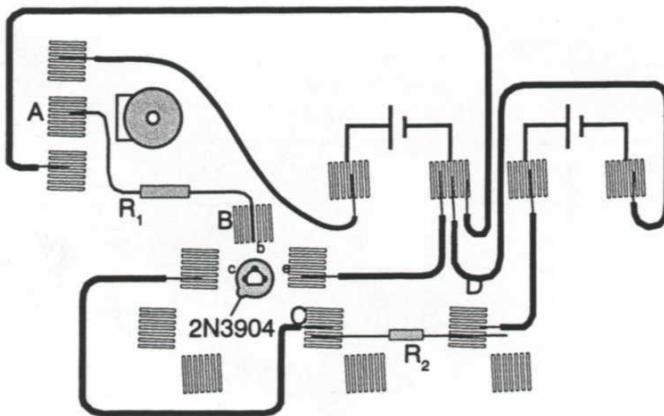


Figura 16.a: Montaje del circuito.

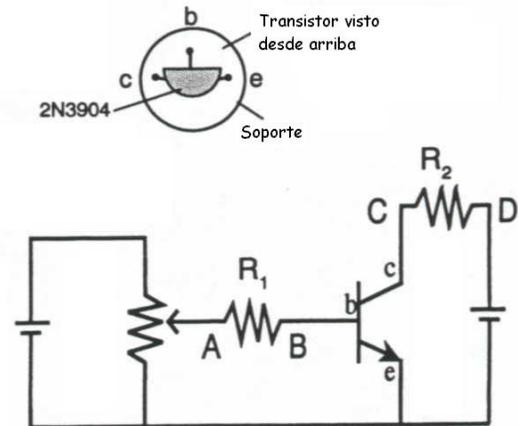


Figura 16.b: Transistor 2N3904.

- 2) Ajuste el potenciómetro cuidadosamente hasta que la lectura entre los puntos A y B sea aproximadamente 0,005 voltios (5,0 mV). Lea el voltaje entre los puntos C y D. Anote estos valores en la tabla 4. Recuerde que V_{AB} dividido entre R_1 determina el valor de la corriente que fluye a la base del transistor, mientras que V_{CD} dividido entre R_2 determina el valor de la corriente que fluye del colector al circuito.
- 3) Ajuste el voltaje a través del potenciómetro hasta obtener para V_{AB} los valores siguientes: 0,005; 0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,035; ...; 0,35 voltios. Mida el voltaje a través del diodo y anota los resultados obtenidos para cada caso. Para cada valor de V_{AB} mida el valor correspondiente de V_{CD} . Realiza además la medida para V_{AB} a 0,000 voltios.



ANÁLISIS

1) Realiza un gráfico de I_C vs I_B . Si encuentra una región donde necesite mas puntos experimentales para notar el cambio en las curvas, regrese al paso 2 y haga las medidas apropiadas.

2) ¿Cuál es la forma general del gráfico? Existe una región lineal. ¿Pasa a través del origen? ¿Porqué no? Se relaciona el comportamiento del transistor al comienzo del gráfico con el comportamiento del diodo de la experiencia anterior.

3) ¿Qué indica la pendiente del gráfico? ¿Qué significa que el transistor comienza a saturarse? Como describiría la saturación, basado en su experimento.

4) Determine la pendiente en la región lineal del gráfico. Esta relación I_C/I_B es referida como la corriente de amplificación del transistor. Describa cuantas veces es mayor el cambio de la corriente del colector que el cambio de la corriente en la base. Reporte la corriente de amplificación de su transistor.

DISCUSIÓN

Analice el gráfico y realice los cálculos correspondientes a la sección de análisis.

R_1 (Ω)	V_{AB} (v)	I_B (mA)	R_2 (Ω)	V_{CD} (v)	I_C (mA)

Tabla 4: Característica operacional de un transistor 2N3904.

Apéndice

Descripción del módulo experimental.

Este módulo está diseñado para implementar una gran variedad de circuitos eléctricos básicos experimentalmente. Comenzando con circuitos sencillos (asociaciones de resistencias y ley de Ohm) para tercer año, continuando con un análisis de las leyes de Kirchhoff y finalizando con el estudio de las características y aplicaciones de los diodos y transistores, para quinto año. La figura 17 muestra el módulo experimental.

El kit de elementos de circuito a utilizar es:

- Resistencias: 2 de $100 \Omega / \frac{1}{2} w$, 2 de $330 \Omega / \frac{1}{2} w$, 2 de $560 \Omega / \frac{1}{2} w$, 1 de $1000 \Omega / \frac{1}{2} w$, 1 de $100 K\Omega / \frac{1}{2} w$, 1 de $220 K\Omega / \frac{1}{2} w$
- Condensadores: 2 de $100 \mu F$ y 2 de $330 \mu F$
- Diodos: 2 (1N-4007), 2 LED (1 Rojo y 1 Verde)
- Transistores: 1 (2N-3904)
- Potenciómetros: 1 (20 K)



Figura 1: Modulo Experimental.



Bibliografía

1. Física 5^{to} Año Ciclo Diversificado: Teoría, Laboratorio, Problemas. Facundo Camero y Arturo Crespo. Edición 1998, Corporación Marca C.A. Caracas, Venezuela.
2. Física 5^{to} Año. John Hinds. Edición 2009, Publicaciones Monfort C.A. Caracas, Venezuela.
3. Física 5^{to} Año Ciclo Diversificado: Teoría, Práctica, Problemario, Autoevaluación. Ely Brett y William Suárez. Octava Edición 2003, Corporación Marca C.A. Caracas, Venezuela.
4. Física 5^{to} Año: Manual de Laboratorio. José María Álvarez. Primera Edición 1991, Reimpresión 2002. Editor: Librería Editorial Salesiana, S.A. Caracas, Venezuela.
5. Getting Started in Electronics. Forrest Mims. Octava Edición 1991, Estados Unidos de América.
6. Unidad Didáctica: Electricidad, Electromagnetismo y Medidas. Antonio Bueno. Curso 5^o ESO, versión 1.0.
7. Física: Conceptos y Aplicaciones. Paul Tippens. Sexta Edición, McGraw-Hill, Interamericana Editores, S.A. de C.V. México 2001.
8. La Enciclopedia del Estudiante: Física y Química. Ediciones Santillana, S.A. 2006, Buenos Aires-Argentina.
9. Basic Electricity Model EM-8622: C. Bakken, D. Griffith and E. Ayars, Pasco Scientific 10101 Foothills Blvd, 1990.
10. Manual de Laboratorio, Principios de Electricidad: Manuel Villarreal y Jesús Rosario. Universidad Valle del Momboy, Facultad de Ingeniería, 2001.