UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGÓN

"APUNTES Y PRACTICAS PARA LA MATERIA DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO

E L E C T R I C I S T A

P R E S E N T A N:

SERGIO RAMIREZ RAMIREZ

ALFREDO GAONA LIBREROS

ASESOR: ING. JESUS NUÑEZ VALDEZ

MÉXICO 1997.

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCION

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

SERGIO RAMÍREZ RAMÍREZ
PRESENTE.

En contestación a su solicitud de fecha 8 de diciembre del año próximo pasado, presentada por Alfredo Gaona Libreros y usted relativa a la autorización que se les debe conceder para que el señor profesor, Ing. JESÚS NÚÑEZ VALADEZ pueda dirigirles el trabajo de Tesis denominado "APUNTES Y PRÁCTICAS PARA LA MATERIA DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México., 9 de enero de 1996.
EL DIRECTOR

M en I CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO

DIRECCION

c c p Jefe de la Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
c c p Asesor de Tesis.

CCMC'AIR'lla.

VNIVERSDAD NACIONAL AVPNºMA DE MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CAMPUS ARAGÓN

UNIDAD ACADEMICA

Ing. RAUL BARRON VERA
Jefe de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica
P r e s e n t e .

En atención a la solicitud de fecha 7 de abril del año en curso, por la que se comunica que los alumnos SERGIO RAMIREZ RAMIREZ y ALFREDO GAONA LIBREROS, de la carrera de INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA, han concluido su trabajo de investigación intitulado "APUNTES Y PRACTICAS PARA LA MATERIA DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted, se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del Examen Profesional.

Sin otro particular, le reitero las seguridades de mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, a 7 de abril de 1997
EL JEFE DE LA UNIDAD

Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS

c c p Asesor de Tesis.
c c p Interesado.
AIR/vr

Al Ing. Jesús Núñez Valadéz :

Por su apoyo y comprensión en la elaboración del presente trabajo de tesis, como asesor de ésta.

A los Ingenieros :

Raúl Barrón Vera.

Francisco Arista Patiño.

Raúl Carbajal Pinal.

Fco. Javier Sampayo Sandoval

Por el tiempo invertido en la revisión y correcciones hechas, para el desarrollo final de esta tesis.

Al ingeniero :

Noé González Rosas.

Por sus inapreciables consejos y críticas constructivas que coadyuvaron a la realización del presente trabajo.

A nuestros compañeros y amigos :

Que con su talento y con una palabra de aliento han estado junto a nosotros.

A mis padres :

Sergio Ramirez Espinoza

Amelia Ramírez Ortiz

Nunca habrá palabras suficientes que expresen el agradecimiento para toda una vida de esfuerzos y sacrificios, realizados por ustedes para que jamas existiera obstáculo alguno para lograr todas mis metas, así pues quiero que sepan que este logro alcanzado, primordial en mi vida, no es solo mío sino que es en su gran mayoría solo suyo.

A mis hermanas :

Rosa, Inés, Rocío y Gabriela.

De quienes he recibido toda clase estímulos para seguir siempre adelante, para concluir mi carrera profesional y con la firme deseo de que logren realizar todas sus metas, obteniendo siempre el reconocimiento de quienes las queremos.

SERGIO.

A mis padres por el esfuerzo realizado y el apoyo que me brindaron siempre, logrando infundir en mi el deseo de superación.

(Alfredo , Irene)

A mis hermanos con la firme certeza de que lograran todas sus metas obteniendo siempre el reconocimiento de quienes los recordamos.

(Luis Enrique, Edgar)

ALFREDO

INDICE

CAPITULO II " Electromagnetismo " (Cargas en movimiento)

CAPITULO III " Campo y Potencial "

CAPITULO IV " CAPACITANCIA Y DIELECTRICOS "

CAPITULO V " Circuitos Eléctricos "

ANEXO

" PRACTICAS PROPUESTAS PARA EL LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO "

INTRODUCCIÓN

El aprendizaje de los fundamentos de la electricidad y el magnetismo es uno de los aspectos básicos en la formación de los profesionales que se desempeñan en el mundo de la ciencia y la tecnología.

Para los ingenieros, estos conocimientos constituyen un elemento formativo de una mente analítica y ordenada, indispensable para comprender los conocimientos teóricos y prácticos que requerirá en el desempeño de su actividad profesional.

Para el estudiante de ingeniería, cuya mentalidad es generalmente práctica, no siempre resulta sencillo comprender la estructura formal y la naturaleza de los conceptos fundamentales de la electricidad y el magnetismo.

En el presente trabajo de tesis hemos puesto especial empeño en presentar los conceptos de tal manera que resulten comprensibles para los estudiantes, sin renunciar a la formalidad mínima que debe tener cada uno de los temas que aquí se tratan, intentando además, inducir al estudiante hacia la búsqueda de otros conocimientos.

Obviamente no se pretende de ninguna manera sustituir publicaciones tan prestigiadas como las que se mencionan en la bibliografía y que constituyen una base inestimable para la elaboración de este trabajo, sino que simplemente pretenden ser un apoyo más para los estudiantes de la asignatura de "Electricidad y Magnetismo".

Por otra parte, en la actualidad todo el mundo tiene a diario contacto con la electricidad y usa alguna de las múltiples formas en que ella rinde algún servicio. Así pues el contenido de cada uno de los capítulos presentados, sin restar importancia a las aplicaciones de esta, se concentran de manera esencial en los principios y características más importantes, que han hecho posible la totalidad de la tecnología eléctrica y electrónica.

De esta manera, el **Capítulo I** se desenvuelve presentando la teoría electrónica básica aplicada a la materia, pasando por el estudio de la naturaleza de las cargas en reposo (electrostática) y los fenómenos que estas presentan, describiendo como se adquiere algún tipo de carga en especifico, mencionando las formas más comunes para lograr tal característica. Así mismo se analiza el comportamiento de las cargas, en función de la leyes fundamentales que rigen a la materia, tales como la conservación de la carga y, la fuerza de atracción ó repulsión entre éstas.

En el **Capitulo II** se encuentra dedicado al estudio de los fenómenos magnéticos asociados al movimiento de cargas eléctricas a través de un conductor (electromagnetismo), en el que se establece que una corriente eléctrica siempre ésta rodeada de un campo magnético. Para tal efecto se definen conceptos básicos como líneas de fuerza y densidad de flujo magnético, necesarios para el establecimiento de leyes fundamentales del magnetismo. Además, se hace referencia a las fuerzas y efectos que interactuan sobre uno ó más conductores en movimiento dentro de un campo magnético, que representa el principio de operación de un generador. Sin perder de vista los fenómenos de inducción magnética en elementos que poseen características tales como la oposición de las variaciones de flujo de corriente a través de ellos (inductancia e inductancia mutua), mencionando las características de conexión de las combinaciones de estos elementos, así como la energía magnética almacenada en ellos.

En el **Capitulo III**, se describen los conceptos necesarios para realizar el análisis para la determinación del campo eléctrico en distribuciones discretas y continuas de carga estática, así como sus características en estás. Se establecen las similitudes y diferencias entre el campo magnético y campo eléctrico.

En otra parte de este capitulo, se tratan definiciones y calculo de potencial eléctrico, diferencia de potencial (debidas a cargas puntuales y distribuciones continuas de carga), superficies equipotenciales y introducción de concepto de gradiente de potencial en relación a el campo eléctrico.

Los conceptos adquiridos en las capítulos anteriores son base para la comprensión de la característica de capacitancia de dispositivos conocidos como condensadores o capacitores, estudio que se realiza en el **Capitulo IV**, que incluye su calculo en diferentes configuraciones geométricas, y describiendo los diversos tipos de condensadores en función de su capacitancia y su voltaje de operación. Al igual que en el caso de las inductancias (Cap. III), se presentan las características y cálculos en las diferentes conexiones que se realizan con los condensadores analizando además el principio de operación de los mismos, así como el calculo de la energía potencial eléctrica almacenada por estos.

El **Capitulo V**, se refiere al análisis de las características de circuitos eléctricos resistivos, realizando el calculo de las transformaciones de energía asociadas. Para lo cual se menciona la característica.de resistencia en los conductores y los parámetros que la determinan, además del efecto que tiene la temperatura sobre de elementos que poseen dicha característica.

Describiendo la ley fundamental que relaciona la corriente, voltaje y la resistencia de un circuito (ley de Ohm), así como el comportamiento de estos parametros en los tipos de conexión en serie y paralelo para resistores. Incluyendo las características que cumplen con los de los principios de la conservación de la carga y de la energía (leyes de Kirchhoff). Finalmente, se describen los fundamentos de la corriente alterna, definiendo el valor efectivo de la corriente alterna o valor RMS y valor promedio de una corriente alterna.

Es importante mencionar que el presente trabajo de tesis cuenta, como parte fundamental del mismo, con un anexo consistente de un juego de practicas, elaboradas pensando servirán como complemento en la reafirmación de los conocimientos teóricos adquiridos.

Estas tienen como objetivo general la de proporcionar al estudiante la habilidad y la destreza en el manejo de instrumentos de medición de los diferentes parámetros de cualquier señal ya sea, de corriente directa (C.D.) ó de corriente alterna (C.A.).

En cada una de las prácticas se abordan objetivos específicos, que irán proporcionando al alumno las herramientas necesarias para entender el comportamiento de los diferentes elementos que se emplean en ellas, así como desarrollar en el estudiante su capacidad de observación, para la solución de problemas de índole puramente físicas en circuitos de mayor complejidad.

CAPITULO I

ELECTROSTÁTICA
(CARGAS EN REPOSO)

I.1 Teoría Electrónica

La historia de la electricidad tuvo sus comienzos hace más de 2500 años. En aquella época, 600 años A.C., el filósofo griego TALES DE MILETO, fué el primero en estudiar la electricidad, atrayendo pajillas y pelusas con una varilla de ámbar, que previamente había frotado con una tela.

La palabra griega para designar al ámbar es elecktrón, de la cual se derivó la palabra electricidad. El físico inglés WILLIAM GILBERT (1540-1603) aplicó la palabra "eléctricos" a los materiales que encontró que se comportaban en forma similar al ámbar.

En 1660, OTTO VON GUERICKE observó la luz, y el sonido de las chispas eléctricas que producía con una rudimentaria máquina generadora de electricidad por fricción construída por él mismo.

Años después el científico italiano LUIGI GALVANI (1737-1798) observó que cuando las ancas de las ranas con que experimentaba tocaban dos metales disímiles, se sacudían bruscamente, lo que atribuyó erróneamente, a electricidad en los animales.

BENJAMIN FRANKLIN (1706-1790), el estadista y científico norteamericano, desarrolló un "condensador" para almacenar electricidad, y por primera vez identificó el rayo como electricidad con su famoso experimento con una cometa.

Además desarrolló una coherente teoría de flujo de la electricidad, pero desafortunadamente se equivocó al conjeturar sobre *la dirección del flujo de la corriente*, que pensó ocurría *desde la terminal positiva de la fuénte hacia su terminal negativa* (Sentido Convencional).

Dicho error no fué descubierto hasta que se desarrolló la actual *teoría electrónica*, ya para entonces se había establecido la práctica convencional de describir el flujo de corriente, del polo positivo al negativo.

Para entender la teoría electrónica debemos antes tener algún conocimiento de la estructura atómica de la materia.

1.1.1 Estructura Atómica de la Materia

Desde la época de los griegos, se pensó que toda materia estaba compuesta por átomos, que en griego significa "indivisible", aunque esta idea sobre la naturaleza de la materia era bastante vaga.

El químico inglés JOHN DALTON sugirió que toda materia podía ser descompuesta en sus componentes fundamentales o elementos, las partículas más pequeñas de los cuales denominó átomos.

De acuerdo con la teoría atómica de NIELS BOHR, el átomo consiste de un núcleo central de *carga positiva* alrededor del cual giran en órbitas fijas, diminutas partículas *cargadas negativamente* denominadas electrones.

En un átomo la carga negativa de todos los electrones orbitales, corresponde a la carga positiva contenida en el núcleo, de este modo dicha combinación es eléctricamente neutro.

De acuerdo con un concepto simplificado, el núcleo del átomo está constituído por dos partículas fundamentales conocidas como el protón y el neutrón.

Puesto que los átomos por lo común son eléctricamente neutros, el número de cargas positivas es igual al número de cargas negativas; esto es, el número de protones en el núcleo es igual al de los electrones que giran alrededor de éste.

Prácticamente todo el peso del átomo se debe a sus protones y neutrones, pues el peso de los electrones orbitales que rodean al núcleo es insignificante en comparación con el peso de los protones y neutrones.

Así mismo, debemos señalar que la masa del electrón es de solamente unos 9.11×10^{-28} gramos, mientras que la del protón y del neutrón es de aproximadamente 1 840 veces la referida masa.

$$\text{Masa del Electrón} = 9.11 \times 10^{-31}\ \text{Kg}$$

$$\text{Masa del Protón} = 1.67 \times 10^{-27}\ \text{Kg}$$

$$\text{Masa del Neutrón} = 1.67 \times 10^{-27}\ \text{Kg}$$

En el sistema MKS, la unidad natural de carga, positiva o negativa, del protón y del electrón es el Coulomb (unidad que será definida más adelante)

$$\text{Carga del Electrón } (-) = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{Coulombs}$$

$$\text{Carga del Protón } (+) = 1.6 \times 10^{-19}\ \text{Coulombs}$$

1.1.2 Número Atómico

La materia está compuesta por tres partículas elementales que son: *protones, neutrones y electrones.*

La diferencia entre los distintos elementos, resulta del número y disposición de estas partículas que existen en sus átomos. Los elementos han sido dispuestos de acuerdo con su número atómico, el cual es igual al número de electrones que giran alrededor del núcleo ó al número de protones dentro del núcleo.

Por tanto, un átomo de Hidrógeno, cuyo número atómico es 1, tiene solo un electrón girando alrededor de su núcleo mientras que el átomo de Uranio, cuyo número atómico es de 92, tiene 92 electrones orbitales.

Las órbitas de estos electrones están dispuestás en "capas" alrededor del núcleo y cada capa tiene una capacidad máxima de electrones siendo ésta sucesivamente de 2, 8, 18 y 32 electrones cada una partiendo del núcleo hacia el exterior.

Sin embargo, la capa mas apartada del núcleo, es decir, la última órbita nunca contiene más de ocho electrones. Esta órbita, es la que determina la *valencia* química del átomo y sus principales características físicas.

Es también la más importante desde el punto de vista de la electricidad, puesto que es en esta órbita, lejana de la atracción del núcleo e interponiendose las órbitas de los demás electrones, donde los electrones tienen mayor facilidad de movimiento para ser desalojados, para convertirse en electrones libres capaces de producir un flujo de electrones que se deslizan de un átomo a otro en un *material conductor.*

I. 1.3 Peso Atómico

El peso de un átomo se determina casi por completo por la suma del número de protones y neutrones de su núcleo.

Los pesos atómicos son relativos, puesto que no indican el peso en unidad alguna, sino que compara el peso de unos con el de otros.

De este modo el peso atómico del Oxígeno es de 16, el del Helio 4, mientras que el del Hidrógeno es de 1.

De aquí que un átomo de Oxígeno sea 16 veces más pesado que un átomo de Hidrógeno y cuatro veces más pesado, que uno de Helio.

I.1.4 Modelos Atómicos

En la figura 1, se pueden apreciar algunos ejemplos de nuestro modelo atómico, en la izquierda de la ilustración se representa un átomo de Hidrógeno, mientras que en la derecha se representa la estructura mas compleja de un átomo de Carbono.

El átomo de Hidrógeno tiene solo un protón en su núcleo (carga +1) esta rodeado de un solitario electrón orbital (e-) y no tiene ningún neutrón; consecuentemente tanto su número atómico como su peso atómico es de 1, siendo el átomo más simple de todos los elementos. El átomo de Carbono, que se asemeja un poco más a un sistema solar en miniatura, tiene un núcleo constituído por seis neutrones y seis protones (carga total +6).

Por consiguiente su peso atómico es de 12. Para equilibrar la carga positiva del núcleo, el átomo de Carbono está rodeado de seis electrones orbitales (6 e-), dos de los cuales están en la capa más interna mientras que los cuatro restantes lo están en la exterior.

Fig. 1

Mientras que los átomos son las porciones más pequeñas de materia en cada elemento, es bueno tener en mente, que la mayoría de las materias que existen en el mundo están compuestas de varios elementos, formados por la combinación de átomos diferentes. Estas combinaciones de átomos se llaman **moléculas**.

I. 2 Naturaleza de la Carga Eléctrica.

I.2.1 Iones e Ionización

Un Ion es un átomo, que esta eléctricamente desequilibrado por la perdida o adquisición de uno o más electrones.

Si ha adquirido electrones es un ion negativo y si los ha perdido es un ion positivo.

La razón es clara, pues cuando un átomo pierde un electrón, los restantes electrones orbitales dejan de equilibrar la carga de +1. De modo similar cuando un átomo adquiere en alguna forma un electrón, asume una carga negativa de -1. El proceso de producir iones se llama ionización.

La ionización no produce cambios en las propiedades químicas del átomo pero sí un cambio eléctrico que puede producirse de varias formas.

Los átomos de algunas substancias, capturan electrones y otras los ceden, por lo que se dice, que la afinidad electrónica de las primeras es mayor que la de las segundas.

Por ejemplo, al poner en contacto dos substancias de distinta afinidad electrónica, la que tenga mayor afinidad absorberá electrones de la otra. La primera quedara cargada negativamente (*ganando electrones*) y la segunda cargada positivamente (*perdiendo electrones*).

I.2.2 Electrones Libres

Los electrones que han sido desalojados de la última órbita de un átomo reciben el nombre de electrones libres.

Estos electrones pueden existir por si mismos, independientemente de cualquier átomo, siendo estos los responsables de la mayoría de los fenómenos eléctricos y electrónicos.

Los electrones libres al desplazarse, constituyen la corriente en los conductores ordinarios. El movimiento de los mismos en las antenas da lugar a las radiaciones electromagnéticas (ondas de radio).

I.2.3 Conductores y Aisladores

La mayoría de las substancias contienen, normalmente, cierto número de estos electrones libres capaces de pasar libremente, de un átomo a otro. Los metales como la Plata, el Cobre o el Aluminio, que contienen relativamente gran cantidad de electrones libres capaces de producir una corriente eléctrica, se denominan **conductores**; los materiales no metálicos que contienen relativamente pocos electrones libres son denominados **aisladores**.

Los materiales que tienen cantidades intermedias de electrones libres disponibles, son los llamados **semiconductores**. En realidad no hay conductores ni aisladores perfectos. Mientras más electrones libres posea un material, mejor conductor será. Las substancias pueden ser ordenadas de acuerdo con el número relativo de electrones libres que contengan.

I.3 Cargas Electrostáticas

Todos hemos tenido oportunidad de observar fenómenos electrostáticos, por ejemplo, los rayos durante una tormenta; las chispas que saltan después que frotamos una gruesa alfombra; los cabellos de punta después de frotarlos o peinarlos con fuerza, etc...

El término electrostática, con el que nos referimos a las cargas en reposo, es inadecuado, ya que sabemos que los portadores de la electricidad - los electrones - están en continuo movimiento. Este término sigue siendo útil, sin embargo, para distinguir entre el movimiento desordenado o al azar de los electrones situados sobre la superficie de un cuerpo cargado (electrificado) y el movimiento ordenadamente dirigido de los electrones que tiene lugar cuando la corriente eléctrica fluye por un conductor.

I.3.1 Cargas Eléctricas. Convención de Franklin.

Benjamín Franklin, de un modo arbitrario, llamó carga positiva (+) a la adquirida por una varilla de cristal cuando se frota con seda, y asignándole el nombre de carga negativa (-) a la adquirida por una varilla de hule duro, cuando se frota con piel. A esta aseveración se le conoce como **Convención de Franklin**.

Un hecho fundamental de la electricidad fué descubierto por el químico francés CHARLES DU FAY, en 1733, que dice:

Las cargas eléctricas del mismo signo, se repelen mutuamente y las cargas de signo contrario (+ ó -) se atraen mutuamente

Se ha mencionado que los átomos de cualquier objeto son neutros eléctricamente.

Cuando un objeto se vuelve *eléctricamente cargado* es que tiene exceso o deficiencia del número normal de electrones.

Un cuerpo se carga positivamente si alguno de los electrones de sus átomos han sido removidos, de modo que hay una deficiencia de electrones, es decir, menos electrones que protones.

Un cuerpo se carga negativamente si adquiere - de alguna manera - un número adicional de electrones; esto es, más electrones que protones.

1.3.2 Carga Estática por Frotamiento (Triboelectricidad)

Cualquier material bajo condiciones normales, es eléctricamente neutro (Fig.2), es decir, sin exceso de electrones, ni deficiencia de ellos.

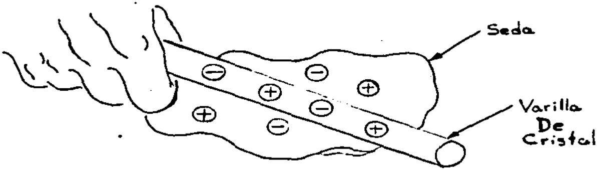


Fig. 2

Ahora bien se puede comprobar que cuando una varilla de cristal, es frotada con seda o piel, estos adquieren cierto tipo de carga y atraen trozitos de papel. De manera similar, una hoja de papel cuando se frota vigorosamente, llega a cargarse y se adhiere a la pared.

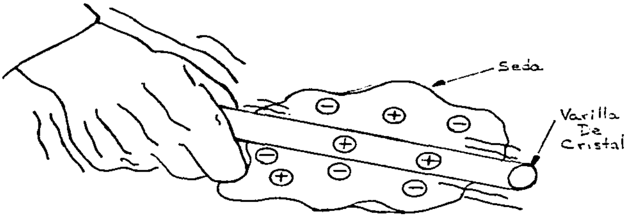


Fig. 3

Así, conforme a la convención de Franklin, se establece que cuando una varilla de cristal es frotada con seda (Fig 3), algunos de los electrones libres de la superficie de la varilla se desprenden y son transferidos a la seda. La varilla de cristal, consecuentemente, pierde electrones y se carga positivamente, mientras que la seda gana electrones y se carga negativamente.

De manera similar cuando una varilla de hule duro, se frota con piel de conejo o franela, la fricción "arrebata" algunos de los electrones próximos a la superficie de la piel o franela y los transfiere a la varilla de hule duro. Como resultado, la varilla de hule duro adquiere un exceso de electrones y se carga negativamente, mientras que la piel o franela es dejada con una deficiencia de electrones y se carga positivamente.

1.3.3 Transmisión de Cargas Estáticas por Contacto

Si un objeto tiene carga estática influye en todos los objetos cercanos a él, esta influencia puede ejercerse por contacto o inducción.

Las cargas positivas significan escasez de electrones y, por lo tanto, siempre tienden a atraer electrones; las cargas negativas, en cambio, significan exceso de electrones por lo que siempre rechazan a los electrones.

Así pues si se toca una barra metálica "descargada" (Fig. 4a), con una varilla que tenga carga positiva (una varilla de cristal frotada con seda), atraerá los electrones de la barra hacia el punto de contacto.

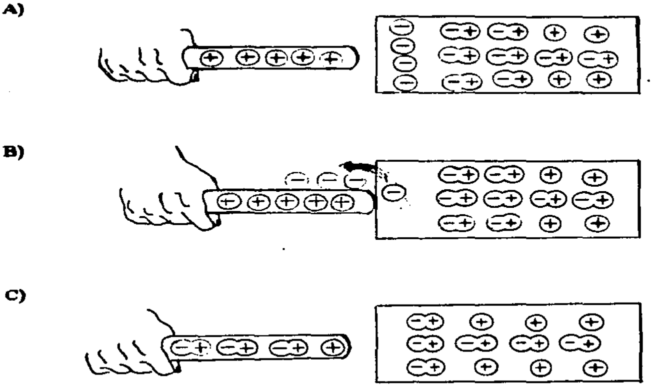


Fig. 4

Algunos de esos electrones abandonarán la barra y se introducirán en la varilla (fig.4b), haciendo que la barra se cargue positivamente (fig. 4c) y que disminuya la carga positiva de la varilla.

De manera similar si se toca, la barra "descargada", con una varilla cargada negativamente (varilla de hule duro frotada con piel o franela), la barra también adquirirá carga negativa. A medida que se acerque la varilla de carga negativa a la barra sin carga, los electrones de la porción de la barra más próxima a la varilla serán repelidos hacia la parte más alejada de la varilla. Entonces la porción de la barra cercana a la varilla adquirirá carga positiva y la parte más alejada tomará carga negativa. Cuando la varilla toque la barra, algunos de los electrones sobrantes de la varilla cargada negativamente pasarán a la barra para neutrolizar la carga positiva de esa porción, pero la parte más alejada conservará su carga negativa.

I.3.4 Transmisión de Cargas Estáticas por Inducción

Se explicó en el tema anterior, que cuando se toca un barra "descargada" con una varilla cargada positivamente, parte de la carga de ésta se transmite a la barra, por lo que adquiere carga positiva.

Ahora, supondremos que en vez de tocar la barra con la varilla, nos limitamos a aproximar la varilla cargada positivamente a la barra "descargada" (sin tocarla), los electrones serán atraídos al punto más próximo con respecto a la varilla, ocasionando una carga negativa en ese punto (fig. 5a), pero además, se tiene que en la parte opuesta de la barra habrá una deficiencia de electrones, por lo que adquiere carga positiva.

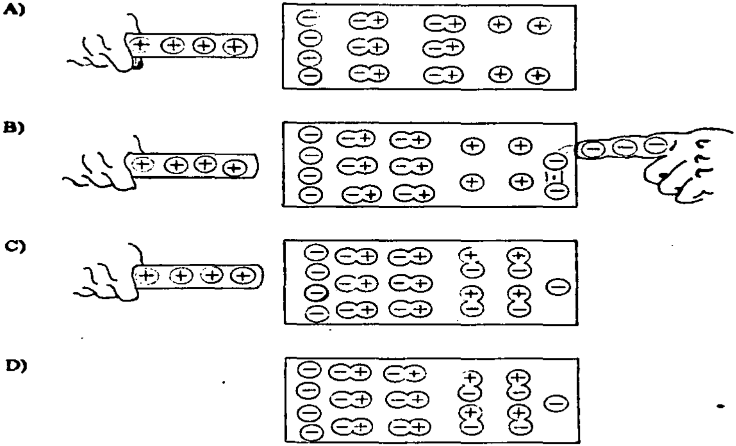


Fig. 5

Tenemos entonces tres cargas: la carga positiva de la varilla, la carga negativa de la barra en el punto más cercano a la varilla, y una carga positiva en la porción de la barra más alejada de la varilla. Haciendo entrar electrones de otra fuente en el extremo positivo de la barra (tocándola con el dedo, por ejemplo), fig.5b, se impartirá a la barra una carga negativa.

Si se retira el dedo (fig. 5c), las cargas positivas y negativas estan neutrolizadas en su mayoría. Por lo que si finalmente se retira la varilla cargada positivamente (fig. 5d), la barra quedará con un exceso de eléctrones por lo que esta adquiere carga negativa.

Ahora en caso de que la varilla cargada posea carga negativa, cuando esta se acerca a la barra "descargada", inducirá una carga positiva en el extremo de la barra más próximo a ella. Los electrones de esa porción de la barra serán rechazados y se desplazarán al otro extremo de la misma. Entonces la carga negativa original de la varilla produce en la barra dos cargas adicionales, una positiva y otra negativa.

Al alejar la varrilla, la barra quedará descargadá porque el exceso de electrones del extremo con carga negativa volverá a su sitio, neutrolizando a la barra. Sin embargo, si antes de alejar la varilla se ofrece un camino de salida a los electrones de la porción de la barra cargada negativamente, toda ella quedará con carga positiva al alejarse la varilla.

I.3.6 Descarga de Carga Estática

Como hemos visto, las cargas estáticas se pueden producir por frotamiento, contacto ó por inducción.

A continuación se verá cómo el exceso o falta de electrones del cuerpo cargado se puede neutrolizar o descargar.

Siempre que se acerque entre sí a dos materiales de carga opuesta, el exceso de electrones del material cargado negativamente será atraído hacia el material de carga positiva.

Tendiendo un alambre entre un material y otro se ofrecerá una vía para que los electrones de la carga negativa pasen a la carga positiva, de manera que las cargas se neutrolizan.

Fig. 6

En vez de conectar los materiales con un alambre se los puede hacer tocar (contacto), y también las cargas desaparecerán.

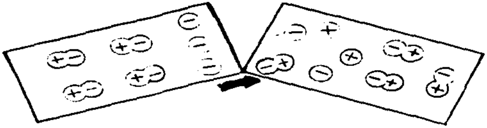


Fig. 7

Si se emplean materiales muy cargados, los electrones podrán saltar de la carga negativa a la carga positiva antes de que los dos materiales lleguen a establecer contacto real. En ese caso la descarga se podrá ver en forma de un arco. Si las cargas son mucho más fuertes, la electricidad puede descargarse a través de grandes espacios, provocando arcos de muchos metros de longitud.

Fig. 8

El rayo es un ejemplo de una descarga de electricidad estática resultante de la acumulación de carga estática en una nube al desplazarse por el aire. Las cargas estáticas naturales van formándose siempre que se produce frotamiento entre las moléculas de aire, como nubes en movimiento o vientos fuertes, y usted comprobará que estas cargas son mucho mayores en los climas muy secos o donde la humedad es baja.

1.4 Ley de fuérza entre Partículas Cargadas: Ley de Coulomb.

Se ha dicho que las cargas de signos semejantes se repelen y que las de signos opuestos se atraen, pero sin llegar a conocer *la magnitud de la fuérza de atracción o repulsión.*

Para establecer la magnitud de la fuérza, el físico francés CHARLES A. DE COULOMB (1736-1806) efectuó una serie de mediciones cuantitativas de las fuérzas entre dos cargas por medio de una balanza de torsión. Usando este instrumento con cargas y distancias variables y usando diferentes medios envolventes, Coulomb fué capaz de demostrar que:

La fuérza entre cargas concentradas (puntuales) varía en proporción directa con el producto de las cargas individuales, y en proporción inversa con el cuadrado de la distancia que las separa.

Esta ley es prácticamente válida para todos los campos de fuérza, eléctricos y magnéticos, incluyendo el gravitacional.

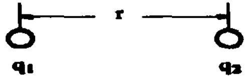


Fig. 9

De acuerdo con esta ley, la fuérza F, entre dos cargas puntuales, q_1 y q_2 es:

$$F = \frac{K\,q_1\,q_2}{r^2}$$

donde r es la distancia en metros, entre las cargas y k se llama la constante dieléctrica del medio.

En el sistema mks, la constante dieléctrica del medio k tiene el siguiente valor para las cargas en el vacío:

$$K = 8.988 \times 10^9\ N.m^2/C^2 = 9 \times 10^9\ N.m^2/C^2$$

A menudo se reemplaza k por $1/4\pi\,\varepsilon_0$, donde

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ N.m^2$$

y se le conoce como la permitividad del espacio vacío. En términos de ésta, la *ley de Coulomb para el vacío* se transforma en:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{q_1\ q_2}{r^2}$$

Cuando el medio que rodea a un material no es el vacío, las fuérzas que se originan por cargas inducidas en el material reducen la fuérza entre las cargas puntuales. Si el material tiene una constante dieléctrica K, entonces ε_0 en la Ley de Coulomb debe remplazase por $K\varepsilon_0 = \varepsilon$, donde ε se le conoce como la permitividad del material. Entonces se tiene:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\,\frac{q_1\ q_2}{r^2}$$

Para el vacío la constante K = 1, y para el aire a presión y temperatura normales k= 1.000586.

Para el cristal k varía desde 4 hasta 8, para el papel es de 2.5, para el cuarzo 4.5, etc...

Las relaciones expresadas en la Ley de Coulomb se muestran en forma esquemática en la fig.11 para dos cargas puntuales (en el vacío).

La Ley de Coulomb sirve para definir la unidad de carga electrostática (abreviada *uce*), que es la carga que repelerá a otra unidad de carga del mismo signo con la fuérza de una *dina*, cuando la distancia entre las cargas (en el vacío) es de un centímetro.

La unidad de carga, electrostática (*uce*), también llamada *stacoulomb*, es una unidad muy pequeña.

En el *SI* ó *mks*, la distancia r se expresa en metros, la fuérza F está en Newtons (Nw) y las unidades de carga en Coulombs (Coul).

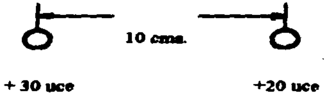
A fin de evitar números muy pequeños, en la práctica se emplean con frecuencia los micro-coulombs (1 C = 10^{-6} C) y el nanocoulomb (1 nC = 10^{-9} C) Una unidad mucho mayor, llamada *Coulomb*, es el equivalente de tres mil millones (3×10^9) uce.

Una carga de un *Coulomb* ejercerá una fuérza de 9×10^9 *Newtons* o 9×10^{14} *Dinas* sobre otra carga de un *Coulomb*, cuando estén separadas por una distancia de un *Metro*.

Un ejemplo aclarara el uso de las unidades mencionadas anteriormente.

Ejemplo No. 1 :

Calcule la fuerza de repulsión en el aire (suponga k=1) entre una carga puntual de +30 uce y una carga puntual de +20 uce, separadas por una distancia de 10 cms.



Solución :

$$F = \frac{K\, q_1 \quad q_2}{r^2} = \frac{1\ (+30)\ (+20)}{(10)^2} = \frac{600}{100} = 6 \text{ Dinas}$$

I.4.1 Forma Vectorial de La Ley de Coulomb

La fuerza F, puede ser representada por medio de un vector, por lo cual tiene también propiedades direccionales.

En la Ley de Coulomb, la dirección de la fuerza queda determinada dependiendo del signo relativo de las dos cargas eléctricas.

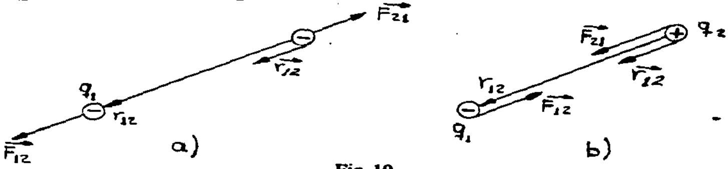


Fig. 10

Como se ilustra en la figura anterior, dos cargas puntuales q_1 y q_2 separadas por una distancia r_{12}, que tienen el mismo signo.

Sobre la carga q_1 se ejerce una fuerza debida la carga q_2, expresada como F_{12}.

El vector de posición que ubica a la carga q_1 en relación con la carga q_2 es r_{12}.

Si definiéramos el origen de nuestro sistema de coordenadas en la ubicación de la carga q_2, entonces r_{12} sería el vector de posición de la carga q_1.

Como las dos cargas tienen el mismo signo, entonces la fuérza entre estás, es de repulsión (fig.10a), y F_{12} debe ser paralelo a r_{12}.

Si las cargas tienen signos opuestos (fig. 10b), entonces la fuérza F_{12} es de atracción y opuesta a r_{12}. En cualquier caso, podemos representar a la fuérza como:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 \; q_2}{r_{12}^{\;2}} \vec{r}_{12}$$

Aquí r_{12} es un vector que representa la distancia entre las cargas , y $\vec{r}_{12}$ indica al *vector unitario* en la dirección de r_{12} . Es decir,

$$\vec{r}_{12} = \frac{r_{12}}{r_{12}}$$

De la figura 5, se desprende otra característica. De acuerdo con la tercera ley de Newton, la fuérza ejercida sobre la carga q_2 por la carga q_1 , F_{21} , es opuesta a F_{12} . Esta fuérza puede entonces expresarse exactamente de la misma forma:

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 \, q_2}{r_{21}^{\;2}} \vec{r}_{21}$$

Aquí r_{21} es un vector unitario que apunta de la carga q_1 a la carga q_2 si el origen de las coordenadas estuviese en la ubicación de la carga q_1.

<u>Carga de Prueba</u>

Con frecuencia conviene emplear el concepto de una carga ficticia llamada carga de prueba.

Esta carga es similar a una carga real, excepto en un aspecto; la carga de prueba se define como aquella que no ejerce fuérza sobre otras cargas; por esto no perturba las cargas en la vecindad. En la práctica, una carga de prueba puede aproximarse a una carga de magnitud prácticamente despreciable.

1.4.2 Principio de Superposición

La forma vectorial de la Ley de Coulomb es útil porque conlleva la información direccional de la fuérza F y si esta es de atracción o de repulsión. El uso de la forma vectorial es de suma importancia cuando se considera que las fuérzas actúan sobre un conjunto de más de dos cargas.

En este caso la Ley de Coulomb en su forma vectorial, se cumple para cada par de cargas, y la fuérza total de cada carga, se determina al *sumar vectorialmente* las fuérzas debidas a cada una de las otras cargas.

Por ejemplo, la fuérza sobre la carga q_1 en un conjunto es

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \ldots\ldots$$

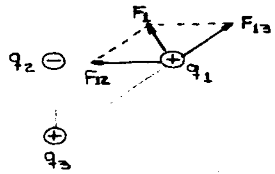


Fig. 11

en donde $\mathbf{F}_{12}$ es la fuérza sobre la carga q_1 provocada por la carga q_2, $\mathbf{F}_{13}$ es la fuérza que ejerce la carga q_1 sobre la carga q_3, y así sucesivamente.

La ecuación anterior es la representación matemática del *principio de superposición*

La fuérza que se ejerce sobre una carga debido a
la presencia de cargas, es la suma vectorial
de las fuérzas de Coulomb que actúan
sobre ella debido a estas otras cargas.

Ejemplo No. 2

La figura 12, muestra tres cargas q_1, q_2 y q_3. ¿Qué fuérza se manifiesta sobre la carga q_1 debido a la acción de las cargas q_2 y q_3? Sabiendo que $q_1 = -1 \times 10^{-6}$ Coul, $q_2 = +3 \times 10^{-6}$ Coul, $q_3 = -2 \times 10^{-6}$ Coul, $r_{12} = 15$ cm, $r_{13} = 10$ cm, y $= 30^\circ$.

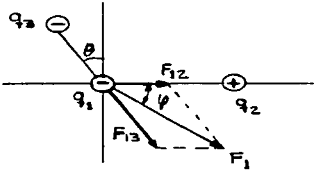


Fig. 12

Solución:

Este problema exige el uso del principio de superposición. Comenzamos por calcular las magnitudes de las fuérzas que ejercen q_2 y q_3 sobre q_1. Sustituimos las magnitudes de las cargas en la ecuación que expresa la ley de Coulomb, sin considerar sus signos por ahora.

Por lo que se tiene que:

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{q_1\,q_2}{r_{12}^2}$$

$$= \frac{(9 \times 10^{9}\ \mathrm{N.m^2/C^2})\,(1 \times 10^{-6}\ \mathrm{C})\,(3 \times 10^{-6}\ \mathrm{C})}{(0.15\ \mathrm{m})^2}$$

$$= 1.2\ \mathrm{Nw}$$

Las cargas q_1 y q_2 tienen signos opuestos de modo que la fuérza entre ellas es de atracción. De aquí que F_{12} apunte a la derecha en la figura mostrada.

y también se tiene:

$$F_{13} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_1 \, q_3}{r_{13}^2}$$

$$= \frac{(9 \times 10^9 \ N.m^2/C^2)\ (1 \times 10^{-6}\ C)\ (2 \times 10^{-6}\ C)}{(0.10\ m)^2}$$

$$= 1.8 \ Nw$$

Estas dos cargas tienen el mismo signo (negativo) de modo que la fuérza entre ellas es de repulsión.

Así, F_{13} apunta como se muestra en la figura.

Las componentes de la fuérza resultante F_1 que actúa sobre q_1 son:

$$F_1x = F_{12}x + F_{13}x = F_{12} + F_{13} \operatorname{sen} \theta$$
$$= 1.2 \ Nw + (1.8 \operatorname{sen} 30^\circ \ Nw)$$
$$= 2.1 \ Nw$$

$$F_1y = F_{12}y + F_{13}y = 0 - F_{13} \cos \theta$$
$$= -(1.8 \cos 30^\circ \ Nw)$$
$$= -1.6 \ Nw$$

$$F_1 = \sqrt{(F_1x^2 + F_1y^2)}$$
$$= \sqrt{2.1 \ Nw)^2 + (-1.6 \ Nw)^2}$$
$$= 2.6 \ Nw$$

$$\varphi = \tan^{-1} (F_1x \ / \ F_1y)$$
$$= \tan^{-1} (2.1 \ / \ (-1.6))$$
$$= -52.7^\circ$$

CAPITULO II

ELECTROMAGNETISMO

(Cargas en Movimiento)

II.1 Teoría del Magnetismo

Se dice que los griegos habían observado que las piedras de un mineral negro, conocido como piedra imán o magnetita, eran capaces de atraer pequeños pedacitos de hierro. Independientemente, los chinos descubrieron que los fragmentos de las piedras de magnetita se orientaban en una dirección norte-sur, por sí mismos, cuando eran suspendidos libremente de un hilo. Ambas son consideradas entre las propiedades fundamentales de todas las sustancias magnéticas.

Hasta hace poco, los efectos magnéticos eran estudiados por medio de débiles imanes naturales, ya que no se disponía de otros.

Después de que HANS CHRISTIAN OESTERD (1777-1851), descubrió la relación entre la electricidad y el magnetismo, fue posible la construcción de poderosos imanes artificiales por medios eléctricos. Estos pueden tener las propiedades magnéticas tanto de modo temporal como de modo permanente. Todos los imanes empleados en la práctica, son producidos artificialmente.

Se ha establecido que el magnetismo *no* es un fenómeno fundamental, sino solamente un aspecto del comportamiento *eléctrico*.

El físico danés Oesterd descubrió en 1820, que una *corriente eléctrica* en un conductor está *siempre rodeada por un campo magnético*. Esta es la base del *electromagnetismo*, algún tiempo después se hizo evidente que el *magnetismo por sí mismo debía atribuirse a las cargas eléctricas en movimiento*.

Específicamente, el movimiento de los electrones dentro de los átomos constituye una *corriente eléctrica* y esta pequeña corriente eléctrica presenta un efecto magnético.

El movimiento de cargas en un conductor cuando se mantiene un campo eléctrico dentro del mismo constituye una corriente eléctrica. Las cargas libres en un conductor metálico son cargas negativas o electrones.

La figura siguiente representa un tramo de conductor metálico.

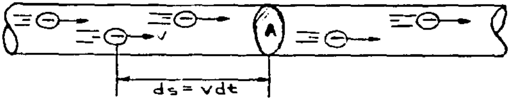


Fig. 1

Se supone que cada electrón se mueve a la misma velocidad v entonces en un tiempo dt cada uno avanza una distancia ds= vdt.

En el instante de tiempodt , el número de electrones que cruzan el área de la sección transversal A (fig. 1) es igual al número de electrones libres contenido en A v dt.

Si hay n electrones libres por unidad de volumen y e es la carga del electrón entonces la carga total dq que atraviesa el área en el tiempo dt es:

$$dq = nevA\, dt$$

En general, la cantidad de carga que atraviesa una sección de hilo metálico por unidad de tiempo (dq/dt), se denomina *intensidad de la corriente* en el hilo, o sea:

$$i = dq/dt = nevA$$

por lo que podemos expresar que,

$$dq = i\, dt$$

e integrando :

$$q = i\, t$$

La unidad de corriente, es *el amper* (así denominada en honor del científico francés ANDRE M. AMPERE), *representa la velocidad de flujo de un coulomb por segundo.*

$$amper = coulomb\ /\ seg$$

II.1.2 Campo Magnético

Un *campo magnético* existe en un punto del espacio, si una carga móvil experimenta una fuerza, debida a su movimiento, cuando pasa por dicho punto.

Las líneas del campo magnético alrededor de un alambre, en el cual existen cargas en movimiento, consisten de una serie de círculos concéntricos.

La figura 2, ilustra las líneas de fuerza representativas del campo magnético alrededor de un alambre por el que fluye una corriente. En (a) de la figura, la corriente fluye de *izquierda a derecha, y penetrando en la página* (apartándose del lector), y según se indica por la cruz en la representación plana. Las líneas del campo en este caso son *contrarias a las manecillas del reloj* como muestran las flechas.

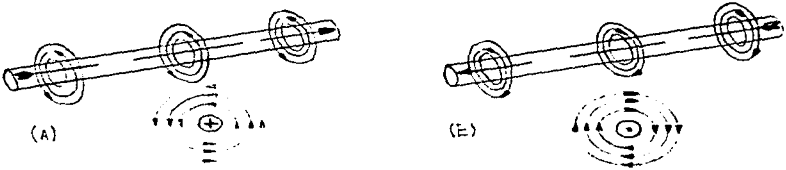


Fig. 2

En (b), la corriente fluye de *derecha a izquierda, y está fluyendo fuera de la pagina* (hacia el lector), según se indica por el punto en la representación plana. En este caso, la dirección de las líneas de fuerza, siguen el *sentido de rotación de las manecillas del reloj* como lo indican las flechas.

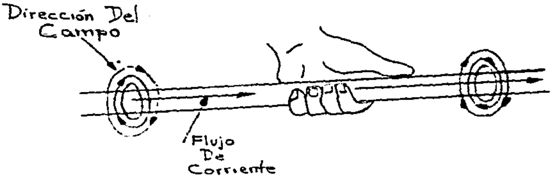


Fig. 3

La figura 3, ilustra una regla sencilla para determinar las direcciones relativas de la corriente y las líneas de fuerza: Agárrese el alambre conductor con la mano izquierda, con el pulgar apuntado el la dirección del flujo de la corriente según el alambre; cuando los dedos envuelven al conductor, están apuntando en la dirección de las líneas de fuerza.

II.1.2 Líneas de Fuerza y Densidad de flujo Magnético.

Al igual que en el caso de la electrostática, se pueden dibujar líneas de fuerza que representen la configuración de un campo magnético.

En la teoría moderna se considera que el concepto de las líneas de fuerza es imaginario, pero de gran utilidad para el trazo de los campos magnéticos y el cálculo de sus efectos.

En el sistema MKS, una sola línea de fuerza representa la unidad de flujo magnético en un campo y se denomina Weber (Wb).

El flujo magnético total (Φ) es un campo magnético, y consecuentemente, se mide por el número total de líneas de fuerza, o Webers.

Los campos magnéticos se representan por líneas llamadas de fuerza ó inducción, por convenio el número de éstas líneas por unidad de área perpendicular a la dirección de las líneas se denomina, *Densidad De flujo Magnético o Inducción Magnética (B)*, es decir:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{(Wb)}{(m^2)} = Tesla$$

En el sistema cgs una línea de inducción representa un Maxwell, Por lo que:

$$B = \frac{Maxwell}{(cm^2)} = Gauss$$

de donde se tiene además que 1 Tesla = 10^4 Gauss

II.1.3 Fuerza Sobre Una Carga Móvil

La fuerza ejercida sobre una carga debida a el campo eléctrico es despreciable comparada con la fuerza ejercida por un campo magnético.

Una carga que se mueve con una velocidad (v) dentro de un campo magnético (B), perpendicular a este, experimenta una fuerza que es a su vez perpendicular al plano formado por v y B.

El valor de la fuerza es:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

En el sistema MKS, la fuerza F ésta dada en *Nw*, la q en *Coul*, v e *m/s* y la B en *Wb/m²* ó *Teslas*.

Cuando la carga en movimiento es positiva por convención se usa la regla de la mano izquierda para encontrar el sentido de la fuerza. Así se usa el dedo índice en el sentido del campo B el dedo medio en el sentido de la *velocidad* y el pulgar para la *fuerza*, los tres dedos mencionados deben formar ángulos rectos entre sí.

II.1.4 Ley de Gauss Para el Magnetismo

Los campos magnéticos son continuos y forman trayectorias cerradas. Las líneas del campo magnético debidas a corrientes no tienen punto de inicio ni punto final. Las líneas de campo magnético de un imán (fig. 4) muestran esta afirmación.

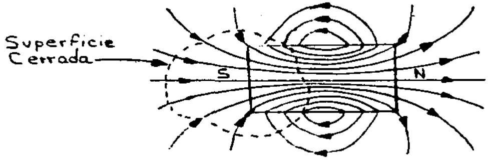


Fig. 4

Obsérvese que para cualquier superficie cerrada, el número de líneas que entran a la superficie es igual al número de líneas que salen de ella, y así el flujo magnético neto es cero.

Esto contrasta con el caso de una superficie que rodea a un dipolo eléctrico (dos cargas del mismo potencial pero de signo contrario) no es cero, tal como se muestra en la figura siguiente.

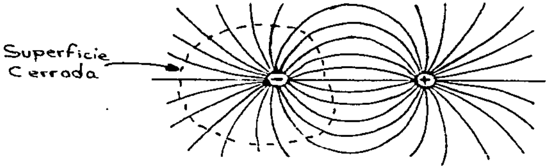


Fig. 5

En la figura se aprecia que las líneas de un campo eléctrico debido a un dipolo se inician en la carga positiva y terminan en la carga negativa, por lo que el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada alrededor de una carga no es cero.

La ley de Gauss en el magnetismo establece que:

" El flujo magnético neto a través de cualquier

superficie cerrada es cero ".

Es decir,

$$\int B \cdot dA = 0$$

Que se basa en el hecho experimental de que no han sido detectados polos magnéticos aislados (o monopolos), y quizás no existan. La únicas fuentes conocidas de campos magnéticos son los dipolos magnéticos, aún en los materiales magnéticos.

II.1.5 Fuerza Sobre un Conductor que Transporta una Corriente Eléctrica y se encuentra dentro de un Campo Magnético. Ley de Ampere.

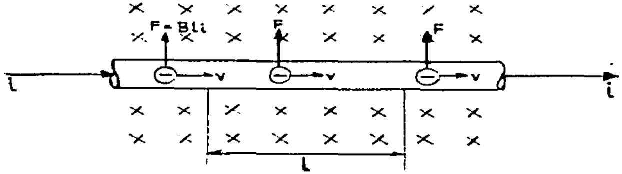


Fig. 6

En la figura anterior, se representa una porción de conductor en el cual existe flujo de electrones (corriente), desplazandose hacia la derecha. Cada electrón viaja a la misma velocidad v, en un tiempo dt, cada electrón se desplaza a una distancia $\ell = v\,dt$ el volumen contenido en este tramo de conductor es:

$$V = A\,v\,dt$$

siendo A el área de la sección transversal del conductor. Si hay n electrones libres por unidad de volumen, el número de electrones que cruzan el plano en el tiempo dt es:

$$V = A\,v\,dt$$

tomando e como la carga del electrón, se tiene que la carga total que atraviesa el área en el tiempo dt se puede expresar como,

$$dq = n\,e\,A\,v\,dt$$

y como la corriente $i = dq / dt$ entonces tenemos que:

$$i = n\,e\,v\,a$$

La figura muestra un conductor que se encuentra en un campo magnético cuando circula una corriente en dicho conductor, la fuerza sobre cada carga es $f = q\,v \times B$, el número de cargas en la longitud l es:

$$N = n\,l\,A$$

por tanto la fuerza total en esa longitud será:

$$F = N\,f = (n\,l\,A)(q\,v\,B)$$

y puesto que,

$$i = n q v A = n e v A$$

la fuerza es:

$$F = B \times l\, i$$

La ecuación anterior es la expresión matemática de la *Ley de Ampere*, que enuncia:

Cualquier conductor por el cual está circulando una corriente, y que esté localizado en un campo magnético en ángulo recto con las líneas de fuerza, será empujado por una fuerza que es directamente proporcional a la densidad de flujo magnético, a la corriente y a la longitud del conductor.

En general cuando el conductor forma un ángulo Θ con la dirección del campo tenemos:

$$F = B\, l\, i\, \operatorname{sen} \Theta$$

II.2 Campo Magnético Creado Por una Corriente. Ley de Biot-Savat

Las cargas en movimiento crean campos magnéticos en el espacio que las rodea. La corriente que fluye en un conductor, son las cargas que nos interesan. fig.7.

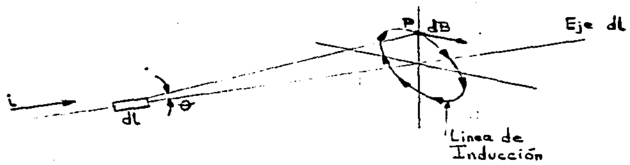


Fig. 7

Considerando un elemento dl de un conductor por el cual circula una corriente I, las cargas móviles de cada elemento, crean un campo en todos los puntos del espacio que los rodea.

En un punto P del espacio, se tiene un campo dB creado por el elemento *dl*

El vector *dB*, se encuentra en un plano perpendicular a *dl*, que a su vez es perpendicular al plano formado por dl y la recta r.

Se sabe que el campo magnético consta de líneas de inducción circulares concéntricas y perpendiculares al eje longitudinal de los conductores y cuyas tangentes son los vectores *dB*.

El sentido de estas líneas es tal que si se pusieran a girar como lo indica el vector *dB* la corriente avanzaría como si fuese un tornillo de rosca derecha.

El valor de *dB* esta dado por la expresión siguiente llamada *Ley de Amper o Ley de Biot-Savat.*

$$dB = K' \frac{i \, dl \, \text{sen}\, \theta}{r^2}$$

El factor K' es de proporcionalidad y se determina experimentalmente de manera similar como la constante K de la Ley de Coulomb, en el sistema MKS

$$K' = 10^{-7} \ \text{Wb / Amp. m}$$

en el sistema electromagnético

$$K' = 1$$

$$K' = \mu_o / 4\pi\varepsilon \qquad \mu_o = 12.57 \times 10^{-7} \ \text{Wb / Amp.m}$$

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi\varepsilon} \ \frac{i \, dl \, \text{sen}\, \theta}{r^2}$$

μ_o = Permeabilidad para el vacío

Observando la expresión se deduce que para puntos cercanos al conductor, es decir cuando

$$\theta = 0° \implies \text{sen}\, \theta = 0$$

por lo que la expresión es igual a cero.

De donde se deduce, que en el eje del elemento la densidad de flujo será máximo a una distancia r cuando el plano pasa por dicho elemento y lo corta perpendicularmente, es decir,

$$\theta = 90^\circ \;\Rightarrow\; \operatorname{sen}\theta = 1$$

La densidad de flujo resultante en cualquier punto del espacio, debido a un circuito completo es:

$$B = \int dB = \mu_o / 4\pi \int (i\, dl \operatorname{sen}\theta / r^2)$$

II.2.1 Campo Magnético de un Conductor Rectilíneo

Calculando la densidad de flujo magnético **B** en un punto **P** exterior al conductor en el cual circula una corriente.

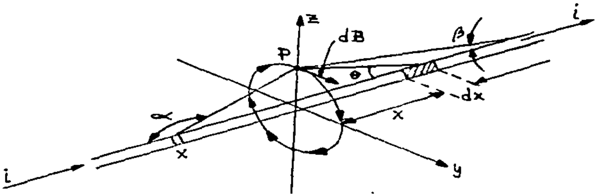


Fig. 8

Como puede observarse en la fig. 8, el elemento dx de longitud del conductor crea un campo dB en el punto P del espacio, el campo dB se encuentra en el plano yz y es perpendicular al plano xy.

El campo resultante en P es la suma de todos los elemento dB del campo y la integración puede realizarse fácilmente cambiando la variable x por la variable independiente simplificándose notablemente los cálculos, de la figura tenemos

$$\csc\theta = r/a \qquad \cot\theta = x/a$$

$$r = a\csc\theta \qquad x = a\cot\theta$$

$$dx = a\,(\,d(\cot\theta)\,) = -a\csc^2\theta\, d\theta$$

sustituyendo estos valores en la expresión de la *Ley de Ampere* tenemos:

$$B = \mu_0/4\pi \int (i\, dx \operatorname{sen}\theta / r^2)$$

$$= -(\mu_0 a\, i \csc^2\theta) / (4\pi a^2 \csc^2\theta) \int \operatorname{sen}\theta\, d\theta$$

$$= -(\mu_0 i)/(4\pi a) \int_\alpha^\beta \operatorname{sen}\theta\, d\theta$$

$$B = ((\mu_0 i)/(4\pi a))\ (\operatorname{sen}\theta - \cos\theta)$$

Para un hilo largo comparado con la distancia a y el punto *P* sin estar próximo a sus extremos se tiene que $\beta = 0$ y $\alpha = \pi$

con **b = 0° y a = 180°**

$$B = (\mu_0/4\pi)(2i/a)$$

y como $K' = (\mu_0/4\pi)$

$$B = K'(2i/a)$$

II.2.2 Fuerza Entre Dos Conductores Paralelos.

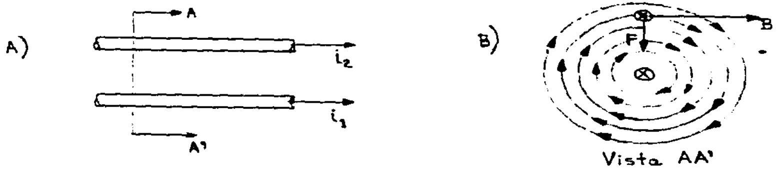


Fig. 9

La figura muestra dos conductores largos rectos separados una distancia d constante los cuales transportan corrientes de valores i_1 e i_2 respectivamente. Cada conductor estará dentro del campo magnético producido por el otro como lo muestra la figura 9b.

El conductor 2 experimentara una fuerza de valor:

$$F = B\, l\, i_2$$

El campo producido por el conductor 1 en el conductor 2 es:

$$B = K' \frac{2\, i_1}{d}$$

sustituyendo se tiene:

$$F = K' \frac{2\, i_1\, \ell\, i_2}{d}$$

y la fuerza por unidad de longitud es:

$$(F / l) = K' \frac{2\, i_1\, i_2}{d}$$

Con la regla de la mano izquierda podemos encontrar el sentido de esta fuerza, deduciéndose que dos conductores paralelos por los que circulan corrientes en el mismo sentido se atraen mutuamente, y si se invierte el sentido de la corriente, en cualquiera de los conductores estos se repelen.

El hecho de que dos conductores rectilineos paralelos ejerzan fuerzas de atracción o de repulsión mutuas se ha tomado como base para definir el *amper* en el sistema mks.

Que se define de la manera siguiente:

Un amper es la corriente invariable que, circulando por dos conductor es paralelos de longitud infinita y separados por una distancia de un metro, en el vacio, produce sobre cada conductor una fuerza de $2x10^{-7}$ New por metro de longitud.

Ahora bien *se define al Coulomb*, a partir del amper, como:

la cantidad de corriente, que atraviesa en un segundo una sección de un circuito por el cual circula una corriente constante de un amper.

De aquí se deduce que la unidad de carga en el sistema mks queda definida a partir de la fuerza entre cargas móviles, en contraste con el sistema electrostático, en el cual la unidad electrostática de carga se define en función de la fuerza electrostática que se ejerce entre cargas fijas.

II.2.3 Campo Creado por una Espira Circular

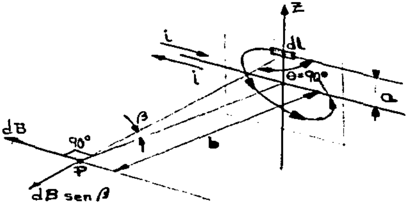


Fig. 10

La figura 10, muestra una espira circular de radio a por donde circula una corriente *i*, y P es un punto situado en el eje de la espira. Determinaremos los vectores *dB* producidos por los elementos d*ℓ* de la espira, los cuales tienen diferentes direcciones siempre perpendiculares a *r* lo que genera un cono con vértice en *P*, por simetría las componentes *dB* paralelas al eje yz se anulan entre si, de modo que solo se suman las componentes dB sen β a lo largo del eje *x*.

El ángulo θ siempre es de 90° y es el formado por *dℓ* y su correspondiente *r* por lo que tenemos:

$$B = \int d\theta \ \text{sen}\ \beta = \mu_0 / 4\pi \int (i\ d\ell\ \text{sen}\ \theta\ \text{sen}\ \beta\ /\ r^2)$$

$\text{sen}\ \theta = 1 \qquad \text{sen}\ \beta = a/r \qquad \int d\ell = 2\pi a$

$$B = (\mu_0\, i\, 2\pi\, a\, a) / (4\pi\, r^2\, r)$$

$$B = (\mu_0/2)\ (i\ a^2 / r^3)$$

y como

$$a^2 + b^2 = r^2 \quad \Rightarrow \quad (a^2 + b^2)^{3/2} = r^3$$

se puede escribir finalmente que:

$$B = (\mu_o \, i \, a^2) \; / \; (2 \, (a^2 + b^2)^{3/2})$$

y como caso particular, en el centro de la espira, o sea, cuando $b = 0$

$$B = (\mu_o \, i) \; / \, (2a)$$

II.2.4 Campo de un Solenoide

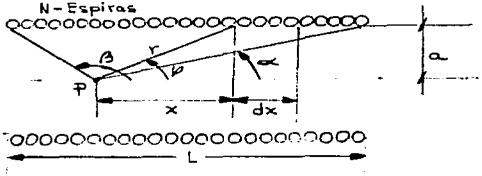


Fig. 11

En la figura 11, se muestra un arrollamiento solenoidal, en el cual para determinar la densidad de flujo en el punto P creado por la corriente que circula en las espiras hay que tomar en cuenta el numero de espiras N, la longitud L del solenoide y la corriente que circula por las espiras.

El número de espiras por unidad de longitud N/L y el número de espiras en la longitud dx es (N/L) dx, de la ecuación del campo para una espira tenemos:

$$dB \; = \; (\mu_o N \, / \, 2L) \, dx \; (a^2 \, i \, / \; (a^2 + b^2)^{3/2})$$

Cambiando la variable independiente φ en lugar de x

$$\cot \varphi = x/a \qquad b = x = a \cot \varphi$$

$$dx = -a \csc^2 \varphi \; d\varphi$$

$$dB = -(\mu_o N i/2L)\left((a^2 a \csc^2 \varphi \; d\varphi) / (a^2 + a \cot^2 \varphi)^{3/2}\right)$$

$$= -(\mu_o N i/2L)\left((a^3 \csc^2 \varphi \; d\varphi) / (a^2 (1 + a \cot^2 \varphi)^{3/2})\right)$$

y como

$$1 + a \cot^2 \varphi = \csc^2 \varphi$$

se tiene que

$$= -(\mu_o N i/2L)\left((a^3 \csc^2 \varphi \; d\varphi) / (a^3 \csc^3 \varphi)\right)$$

$$= -(\mu_o N i/2L)\left(d\varphi / \csc \varphi\right)$$

y con:

$$1 / \csc \varphi = \operatorname{sen} \varphi$$

se tiene:

$$B = -(\mu_o N i / 2L) \int_{\alpha}^{\beta} \operatorname{sen} \varphi \; d\varphi$$

$$B = (\mu_o N i / 2L)(\cos \alpha - \cos \beta)$$

En los puntos del eje dentro del solenoide, proximos a su centro considerando

$$\alpha = 0^\circ \text{ y } \beta = 180^\circ$$

se tiene:

$$B = (\mu_o N i) / L$$

La densidad en un extremo del solenoide, es decir,

$$\alpha = 0^\circ \text{ y } \beta = 90^\circ$$

se tiene:

$$B = (\mu_o N i) / 2L$$

de donde se deduce, que la densidad en los extremos respecto a los puntos interiores cercanos al centro.

II.2.8 Campo de una Toroide

Si engordamos el arrollamiento de un solenoide hasta tener una forma circular tenemos un arrollamiento llamado Toroide.

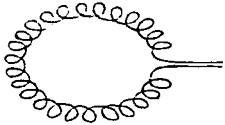


Fig. 12

Como todo el flujo se aloja en el interior de las espiras, la densidad en cualquier punto dentro del arrollamiento es igual a la del solenoide

$$B = (\mu_o N i) / L$$

Siendo L, la longitud media de la circunferencia Toroidal.

II.3 Fuerza Electromotriz Inducida (f.e.m.)

Recordando que una carga que se encuentra en movimiento dentro de un campo magnético, experimenta una fuerza,

$$f = q\, v \times B.$$

Ahora se considera a un conductor dentro de un campo magnético el cual se pone en movimiento. La siguiente figura muestra dicho conductor.

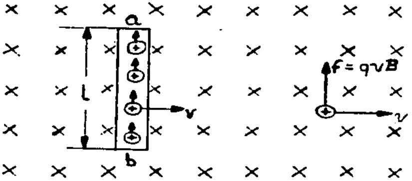


Fig. 13

Por la regla de la mano izquierda se deduce que actuará una fuerza en las cargas positivas moviéndolas de "*b*" a "*a*".

Se observa que las cargas tienen dos velocidades:

1) De izquierda a derecha debido al movimiento del conductor.
2) De abajo hacia arriba debido a la fuerza $f = qv \times B$ producida por el campo magnético.

Agregando al conductor móvil un conductor fijo en forma de "*U*" como se muestra en la figura siguiente.

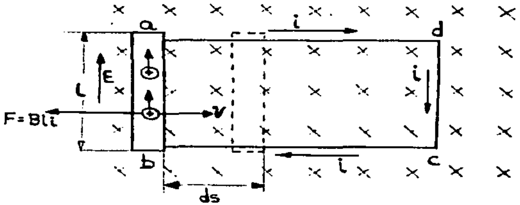


Fig. 14

El movimiento de las cargas positivas crea una corriente permanente al existir un circuito cerrado, siendo el sentido de ésta el que se muestra en la figura, que puede deducirse con la regla de la mano izquierda.

Al existir un conductor por el que circula una corriente localizado dentro de un campo magnético éste experimentará una fuerza:

$$F = B \times l\, i$$

el sentido de esta fuerza se deduce a partir de la regla de la mano izquierda.

Como consecuencia es necesario ejercer una fuerza exterior para sostener al conductor en movimiento esto se entiende fácilmente como la transformación directa de energía mecánica a energía eléctrica.

El conductor móvil se comporta como un *generador de fuerza electromotriz.*

Se define la *fuerza electromotriz* como la razón del trabajo realizado en las cargas circundantes a la cantidad de carga desplazada, esto es:

$$f.e.m. = E = dw / dq$$

la fuerza ejercida sobre el conductor (despreciando la fricción) para mantenerlo en movimiento es:

$$F = B \times l\, i$$

La distancia que recorre en un tiempo dt es

$$ds = v\, dt$$

el trabajo realizado en esta distancia

$$dW = F\, ds = B\, l\, i\, v\, dt$$

recordando que la corriente es

$$i = dq / dt \quad \text{se tiene,} \quad dq = i\, dt$$

y sustituyendo en dW

$$dW = B\, l\, v\, dq$$

$$dW / dq = B\, l\, v$$

Además $E = dW / dq$ por lo que finalmente se tiene que

$$E = B\, l\, v$$

En el sistema MKS, E se expresa en:

$$(\ \text{Jouls} / \text{Coul}\ ) \quad \text{ó} \quad (\ \text{Volts}\ )$$

el *sentido de la f.e.m., campo y movimiento* pueden deducirse ahora por la *regla de la mano derecha*, donde el dedo pulgar representa el movimiento del conductor, el índice el sentido del campo y el medio la f.e.m. o también la corriente.

El conductor producirá una f.e.m. aún cuando el circuito este abierto, o sea, $i = 0$

II.3.1 Ley de Faraday

Hay otra manera de deducir la f.e.m., observando la figura anterior se tiene que el conductor se ha movido hacia la derecha una distancia ds, el área total del circuito a,b,c,d se ha disminuido en una área,

$$dA = l\ ds$$

entonces la variación del flujo magnético $d\phi$, que atraviesa por la superficie del circuito es:

$$d\phi = -B\ dA = -B\ l\ ds$$

Si dividimos estas igualdades entre *dt* tendremos,

$$-d\phi / dt = B\ l\ ds/dt = B\ l\ v = \varepsilon$$

$$\varepsilon = -d\phi / dt$$

A la expresión anterior, se le conoce como expresa *la Ley de Faraday*, que expresa:

" Que la f.e.m. inducida en un circuito es igual a la variación del flujo con respecto al tiempo pero cambiada de signo ".

Es decir, puede inducirse una f.e.m. con solo variar el flujo magnetico $d\phi$ con algún medio determinado, sin que existan movimientos relativos entre los elementos de los circuitos (como es el caso de los transformadores).

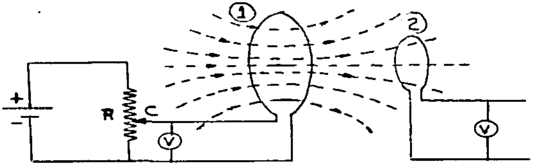


Fig. 16

La figura 16, nos muestra un circuito 1 por el cual circula una corriente variable, que se produce al deslizar el contacto "C" en la resistencia "R".

Experimentalmente se encuentra una f.e.m.

$$\varepsilon = -\, d\phi \,/\, dt \quad \text{en el circuito 2}$$

Los circuitos 1 y 2 no tienen movimientos relativos uno con respecto del otro, por lo tanto la f.e.m. inducida en el circuito 2 se debe exclusivamente a la variación del flujo el que a su vez es debido a la variación de la corriente que lo produce.

II.3.2 Ley de Lenz

Esta ley establece que:

El sentido de una f.e.m. inducida es tal que se opone a la causa que la produce.

Como se ha mencionado se puede producir una f.e.m. de dos maneras distintas:

1) La f.e.m. es producida por el movimiento relativo de un conductor en un campo magnético. La f.e.m. se opone a esta causa, es decir, crea una corriente la cual al actuar dentro del mismo campo, produce una fuerza, la que se opone al movimiento del conductor.

2) La f.e.m. es producida por la variación del flujo.

En este ultimo caso la f.e.m. crea una corriente como en el circuito 2 (fig. 16), de la Ley de Faraday, esta corriente produce un flujo ϕ_2 el que se opone a la variación del flujo ϕ_1; nótese que no se opone al flujo ϕ_1 sino a su variación, así tenemos que si el flujo ϕ_1 aumenta el flujo ϕ_2 se opone a su crecimiento y si el flujo ϕ_1 disminuye entonces el flujo ϕ_2 se suma a ϕ_1 para no dejar que disminuya cumpliéndose de este modo la Ley de Lenz.

II.3.3 Inducción de una f.e.m. en una Bobina rotatoria. El Generador

Se ha visto que una f.e.m. continua se induce en un conductor que se mueve a una cierta velocidad a través de un campo magnético. Como uno puede llegar a cansarse de estar pasando un alambre por un campo magnético, una manera más fácil de obtener la generación de tal f.e.m. continua, es la de hacer rotar una bobina entre dos polos de un imán (o electroimán) de tal manera que los conductores de la bobina corten las líneas de fuerza del campo magnético.

Tal disposición se muestra en la fig. 17, siendo este el principio básico de la operación de todos los tipos de generadores eléctricos. El tipo mostrado en la figura es un *generador de corriente alterna (C.A.).*

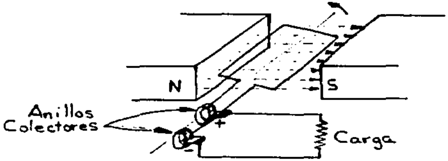


Fig. 17

Las partes esenciales de un generador eléctrico son: la bobina de la armadura, y los medios de conexión de la bobina rotatoria al circuito externo.

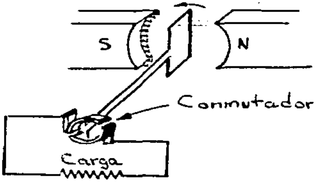


Fig. 18

En el generador de corriente alterna, las escobillas giran sobre anillos colectores continuos, en el caso de los *generadores de corriente directa* (figura 18), las escobillas giran sobre los segmentos de un anillo dividido (o conmutador).

II.4 Autoinductancia.

Se ha visto que un voltaje se induce en un conductor, siempre que el flujo magnético que concatena en el mismo es variable. Si el campo magnético es debido a un conductor que lleva una corriente, una variación en el número de las líneas de campo, acompañará a cualquier variación de la corriente.

Independientemente de la manera en que se produzca, siempre que las líneas de fuerza de un campo magnético creciente o decreciente corten a través de un conductor (o del número de vueltas de una bobina), se induce una f.e.m.

Por la Ley de Lenz, también se recordará, que el voltaje inducido es siempre de tal dirección, que se opone al cambio (a la variación) de la corriente que lo produce. Así, cuando un voltaje aplicado a la bobina, produzca un flujo de corriente en la bobina del circuito, el voltaje inducido en la bobina se opondrá a la corriente y al voltaje que las produjo.

Por esta razón, al voltaje inducido también se le conoce como fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.).

La propiedad característica de un circuito capaz de inducir un voltaje o una fuerza f.c.e.m., se denomina inductancia. A mayor inductancia en un circuito, mayor habrá de ser su oposición a las variaciones de la corriente, y por consiguiente, mayor será la f.c.e.m.

El símbolo esquemático de un circuito de inductancia (L), es una bobina ( ), significando esto, que la propiedad está principalmente relacionada con las bobinas.

II.4.1 Inductancia Mutua

Con frecuencia el flujo magnético varía con el tiempo como consecuencia de las corrientes variables que existen en circuitos cercanos. Esto da origen a una f.e.m inducida mediante un proceso conocido como *inducción mutua*, llamada así porque depende de la interacción de dos circuitos.

Consideremos dos bobinas devanadas en forma muy estrecha, como se muestra en la vista de la sección transversal de la figura siguiente.

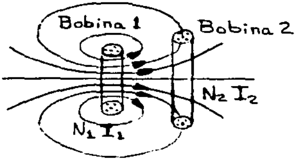


Fig.19

La corriente I_1 en la bobina 1, que tiene N_1 espiras, genera líneas de campo magnético, algunas de ellas atravesarán la bobina 2, que tiene N_2 espiras. El flujo correspondiente a través de la bobina 2 producido por la bobina 1 se presenta por ϕ_{21}.

Se define la inductancia mutua M_{21} de la bobina 2 con respecto a la bobina 1 como la razón de $N_2\,\phi_{21}$ a la corriente i_1:

$$M_{21} = \frac{N_2\,\phi_{21}}{i_1}$$

II.4.2 Magnitud de la Fuerza Contraelectromotriz Inducida (f.c.e.m.).

En una bobina conductora de corriente, la velocidad de cambio del flujo es proporcional a la velocidad de cambio de la corriente en la bobina.

En forma más sencilla, se puede enunciar que la f.c.e.m. inducida en una bobina es proporcional a la velocidad de cambio de la corriente en la bobina.

$$\text{f.c.e.m.} = \varepsilon = -L\ (di/dt)$$

donde di/dt, representa la relación entre un cambio muy pequeño en la corriente y un cambio también pequeño en el tiempo, es decir, la velocidad de cambio de la corriente; a

la constante de proporcionalidad, L, se le denomina, coeficiente de *auto-inductancia, o sencillamente, inductancia*.

Como el flujo magnético es proporcional al campo magnético, que a su vez es proporcional a la corriente, se tiene que para una bobina de N espiras muy juntas y de geometría fija (una bobina toroidal o un solenoide ideal) se encuentra que:

$$f.c.e.m = \varepsilon = -N\,(d\phi/dt)$$

El *signo menos* significa que el voltaje inducido se opone al voltaje aplicado.

La formula también sirve para definir la unidad de inductancia, llamada Henrio (en honor de JOSEPH HENRY).

La autoinductancia de una bobina es de 1 Henrio, si la variación de la corriente es de 1 Amper por segundo, induce una f.c.e.m de 1 Volt.

Frecuentemente se emplean unidades más pequeñas, tales como el mili-henrio (mh), que representa una milésima de un Henrio, y el micro-henrio (μh), que representa una millonésima de un Henrio.

II.4.3 Inductores en Serie.

Si los inductores se encuentran espaciados de tal forma que su inductancia mutua sea insignificante, la inductancia total L de un número de inductores conectados en serie, como se muestra en la fig. 20, es simplemente la suma de las inductancias individuales, lo que se expresa:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + ...$$

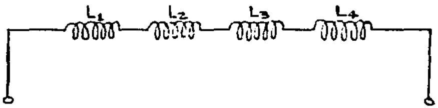


Fig. 20

pero si dos inductancias se encuentran conectadas en serie, de tal forma que sus campos magnéticos se concatenen, su inductancia total es

$$L = L_1 + L_2 \ (+,-) \ 2M$$

donde M es la inductancia mutua entre las bobinas.

El signo más de la expresión se utiliza si las bobinas están conectadas en serie aditiva, en forma tal que la corriente fluye en la misma dirección, aumentando la magnitud del campo magnético

El signo menos se usa si las bobinas están conectadas en serie sustractiva, o sea de tal forma que sus campos magnéticos individuales se oponen entre sí disminuyendo el campo magnético total.

Ejemplo No 1.

Un reactor (bobina con núcleo de hierro) de 5 Henrios y otro de 12 Henrios están conectados en serie situados muy apartados entre sí ¿ Cuál es su inductancia total ? Si dichos reactores se aproximan de modo que su inductancia mutua de acoplamiento es de 7 Henrios. ¿ Cuál es su inductancia total si ?

a) la corriente fluye por ambas bobinas en el mismo sentido y
b) si lo hace fluyendo por cada bobina en sentido opuesto.

Solución:

Para las bobinas no acopladas

$$L = L_1 + L_2 = 5 + 12 = 17 \text{ Henrios}$$

a) para las bobinas conectadas en serie aditiva

$$L = L_1 + L_2 + 2M = 5 + 12 + 14 = 31 \text{ Henrios}$$

b) para las bobinas conectadas en serie sustractiva

$$L = L_1 + L_2 - 2M = 5 + 12 - 14 = 3 \text{ Henrios}$$

II.4.4 Inductores en Paralelo

Cuando se conectan en paralelo bobinas de inductancia, que están apartadas entre sí lo suficiente para que la inductancia mutua no sea de consideración, *la inductancia total* de dos bobinas conectadas en paralelo es

$$L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

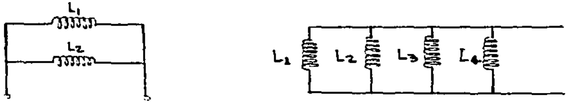


Fig. 21

La inductancia total, para un número "n" de inductancias en paralelo, es igual a la reciproca de la suma de las reciprocas de las inductancias individuales, es decir

$$L = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}}$$

Ejemplo No. 2

Cierto numero de inductores están conectados entre si formando una red de inductancias. El grupo A está constituido por cuatro inductancias de 12 henrios cada uno conectados en paralelo, el grupo B de un reactor (inductancia con nucleo de hierro) de 5 henrios también en paralelo; el grupo C de un inductor de 4 henrios; y el grupo D por otros dos inductores de 7 henrios y 9 henrios respectivamente también conectados en paralelo. Los cuatro grupos A, B, C, D, están conectados en serie entre sí.

¿ Cuál es la inductancia total ?

Solución:

La inductancia del grupo A

$$L_A = \frac{1}{4 / 12} = \frac{12}{4} = 3 \text{ henrios}$$

La inductancia del grupo B

$$L_B = \frac{(3)(5)}{3+5} = \frac{15}{8} = 1.875 \text{ henrios}$$

La inductancia del grupo C

$$L_C = \frac{(4)(6)}{4+6} = \frac{24}{10} = 2.4 \text{ henrios}$$

La inductancia del grupo D

$$L_D = \frac{(7)(9)}{7+9} = \frac{63}{16} = 3.94 \text{ henrios}$$

y finalmente la inductancia total de todos los grupos conectados en serie

$$L = L_A + L_B + L_C + L_D = 3 + 1.875 + 2.4 + 3.9$$

$$L = 11.22 \text{ henrios.}$$

II.4.5 Constante de Tiempo en un Circuito Inductivo (R-L).

En la figura se representa una autoinductacia L pura (sin resistencia) y una resistencia en serie, entre dos puntos mateniendos a una diferencia de potencial constante Vab.

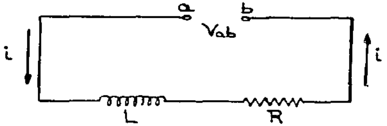


Fig. 22

Siendo i la intensidad de corriente en el circuito un cierto instante despues de efectuar la conexión, y di/dt su derivada. Se tiene:

$$Vab = \Sigma\, iR - \Sigma \varepsilon$$

y considerando que

$$\varepsilon = - L\, di/dt$$

podemos escribir

$$(di/dt) + (R/l)i - (vab/L) = 0$$

de donde se obtiene

$$i = Vab/R\ (1 - \varepsilon^{-Rt/L})$$

Puesto que Vab/R es igual a la corriente final I, en el circuito podemos escribir:

$$i = I\,(1 - \varepsilon^{-Rt/L})$$

Cuya representación grafica se aprecia en la figura siguiente.

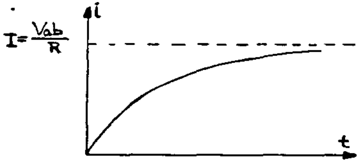


Fig. 23

En esta grafica se aprecia que se requiere un tiempo infinito para que la corriente alcance su valor final; pero, para cualquier valor R/L que pueda encontrarse en la práctica, basta un tiempo muy corto para que la corriente alcance esencialmente su valor final, es decir, para que la corriente del circuito alcance el 63.3% de su valor máximo,.

La "constante de tiempo" t del circuito, el tiempo en segundos, necesario para que la intensidad de la corriente aumente hasta 1- (1/ ε) de su valor final, es:

$$t = L/R$$

Si se ponen en cortocircuito las terminales de la inductancia en el preciso instante en que se abre el interruptor de la fuente de alimentación, la corriente de la bobina sigue circulando a la acción del campo en contracción.

La constante de tiempo se puede utilizar para determinar el momento en que la intensidad a disminuido en un 63.2 %, o sea que ha llegado al 36.8 % de su valor máximo original.

Si se conecta una bobina (inductancia) en serie con una resistencia, la corriente no se establecerá instantaneamente, sino que aumentará con rapidez al principio para despues hacerlo con mayor lentitud a medida que va llegando al máximo.

En los circuitos R-L o inductivos, cuanto menor sea la resistencia del circuito, mayor será la constante de tiempo para el mismo valor de inductancia. Todo circuito inductivo tiene resistencia puesto que el conductor empleado para la bobina o inductancia siempre tiene resistencia, por lo que una inductancia perfecta (carente de resistencia) es prácticamente imposible.

II.4.6 Energía Almacenada por un Inductor

Cuando se cierra el interruptor de la fig. 24, la corriente en el circuito aumenta desde cero hasta un valor final Vab/R. En el instante en que la corriente es i y crece en la proporcion di/dt, se tiene:

$$Vab = Vax + Vxb = L\,(di/dt) + Ri$$

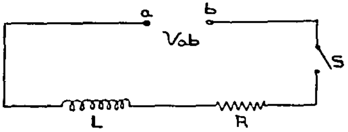


Fig. 24

la potencia suministrada al circuito en ese instante es:

$$P = i\ V_{ab}$$

es decir,

$$P = Li\ di/dt + i^2R$$

El último termino de la expresión anterior, es la potencia suministrada a la resistencia. El primer termino es la potencia suministrada a la autoinducción L.

En consecuencia, se suministra energía a la autoinducción mientras la corriente está aumentando.

Cuando la corriente ha alcanzado su valor final estacionario $di/dt = 0$ y cesa el suministro de potencia a la autoindución. La energía suministrada a la autoinducción se utiliza para establecer el campo magnético que rodea a ésta, quedando almacenada en dicho campo como energía potencial.

Si se abre el interruptor, desaparece el campo magnético y la energía pasa de nuevo al circuito. Esta energía cedida es la que mantiene el arco que se observa a veces cuando se abre un interruptor en un circuito inductivo.

La energía asociada al campo magnético de la corriente transportada por una autoinductancia L, puede calcularse del modo siguiente.

La potencia instantánea suministrada a la autoinductancia es:

$$P = dW/dt = Li\ \ di/dt$$

por tanto,

$$dW = Li\ di$$

y finalmente

$$W = \int dW = \int Li\ di$$

$$W = ½\ L\ I^2$$

siendo W la energía suministrada mientras la corriente aumenta desde cero hasta el valor I. Además se cede la misma cantidad de energía cuando la corriente desciende a cero.

II.4.7 Propiedades Magnéticas De la Materia

La mayor parte de los materiales solo presentan efectos ligeros sobre un campo magnético estacionario. Supongamos que se utiliza un solenoide muy largo o un toroide en el vacío. Cuando se establece una corriente fija a través de la bobina, la inducción magnética en cierto punto del solenoide o del toroide es B_v, donde el subíndice v significa que se trata del vacío. Si ahora el nucleo del solenoide o del toroide se llena con un material, el campo en ese punto cambiará a un nuevo valor B.

Se define que:

permeabilidad relativa del material = $K_m = B/B_v$

permeabilidad del material = mu = $K_m\mu_o$

recuérdese que μ_o es la permeabilidad del vacío, y es igual a $4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A

Materiales diamagnéticos son aquéllos que tienen valores para K_m ligeramente menores que la unidad (0.999 984 para Plomo sólido, por ejemplo) Ellos hacen disminuir ligeramente el valor de B en el solenoide o toroide.

Materiales paramagnéticos son aquellos que tienen valores para K_m ligeramente mayores que la unidad (1.000 021 para el Aluminio, por ejemplo). Ellos incrementan ligeramente el valor de B en el solenoide o toroide.

Materiales ferromagnéticos son aquellos, como el Hierro y sus aleaciones, que tienen valores de K_m de aproximadamente 50 o mayores. Ellos incrementan grandemente el valor de B en el toroide o solenoide.

Las *propiedades magnéticas* de los materiales también pueden ser descritas en términos de su respuesta a un campo externo.

En general, cualquier espira por la cual fluye una corriente genera una campo magnético y su correspondiente momento magnético. Los momentos magnéticos en las sustancias magnetizadas están asociados con corrientes atómicas internas. Estas corrientes pueden verse como electrones orbitando alrededor del núcleo y como los protones uno sobre de otro en el interior de núcleo.

Así pues, los átomos de los materiales ferromagnéticos y paramagnéticos tienen momentos magnéticos permanentes. Los materiales diamagnéticos constan de átomos con momentos magnéticos no permanentes.

Cuando un material paramagnético o ferromagnético se coloca en un campo magnético externo, sus dipolos tienden a alinearse paralelamente al campo, y esta alineación se convierte en un aumento en el campo total. El aumento en el campo debido a materiales paramagnéticos es pequeño. Esto se debe a que los dipolos magnéticos en una sustancia paramagnética están orientados al azar en ausencia del campo. Los dipolos se alinean parcialmente en presencia de un campo aplicado.

CAPITULO III

CAMPO Y POTENCIAL

III.1 Campo de Fuerza Eléctrico

Como hemos mencionado, un cuerpo cargado eléctricamente, ejerce una fuerza física sobre los cuerpos que lo rodean. El área de influencia en la vecindad de ese cuerpo cargado se conoce como campo eléctrico de fuerza, o simplemente campo eléctrico **E**. Este se puede detectar con una *carga de prueba (considerada como una carga positiva)* la cual al introducirse a dicho campo experimentara una fuerza **F**, de atracción o repulsión, dependiendo del signo de su carga, que no se produce si se retira el cuerpo cargado.

La dirección de un campo eléctrico en cualquier punto en el espacio, es la dirección en la cual una carga de prueba q_o, colocada en dicho punto, sería obligada a moverse o desplazarse.

La intensidad del campo eléctrico **E**, se define como el cociente de la fuerza ejercida sobre la carga de prueba entre la cantidad de carga q_o, de la carga de prueba.

$$E = F / q_o \quad (Nw / Coul)$$

El sentido del campo eléctrico en un punto es el mismo que la fuerza ejercida sobre una carga de prueba positiva colocada en dicho punto.

III.1.1 Campo Eléctrico debido a una Carga Puntual

Considérese una carga puntual q ubicada a una distancia r de una carga de prueba q'. Según la *Ley de Coulomb*, la fuerza sobre esta carga de prueba es

$$F = K \frac{q\,q'}{r^2}\, r$$

Como el campo eléctrico en la posición de la carga de prueba se define como:

$$E = F / q_o$$

se tiene que el campo eléctrico debido a la carga q en la posición de q' es

$$F = K \frac{q}{r^2}\, r$$

donde r es un vector unitario que está dirigido de q hacia q'. Si q es positiva, como en la figura (1a), el campo esta dirigido radialmente hacia afuera de ella. Si q es negativa (fig. 1b), el campo esta dirigido radialmente hacia ella.

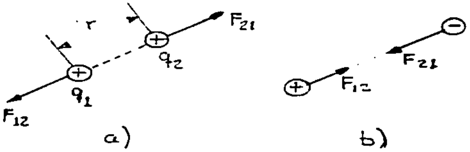


Fig. 1

Para determinar el valor del campo debido a un grupo de cargas puntuales, primero se calcula el vector de campo eléctrico en el punto P, en forma individual y después sumarlos vectorialmente. Es decir,

el campo eléctrico total debido a un grupo de cargas es igual al vector resultante de la suma de los campos eléctricos de todas las cargas.

Este *principio de superposición de los campos eléctricos* se deduce directamente de la propiedad de superposición de las fuerzas eléctricas. Por lo tanto el campo eléctrico de un grupo de cargas (excluyendo la carga de prueba q') se puede expresar como:

$$E = K \sum \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

donde r_i es la distancia de la I- enésima carga q_i, al punto P (ubicación de la carga de prueba), y $\hat{r}_i$ es un vector unitario dirigido desde qi hasta P.

III.1.2 Líneas de Fuerza en un Campo Eléctrico

Este concepto fue ideado por Michel Faraday para representar campos eléctricos o magnéticos. Una línea de fuerza, es una línea imaginaria que sirve para visualizar los patrones del campo eléctrico en varios puntos y están relacionadas con éste de la siguiente manera:

1. **El vector campo eléctrico E es tangente a la línea de campo eléctrico en cada punto.**
2. **El número de líneas por unidad de área que pasan por una superficie perpendicular a las líneas de campo es proporcional a la magnitud del campo eléctrico en esa región. En consecuencia, E es grande cuando las líneas están muy próximas entre si, y es pequeña cuando están separadas. (fig. 2)**

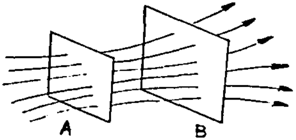


Fig. 2

Las líneas representativas del campo eléctrico para una carga puntual positiva se aprecia en la (fig. 3a), nótese que las líneas del campo están representadas en el plano que contiene a la carga, pero en realidad las líneas están radialmente dirigidas hacia afuera de la carga positiva.

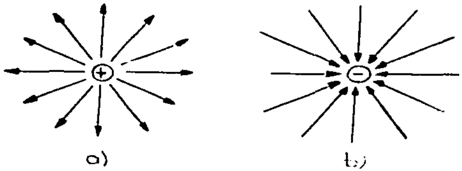


Fig. 3

En forma similar una carga puntual negativa (fig. 3b) las líneas de campo eléctrico están dirigidas hacia la carga.

Las reglas para trazar las líneas de campo eléctrico de cualquier distribución de carga son las siguientes:

1. Las líneas deben partir de cargas positivas y terminar en cargas negativas, o bien en el infinito en el caso de exceso de carga.
2. El numero de líneas que se apartan de la carga positiva o lleguen a la negativa es proporcional a la magnitud de la carga.
3. Dos líneas de fuerza nunca deben cruzarse.

Las líneas de campo eléctrico para dos partículas cargadas con igual magnitud, pero de signos contrarios opuestos (dipolo eléctrico), se muestran en la fig. 4, en este caso el numero de líneas que empiezan en la carga positiva debe ser igual al numero que terminan en la carga negativa. En puntos cercanos a las cargas, las líneas son prácticamente radiales. La alta densidad de las líneas entre las cargas indica una región de campo eléctrico intenso.

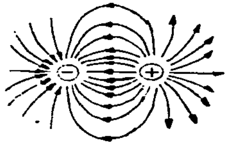


Fig. 4

La fig. 5, muestra las líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales positivas y de igual magnitud. Las líneas son casi radiales en los puntos cercanos a las cargas. además emerge el mismo número de líneas desde cada carga, ya que éstas tienen magnitudes iguales. A grandes distancias de las cargas el campo eléctrico es aproximadamente igual al de una sola carga puntual de magnitud 2q.

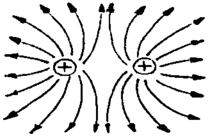


Fig. 6

III.1.3 Campo Eléctrico de una Distribución Continua de Carga

Con mucha frecuencia un grupo de cargas pueden estar muy próximas entre sí en comparación con las distancias a los puntos que se consideran. En situaciones de este tipo, puede considerarse al sistema como si fuera contínuo.

Es decir, se supone que el sistema de cargas muy próximas es equivalente a una carga total continuamente distribuída a través de un volumen o sobre una superficie.

En una distribución de carga contínua, el campo eléctrico **dE** en un punto **P** debido al elemento de carga **dq** está dado por:

$$dE = K \frac{dq}{r^2} \, r$$

donde r es la distancia desde el punto P y r es el vector unitario dirigido desde el elemento de carga hacia P. El campo eléctrico total en P debido a todos los elementos en la distribución de carga está aproximadamente dado por

$$E = K \frac{dq_i}{r_i^2} \, r_i$$

donde el índice i se refiere al enésimo elemento en la distribución de carga. Si la separación entre los elementos de la distribución de carga es pequeña comparada con la distancia a P, como una aproximación puede considerarse que la distribución de carga es continua. Por lo tanto, el campo total en P en el límite dq cuando éste tiende a cero, viene a ser

$$E = K \lim_{dq \to 0} \frac{dq_i}{r_i^2} r_i$$

$$E = K \frac{dq}{r^2} r$$

en donde la integral es una operación vectorial, o en forma general :

$$E = K \frac{dq}{r^2}$$

III.1.4 Densidad De Carga Volumétrica, Superficial y lineal.

Si una carga Q esta uniformemente distribuida en un volumen V, la carga por unidad de volumen ρ , está definida por

$$\rho = Q/V$$

donde ρ tiene unidades de Coul/m^3.

Si una carga Q está uniformemente distribuida sobre una superficie de área A, la densidad de carga superficial σ, esta definida por

$$\sigma = Q/A$$

donde σ tiene unidades de Coul/m^2.

Finalmente, si una carga Q está uniformemente distribuida a lo largo de una línea de longitud l, la densidad de carga lineal λ se define como

$$\lambda = Q/l$$

donde λ tiene unidades de Coul/m.

Si la carga no esta uniformemente distribuida sobre un volumen, superficie o línea, se tendrían que expresar las densidades de carga como

$$\rho = dQ / dl \qquad \sigma = dQ / dl \qquad \lambda = dQ / dl$$

donde dQ es la cantidad de carga en un elemento pequeño de volumen, superficie o longitud.

III.2 Flujo Eléctrico

Considerando un campo uniforme tanto en magnitud como en dirección, como se muestra en la fig. 7. Las líneas de campo eléctrico penetran a una superficie rectangular de área A, a la cual es perpendicular al campo, ha de recordarse que las líneas por unidad de área es proporcional a la magnitud del campo eléctrico. De aquí que el número de líneas que penetran la superficie de área A es proporcional al producto EA. El producto de la intensidad del campo eléctrico E y el área superficial A perpendicular al campo se conoce como flujo eléctrico, Φ:

$$\Phi = EA$$

donde Φ tiene en el sistema MKS las unidades de Nw. m^2 / Coul

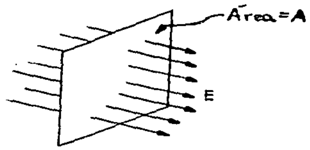


Fig. 7

Si la superficie A en consideración no es perpendicular al campo, y forma un ángulo θ con el campo eléctrico uniforme, el flujo eléctrico es igual al flujo eléctrico que cruza el

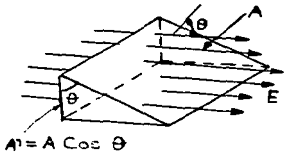


Fig. 8

área proyectada A' la cual es perpendicular al campo de la fig. 8, se ve que $A' = A \cos \theta$, de donde se concluye que:

$$\Phi = EA \cos \theta$$

Consideremos ahora una superficie de forma irregular dividida en un gran número de pequeños elementos, cada uno de área ΔA, definiendo además el vector ΔA_i. cuya magnitud representa el área del I-enésimo elemento y cuya dirección queda definida como perpendicular a la superficie, según se ve en la fig. 9.

El flujo eléctrico $\Delta\Phi_i$ a través de este pequeño elemento está dado por :

$$\Delta\Phi_i = E_i \, \Delta A_i \cos \theta = E_i \, \Delta A_i$$

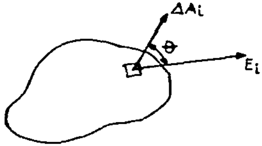


Fig. 9

Sumando la contribución de todos los elementos, se obtiene el flujo total a través de la superficie. Si el área de cada uno de los elementos se hace que tienda ha cero, entonces el número de elementos tiende al infinito y la suma se sustituye por una integral. En consecuencia, la definición general de flujo eléctrico es

$$\Phi = \lim_{\Delta A_i \to 0} \sum E_i \, \Delta A_i = \int E \, dA$$

Si se considera una *superficie cerrada* (superficie que divide el espacio en una región interna y otra externa, así que uno no puede moverse de una región a otra sin atravesar la superficie. La superficie de una esfera, por ejemplo, es una superficie cerrada).

El *flujo total o neto* que pasa a través de la superficie es proporcional al número neto de líneas que pasan a través de ella, es decir, el número de líneas que salen de la superficie, menos el número de líneas que entran a ella.

Si se tienen más líneas salientes que entrantes, el ***flujo neto es positivo.***

Si entran más líneas que las que salen de la superficie, el ***flujo neto es negativo.***

Si utilizamos el símbolo $\oint$ para representar una superficie cerrada, se puede escribir el flujo neto Φ_c a través de una superficie cerrada

$$\Phi_c = \oint E \, dA = \oint E_n \, dA$$

donde E_n representa la componente del campo eléctrico perpendicular, o normal, a la superficie, y el subíndice c denota una superficie cerrada.

III.2.1 Ley de Gauss

Consideremos una carga puntual q localizada en el centro de una esfera de radio r como se muestra en la figura 10. De la ley de Coulomb se sabe que la magnitud del campo eléctrico en cualquier punto sobre la superficie de la esfera es $E = kq/r2$.

Además, las líneas de campo son radiales hacia afuera, y son perpendiculares (o normales) a la superficie en cada punto. Esto es, en cada punto, E es paralelo al vector ΔA_i que representa al elemento local de área ΔA_i. Por lo tanto,

$$E \cdot \Delta A_i = E_n \Delta A_i = E \Delta A_i$$

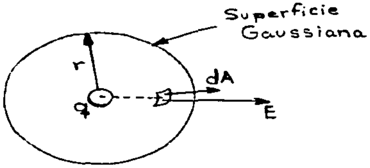


Fig. 10

y de la ecuación para el cálculo del flujo neto Φ_c a través de la superficie gaussiana esta dada por

$$\Phi_c = \oint E_n \, dA = \oint E \, dA = E \oint dA$$

donde E es constante sobre la superficie y dado por E = Kq/r2.

Y como el area para la superficie esférica es,

$$\oint dA = A = 4\pi r^2$$

el Φ_c de la superficie gaussiana es

$$\Phi_c = (Kq / r^2)(4\pi r^2) = 4\pi kq$$

Recordando que $K = \frac{1}{4}\pi\varepsilon_o$, se puede escribir:

$$\Phi_c = q / \varepsilon_o$$

donde se observa que el flujo neto a través de una superficie gaussiana esférica es proporcional a la carga q está encerrada dentro de la superficie.

Por lo que :

La Ley de Gauss, establece que el flujo eléctrico neto a través de cualquier superficie gaussiana cerrada es igual a la carga neta que se encuentra dentro de ella, dividida por ε_o.

III.2.2 La Ley de Gauss y la Ley de Coulomb

La ley de Coulomb puede deducirse de la Ley de Gauss a partir de ciertas consideraciones de simetría. Partiremos de la aplicación de la ley de Gauss para una carga puntual positiva q aislada como se muestra en la figura siguiente.

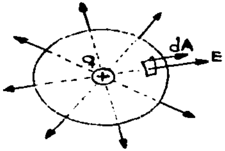


Fig. 11

En este caso se elige una superficie esférica de radio r y con centro en la carga puntual. El campo eléctrico de una carga puntual positiva es radial:, hacia afuera y simétrico, por lo tanto, es normal a la superficie en todo punto. Es decir, **E** es paralelo a **dA** en cada punto, y en consecuencia

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = E\, dA$$

Por lo que la ley de Gauss se reduce a:

$$\Phi_e = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \oint E dA = q / \varepsilon_0$$

Por simetría, E es constante en todo punto sobre la superficie por lo que:

$$E \oint dA = E A = E (4\pi r^2) = q / \varepsilon_0$$

donde A, es el área de una esfera.

Además se tiene que la magnitud del campo a una distancia r de la carga q es

$$E = q / (4\pi \varepsilon_0 r^2) = K (q / r^2)$$

Si colocamos una segunda carga puntual q_0, en un punto donde el campo es E, la fuerza sobre esta carga tiene una magnitud dada por

$$F = q_0 E = K \frac{q\, q_0}{r^2}$$

Con lo que queda demostrado la equivalencia de la ley de Coulomb con la Ley de Gauss.

III.3 Campo Eléctrico de Distribuciones Discretas y Continuas

(Aplicación de la ley de Gauss)

Es importante reconocer que la Ley de Gauss solo se aplica cuando existe un alto grado de simetría en la distribución de carga, como en el caso de una esfera, cilindros largos y laminas planas uniformemente cargadas. En tales casos, es posible determinar una superficie gaussiana simple sobre la cual se evalúa con facilidad la integral de superficie dada por la ecuación

$$\Phi_c = \oint E.dA = q_{int} / \varepsilon_o$$

III.3.1 Distribución de Cargas Esféricamente Simétricas.

Una esfera aislante de radio a tiene una densidad uniforme ρ y una carga total positiva Q, para $r > a$.

Siguiendo la misma línea de razonamiento del campo eléctrico eléctrico debido a una carga puntual (ley de gauss y ley de Coulomb), se encuentra que:

$$E = K\,(Q / r^2)$$

Para $r < a$. Seleccionaremos una superficie gaussiana esférica concéntrica con la distribución de carga (fig. 12b). Es importante mencionar que la carga $q_{int} < Q$, que se encuentra dentro del volumen V' .

Partiendo de que la densidad volumétrica de carga en una superficie es:

$$\rho = Q/V$$

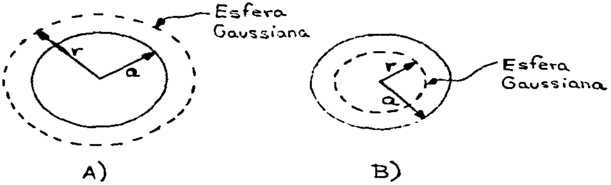


Fig. 12

tenemos que:

$$q_{int} = \rho V'$$

donde ρ es la carga por unidad de volumen y V' es el volumen encerrado por la superficie gaussiana, dado por V'=4 / 3πr3 para una esfera. por lo tanto:

$$q_{int} = \rho V' = \rho (4 / 3 \pi r^3)$$

Aplicando la ley de gauss en la región r < a (fig. 12a), se obtiene

$$E \oint dA = E A = E (4\pi r2) = q_{int} / \varepsilon_0$$

al despejar E se obtiene

$$E = q_{int} / (4\pi \varepsilon_0 r^2)$$

ya que por definición

$$\rho = Q / ((4/3) \pi a^3)$$

se puede escribir finalmente que:

$$E = Qr / (4\pi \varepsilon_0 a^3) = kQr / a^3$$

III.3.2 Distribución De Carga Cilíndricamente Simétrica

La figura (13a) muestra una línea infinita de carga que se encuentra rodeada por una superficie gaussiana cilíndrica de radio r, y de longitud l coaxial concéntrica con la línea de carga. El campo eléctrico E es perpendicular a la línea ya dirigido hacia afuera figura (13b), el campo en la superficie cilíndrica es constante en magnitud y perpendicular a la superficie.

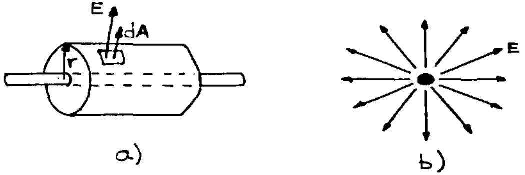


Fig. 13

La carga total encerrada por la superficie gaussiana es :

$$\lambda = q/l \quad \Rightarrow \quad q_{int} = \lambda l$$

Aplicando la ley de Gauss, sin perder de vista que el campo E es paralelo a dA en cualquier punto sobre la superficie cilíndrica, se encuentra que:

$$\Phi_e = \oint E\, dA = q_{int} / \varepsilon_o = \lambda l / \varepsilon_o$$

y como el área de la superficie curva es $A = 2\pi rl$, se tiene :

$$E\,(2prl) = \lambda l / \varepsilon_o$$

III.3.3 Campo electrico entre dos laminas cargadas.

La figura muestra un arreglo de dos laminas cargadas con signos contrarios y separadas por una distancia pequeña comparada con sus dimensiones.

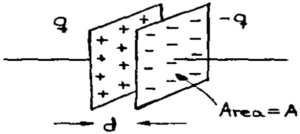


Fig. 14

Suponemos que el campo electrico entre las dos laminas es uniforme. Tomando en consideración que las líneas de fuerza atraviezan la superficie del paralepipedo únicamente por la cara situada en el espacio comprendido entre las laminas, el campo dentro de las laminas es nulo, ya que las cargas se colocan en la superficie interna, aplicando la ley de gauss

$$\Phi_c = \oint E\, dA = q / \varepsilon_o$$

y que la carga total encerrada por la superficie gaussiana es

$$\sigma = q/dA \quad \Rightarrow \quad q = \sigma\, dA$$

se tiene que

$$E\, dA = q / \varepsilon_o \quad \Rightarrow \quad E = q / (\varepsilon_o\, dA)$$

$$E = (\sigma\, dA) / (\varepsilon_o\, dA)$$

de donde finalmente se tiene

$$E = \sigma / \varepsilon_o$$

III.3.4 Conductores en equilibrio Electrostático

Un buen conductor eléctrico, como el Cobre, contiene cargas (electrónes) que no están ligadas a átomo alguno y pueden moverse con libertad dentro del material. Cuando no se tiene movimiento neto dentro del conductor, éste se encuentra en *equilibrio electrostático.*

Un conductor en equilibrio electrostático tiene las siguientes propiedades:

1) El campo eléctrico es cero en cualquier punto en el interior del conductor.

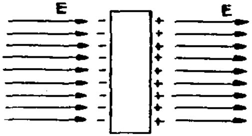


Fig. 15

La figura anterior, muestra una placa conductora en un campo eléctrico externo E. Las cargas inducidas por el campo sobre las caras de la placa producen un campo eléctrico el cual se opone al campo externo, dando un campo resultante cero en el conductor.

2) Cualquier exceso de carga en un conductor aislado debe residir enteramente sobre su superficie.
Un conductor es un cuerpo dentro del cual hay cargas libres. Si hay un campo eléctrico E dentro del conductor entonces habrá movimiento contínuo de las cargas libres. Si no hay campo eléctrico no habrá movimiento de las cargas. Invirtiendo el razonamiento, si las cargas están en reposo el campo E dentro del conductor tiene que ser nulo.

3) El campo eléctrico precisamente afuera del conductor es perpendicular a la superficie del conductor y tiene una magnitud, ρ/ε_0 donde ρ es la carga por unidad de área en ese punto.

La figura 16, muestra una superficie gaussiana en forma de un pequeño cilindro se utiliza para calcular el campo eléctrico precisamente afuera de un conductor cargado. El flujo a través de la superficie gaussiana es:

$$\Phi_E = \oint E_n\, dA = E_n\, dA = q_{int} / \varepsilon_0 = \rho A / \varepsilon_0$$

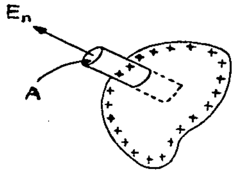


Fig. 16

4) En un conductor de forma irregular la carga tiende a acumularse en regiones donde el radio de curvatura de la superficie es más pequeño, es decir, en las puntas.

III.4 Potencial Eléctrico

Cuando se coloca una carga de prueba q_o en un campo electrostático **E**, la fuerza eléctrica sobre la carga de prueba es q_o**E**. La fuerza qoE es la suma vectorial de las fuerzas ejercidas sobre q_o por las diversas cargas que producen el campo **E**.

El trabajo realizado por la fuerza eléctrica q_o**E** sobre la carga de prueba, en un desplazamiento infinitesimal **ds**, está dado por

$$dW = F \cdot ds = q_o E \cdot ds$$

el trabajo efectuado por una fuerza es igual al valor negativo del cambio en la energía potencial **dU**, es:

$$dU = -q_o E \cdot ds$$

Para un desplazamiento finito de la carga de prueba entre dos puntos A y B (Fig. 17), el *cambio en la energía potencial* esta dado por

$$\Delta U = U_B - U_A = -q_o \int_A^B E \cdot ds$$

la integral de línea, de la expresión anterior se considera a lo largo de la trayectoria por la cual se mueve q_o, es decir, desde A a B.

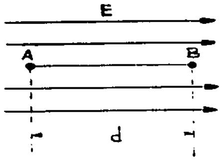


Fig. 17

La diferencia de potencial VB - VA, **entre los puntos A y B se define como el cambio de energía potencial dividido entre la carga de prueba q_o:**

$$V_B - V_A = \frac{U_B - U_A}{q_o}$$

$$= -\int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

la diferencia de potencial $V_B - V_A$ es igual al trabajo por unidad de carga que debe realizarse para desplazar la carga de prueba de A hasta B, sin que cambie la energía cinética.

Con frecuencia se toma la función potencial como igual a cero en algún punto conveniente.

Por lo general se tomará el potencial cero, en un punto infinitamente lejos de las cargas que producen el campo eléctrico. Teniendo presente la consideración anterior se puede decir que:

el potencial es igual al trabajo requerido por unidad de carga para llevar desde el infinito hasta ese punto una carga de prueba positiva.

Así pues se toma $V_A = 0$ en el infinito, entonces el potencial en cualquier punto P está dado por

$$V_P = -\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

V_P representa la diferencia de potencial entre el punto P y un punto en el infinito.

Y en forma general, cuando la dirección del campo eléctrico E no coincide con el del desplazamiento infinitesimal ds y forma con este un ángulo θ se tiene que

$$V_p = -\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\int E \cos ds$$

en el sistema MKS las unidades están dadas en

Joule / Coul = Volts

III.4.1 Potencial Eléctrico y Energía Potencial debida a Cargas Puntuales.

Para calcular el potencial eléctrico de una carga puntual q_o, a una distancia r en un punto del espacio (Fig. 18), comenzaremos con escribir la expresión general de la diferencia de potencial

$$V_B - V_A = \frac{U_B - U_A}{q_o} = -\int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$$

el campo eléctrico debido a una carga puntual esta dado por

$$\mathbf{E} = k\, q\, \mathbf{r} / r^2$$

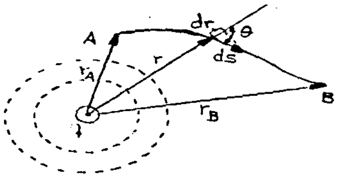


Fig. 18

donde $\hat{r}$ es un vector unitario dirigido hacia el punto del campo

$$\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = k\,(q/r^2)\,\hat{r} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\hat{r} \cdot d\mathbf{s} = ds \cos\theta \,,$$

θ es el ángulo entre $\hat{r}$ y $d\mathbf{s}$.

Nótese que $ds \cos\theta$ es la proyección de $d\mathbf{s}$ sobre r, así pues se tiene que

$$dr = ds \cos\theta$$

lo cual significa que cualquier desplazamiento ds produce un cambio dr en la magnitud de r. Tomando en cuenta las consideraciones anteriores las expresión diferencia de potencial esta dada por:

$$V_B - V_A = -\int E_r\, dr = -kq \int_A^B dr/r^2 = Kq/r\Big]_{rA}^{rB}$$

$$V_B - V_A = kq\,[\,1/R_B - 1/R_A\,]$$

Para calcular el potencial eléctrico debido a una carga puntual a cualquier distancia r de la carga, podemos hacer $r_A = \infty$ y

$$V_A = 0$$

$$V = kq / r$$

El potencial eléctrico, de dos o mas cargas puntuales se obtiene aplicando el principio de superposición. Es decir,

el potencial total en un punto dado P debido a varias cargas
puntuales es la suma de los potenciales
debidos a cada carga individual.

Para un grupo de cargas, se puede escribir el potencial total en P en la forma

$$V = K \sum q_i/r_i$$

Además por definición, si existen más de dos partículas cargadas en un sistema, la energía total puede obtenerse por el cálculo de U para todos los pares de cargas y sumar los términos algebraicamente.

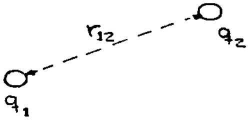


Fig. 19

Si dos cargas puntuales (fig. 19) están separadas una distancia r_{12} la energía potencial del par de cargas está dada por

$$U = q_2 V_1 = k \ (q_1 q_2 \ / \ r_{12})$$

Así pues, la energía potencial total de las tres cargas mostradas en la fig. 18, esta dada por:

$$U = K \ (q_1 q_2 / r_{12} + q_1 q_3 / r_{13} + q_2 q_3 / r_{23} \ )$$

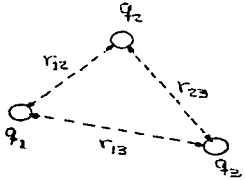


Fig. 20

III.4.2 Potencial Eléctrico debido a una Distribución de Carga Continua.

El potencial eléctrico en el punto P (fig. 21), debido a la distribución de carga puede ser calculado dividiendo el cuerpo cargado en segmentos de carga dq y sumando (integrando) las contribuciones al potencial de todos los segmentos.

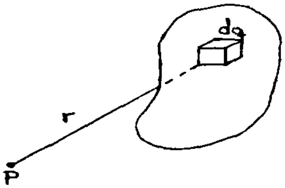


Fig. 21

Así pues, se considera el potencial debida a un pequeño elemento de carga dq, considerando este elemento como una carga puntual. El potencial **dV** en un punto **P** debido al elemento **dq** situada a una distancia **r**, es

$$dV = K\,(dq/r)$$

en donde r es la distancia dede el elemento de carga hasta el punto P. Integrando ambos terminos de la expresión anteror se tiene:

$$V = K\,q\,/\,r$$

III.4.3 Gradiente de Potencial.

Si un *campo eléctrico es de intensidad uniforme*, su potencial a largo de las líneas de fuerza varía en incrementos iguales para movimientos iguales, según las mencionadas líneas de fuerza. Este cambio de potencial según las líneas de fuerza, mide la pendiente eléctrica relativa del campo, o como se le denomina usualmente, *gradiente de potencial del campo.*

En forma general la diferencia de potencial entre dos puntos es:

$$V_B - V_A = \frac{U_B - U_A}{q_o} = -\int_A^B E \cos \theta \, ds$$

Si la distancia que separa a los dos potenciales es infinitesimal, entonces la diferencia de potencial se transforma en dV, quedando

$$dV = -E \cos \theta \, ds$$

y por tanto:

$$E \cos \theta = -dV/ds$$

Si la dirección del campo eléctrico E coincide con la del desplazamiento ds, es decir

$$\theta = 0° \Rightarrow \cos \theta = 1$$

por lo que

$$E = -dV/ds$$

La primera derivada del potencial respecto a la distancia en la dirección ds, se denomina *Gradiente de potencial*.

En el sistema MKS el gradiente de potencial se expresa en

Volt/Metro ó V/m

Si el *campo no es uniforme*, tal como el que rodea una carga puntual o una esfera cargada, el potencial *no cambia* igualmente para incrementos iguales de la distancia a lo largo de una línea de fuerza.

El gradiente de potencial es generalmente máximo en las proximidades de áreas convexas terminadas en punta o en la superficie de los cuerpos cargados, y es en esta área puntiaguda o las salientes donde existen mayores probabilidades de que el flujo eléctrico se escape en la forma del efecto de corona o descarga radiante.

III.4.4 Superficies Equipotenciales.

Como su nombre lo dice son superficies en las que cualquier punto de la misma se encuentra al mismo potencial.

La energía potencial de un cuerpo cargado es la misma en todos los puntos de una superficie equipotencial dada, y por tanto no se necesita realizar trabajo (eléctrico) para mover un cuerpo cargado sobre una de estas superficies. De ésto se deduce que la superficie equipotencial en cualquier punto es perpendicular (Fig. 22a), a la dirección del campo en dicho punto.

Asi mismo, la representacion de las superficies equipotenciales para una distribucion de carga simetricamente esferica, son una familia de esferas concentricas (Fig. 22b). Y las superficies equipotenciales para un dipolo electrico, se muestran en la fig. 22c.

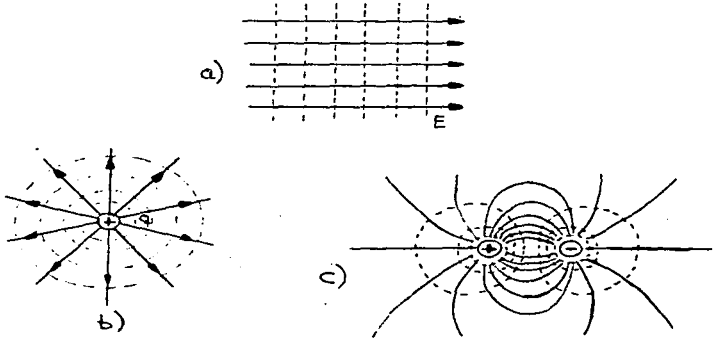


Fig. 22

Si no fuera así, el campo tendría una componente situada sobre la superficie y habría que realizar trabajo contra las fuerzas eléctricas para mover una carga en dirección de ésta componente.

III.4.5 Potencial de un Conductor Esférico Cargado.

La intensidad de un campo eléctrico producido por un conductor esférico cargado se comporta igual que si toda la carga estuviera concentrada en su centro. Por lo que se empleamos la misma expresión para una carga puntual

$$V = K\,(q/r) = q/(4\pi\,\varepsilon_o r)$$

Siendo $r \geq$ al radio de la esfera.

En el interior de la esfera la intensidad del campo eléctrico es nula. El potencial es el mismo en todos los puntos interiores e igual al potencial en la superficie.

$$V = K\,(q/r) = q/(4\pi\,\varepsilon_o\, a) \quad \text{siendo, } a = \text{radio de la esfera}$$

El potencial y la intensidad del campo eléctrico debidos a una esfera cargada positivamente están representados gráficamente en la figura siguiente.

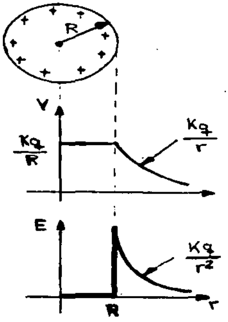


Fig. 23

En el interior de la esfera el voltaje es constante y el campo es nulo.

En el exterior el voltaje disminuye proporcionalmente a $1/r$ y el campo E lo hace proporcionalmente a $1/r^2$.

Se sabe experimentalmente que la carga máxima que puede ser retenida por un conductor situado en el aire es tal que su campo es de :

$$E = 3 \times 10^6 \text{ Volt/metro}$$

En general si Em representa el límite máximo del campo eléctrico, la carga máxima será:

$$E = K\,(q/r^2) = q/(4\pi\,\varepsilon_o r^2) \qquad \Rightarrow \qquad q_m = Em\,4\pi\,\varepsilon_o r^2$$

$$V = K\,(q/r) = q_m\,/\,(4\pi\,\varepsilon_o\,r) \qquad \Rightarrow \qquad Vm = (Em\,4\pi\,\varepsilon_o\,r^2)\,/\,(4\pi\,\varepsilon_o\,r) = rEm$$

de donde

$Vm = a\,Em$ siendo a el radio de la esfera

CAPITULO IV

CAPACITANCIA Y DIELECTRICOS

IV.1 Capacitancia

Un *Condensador* es un dispositivo que consiste esencialmente de dos placas próximás, capaces de acumular cargas por inducción, limitando el número de cargas libres por aislamiento eléctrico, es decir, por la existencia de algún dieléctrico entre estás.

Si las placas conductoras de un condensador, las cuales pueden tener cualquier forma geométrica, se conectan a las terminales de una batería, se induce en estas, el mismo tipo de carga (-q ó +q) de la terminal respectiva a la que se encuentren conectadas, por lo que estas adquieren entre ellas el mismo potencial V , aplicada por las terminales de la batería.

Esto es causa de que estos almacenen energía y de que la carga inducida q , de cualquiera de las placas, sea proporcional al potencial V aplicado, que define la capacidad de un condensador, que se expresa como:

$$C = q / V$$

En donde C, se le conoce como *"Capacitancia"* , que se define como la capacidad de acumulación de carga eléctrica en las placas de un condensador, cuando se aplica una diferencia de potencial entre ellas.

De aquí que al aumentar la carga almacenada en el condensador, la diferencia de potencial aumente (la razón q/V es una constante para un condensador dado).
Finalmente, siempre se debe tener presente que:

La Capacitancia de un condensador, es la medida de su Capacidad de almacenar carga y energía eléctrica, entre sus placas.

De la expresión matemática para la capacitancia C, se tiene que en el SI, que las unidades de esta son:

Coulomb / Volt ó Farad (F)

El Farad F, ha recibido este nombre en honor de Michael Faraday quien , entre otras contribuciones, desarrollo el concepto de capacitancia .

En la practica son más convenientes los submultiplos del Farad, el microfarad

$$1\ \mu f = 10^{-6}\ \text{Farad}$$

y el nanofarad

$$1\ nf = 10^{-9}\ \text{Farad}$$

El condensador posee la cualidad de polarizarse, dando lugar a modificaciones importantes en la respuesta de salida, ya sea conectado en circuitos de corriente directa o de corriente alterna.

Un condensador tiene la característica de ser variable de ser en el tiempo, sobre todo en función de la energía que es capaz de almacenar.

NOTA:

Es importante hacer mención que los términos condensador, capacitor y/o filtro, se utilizan indistintamente para nombrar a todo dispositivo capaz de almacenar carga y energía eléctrica.

IV.1.1 Calculo de la Capacitancia

Para calcular la capacitancia de un par de conductores cargados con cargas opuestas puede ser calculada de la siguiente manera.

Se supone una carga de magnitud q, y la diferencia de potencial V, se determina como se describió en el capitulo anterior, y entonces simplemente se utiliza la expresión

$$C = q/V$$

para evaluar la capacitancia de un *condensador*, es conveniente conocer su geometría, para lo cual, a continuación, trataremos con tres geométricas que nos son familiares.

En estos ejemplos, se supondrá que la carga entre los conductores está separada por el vacío.

IV.1.2 Condensador de Placas Paralelas

Dos placas paralelas de igual área **A** están separadas por una distancia **d**, fig. 1. Una placa tiene carga +q, y la otra, carga -q.

La carga por unidad de área en cada placa es

$$\sigma = q/A$$

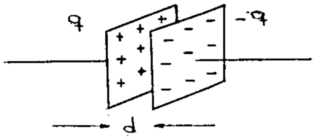


Fig. 1

Además, suponemos que el campo eléctrico **E** es uniforme en todo el volumen encerrado entre las placas. Recordando que el campo eléctrico entre dos placas esta dado por

$$E = \sigma / \varepsilon_o = q / \varepsilon_o A$$

y que la diferencia de potencial **V**, entre las placas es igual a **Ed**, se tiene

$$V = E\,d = q\,d / \varepsilon_0 A$$

finalmente sustituyendo esta última expresión en la formula de la capacitancia C, se encuentra que la capacitancia de dos placas paralelas es:

$$C = q/V = q \; / \; (qd / \varepsilon_0 A)$$

$$C = \varepsilon_0 A / d$$

Esto significa que la capacitancia de un condensador de placas paralelas es proporcional al área de estás e inversamente proporcional a la separación entre ellas.

IV.1.3 Condensador de Capas (Cilíndrico).

Sea la sección transversal de un condensador cilíndrico de longitud L, formado por dos cilindros coaxiales, fig. 2a, uno de los cuales tiene radio a y carga +q, y otro de radio b y carga -q.

Se supone que L es grande comparada con a y b, los efectos en los extremos son despreciables. En este caso, el campo eléctrico es perpendicular al eje de los cilindros y está confinado a la región entre ellos.

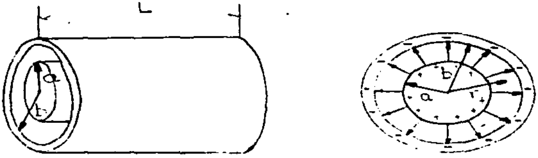


Fig. 2

Se debe calcular la diferencia de potencial entre los cilindros, la cual se expresa como

$$V_b - V_a = - \int_a^b E \cdot ds$$

donde E es el campo eléctrico en la región $a < r < b$.

Utilizando la ley de Gauss, el campo eléctrico de un cilindro de carga por unidad de longitud λ está dado por

$$E = 2K \lambda / r$$

donde $k = 9 \times 10^9$ Nw/Coul, y observando que E está a lo largo de r, en la fig. 2b, se tiene que

$$V_b - V_a = - \int_a^b E_r \, dr = - 2K\lambda \int_a^b (dr/r)$$

$$V_b - V_a = - 2K\lambda \quad \ln (b/a)$$

sustituyendo esto ultimo en la expresión general para la Capacitancia, y recordando además que

$$\lambda = q / L$$

se obtiene

$$C = q / V = q \ / \ ((2Kq / l) (\ln (b / a)))$$

$$C = L / (2Kq (\ln (b/a))$$

IV.1.4 Condensador Esférico.

Un condensador esférico formado por dos esferas *concéntricas*, una de radio b y carga -q, y otra de radio más pequeño a y carga +q, fig.3

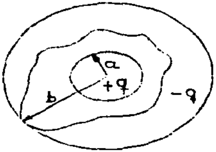


Fig. 3

El campo eléctrico de una carga simétricamente esférica es radial y esta dado por

$$E = kq / r^2$$

que corresponde, en este caso, al campo eléctrico entre las esferas ($a < r < b$), la diferencia de potencial entre las esferas esta dada por

$$V_b - V_a = - \int_a^b E_r\, dr = - 2q \int_a^b (dr / r^2) = Kq \left[1 / r \right]_a^b$$

de donde la magnitud de la diferencia de potencial es

$$V = V_b - V_a = Kq \; ((1 / b) - (1/a)) = Kq \; ((b-a) / ab)$$

sustituyendo esto ultimo en la expresión general para la Capacitancia, se obtiene

$$C = q / V = ab / (k (b - a))$$

IV.2 Tipos de Condensadores.

En la electricidad y la electrónica existen diferentes tipos de condensadores, para saber elegir el más adecuado para algún trabajo en particular, se deberá saber la constitución de cada uno de ellos y su función.

En los subtemas siguientes se describen los principales tipos de condensadores más comunes .

IV.2.1 Condensadores fijos de aire y de vacío.

El tipo más elemental es el *condensador fijo de aire*, constituido por placas metálicas separadas por aire. Un tipo similar es el condensador de vacío, que consiste en dos placas separadas por el vacío que hace las veces de dieléctrico , estas placas deben estar lo bastante separadas para no producir un arco eléctrico entre ellas o la formación de estos.

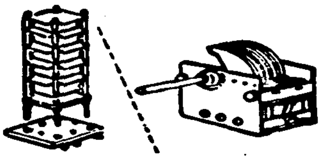


Fig. 4

IV.2.2 Condensadores fijos y variables de mica.

Este tipo de condensadores, estan constituidos por dos placas separadas por una lamina de mica (dielectrico), los condensadores variables cuentan con un tornillo de ajuste para acercar las placas conductoras, modificando su capacitancia. Este tipo de condensadores

se construyen en algunas ocasiones dentro otro más grande, conectado en paralelo, para ofrecer un mejor ajuste para una capacitancia y esta sea aun más exacta.

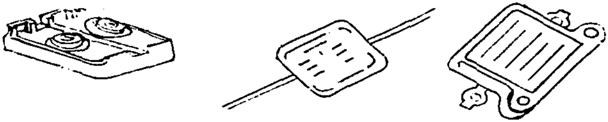
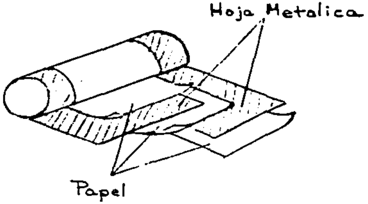


Fig. 5

El tipo de condensadores de mica fijos, estan constituidos de delgadas hojas metálicas separadas por mica, moldeadas dentro de un recipiente de material plástico, para conectar este tipo de condensadores con circuitos se utilizan diferentes tipos de terminales, el recipiente de plástico evita la corrosión de las placas, y el deterioro del dieléctrico, logrando además que el condensador sea mecánicamente sólido.

IV.2.3 Condensadores de papel moldeado.

Este tipo de condensadores (fig. 6), de papel se utilizan tirillas metálicas que hacen las veces de placas y que están separadas entre si por bandas de papel encerado. Dado que para en obtener una capacitancia útil se requiere bandas sumamente largas de papel, las tirillas metálicas y las bandas de papel encerado se arrollan juntas formando un cartucho, este tipo que incluye las terminales adheridos a las placas, viene encerado para impedir la filtración de humedad y la corrosión de las placas, para este tipo de condensadores se utilizan diferentes tipos de envoltura , siendo la más sencilla el tubo de cartón.



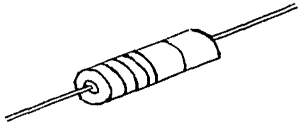


Fig. 6

Algunos condensadores de papel están incluidos en un molde de material plástico muy duro, estos son sumamente resistentes por lo que se les emplea para trabajar a temperaturas mucho mayores que el tipo del tubo de cartón, debido a que la cera utilizada en el cartón tubular se funde a altas temperaturas y escapa por los extremos abiertos del recipiente.

IV.2.4 Condensadores de recipiente metálico.

Los condensadores de caja metálica, se consisten por condensadores de papel moldeado encerrados herméticamente dentro de un recipiente de metal (fig.7), este recipiente suele utilizarse como una de las terminales, y en otros casos, hace de coraza frente a la interferencia eléctrica.

Con mucha frecuencia un terminal única sirve de terminal común para distintos condensadores incluidos dentro de un mismo recipiente metálico. **Los condensadores de ignición para los automóviles son ejemplo de este tipo de condensador.**

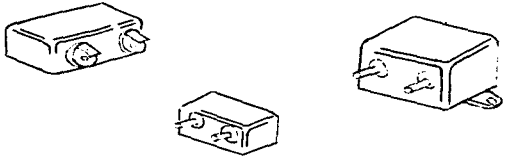


Fig. 7

metálicos son necesarios en este caso porque los condensadores para automóviles tienen que ser extraordinariamente sólidos y capaces de soportar los efectos del esfuerzo mecánico y la intemperie.

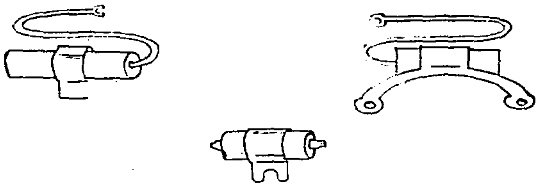


Fig. 8

Los condensadores de papel para circuitos de alta tensión (600 volts ó más), están impregnados en aceite (Fig. 8). El recipiente metálico es hermético y se emplean varios tipos de terminales.

IV.2.6 Condensadores cerámicos.

Este tipo de condensador -tanto fijos como variables- tiene como material dielectrico la ceramica y una pelicula de plata que hace las veces de placa. Suelen tener una capacitancia comprendida entre 1 nf y 0.01 µf. Se fabrican de varias formás, siendo las más comunes la de disco y la tubular (fig.9).

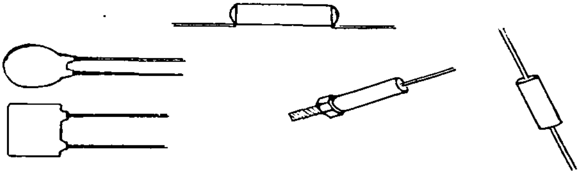


Fig. 9

Los condensadores de cerámica variables tienen una placa fija (película de plata) y una placa metálica móvil revestida de plata. Si bien el dieléctrico de los condensadores de cerámica son capaces de aislar tensiones superiores a 2000 volts, estos condensadores son sumamente pequeños y ocupan espacio muy reducido, por lo que se les emplea en muchos circuitos especiales para tensiones de 10 000 volts o más.

Para capacitores que utilizan el codigo de colores standar, Fig. 10, La primera franja indica el primer guarismo del valor en picofaradios; la segunda franja el segundo guarismo; la tercera franja, el factor de multiplicación; la cuarta franja, la tolerancia, y la quinta franja, la tensión de trabajo nominal.

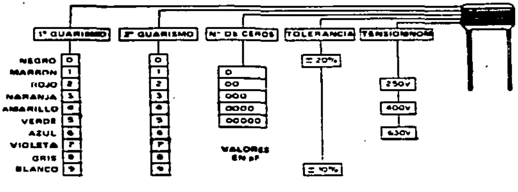


Fig. 10

En los capacitores cerámicos de valores pequeños (Fig. 11), los mismos son dados en picofaradios (pF) y seguidos por una letra mayuscula cuyo significado se da a continuación:

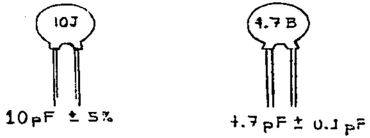


Fig. 11

- Para capacitores menores que 10 pF

B = ± 0.1 pF	**F = ± 1 pF**
C = ± 0.25 pF	**G = ± 2 pF**
D = ± 0.5 pF	

- Para capacitores de más de 10 pF

F = ± 1 %	**M = ± 20 %**
G = ± 2 %	**S = ± 50 % - 20 %**
H = ± 3 %	**Z = ± 80 % - 20 % 6 + 100 % - 20 %**
J = ± 5 %	**F = ± 100 %**
K = ± 10 %	

IV.2.6 Condensadores electrolíticos.

Para capacidades superiores de 1 mfd. el tamaño del condensador de papel o de mica se torna excesivo, para estos valores relativamente altos se emplean por lo tanto los condensadores electrolíticos cuya capacidad esta comprendida entre 1 y 1000 mfd (fig. 10).

A diferencia de otros tipos de condensadores , el electrolítico esta polarizado, y si se conecta mal, se rompe y hace cortocircuito, para compensar los cambios de polaridad se utilizan un tipo especial de condensador es electrolíticos que sirve para CA.

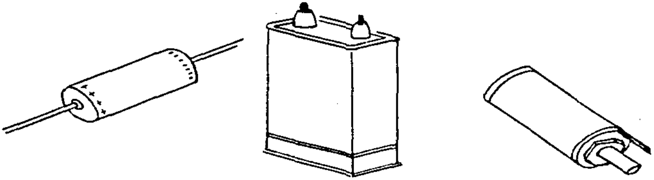


Fig. 12

Los condensadores electrolíticos se hacen formás y tamaños sumamente variables, con recipientes de cartón o metálicos y distintos tipos de terminales. ***Recuerde que, a menos que el condensador electrolito se para CA, como en el caso del condensador de arranque de los motores, usted siempre deberá tomar precaución de conectarlo únicamente en un circuito de observar la polaridad correcta.***

IV.3 Conexión en Serie y Paralelo de los Condensadores.

En el análisis de los circuitos eléctricos, a veces se desea conocer la capacitancia equivalente de dos o más condensadores conectados, de cierta manera.

La capacitancia de una combinación cualquiera, puede sustituirse por un condensador individual, sin que cambie la operación del resto del circuito.

Un condensador se representa por el símbolo (—| |—) , el cual aunque se parece un condensador de placas paralelas, para efectos del calculo de una capacitancia equivalente en un circuito, representa cualquier tipo de condensador.

IV. 3.1 Condensadores Conectados en paralelo.

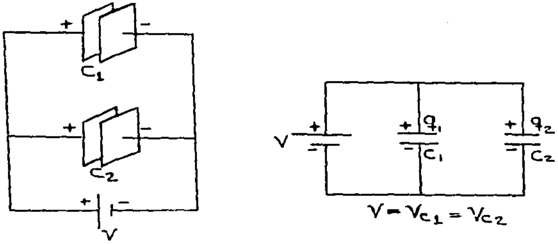


Fig. 13

Analizando el tipo conexión, mostrado en la figura anterior, desde el punto de vista de un condensador de placas paralelas, se observa que al conectarse varios condensadores en paralelo se aumenta el área total de las placas y, por consiguiente, también lo capacidad de carga que puede recibir, en proporción al número y capacidad de los condensadores conectados.

De esta manera podemos sumar las cargas individuales en cada condensador, (q_1, q_2, q_3, q_4), para obtener la carga total q_T, tal como se indica a continuación:

$$q_T = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$$

Según la definición de la capacitancia ($C = q / V$), la carga en cada condensador es igual al producto de la capacitancia y el voltaje entre las placas y, debido a que el voltaje a través de cada condensador es igual al voltaje aplicado V, se tiene:

$$q_T = C_T V$$

sustituyendo q_T por su equivalente CV en cada condensador (C_1V , C_2V , C_3V , C_4V), se tiene:

$$q_T = C_T V = C_1 V + C_2 V + C_3 V + C_4 V$$

$$C_T V = V (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)$$

Dividiendo ambos lados de la expresión anterior por el factor común V, se obtiene la fórmula para obtener la capacitancia total C_T equivalente para condensadores conectados en paralelo:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

De aquí que la capacitancia total C_T equivalente de n Condensadores conectados en paralelo sea:

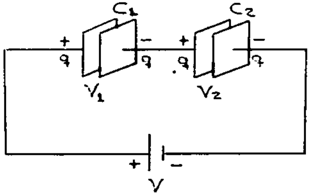
$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + \ldots\ldots\ldots + C_n$$

Es importante mencionar que la que la capacitancia C_T equivalente, es siempre mayor que la capacitancia de cualquiera de los condensadores individuales conectados en la combinación en paralelo.

IV.3.2 Condensadores Conectados en Serie.

Puesto que la corriente viaja desde un punto a otro, en un arreglo de condensadores conectados en serie, ésta es la misma en todas cualquier parte del arreglo (fig. 14), la carga total q_T, es igual a la carga en cada capacitor, de decir:

$$q_T = q_1 = q_2 = q_3 = q_4$$



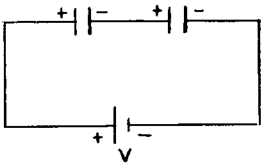


Fig. 14

Cuando se conecta una batería entre la combinación de condensadores en serie, la suma de las caídas de tensión a través de los condensadores es igual al voltaje V de la batería. De este modo se tiene:

$$V = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + V_{C4}$$

Ahora bien, si dividimos ambos lados de la ecuación anterior por q , se obtenemos:

$$V / q = (V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + V_{C4}) / q$$

$$V / q = (V_{C1} / q) + (V_{C2} / q) + (V_{C3} / q) + (V_{C4} / q)$$

Por la definición la capacitancia

$$C = q / V$$

se tiene que

$$1 / C_T = V / q$$

y por tanto:

$$(V_{C1} / q) = (1 / C_1) ; \quad (V_{C2} / q) = (1 / C_2) ; \quad (V_{C3} / q) = (1 / C_3) ; \quad (V_{C4} / q) = (1 / C_4)$$

sustituyendo todos estos valores en la ecuación precedente se obtiene:

$$1 / C_T = (1 / C_1) + (1 / C_2) + (1 / C_3) + (1 / C_4)$$

en la que se aprecia que cuando los condensadores se conectan en serie, la reciproca de la capacitancia total es igual a la suma de las reciprocas de las capacitancias individuales.

Además resolviendo, esta última expresión para determinar el valor de C_T , para n condensadores conectados en serie se tiene que:

$$C_T = 1 / ((1 / C_1) + (1 / C_2) + (1 / C_3) + (1 / C_4) + \ldots\ldots + (1 / Cn))$$

Si todos los condensadores son iguales (en cuanto a su capacitancia), la capacitancia total C_T es simplemente , el valor de una de ellas dividido por el número total de los condensadores conectados en serie. Cuando son dos los condensadores (iguales) conectados en serie se aplica la siguiente expresión:

$$C_T = (C_1 \ C_2) / (C_1 + C_2)$$

Puede parecer un tanto raro que en la práctica se conecten condensadores en serie puesto que la capacitancia en esta forma, es menor que la correspondiente a un solo condensador. La razón parta usar los condensadores en serie es que el voltaje total se divide entre ellos.

Puesto que el costo de los condensadores aumenta considerablemente a medida que sus especificaciones de voltaje son más elevados, a menudo es más económico usar en circuitos de alto voltaje, grupos de condensadores grandes de relativo bajo voltaje y poco costo, en serie, que usar un solo condensador de menor valor y con una especificación de voltaje elevada.

IV.3.3 Corrientes de Carga y Descarga de un Condensador

(Constante de tiempo en un circuito R-C)

Si se conecta una resistencia en serie con un capacitor y todo el conjunto es conectado así mismo a una fuente de suministro externa V, circulará por la resistencia una corriente que cargará el condensador; pero como la particularidad de la resistencia es oponerse al paso de la corriente (ley de Ohm), el potencial en el condensador no alcanzará el valor, sino que hasta que haya transcurrido un cierto tiempo t. Esto determina que la corriente que pasa a través de un arreglo serie de resistencia- Capacitor (R-C), sea calculada en función del tiempo.

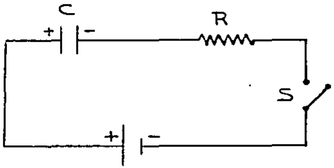


Fig. 15

Si en el circuito de la figura anterior cerramos el interruptor S, el potencial V no sólo tendrá que vencer la caída de potencial en la resistencia sino que deberá vencer también la oposición de la fuerza electromotriz (f.e.m.) que es igual a q/C, es decir, la que posee el condensador.

Se define a la corriente como la proporción existente que da una carga infinitesimal en un tiempo dado sobre el cual deberá pasar, es decir:

$$i = dq \;/\; dt \quad \text{Ampers}$$

de donde

$$dq = i\,dt$$

e integrando se tiene:

$$q = \int i_{(t)}\,dt$$

En donde $i_{(t)}$ es la corriente variante en el tiempo.

Para un tiempo $t = 0$ y carga $q=0$, la corriente es un máximo y equivale entonces a:

$$i = I = V/R \quad \text{Ampers}$$

Por condiciones de equilibrio tenemos que:

$$V = V_R + V_C$$

y sabiendo que $V_R = i\,R$; **y que** $VC = q / C = 1 / C \int i\,dt$

se obtiene que:

$$V = i\,R + 1/C \int i\,dt$$

Ahora bien diferenciando con respecto a t la ecuación diferencial anterior y restableciendo el equilibrio (igual a cero) se tiene:

$$(di/dt)\,R + (i/C) = 0$$

y separando variables e integrando se obtiene:

C

de donde:

$$\ln(i) = -(t/RC) + K_1$$

En las condiciones descritas anteriormente al valor máximo de la corriente, $t = 0$ y $q = 0$, entonces:

$$\ln(I) = K_1$$

por lo que sustituyendo K_1, tendremos:

$$\ln(i) = -(t/RC) + K_1 = -(t/RC) + \ln(I)$$

$$\ln(i/I) = -\,t/RC$$

de donde finalmente se tiene:

$$i_{(t)} = I\,e^{-t/RC} \quad \text{Ampers}$$

De donde se ve que esta es una ecuación exponencial decreciente, ya que el valor máximo o inicial de la corriente es alcanzado cuando $t = 0$. Teóricamente esta puede tener un valor igual a cero cuando $t = C$, luego la constante de tiempo del arreglo R-C esta dado por:

$$t = RC \quad \text{segundos.}$$

Un capacitor tiene la característica de corriente infinita si se encuentra descargado y su f.e.m es nula, al instante de conectarse y también será constante su f.e.m. si no hay resistencia serie. Lo anterior es el caso de corriente de carga de un condensador, ahora analizaremos la corriente de descarga de un condensador.

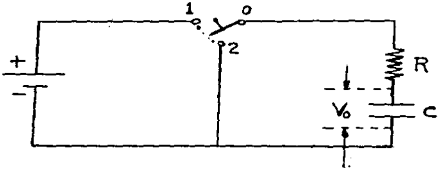


Fig. 16

Analizando el circuito de la figura 16, el potencial entre los terminales del condensador en el instante de cerrar el interruptor S en la posición 2 es V0 volts; este potencial será diferente si existen fugas de corriente o que se haya cambiado el interruptor antes de que el condensador se encuentre completamente cargado.

De esta forma el condensador actuará como una fuente decreciente de f.e.m. (q/C), capaz de suministrar corriente a la resistencia (respuesta de estado transitorio); luego además esta corriente es opuesta a la corriente de carga del condensador. Por esta razón la ecuación de equilibrio del voltaje total se escribe como:

$$V_R + V_C = 0$$

debido a que en corto circuito (posición 2), el potencial disminuye hasta cero. De la cual tenemos que:

$$- V_R = V_C$$

o sea:

$$- (i R) = 1/C \int i \, dt$$

por lo que resolviendo la ecuación diferencial tenemos:

$$- R \, di/dt = I/c$$

$$\int di / i = \int (1/RC)\, dt$$

de donde:

$$\ln(i) = -t/RC + K_2$$

Siendo K_2 la constante de integración y, para el valor máximo de la corriente se tiene que $t = 0$ y por consiguiente:

$$i = -I_2 \qquad \text{entonces} \qquad K_2 = \ln(-I_2)$$

por lo que sustituyendo K_2 se tiene:

$$\ln(i) = -t/RC + \ln(-I_2)$$

de donde:

$$\ln(i/-I_2) = -t/RC$$

para obtener finalmente que:

$$i_{(t)} = -I_2 \; e^{-t/RC} \text{ Ampers.}$$

La constante de tiempo se puede utilizar para determinar el momento en que el condensador se ha cargado en un 63.2 %, de la carga total ó sea que se ha descargado en un 36.8 %. El comportamiento de carga y descarga de un condensador se ilustra en la grafica siguiente:

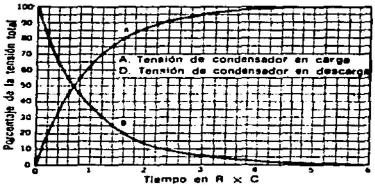


Fig. 17

IV. 3.4 Almacenamiento de Energía en Un Campo Eléctrico

Sea la carga q en un condensador en algún instante durante el proceso de carga, en el mismo instante, la diferencia de potencial a través del condensador es:

$$V = q / C$$

Ahora bien, el trabajo necesario para transferir un incremento de carga dq desde la placa -q a la placa q (la cual se encuentra a mayor potencial) esta definido por:

$$dW = Vdq = q/C \; dq$$

Por lo que el trabajo requerido para cargar el condensador desde $q_0 = 0$, hasta carga final $q_0 = q$ está dado por

$$W = \int_0^q q_0/C \; dq = q^2 / 2C$$

pero el trabajo que se realiza al cargar el condensador puede se considerado como la energía potencial U almacenada en un condensador. Sabiendo que:

$$q = CV$$

se puede expresar que la energía electrostática almacenada en un condensador cargado es:

$$U = q^2 / 2C = ½ \; qV = ½ \; CV^2$$

Cabe mencionar que no importa la geometría del condensador. La energía almacenada en el condensador se considera como si estuviese almacenada en el campo eléctrico existente entre las placas del condensador cuando este se encuentra cargado, esto desde el punto de vista de que el campo eléctrico es proporcional a la carga en el condensador.

Para un condensador de placas paralelas, la diferencia de potencial en términos del campo eléctrico es:

$$V = E \, d$$

y como su capacitancia esta dada por:

$$C = \varepsilon_0 A / d$$

se puede calcular la energía potencial como:

$$U = \frac{1}{2}\, qV = \frac{1}{2}\, (\varepsilon_o A \,/\, d)\; (E\, d)^2 = \frac{1}{2}\, (\varepsilon_o A\, d)\, E^2$$

En un capacitor de placas paralelas, sin considerar el efecto del borde, el campo eléctrico tiene el mismo valor en todos los puntos entre las placas. Por lo que se deduce que la densidad de la energía almacenada por unidad de volumen, deberá ser también la misma en todas las partes entre las placas.

Como el volumen de un condensador de placas que es ocupado por el campo eléctrico es Ad, la energía por unidad de volumen $u = U \,/\, Ad$, llamada densidad de energía es:

$$u = \frac{1}{2}\, \varepsilon_o E^2$$

Esta expresión general para calcular la densidad de energía en cualquier campo electrostático es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico en un punto dado.

IV.4 Dieléctricos

Se denomina dieléctrico al medio físico cuya naturaleza intrínseca es la de aislar el campo eléctrico creado, impidiendo o limitando el movimiento de las cargas libres. Su comportamiento relacionado a una fuente de alimentación externa, depende en forma cuantitativa de una magnitud escalar llamada movilidad y se designada por μ, y en forma cualitativa de una magnitud vectorial llamada conductividad, designada por σ expresadas en m^2 / (volts-seg) y en Ohms / m , respectivamente.
La siguiente ecuación relaciona ambas magnitudes:

$$\sigma = n\, e\, \mu$$

donde n designa a los transportadores de carga (constante) y e es la carga del electrón

IV.4.1 Cargas Inducidas y Polarización.

Cuando un cuerpo sin carga se introduce dentro de un campo eléctrico, inmediatamente se produce una redistribución de la carga del campo. Si el cuerpo es un conductor sus electrones libres se sitúan en las superficies de modo que en su interior su campo se anule, produciendo un volumen equipotencial. Si el cuerpo no es un conductor los electrones se desplazan por la acción del campo pero puesto que no hay cargas libres que puedan moverse indefinidamente, en el interior del cuerpo no se convierte en un volumen equipotencial y por lo tanto su campo es nulo.

Ambos cuerpos siguen con su carga nula ya que solo se ha redistribuido y ciertas partes del cuerpo adquieren un exceso de cargas positivas o negativas, llamadas "Cargas Inducidas".

La figura 18, muestra un campo resultante y las cargas inducidas cuando un conductor se introduce en el campo eléctrico cargado por laminas cargadas

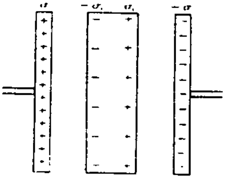


Fig. 18

Substancialmente, las moléculas se presentan en dos formás: no polar y polar.
Una molécula "No Polar", es aquella en la cual los centros de gravedad de los protones y electrones coinciden, mientras que la molécula polar no coinciden.
La figura 19, muestra los efectos de las moléculas de un material cuando es sometido a un campo eléctrico externo.

Bajo la influencia de un campo eléctrico las cargas de un molécula no polar se desplazan, se dice que la molécula se a polarizado por la acción del campo, y se le denomina "Dipolo Inducido", el momento dipolar p, es igual al producto de una de sus cargas por la distancia d que las separa.

$$p = q\,d$$

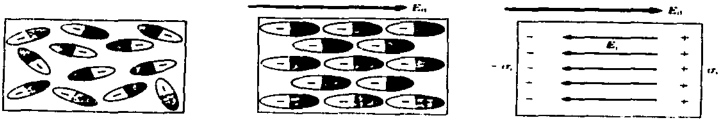
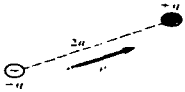
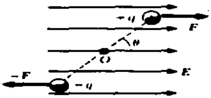


Fig. 19

El efecto de un campo eléctrico en una molécula polar es orientarla en la dirección del campo.

Si suponemos un dipolo eléctrico colocado en un campo eléctrico externo E como se muestra en la figura siguiente, donde el momento dipolar hace un ángulo θ con el campo.





Las fuerzas sobre las cargas son iguales y opuestas como se muestran, cada una con una magnitud de:

$$F = q\,E$$

Como se puede apreciar la fuerza neta sobre el dipolo es cero. Sin embargo, las dos fuerzas producen un momento neto sobre el dipolo, tendiendo a rotar de tal modo que su eje se alinea con el campo. El momento de una fuerza debido a la fuerza sobre la carga positiva alrededor de un eje a través de O está dada por:

$$Fa \operatorname{sen} \theta$$

($a = d/2$) en donde se tiene que $a \operatorname{sen} \theta$, el brazo de la palanca de F sobre O, en la figura, esta fuerza hace que tienda a girar en el sentido horario. El momento de una fuerza sobre la carga negativa alrededor de O es también $Fa \operatorname{sen} \theta$, así que el momento de una fuerza neta alrededor de o está expresada por:

$$\Upsilon = 2\,Fa \operatorname{sen} \theta = d\,F \operatorname{sen} \theta$$

y puesto que $F = qE$ y $p = d\,q$, se puede expresar Υ como:

$$\Upsilon = d\,q\,E \operatorname{sen} \theta = p\,E \operatorname{sen} \theta$$

IV.4.2 Efecto de los Dieléctricos en los Condensadores.

Un dielectrico es un material no conductor, como el caucho, vidrio o papel. Cuando un material dielectrico se introduce entre las placas paralelas de un condensador, la capacitancia aumenta, cuando este llena por completo el espacio entre las placas, la capacitancia aumenta en un factor adimensional K_e llamado *Constante dieléctrica.*

En un condensador de placas paralelas de carga q_0 (previamente cargado), y capacitancia C_0, en ausencia de un dieléctrico. La diferencia de potencial entre las placas del mismo es:

$$V_0 = q_0 / C_0$$

Si un dieléctrico se introduce entre las placas de un condensador cargado, la carga en las placas permanece sin cambio, pero la diferencia de potencial se reduce desde V_0 hasta V, en la proporción al factor K_e, dicha relación se expresa como:

$$V = V_0 / K_e$$

como $V < V_0$, se deduce que $K_e > 1$

El comportamiento descrito en los párrafos anteriores se muestra en la figura siguiente.

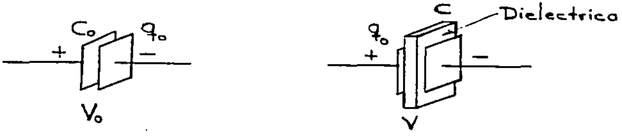


Fig. 20

Debido a que la carga q_0 permanece constante, se asume que la capacitancia C cambia de valor, de la manera siguiente:

$$C = q_0 / V = q_0 / (V_0 / K_e) = K_e (q_0 / V_0)$$

y finalmente se tiene:

$$C = K_e C_0$$

donde C_0 es la capacitancia en ausencia del dieléctrico.

Por lo tanto se concluye que la capacitancia en un condensador *aumenta* por un factor K, cuando el dieléctrico llena completamente la región entre sus placas. En un condensador de placas paralelas, en ausencia de un dieléctrico entre ellas, se tiene que:

$$C_0 = \varepsilon_0 A / d$$

por lo que la capacitancia, cuando el condensador esta lleno con un dieléctrico es:

$$C = (Ke \ \varepsilon_0 A) / d$$

Se puede apreciar que la capacitancia es muy grande cuando la distancia entre placas disminuye.

A continuación se muestra una tabla con las constantes dielectricas de algunos materiales a temperatura ambiente.

Material	Constante dieléctrica	Resistencia Dielectrica (Volts / m)
Vacio	1.00000	--
Aire (seco)	1.00059	3×10^6
Baquelita	4.9	24×10^6
Cuarzo fundido	3.78	8×10^6
Vidrio Pyrex	5.6	14×10^6
Poliestireno	2.56	24×10^6
Teflon	2.1	60×10^6
Caucho neopreno	6.7	12×10^6
Nylon	3.4	14×10^6
Papel	3.7	16×10^6
Titanio	233	8×10^6
Agua	80	--
Aceite de silicon	2.5	15×10^6

La *resistencia dielectrica o rigidez dieléctrica*, es el campo eléctrico máximo que puede existir en un dieléctrico, sin que se produzca la ruptura de la rigidez dielectrica del material, en la cual pierde sus propiedades de aislante. En la practica los valores de la distancia " d " , entre las placas de un condensador, esta limitado por la descarga eléctrica que podría ocurrir a través del medio eléctrico que separa a las placas.

El voltaje máximo que puede ser aplicado a las placas de un condensador, sin que cause una descarga, depende de la *resistencia dielectrica* (máxima intensidad del campo) del dieléctrico, por ejemplo, para el aire la resistencia dieléctrica es igual a 3×10^6 Volts/m; de donde se observa que requieren 3×10^6 Volts para que se produzca una descarga entre un par de placas separadas un metro de distancia.

Si la intensidad del campo en el medio excede la resistencia dielectrica, las propiedades aislantes se romperán y el medio será conductor. La mayoría de los aislante tienen una resistencia dielectrica y una constante dielectrica muy grande comparada con la del aire.

En resumen podemos decir que los efectos que produce un dieléctrico entre las placas de un condensador son:

- *Aumenta la capacitancia de un condensador.*
- *Aumenta el voltaje de operación de un condensador.*
- *Proporciona una estructura mecánica de soporte entre las placas conductoras.*

IV.4.3 Coeficiente de Susceptibilidad, Coeficiente Dieléctrico y Capacidad Especifica de Inducción.

El campo eléctrico aislado en un dieléctrico da lugar a cargas inducidas; por tanto están dependen del valor del campo eléctrico E aislado y del material del dieléctrico. Si consideramos dos placas conductoras (paralelas entre si) y un cierto dieléctrico entre ellas (Fig.23), éste se extenderá de una placa a otra, pero habrá un espacio en el dieléctrico que será el campo aislado E; si designamos σ_i las cargas inducidas por unidad de superficie del dieléctrico y por σ la carga por unidad de superficie de las placas, ambas recibirán el nombre de carga ligada y de carga libre respectivamente.

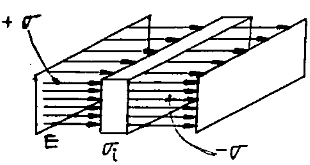


Fig. 21

Las cargas libres son neutralizadas en parte por las cargas inducidas, por lo cual la densidad superficial efectiva es reducida de σ a $\sigma - \sigma_i$, entonces el campo eléctrico resultante en el interior del dieléctrico es:

$$E = 1/\varepsilon_o\ (\sigma - \sigma_i) = (\sigma/\varepsilon_o) - (\sigma_i/\varepsilon_o)$$

donde σ/ε_o es la componente del campo eléctrico con resultante debida a las cargas libres sobre las placas y σ_i/ε_o es la componente del campo eléctrico resultante producido por las cargas inducidas. Se tiene que el campo eléctrico resultante aislado por el dieléctrico es producido por las cargas inducidas anulando éstas casi por completo las cargas libres, por lo que el campo eléctrico interior equivale al campo exterior, es decir:

$$\sigma/\varepsilon_o = \sigma_i/\varepsilon_o = E$$

donde $\varepsilon_o = \eta$ por lo tanto

$$\eta = \sigma_i/E$$

η recibe el nombre de *susceptibilidad eléctrica de un material*, y es constante e independiente de E, bajo condiciones de temperatura y presión constantes, en campos eléctricos no muy grandes y dependiendo siempre de la densidad superficial de carga, inducida por una fuente externa y de la movilidad en el dieléctrico; se expresa en el SI en $Coul^2/m^2 Nw^2$.

El campo eléctrico resultante en el interior del dieléctrico también puede escribirse como:

$$E = (\sigma/\varepsilon_o) - (\eta E/\varepsilon_o)$$

de donde:

$$E + (\eta E / \varepsilon_0) = \sigma / \varepsilon_0$$

$$E\,(1 + (\eta / \varepsilon_0)) = \sigma / \varepsilon_0$$

y finalmente:

$$E = \sigma \,/\, (\varepsilon_0 (1 + (\eta / \varepsilon_0)))$$

Podemos sustituir el término $1 + (\eta / \varepsilon_0)$ por K_e por la que se tiene:

$$E = \sigma \,/\, (\varepsilon_0 K_e)$$

K_e recibe el nombre de *coeficiente dieléctrico del material* y depende de la temperatura y presión del material, de la intensidad del campo eléctrico y de la movilidad. K_e es un número sin dimensiones. Como para el vacío $\eta = 0$; $K_e = 1$

Además se tiene que:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 K_e$$

ε recibe el nombre de capacidad especifica de inducción (del dieléctrico) y se expresa también en $Coul^2 / m^2 Nw^2$.

Para el vacío, en donde $K_e = 0$; $\varepsilon = \varepsilon_0$

Las magnitudes η, K_e y ε_0 físicamente son formás diversas de descripción referente a la orientación que toman los iones y los electrones en el interior del dieléctrico. Esto significa que si estas magnitudes son conocidas podremos determinar las propiedades dieléctricas de un material dado. estas pueden entonces escribirse por definición como:

$$K_e = 1 + (\eta / \varepsilon_0) = (\varepsilon / \varepsilon_0)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 K_e = \varepsilon_0 + \eta$$

$$\eta = \varepsilon_0 (K_e - 1) = \varepsilon - \varepsilon_0$$

IV.4.4 Generalización del Teorema de Gauss. Densidad de Flujo.

El teorema de gauss se generalizara para ser aplicado al caso de una superficie cerrada o parte de ella colocada en cima de un dieléctrico situado entre dos placas paralelas. La superficie gaussiana esta indicada por la línea de trazos, una parte de la cual atraviesa el dieléctrico. Los valores de las cargas (q y q_i) en relación a las densidades de carga superficial e inducida (σ y σ_y) son:

$$q = \sigma A \qquad y \qquad q_i = \sigma_i$$

donde A es el área de las placas, el campo eléctrico dentro del dieléctrico es igual a:

$$E = (\sigma / \varepsilon_0) - (\sigma_i / \varepsilon_0) = (1 / \varepsilon_0 A)(q - q_i)$$

de donde:

$$E A = (1 / \varepsilon_0)(q - q_i)$$

y finalmente:

$$\varepsilon_0 E A = q - q_i$$

El producto $\varepsilon_0 E A$ es el número de líneas de fuerza que cruzan hacia afuera la superficie de Gauss y ($q - q_i$) es la carga neta q encerrada en el interior de la superficie, es decir, la suma algebraica de las cargas libres y de las cargas inducidas

$$q = q - q_i$$

Esto conduce a una modificación en la ley de Gauss que queda expresada como:

$$\varepsilon_0 \int E \ \mathrm{Cos}\,\theta \ dA = q$$

$$\varepsilon_0 \int E \ \mathrm{Cos}\,\theta \ dA = q + q_i$$

Tanto q como q_i se han escrito en la expresión general como magnitudes positivas, pero debe sobreentenderse que se deberá efectuar la suma algebraica de los valores absolutos de q y q_i.

Por otra parte recordando que:

$$E = \sigma / (\varepsilon_0 K_e) = \sigma / \varepsilon$$

pero como además $\sigma = q / A$ entonces:

$$E = q / (\varepsilon A)$$

de donde:

$$(\varepsilon E) \times A = q$$

El producto de la intensidad del campo eléctrico resultante E en un punto cualquiera dentro de un dieléctrico por la capacidad especifica de inducción ε en el mismo punto, se denomina *desplazamiento* en el punto, y se designa por D:

$$D = \varepsilon E$$

las unidades del desplazamiento son Coul/m^2, que son las mismás que las de la densidad superficial de carga σ.

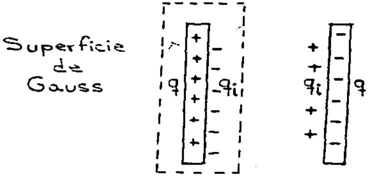


Fig. 22

La dirección de un vector sobre cada punto de la superficie es la misma que la del campo eléctrico E, así mismo como el campo eléctrico, el desplazamiento puede representarse por líneas de fuerza llamadas líneas de desplazamiento y la tangente a estas líneas coincide con la dirección del desplazamiento, hemos de asumir que el número de líneas por unidad de superficie equivale al desplazamiento (perpendicular a su dirección) es numéricamente igual al desplazamiento D, por lo que el número de líneas de desplazamiento por unidad de área es igual, en cualquier punto, al número de líneas de fuerza por unidad de superficie en el mismo punto.

En el vacío, para el cual

$$\varepsilon = \varepsilon_0$$

Entonces se tiene que:

$$D = \varepsilon_0 E$$

y puesto que

$$(\varepsilon E) \times A = q$$

obtenemos:

$$DA = q$$

El producto DA es igual al número de líneas de desplazamiento que atraviesan hacia afuera la superficie Gaussiana, y q es la carga libre dentro de la superficie.

Por lo cual podemos ahora generalizar el teorema de Gauss estableciendo que:

La integral de superficie de la componente normal de D, extendida a una superficie cerrada es igual a la carga libre encerrada por la superficie,

es decir:

$$\int D \cos \theta \ dA = q$$

El concepto de desplazamiento, no tiene ninguna interpretación física directa, como en el caso de la fuerza por unidad de carga del campo eléctrico, sino que simplemente se considera como una magnitud auxiliar definida por la ecuación $D = \varepsilon E$, que tiene la propiedad de que su integral de superficie extendida a una superficie cerrada es igual a la carga libre encerrada por ésta.

CAPITULO V

CIRCUITOS ELÉCTRICOS

La mayor parte de las aplicaciones prácticas de la electricidad se refieren al flujo de la corriente eléctrica.

Por lo que es importante hablar de los factores que contribuyen a la *resistencia* del flujo de carga en los conductores, tales como la composición del material y de la temperatura de operación a la cual se encuentran sometidos dichos materiales

Además debemos avocarnos al análisis de algunos circuitos simples, dicho análisis se simplifica utilizando reglas que siguen las leyes de conservación de energía y de la carga.

La discusión de circuitos que tienen un flujo de corriente contínuo (Corriente Contínua), y sin variaciones en el tiempo, dan la pauta para el análisis de circuitos en los cuales la corriente varía con el tiempo (Corriente Alterna).

V.1 Resistencia.

La oposición que encuentran los electrones libres en su movimiento a través de un material (conductor o aislador) se denomina resistencia del material. Por el contrario, la facilidad con que los electrones se mueven a través de un material, se conoce como la conductancia G del material

La resistencia R, es análoga a la fricción mecánica, puesto que es causada por las colisiones entre los electrones libres y los átomos de un material. La estructura cristalina o atómica de un material determina, por consiguiente, su resistencia inherente por unidad de longitud y área, que es llamada algunas veces resistencia específica o resistividad. En el sistema MKS las unidad de medida de R es el ohm (Ω).

Se define el ohm como la resistencia de un conductor a través de la cual existe una caída de potencial de 1 volt, cuando una corriente de 1 amper fluye por él.

V.1.1 Resistencia de alambres Conductores .

Todos los materiales ofrecen alguna resistencia al flujo de la corriente eléctrica. Los conductores tienen una resistencia relativamente baja; los aisladores tienen una resistencia muy alta. Además, la resistencia de un alambre conductor está afectada por cierto número de factores, entre los que se comprenden la resistividad inherente del alambre, su longitud y su sección transversal, y también la temperatura del ambiente que rodea al conductor. Para calcular las resistencias debemos conocer la relación entre dichos factores. A menudo, se hace necesario insertar una resistencia de un valor muy alto en un circuito sin que la misma ocupe mucho espacio, estás son especialmente diseñadas, que consisten de alambre de alta resistencia, carbono u otro material adecuado, son utilizados para servir como resistencia concentrada de pequeñas dimensiones.

Experimentalmente se ha determinado que la resistencia de un alambre aumenta directamente con su longitud y disminuye en proporción directa al área de su sección transversal, es decir su espesor. La resistencia de un alambre también depende de su resistividad inherente ρ, definiéndose la resistividad como la resistencia de un alambre de unidad de longitud y de unidad de sección transversal. Estas determinaciones experimentales pueden enunciarse cuantitativamente por la formula:

$$R = \rho \quad (L/A)$$

donde **R** es la resistencia en Ohms, ρ es la resistividad, L es la longitud y A es él área de su sección transversal.

Se emplean dos sistemas de unidades para expresar la longitud, el área y la resistividad de un alambre.

El sistema CGS, expresa la longitud, en centímetros (cms.) y el área de la sección transversal en centímetros cuadrados (cms^2), en cuyo caso, la resistividad ρ, está dada en Ohms-centimetros.

En el sistema MKS la longitud del alambre se expresada en pies y el área de la sección transversal expresada en mil circulares.

La resistividad en este caso se denomina ohmio-mil circulares por pie, que en lenguaje de los electricistas es Ohms por mil-pie.

La figura 1 ilustra los dos sistemas. La parte (a) muestra un alambre de 1 cm. de longitud y 1 cm^2. de sección transversal, cuya resistencia en Ohms es igual a su resistividad, expresada en Ohms-centimetros. Para un alambre de cobre con esas características, la resistividad resulta ser 1.724×10^{-6} Ohms. La parte (b) muestra un alambre de 1 pie de longitud y 1 mil-circular de sección transversal. (el diámetro es 1 mil = 0.001 pulgada). Para el cobre, la resistividad es alrededor de 10.4 Ohms por mil circular-pie, a la temperatura ambiente ordinaria, indicando que la resistencia de esta muestra es de aproximadamente 10.4 Ohms.

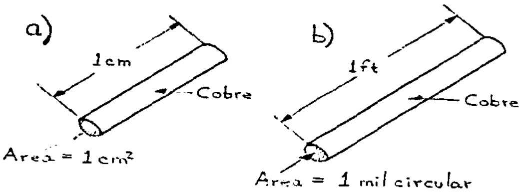


Fig. 1

El mil circular es una unidad conveniente para expresar las áreas circulares. Como ya se sabe, el mil ordinario es una milésima de pulgada (1 mil = 0.001 pulgada). Para hallar el área de un alambre en mils circulares, simplemente exprese su diámetro en mils y elévese al cuadrado este número (ó sea, mils circulares = $(\text{mils})^2$). Con esta unidad se evita el tener que usar el "factor π". Por consiguiente, un alambre de 0.08 pulgs. de diámetro, tiene una sección transversal de $(0.08)(1000)^2 = (80 \text{ mils})^2 = 6\,400$ mils circulares.

Ejemplo No. 1

Calcúlese la resistencia de 1000 pies de alambre de cobre No. 10 (diámetro 0.102 pulg), con una resistividad de 10.4 Ohms/mil-pie.

Solución:

Expresando el área primeramente en mils circulares, elevándose al cuadrado su diámetro en mils. Así 0.102 pulg. = 102 mils; por consiguiente, el área es $(102)^2 = 10\,400$ mils circulares. Luego, la resistencia es:

$$R = \rho\ (L/A) = ((10.4)(1000))\ /\ 10\,400 = 1 \text{ Ohmio}$$

En consecuencia, la resistencia de 1000 pies de alambre de cobre del No. 10 es un Ohmio, que es un valor que se debe de recordar. El valor exacto dado por las tablas corrientes de alambres es 0.9989 Ohms.

V.1.2 Calibres de Alambres.

El espesor de un alambre determina su resistencia para una longitud dada, y también, por consiguiente, su capacidad conductora de corriente en un circuito. El diámetro (espesor) de los alambres de cobre se especifica por los números correspondientes a un patrón o calibrador, y que en los Estados Unidos de América se conoce como el Calibrador Norteamericano de Alambre (AWG, cuyas iniciales en inglés son aceptadas en los países de habla española). Mientras más grueso es el alambre, menor es su número en el calibrador; mientras más delgado es el alambre, mayor es su número en el calibrador. Los números de alambre sólido de cobre comienzan en el No. 0000, para un diámetro de 460 mils y llegan hasta el No. 40 del calibrador, para un alambre de 3.145 mils. La figura 2 ilustra los tamaños relativos de los alambres hasta el número 18 del calibrador.

Fig. 2

Los alambres finos se calientan indebidamente y sus resistencias, relativamente altas, conducen a una pérdida considerable de voltaje en la línea, debida a la caída de voltaje en el alambre, que a su vez causa el funcionamiento deficiente de los aparatos conectados a ese alambre. Los cordones flexibles de cobre trenzado tienen una capacidad conductora de corriente algo mayor que los conductores sólidos. Por ejemplo, el cordón flexible del No. 16 puede llevar hasta 15 Ampers, y el alambre del No. 18 hasta 10 Ampers. Es de máxima importancia escoger el tamaño correcto de alambre para obtener un alambrado eficiente y seguro.

V.1.3 Resistividades de Diferentes Conductores.

Las resistividades de varios metales, y por consiguiente, su capacidad para conducir la electricidad, varían grandemente. A pesar de que el Cobre es el principal metal utilizado en los conductores eléctricos, otros metales se emplean con frecuencia en aplicaciones especiales.

Por ejemplo, metales de alta resistividad, tales como el Constantán, el Maganín y el Nicromo se usan en aplicaciones térmicas y como resistencias. La Tabla siguiente, indica las resistividades de algunos metales comúnmente usados.

Metales	Resistividad a 20 °C		Coeficiente de resistencia por temperatura, a 20 °C
	Microohms (cm²/cm)	Ohms (millares por pie)	
Acero: dulce	15.9	95.8	0.0016
Con dureza de vidrio	45.7	275	
Al silicio (4%)	51.18	308	
Para transformadores	11.09	66.7	
Para alambre de trole	12.7	76.4	
Aluminio	2.828	17.01	0.00403
Antimonio	42.1	251.0	0.0036
Bismuto	111.0	668.0	0.004
Carbono: amorfo	3 800–4,100	....	(−)
De retorta (grafito)	720–812*	....	(−)
Cobre (estirado)	1.724	10.37	0.00393
Estaño	11.63	70	0.0042
Hierro: electrolítico	10.1	59.9	0.0064
Fundición	75.2–98.8	448–588	
En alambre	97.8	588	
Latón	6.21	37.0	0.0015
Mercurio	96.8	576	0.00089
Metal monel	43.5	262	0.0019
Molibdeno	5.78	34.8	
Níquel	8.54	50.8	0.0041
Oro	2.44	14.7	0.0034
Plata	1.628	9.8	0.0038
Plata al platino, 2Ag + 1Pt	24.61	148.0	0.00031
Platino	10.72	63.8	0.003
Plomo	22.0	132	0.00387
Tungsteno	5.51	33.2	0.005
Zinc	5.97	35.58	0.0037

Fig. 3

V.1.4 Efecto de la Temperatura Sobre la Resistencia.

Nótese que en la Tabla de la fig. 3, se especifica la resistividad a una temperatura de 20 °C (68 °F). Esto debido a que la resistencia de los conductores metálicos puros aumenta con la temperatura.

Una sencilla relación nos da la ley del aumento de la resistencia con la temperatura:

$$Rf = Ro\ (1 + \alpha t)$$

donde:

Ro = Resistencia original a la temperatura de referencia

(usualmente 20 °C o 68 °F).

Rf = Resistencia final a mayor temperatura.

t = incremento de temperatura

(o sea, la temperatura final menos la inicial).

α = coeficiente de resistencia a la temperatura de referencia.

En la tabla siguiente se muestran los coeficientes de resistencias para variaciones de temperatura del Cobre y del Aluminio.

Temperatura inicial, °C	Aumento de resistencia por °C		Temperatura inicial, °C	Aumento de resistencia por °C	
	Cobre	Aluminio		Cobre	Aluminio
0	0.00427	0.00439	25	0.00385	0.00396
5	0.00418	0.00429	30	0.00378	0.00388
10	0.00409	0.00420	40	0.00364	0.00373
15	0.00401	0.00411	50	0.00352	0.00360
20	0.00393	0.00403			

Fig. 4

El coeficiente temperatura-resistencia de la mayor parte de los conductores metálicos, tiene un valor promedio de alrededor de 0.004 por grado de variación de la temperatura, expresada ésta en grados Centígrados. Ciertas aleaciones, como el Manganín y la Plata Alemana, tiene coeficientes de temperatura extremadamente pequeños (entre 0.00001 y 0.0004), lo que los hace extremadamente útiles en la construcción de resistencias de alta precisión por sus valores estables de resistencia.

Algunos semiconductores, de hecho, presentan una característica temperatura-resistencia negativa, lo cual significa que su resistencia decrece cuando la temperatura aumenta.

Se hace uso de esta característica para construir resistencias sensibles a la temperatura (termistores), a fin de compensar el aumento en la resistencia de otros componentes; también se utilizan en aplicaciones de control y medida. Algunos termistores presentan una reducción en su resistencia en proporción tan elevada como 10,000,000 : 1 al calentarse a unos 500 °C.

Ejemplo No. 2

Un alambre resistor tiene una resistencia de 50 Ohms a 20 °C, y un coeficiente de temperatura de 0.004 ¿Cuál es el valor de este resistor cuando la temperatura sube a 100 °C.?

Solución:

El cambio en la temperatura es, t = 100-20 = 80 grados Por consiguiente la nueva resistencia es,

$$Rf = Ro\ (1 + \alpha t) = 50\ (1 + (0.004)(80)) = 66\ \text{Ohms}.$$

V.1.6 Tipos de Resistores

Los resistores son fuentes compactas de resistencia. Se producen en gran variedad de tipos, dependiendo del uso que se le dará, resistencia, potencia asignada, precisión requerida (tolerancia), etc.

El tamaño de los mismos oscila entre los muy pequeños (1/2 pulg. de longitud), del tipo de caña o varilla, usados en requerimientos de baja capacidad de potencia (1/2 a 2 watts), y las grandes estructuras "tipo poste" que se utilizan como "balastros" de alto factor y para arrancar los grandes equipos motores-generadores.

La fig. 5, ilustra unos cuantos tipos de resistores "fijos" de resistencia constante.

Los resistores de película de carbón (a) consisten de una varilla de grafito comprimido, embebido en un material aglutinante; son muy populares en las aplicaciones que requieren baja potencia (radio, electrónica) y que no demandan una gran precisión. Se producen desde valores menores a 1 Ohm hasta valores de varios megaOhms (MΩ), con tolerancias que van desde el 5% hasta el 20% del valor indicado.

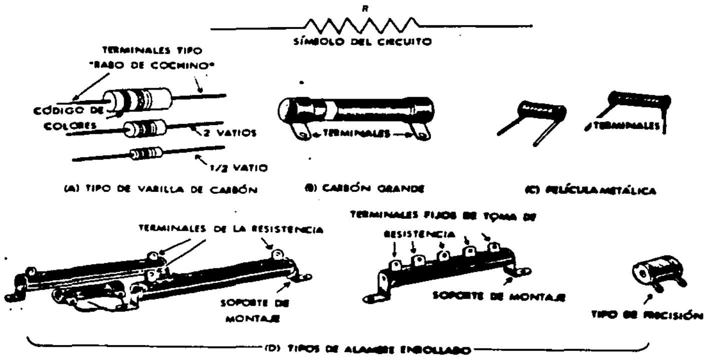
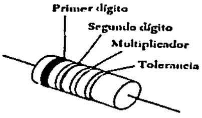


Fig. 5

Generalmente, el valor y la tolerancia de una resistor, se indica por bandas coloreadas alrededor del mismo, de acuerdo con un código de colores "standard", mismo que se muestra en la Tabla siguiente.



Color	Número	Multiplicador	Tolerancia (%)
Negro	0	1	
Café	1	10^1	
Rojo	2	10^2	
Naranja	3	10^3	
Amarillo	4	10^4	
Verde	5	10^5	
Azul	6	10^6	
Violeta	7	10^7	
Gris	8	10^8	
Blanco	9	10^9	
Oro		10^{-1}	5%
Plata		10^{-2}	10%
Sin color			20%

Fig.6

Los resistores de película metálica (c) se hacen rociando una película delgada metálica sobre una varilla de cristal.

Para potencias mayores y de mayor precisión, generalmente se utilizan *resistencias construidas de alambre enrollado* (d). Estas se hacen enrollando alambre de resistencia, de bajo coeficiente de temperatura (Nicromo, Manganín, Plata Alemana) en un pedazo plano de mica, o en una forma de baquelita o porcelana. Es posible obtener precisiones con tolerancias de +,- 1% del valor indicado para la resistencia.

Las resistencias "variables" o ajustables generalmente se construyen del tipo de carbón para aplicaciones que requieren poca potencia, o del tipo de enrollado para requerimientos de potencia mayores, la Fig. 7 ilustra algunos tipos de estas resistencias variables.

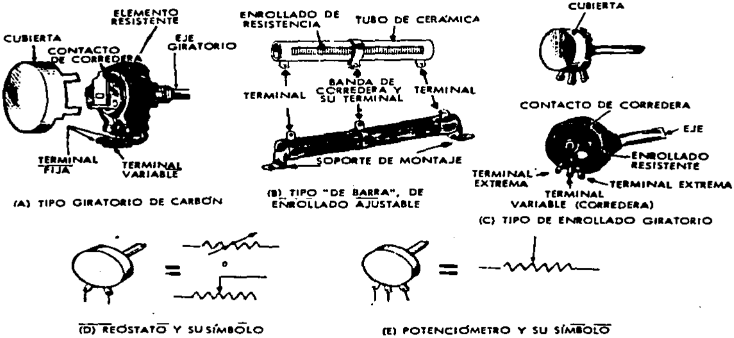


Fig. 7

Las resistencias variables del tipo de alambre enrollado, pueden ser del tipo de "barra" (b) o del tipo giratorio (c). En el tipo de barra, un alambre de alta resistencia se enrolla sobre un tubo de cerámica recto, y la resistencia es variada por el movimiento de una banda corredera en contacto con el alambrado expuesto. En el tipo giratorio, el alambre de alta resistencia se ha enrollado sobre una forma circular y la resistencia que se desea, puede ser obtenida por medio de un brazo de contacto que se puede hacer girar sobre la superficie del alambre.

Las resistencias variables pueden tener dos o tres terminales. Las resistencias con dos terminales, uno conectado en un extremo del enrollado y el otro sobre la corredera, se llaman *reóstatos* (d).

Las resistencias con tres terminales, uno en cada extremo del enrollado y uno conectado a la corredera, son conocidos como *potenciómetros* (e). Un potenciómetro permite "amortiguar" el voltaje aplicado a él en proporción con la resistencia incluída entre uno de los extremos fijos y la corredera.

V.2 *Circuito Eléctrico.*

Un **Circuito Eléctrico** sencillo, consiste de una fuente de fuerza electromotriz (f.e.m.) y una carga conectada a las terminales de la misma.

Una carga representa cualquier dispositivo que consuma o almacene energía.

En la fig. 8, La carga R, puede representar una resistencia verdadera o cualquier aparato eléctrico como puede ser una lámpara, un tostador o una plancha eléctrica, y de los cuales puede obtenerse un trabajo útil.

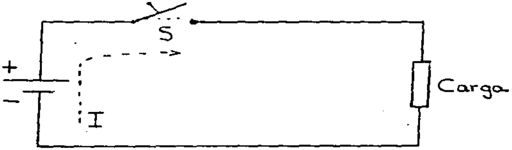


Fig. 8

También se ha conectado un interruptor (S) en este circuito sencillo, que permite la apertura o cierre del mismo.

Mientras el interruptor en el circuito esté en la posición de abierto, el circuito no está completo para que la corriente pueda fluir y se le conoce como un "*Circuito abierto*".

Tan pronto como el interruptor se lleva hacia la posición de cerrado, el circuito queda completo, es decir, sin interrupciones al cual se le se conoce como "*Circuito Cerrado*", a través del cual la corriente eléctrica puede fluir.

V.2.1 Ley de Ohm

Georg Simon Ohm, en 1827, enuncio que la corriente I que fluye en un circuito de C.D., en un circuito eléctrico sencillo, es directamente proporcional al voltaje aplicado E e inversamente proporcional a la resistencia R del circuito.

Este enunciado es conocido como la Ley de Ohm, cuya expresión matemática es

$$I = E / R$$

La Ley de Ohm no solamente se aplica a un circuito sencillo, sino también a cualquier parte de ese circuito, tal como una resistencia individual.

De este modo, cuando la resistencia R en Ohms y la corriente I en Ampers, son conocidas, la caída de voltaje E a través de la resistencia, sencillamente es el producto de la corriente por la resistencia, o en forma de ecuación:

$$E = I R$$

Nótese que aquí se ha empleado el símbolo E para representar una caída de voltaje, a pesar de que debe emplearse en forma correcta para una f.e.m.

El símbolo V frecuentemente se usa para indicar una caída de potencial o diferencia de potencial.

Además el voltaje aplicado (f.e.m.) en un circuito sencillo, si se conocen la corriente a través del circuito y su resistencia total, aplicando la Ley de Ohm, es:

$$R = E / I$$

Si en un circuito eléctrico fig. 9 se mantiene constante el valor de la resistencia o carga del mismo, y el valor de la f.e.m varía.

Aplicando la Ley de Ohm, se obtienen diferentes valores de corriente, que servirán para trazar una gráfica de la corriente I, contra el voltaje aplicado E. De la cual resulta una línea recta, (fig. 9), verificándose que la corriente en un circuito de corriente directa es proporcional a la f.e.m. aplicada.

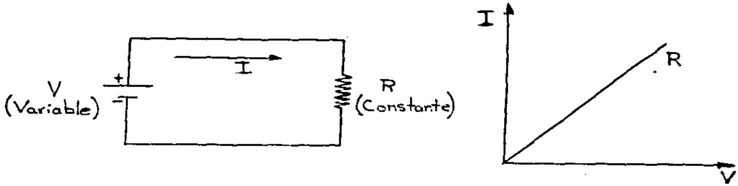


Fig. 9

Ahora, si se mantiene la f.e.m constante y varía la resistencia, como se muestra en la fig. 10, aplicando de nueva cuenta la Ley de Ohm se obtienen valores de corriente que sirven para trazar una gráfica de la corriente contra la resistencia.

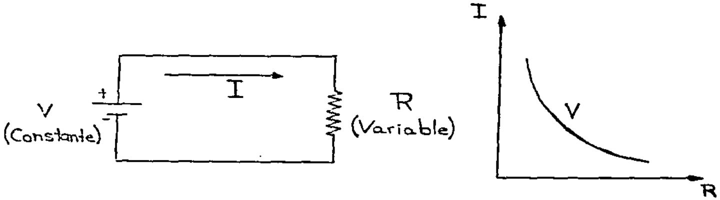


Fig. 10

De la que resulta una línea curva (hiperbólica), la cual indica que la corriente varía inversamente con la resistencia, si el voltaje aplicado se mantiene constante.

V.2.2 Casos en que la Ley de Ohm no es Aplicable.

La Ley de Ohm, no es una ley universal, como la ley de gravitación, sino una verdad experimental que se cumple para ciertos tipos de conductores, por lo que *no siempre es aplicable.*

La Ley de Ohm se aplica siempre que exista una *relación lineal* entre el voltaje y la corriente, es decir, siempre que la resistencia de un conductor o de un circuito, permanezca constante, sin tener en cuenta el valor de la corriente.

Los metales puros y las aleaciones metálicas, tienen una resistencia esencialmente constante, despreciándose los pequeños cambios de la resistencia debidos al calentamiento del conductor cuando una corriente está pasando por él.

Por consiguiente, los metales y las aleaciones, son conocidos con el nombre de **conductores lineales**, y son los únicos que obedecen la Ley de Ohm.

Siempre que la resistencia de un aparato o equipo no permanezca constante, la relación entre el voltaje y la corriente será **no-lineal**

y la Ley de Ohm no es aplicable.

De manera general, esa relación *no-lineal* entre el voltaje y la corriente existe en los **semiconductores, electrolitos y gases ionizados.**

Por ejemplo, una lámpara incandescente es un conductor no-lineal. La resistencia "en caliente" de la misma, cuando está en su máxima brillantez, puede llegar a ser de 15 a 20 veces el valor de la resistencia "en frío", cuando no circula corriente a través de esta.

Como resultado, si se comienza a aumentar el voltaje aplicado a través de tal lámpara desde cero hasta el voltaje máximo, la resistencia de la bombilla aumentará tan rápidamente como el voltaje aplicado, y por consiguiente, la corriente ($I = E/R$) permanecerá prácticamente constante.

Esta característica de corriente constante es de bastante utilidad para la regulación de la cantidad de corriente que fluye en un circuito, y frecuentemente se hace uso de lámparas, con esta finalidad.

Nótese que la Ley de Ohm sería aplicable aún a una lámpara incandescente, siempre y cuando se conocieran el voltaje, la corriente y la resistencia en el mismo instante de tiempo.

Los tubos al vacío, usados en los aparatos de radio y televisión, constituyen un ejemplo interesante de equipo mixto, al presentar al mismo tiempo características *lineales y no-lineales de la resistencia.*

Cuando se le aplica un voltaje al tubo y la corriente empieza a fluir, la resistencia interna del tubo, que es inicialmente alta, cae rápidamente a un valor bastante bajo, y entonces, permanece esencialmente constante.

Como consecuencia, la corriente en el tubo, aumenta lentamente al principio, según aumenta el voltaje, y luego más rápidamente, según va disminuyendo la resistencia, hasta que finalmente aumenta casi linealmente, según se va estabilizando la resistencia.

Una característica típica voltaje-corriente para un tubo al vacío, se muestra en la fig. 11a. la Ley de Ohm puede aplicarse en la parte lineal (superior) de la curva.

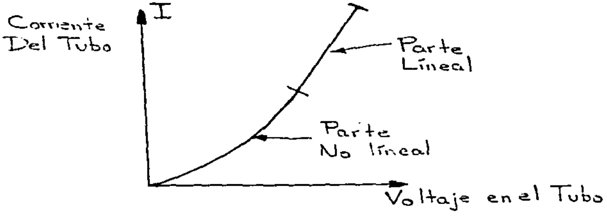


Fig. 11a

El carbón y ciertos semiconductores, realmente tienen una característica negativa de temperatura-resistencia; esto es, que su resistencia cae al subir la temperatura. Por ejemplo, cuando una corriente fluye por un termistor, este *comenzará* a calentarse ligeramente, y su resistencia cae *rápidamente* aun valor de una millonésima de su valor original, cuando la temperatura aumenta en unos 50 °C.

Como la resistencia decrece *mucho más* rápidamente que lo que la corriente puede incrementarse, la caída de voltaje a través del termistor (E = IR), verdaderamente decrece para un incremento de la corriente.

Tal característica negativa de la resistencia, se ilustra en la fig. 11b.

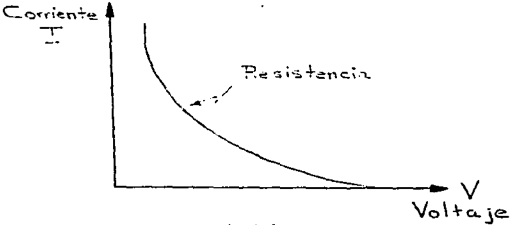


Fig. 11b

V.2.3 Voltaje de Pilas y Generadores en Circuito Abierto y en Circuito Cerrado.

En la fig. 12, se muestra una batería que tiene una carga eléctrica R_L conectada a sus terminales, esta carga puede ser cualquier aparato que consuma energía.

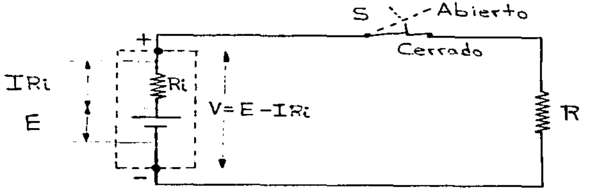


Fig. 12

Además, asumiendo que el símbolo de la batería representa cualquier fuente de C.D., por ejemplo, un generador de C.D.

Todas esas fuentes tienen una cierta cantidad de resistencia interna, Ri, a través de la cual la corriente en el circuito deberá fluir. Esta resistencia interna puede deberse a acciones químicas, tal como la polarización, o puede ser la resistencia real del embobinado del generador.

Cualquiera que sea su origen, una cierta cantidad de trabajo deberá efectuarse contra esta resistencia interna, y en consecuencia, una parte de la f.e.m. de la fuente se gasta en vencerla.

Colocando una resistencia, del mismo valor que la resistencia interna R_i de la fuente, en serie con la f.e.m. y colóquese todo en una caja. La diferencia de potencial ó voltaje, que aparece entre las terminales de la caja, es el voltaje realmente aplicado al circuito externo, o carga.

Es de especial interés conocer el valor de este *voltaje terminal* V, lo mismo ha *circuito abierto* (sin carga ó con el interruptor abierto), como ha *circuito cerrado* (con carga ó con el interruptor cerrado).

Aplicando la Ley de Ohm, el voltaje V, aplicado debe ser igual al producto de la corriente I que fluye por el circuito y la resistencia de la carga R_L, es decir:

$$V = I\ R_L$$

Así mismo, la caída de voltaje en la resistencia interna VR_i es,

$$VR_i = I\ R_L$$

Y estableciendo que la f.e.m. de la fuente E debe ser igual a la suma de todas las caídas de voltaje en el circuito, se tiene que

$$E = I\ R_i + R_L\ I$$

o bién

$$E = I\ R_i + V$$

y por transposición; se obtiene que el voltaje terminal es:

$$V = E - I\ R_i$$

que significa que el voltaje terminal V en un circuito cerrado para una cantidad de corriente I, simplemente, es la f.e.m. E menos la caída de voltaje en la resistencia interna.

Un breve razonamiento produce el mismo resultado sin necesidad de recurrir a las matemáticas.

Yendo en la dirección de la corriente electrónica, de la terminal negativa a la terminal positiva, se encuentra primero una elevación en el potencial E (desde -E hasta +E) y entonces, una caída de potencial igual a IR_i. Sustrayendo la caída de potencial de elevación, se obtiene la diferencia de potencial entre las terminales V, que es la misma que se obtuvo antes, es decir,

$$V = E - IR_i$$

Si el circuito está abierto, la corriente en la ecuación anterior, es cero, y

$$V = E$$

o sea, que el voltaje terminal en circuito abierto es igual a la f.e.m de la fuente.

Ejemplo No. 3

¿Cuál es la f.e.m. de una batería si su voltaje terminal es 5.5 Volts para una corriente de 25 Ampers, y la resistencia interna de la batería es de 0.02 Ohms?

Solución:

$$E = V + I\ R_i = 5.5 + ((25)(0.02)) = 6 \text{ Volts}$$

Ejemplo No. 4

Calcúlese la resistencia interna de una pila seca, que tiene un voltaje en circuito abierto de 1.5 Volts y un voltaje terminal en circuito cerrado de 1.41 Volts, cuando se obtiene una corriente de 30 Ampers.

Solución:

Resolviendo la ecuación

$$E = V + I\,R_i$$

para Ri, se obtiene:

$$\begin{aligned} R_i &= (E - V) / I \\ &= (1.5 - 1.41) / 30 \\ &= 0.003 \text{ Ohms} \end{aligned}$$

V.2.4 Calor y Trabajo: La Ley de Joule

La corriente en un conductor es debida a la velocidad media de los electrones; como si se moviesen a la misma velocidad constante "v", podemos describir más correctamente este movimiento de los electrones como movimientos acelerados y cada uno termina en un choque contra las partículas fijas de un conductor produciéndose nuevamente otra aceleración para volver a chocar.

Los electrones ganan energía cinética durante el movimiento y ceden esta energía a las partículas fijas en forma de calor.

El físico inglés JAMES PRESCCOTT JOULE (1818-1889) enunció que

el calor total desarrollado en un conductor es directamente proporcional a la resistencia, al cuadrado de la corriente y al tiempo que dure el flujo de esta última.

Este pronunciamiento es conocido como la Ley de Joule, que se expresa en forma matemática como

$$H = I^2 R\, t \text{ (Joules)}$$

donde H es el calor generado en Joules, y la corriente I está dada en Ampers, la resistencia R en Ohms y el tiempo t en segundos.

Se ha definido que la diferencia de potencial V_{AB} entre dos puntos es el trabajo W efectuado, al llevar una carga a través de un conductor de un punto de mayor potencial a otro de menor potencial.

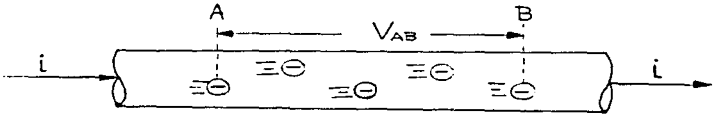


Fig. 13

La figura muestra una parte de un circuito, en un tiempo dt entra por el borne A una cantidad de carga dq = i dt, y la misma cantidad sale por el borne B. Se ha producido un movimiento de la carga dq, desde el potencial V_A hasta el potencial V_B.

La energía dW cedida por la carga es igual a:

$$dW = dq \ (V_A - VB)$$

y como,

$$dq = i \ dt$$

se tiene que:

$$dW = i \ dt \ V_{AB}$$

y la cantidad de energía cedida por unidad de tiempo

$$P = dW / dt = i \ V_{AB}$$

Donde P es la potencia disipada al trasladar la dq de un punto a otro. En el sistema MKS la potencia esta expresada en

Jouls / segundo ó Watts

El trabajo total W hecho al mover una carga q entre los puntos es simplemente el producto de la carga por la diferencia de potencial , es decir:

$$W = q \quad V_{AB}$$

Además, como q = i t

$$W = i \ t \ V_{AB}$$

por la Ley de Ohm, la diferencia de potencial V_{AB} = iR, de donde:

$$W = (i\ t)\ iR = i^2R\ t$$

que expresa la cantidad total de trabajo efectuado por una corriente eléctrica o la energía consumida por la misma.

Por el principio de la conservación de la energía, la energía eléctrica (W) gastada es igual a la energía térmica (H) producida, o sea

$$W = H = i^2R\ t \quad (\textit{Joules})$$

Puesto que el calor se mide usualmente en calorías, es importante tener presente que

$$1\ \text{caloria} = 0.239\ \text{Joules}$$

y que

$$1\ \text{Joule} = 4.18\ \text{calorias}.$$

Ejemplo No. 5

Un calentador eléctrico surtido por una fuerza de 120 Volts consiste de dos enrollados de alambre de resistencia, cada uno de ellos con 30 Ohms. Dichos enrollados pueden conectarse entre sí, en serie o paralelo. Calcúlese el calor generado en 10 minutos en cada caso.

Solución:

Cuando los enrollados están conectados en serie la resistencia total es de 60 Ohms y por consiguiente la corriente es E/R = 120/60 = 2 Ampers. Usando este resultado en la ecuación (8), se tiene:

$$H = i^2R\ t$$
$$= (2\ \text{Amp})^2\ (60\ \text{Ohms})\ ((10)(60)\text{seg}) = 144{,}000\ \text{Joules}$$
$$H = (0.239)\ (144{,}000) = 34{,}416\ \text{Calorías}$$

Cuando los enrollados se conectan en paralelo su resistencia total equivalente R = 30/2 = 15 Ohms, la corriente es I = E/R = 120/15 = 8 Ampers, de estos datos el calor producido, en calorías, sea:

$$H = 0.239\ i^2R\ t$$
$$= (0.239)\ (8)^2\ (15\ \text{Ohms})(600\ \text{seg})$$
$$= 137{,}664\ \text{Calorías}$$

V.2.8 Potencia Eléctrica : Rendimiento del Trabajo.

La potencia, ya sea eléctricas o mecánica, es siempre la proporción de rendimiento del trabajo. o dicho de otra forma, La potencia es el trabajo realizado por unidad de tiempo.

Como ya se menciono el trabajo W es:

$$W = I^2 R\, t$$

y la potencia

$$P = W / t = I^2 R$$

Por la ley de Ohm I = E/R, teniendo que

$$P = I^2 R = (E/R)\, IR = EI$$

ó

$$P = I^2 R = (E/R)^2\, R = E^2/R$$

Las tres fórmulas para la potencia ($P = I^2 R = EI = E^2/R$) son constantemente usadas y se aplican a todos los circuitos en que la ley de Ohm es aplicable.

Ejemplo No. 6

Un generador con un voltaje de 220 Volts. entre sus terminales, envía una corriente de 0.5 Ampers a través de una lámpara que tiene una resistencia de 440 Ohms. Calcule la potencia requerida por dicha lámpara.

Solución:

La potencia se puede determinar de tres modos diferentes;

1.- Potencia en la lámpara

$$E\, I = (220 \text{ Volts})(0.5 \text{ Ampers}) = 110 \text{ Watts}$$

2.- Potencia en la lámpara

$$I^2 R = (0.5 \text{ Ampers})^2\, (440 \text{ Ohms}) = 110 \text{ Watts}$$

3.- Potencia en la lámpara

$$E^2 / R = (220 \text{ Volts})^2 / (440 \text{ Ohms}) = 110 \text{ Watts}$$

V.3 Circuitos de Corriente Directa.

Siempre que haya un flujo de corriente, en un solo sentido sin variaciones con respecto al tiempo, tiene que existir su correspondiente circuito, es decir una senda eléctrica sin interrupciones desde la fuente hasta la carga y desde ésta de regreso hasta la fuente.

Si todos los circuitos fueran tan simples, la sola aplicación de la ley de Ohm sería suficiente para determinar la corriente, pero desafortunadamente en la práctica, la mayoría de los circuitos, incluso los que se usan en nuestros hogares, no son tan simples, pues algunas veces antes de retornar a su fuente, la corriente fluye en forma consecutiva a través de distintos dispositivos o cargas en lo que se denomina **circuito serie**.

Más a menudo, la corriente que fluye desde su fuente se divide en muchas ramas, al entrar en distintas ramas para abastecer casas, apartamentos y los dispositivos eléctricos que en los mismos existen, antes de reunirse de nuevo y regresar a su fuente. Este tipo de circuito que origina un flujo dividido de corriente recibe el nombre de **circuito en paralelo**.

Muchos de los circuitos que en la actualidad suelen encontrarse son combinaciones de los dos tipos más arriba mencionados, es decir, con cierto número de cargas conectadas en serie y la corriente dividida en varias ramas en paralelo por lo que se les denomina **circuitos en serie-paralelo**.

Para la solución de estos circuitos, generalmente se hace referencia a tres cosas.

Primero reducir las resistencias de todas las cargas en el circuito a una resistencia única equivalente o resistencia total, que nos dará la corriente total que se demandará de la fuente de f.e.m., mediante la aplicación de la ley de Ohm.

En segundo lugar, determinar las corrientes individuales que fluyen por las distintas cargas y ramas del circuito, lo que nos da la distribución de la corriente.

Y finalmente, la determinación de la caída de potencial o caída de voltaje a través de cada una de las cargas para a su vez conocer la distribución de voltaje del circuito.

Puede observarse que siempre que tenga aplicación la ley de Ohm es usada constantemente en los cálculos, pero también existen otros métodos mucho mejores para la solución de circuitos, que nos dan las respuestas con mucha más rapidez y menos inconvenientes.

Deberán tenerse presente algunos términos que se emplearán en adelante tales como ***rama, nodo, lazo y malla.***

En el sentido estricto de la palabra, una **rama** de un circuito es un simple componente, como por ejemplo un resistor (dispositivo que posee cierta cantidad de resistencia) o una fuente.

Un **nodo** es un punto en que se conectan dos o más ramas. Dicho de otra manera un nodo indica que todos los puntos están a el mismo potencial.

Un **lazo** es cualquier trayectoria cerrada en un circuito. Una **malla** es un lazo que no tiene una trayectoria cerrada en su interior.

V.3.1 Circuito Serie.

En un circuito serie la corriente fluye por un lazo continuo, desde una f.e.m. a través de las cargas y de regreso a f.e.m. La fig. 14 ilustra un circuito serie.

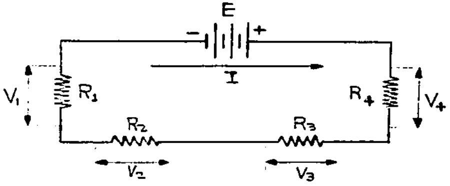


Fig. 14

Se han conectado en serie cuatro resistencias con una batería de 50 Volts y un interruptor que permite la apertura y cierre del circuito. Las resistencias pueden representar carga de varios tipos tales como lámparas, o los filamentos de tubos de radio.

Puesto que por definición la corriente fluye en una senda única continua, se infiere que

" la corriente en un circuito serie debe ser la misma en cualquier punto parte del mismo "

Se sabe *intuitivamente*, **que la oposición total, resistencia Rt, a la corriente es la suma de las oposiciones individuales de las resistencias, por lo tanto en forma general y por consiguiente para cualquier número de resistencias en serie R_1, R_2, R_3, R_4,..... Rn., la resistencia total Rt será igual a:**

$$Rt = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \ldots\ldots + Rn$$

donde los puntos representan cualquier "n" número adicional de resistencias que se usen.

En forma equivalente, como se ha mencionado con anterioridad, la suma de las caídas de voltaje individuales en el circuito debe ser igual a la f.e.m. (E) de la fuente. Así pues podemos expresar matemáticamente las caídas de voltaje V, para cada una de las resistencias, como:

$$E = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

V_1 representa la caída de voltaje a través de R_1 y así en forma correspondiente para los demás.

De donde además conforme a la ley de Ohm la corriente serie total es:

$$I = E / Rt$$

Como la corriente es la misma en todas las partes del circuito, aunque las resistencias varían, es evidente que **las caídas de voltaje para distintas partes de un circuito serie pueden diferir entre sí**. Éste es otro hecho importante de recordar.

Aplicando la ley de Ohm, a las caídas de voltaje a través de cada una de las resistencias de la fig. 14, tenemos:

$$V_1 = I\ R_1,\quad V_2 = I\ R_2,\quad V_3 = I\ R_3 \text{ y } V_4 = I\ R_4$$

como E = IRt, se tiene

$$E = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

<u>En resumen las relaciones que se derivan del circuito serie, son las siguientes:</u>

1. La corriente en el circuito serie es la misma en todas sus partes.
2. Las caídas de voltaje pueden ser todas diferentes dependiendo del valor de cada resistencia, pero la suma de todas las caídas de voltaje debe ser igual a la f.e.m. (voltaje) de la fuente.
3. La resistencia total del circuito serie es igual a la suma de las resistencias individuales.

Ejemplo No. 7

Calcúlese la resistencia y la corriente del circuito ilustrado en la fig. 14.

Solución:

La resistencia total,

$$R_t = 50 + 100 + 300 + 20 = 470 \text{ Ohms}$$

y por consiguiente aplicando la ley de Ohm la corriente es

$$I = E / R_t = 50 / 470 = 0.106 \text{ Ampers}$$

V.3.2 Circuito Paralelo.

Un circuito paralelo es básicamente aquel en el cual la corriente se divide a través de un número de ramas separadas e independientes. Cada una de estas ramas puede tener distinta resistencia (carga) y de aquí que el valor de la corriente en cada rama sea diferente. De este modo si se pude encontrar más de una senda para el flujo de la corriente, a través de un circuito, este es clasificado como *Circuito Paralelo.*

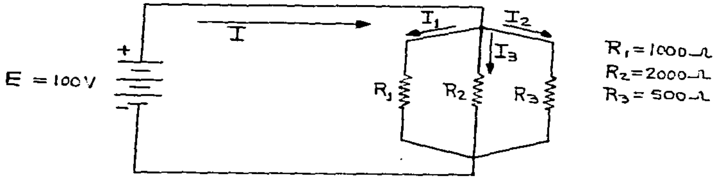


Fig. 15

En el circuito mostrado (fig 15), cuando el interruptor principal está cerrado, una corriente I fluye desde la fuente de f.e.m. (E) en la dirección indicada, hasta el nodo superior común a las resistencias R_1, R_2, y R_3, que al llegar a ese punto se divide en tres corrientes parciales I_1, I_2 e I_3 respectivamente, las que después de fluir a través de cada una de las resistencias individuales vuelven a combinarse en el nodo inferior.

Puesto que *la carga total debe conservarse*, la corriente que sale del nodo inferior debe ser igual a la que entró por el nodo superior o en forma equivalente, *la suma de las corrientes de cada una de las los ramas es igual a la corriente total* I, esto se expresa matemáticamente de la manera siguiente:

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Por supuesto la corriente total es igual a:

$$I = E / R_t .$$

puesto que la corriente total es mayor que la corriente de cada rama, la resistencia Rt debe ser menor que la más baja de las resistencias de cualquier rama.

En terminos de las aseveraciones anteriores, tendremos que:

$$I = E/Rt \;:\quad I_1 = E/R_1 \;:\quad I_2 = E/R_2 \;:\quad I_3 = E/R_3$$

y por consiguiente:

$$E/Rt = E/R_1 = E/R_2 = E/R_3$$

y dividiendo el numerador en ambos lados de la ecuación anterior por el factor común E, tendremos:

$$1/Rt = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$$

esta última ecuación, expresa que la reciproca de la resistencia total en un circuito total en un circuito en paralelo es igual a la suma de las recíprocas de las resistencias de cada una de las ramas individuales.

De esta misma ecuación podemos despejar el valor de la resistencia total, para cualquier número n de resistencias adicionales conectadas en paralelo, obteniéndose:

$$Rt = 1 / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \ldots\ldots + 1/Rn$$

la cual expresa que la resistencia total de un circuito en paralelo es igual a la recíproca de la suma de las recíprocas de las resistencias de cada una de las ramas individuales.

Como caso especial, que ocurre en la práctica, la resistencia total de dos resistencias conectadas en paralelo. Se tiene que:

$$1/Rt = 1/R_1 + 1/R_2 = (R_1 + R_2) / ((R_1) (R_2))$$

y por consiguiente

$$Rt = (R_1 \quad R_2) / (R_1 + R_2)$$

<u>En resumen las características de un circuito paralelo, son:</u>

1. La caída de tensión en cada rama de un circuito en paralelo, es igual al voltaje suministrado.
2. La corriente total que entra en un nodo común de todas las ramas, es igual a la suma de las corrientes individuales de cada una de las ramas.
3. La resistencia total (equivalente) de un circuito en paralelo es igual, al recíproco de la suma de los recíprocos de las n resistencias individuales de cada rama.

$$Rt = 1 / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \ldots\ldots + 1/Rn$$

Ejemplo. No. 8

Determínese la resistencia total, la corriente total y las corrientes en cada rama, para el circuito ilustrado en la fig. 15.

Solución:

La resistencia equivalente total (equivalente) del circuito es:

$$Rt = 1 / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3)$$

$$Rt = 1 / (1/1000 + 1/2000 + 1/500)$$

$$= 1 / (0.001 + 0.0005 + 0.002)$$

$$= 1 / 0.0035 = 285.71 \text{ Ohms}$$

Puesto que se conoce la resistencia total, es la equivalente de las tres resistencias de las ramas, podemos sustituir el circuito de la fig. 15, por uno más simple equivalente, teniendo una sola resistencia con 285.71 Ohms. La corriente total del circuito equivalente de la fig. 15, simplemente es

$$I = E / Rt = 100 / 285.71 = 0.35 \text{ Ampers}$$

Para obtener la corriente en cada una de las ramas tenemos que referirnos nuevamente al circuito original (fig.15). Aquí la corriente a través de R_1 es

$$I_1 = E / R_1 = 100 / 1000 = 0.1 \text{ Ampers}$$

la corriente en a través de R_2

$$I_2 = E / R_2 = 100 / 2000 = 0.05 \text{ Ampers}$$

y la corriente a través de R_3 es

$$I_3 = E / R_3 = 100 / 500 = 0.2 \text{ Ampers}$$

Como comprobación, la suma de la corriente individual de cada una de las ramas, debe ser igual a la corriente total

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 0.1 + 0.05 + 0.2 = 0.35 \text{ Ampers}$$

V.3.3 Circuito Serie-Paralelo.

Los circuitos *serie-paralelo* son combinaciones de ambos tipos de circuitos, serie y paralelo, teniendo las propiedades de ambos.

El método general es simplificar el circuito paso a paso, sustituyendo grupos de resistencias en serie o en paralelo por resistencias simples equivalentes reduciéndolo finalmente a un circuito serie sencillo. El ejemplo siguiente ilustrará mejor dicho método.

Ejemplo No. 9

La fig. 16 - Parte I, ilustra un circuito serie-paralelo consistente en una fuente E de 100 Volts y cinco resistencias conectadas en serie-paralelo con los valores indicados en la figura. Se desea encontrar la resistencia total equivalente Rt, la corriente total de línea It el valor de la corriente y la caída de voltaje a través de cada resistencia.

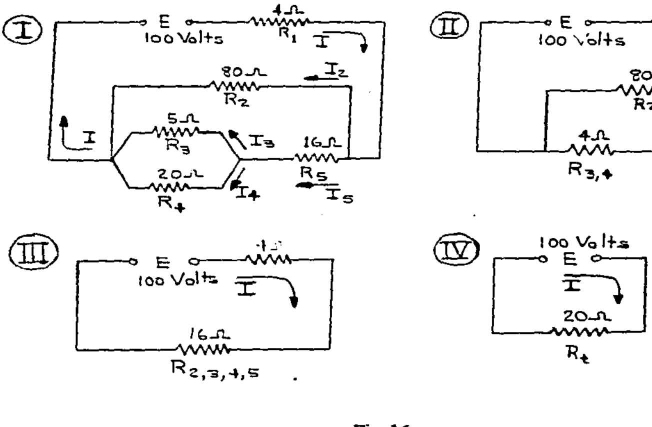


Fig. 16

Solución:

El circuito de la parte I de la (fig. 16), debe ser simplificado a un circuito serie simple tal como se indica en los circuitos sucesivos equivalentes ilustrados en las partes II al IV.

Primero combinaremos las resistencias R_3 y R_4 en una sola resistencia equivalente $R_{3\text{-}4}$, observando que se trata de un arreglo de resistencias en paralelo, y se obtiene:

$$R_{3\text{-}4} = (R_3 \ R_4) / (R_3 + R_4)$$

$$R_{3\text{-}4} = ((5)(20)) / (5 + 20)$$

$$= 100 / 25 = 4 \text{ Ohms} \ldots\ldots\ldots \text{ (fig. 16, parte II)}$$

Esta resistencia $R_{3\text{-}4}$ esta conectada en serie con R_5, por lo que se podemos obtener una resistencia equivalente $R_{3,4,5}$ igual a:

$$R_{3,4,5} = R_{3,4} + R_5 = 4 + 16 = 20 \text{ Ohms.}$$

Ahora combínese esta resistencia $R_{3,4,5}$ de 20 Ohms, conectada en paralelo, con R_2 de 80 Ohms, para obtener la resistencia equivalente

$$R_{2,3,4,5} = (R_{2,3,4} \ R_2) / (R_{2,3,4} + R_2)$$

$$R_{2,3,4,5} = ((20)(80)) / (20 + 80)$$

$$= 1600 / 100 = 16 \text{ Ohms} \ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (fig. 16, parte III)}$$

Finalmente solamente queda la resistencia R_1 de 4 Ohms, conectada en serie con la resistencia equivalente $R_{2,3,4,5}$ de 16 Ohms, que al combinarse dan resistencia total equivalente Rt de:

$$Rt = R_{2,3,4,5} + R_1$$

$$Rt = 16 + 4 = 20 \text{ Ohms}$$

Por consiguiente la corriente total es

$$It = E / Rt = 100 / 20 = 5 \text{ Ampers.}$$

Determínese ahora las corrientes y caídas de tensión.

La corriente a través de R_1, es igual a la corriente total It de 5 Ampers y la caída de tensión en la misma es:

$$V_{R1} = It \, R_1 = 5 \ (4) = 20 \text{ Volts.}$$

La caída de tensión a través de la combinación completa de R_2, R_3, R_4 y R_5, es igual a la corriente It por su resistencia equivalente $R_{2,3,4,5}$, es decir:

$$V_{R2,R3,R4,R5} = I_t\ R_{2,3,4,5} = 5\ (16) = 80 \text{ Volts}$$

También es igual a la diferencia entre f.e.m. y la caída de voltaje a través de R_1, o sea:

$$V_{R2,R3,R4,R5} = E - V_{R1} = 100 - 20 = 80 \text{ Volts}$$

La caída de voltaje a través de la resistencia R_2 de 80 Ohms, es igual que la correspondiente a la entera combinación, o sea, 80 Volts. De aquí que la corriente por el rama de R_2 sea igual a

$$I_{R2} = V_{R2,R3,R4,R5} \ / \ R_2 = 80 / 80 = 1 \text{ Ampers}$$

La corriente que pasa por R_5 es igual a la caída de tensión a través de R_2, R_3, R_4 y R_5 dividida por la resistencia de la rama donde se encuentra conectada, es decir, $R_{3,4,5}$ de 20 Ohms como se indico en la parte II, y de aquí que la corriente a través de R_5 sea igual a:

$$I_{R5} = V_{R2,R3,R4,R5} \ / \ R_5 = 80 / 20 = 4 \text{ Ampers}$$

También es igual a la corriente total, menos la que pasa por R_2.

La caída de tensión a través de las resistencias en paralelo R_3 y R_4 es igual a la corriente del rama por su resistencia equivalente $R_{3,4}$ o sea:

$$V_{R3,R4} = V_{R4} = R_{3,4}\ I_{R5} = 4\ (4) = 16 \text{ Volts}$$

La caída de voltaje a través de R_5 en esta misma rama es:

$$V_{R5} = I_{R5}\ R_5 = 4\ (16) = 64 \text{ Volts}$$

Si suman las caidas de tensión $V_{R3,R4}$ y V_{R5}, llegarán a 80 Volts.

Finalmente la corriente a través de R_3 es igual a la tensión en la rama que es de 16 Volts, dividido por R_3, dando como resultado:

$$V_{R3,R4} \ / \ R_3 = 16 / 5 = 3.2 \text{ Ampers}$$

En forma similar la corriente a través de R_4 correspondiente es

$$V_{R3,R4} \ / \ R_4 = 16 / 20 = 0.8 \text{ Ampers.}$$

con lo que queda solucionado totalmente el problema.

V.3.4 Leyes de Kirchhoff.

En ocasiones puede resultar sumamente complicado aplicar la ley de Ohm, para la solución de un circuito serie-paralelo un tanto más complicado. Para lo cual son de gran utilidad las generalizaciones establecidas por el físico alemán GUSTAVO ROBERTO KIRCHHOFF (1824-1887), estas son válidas para cualquier circuito eléctrico, a las que se les conoce como *Leyes de Kirchhoff,* estas enuncia lo siguiente:

Primera Ley:

La suma de las corrientes que fluyen hacia un nodo en un circuito eléctrico es igual a la suma algebraica de las corrientes que salen del citado nodo. En otras palabras, igual corriente fluye hacia un punto como sale de él.

Segunda Ley:

La suma de las fuerzas electromotrices (voltajes de baterías, generadores y fuentes de poder) alrededor de cualquier circuito cerrado, es igual a la suma algebraica de las caídas de voltaje a través de cada una de las cargas de dicho circuito.

El siguiente ejemplo ilustrará lo simple que es la aplicación de la primer ley de Kirchhoff.

Ejemplo No. 10

En la fig. 17, las corrientes de dos ramas (I_1 e I_2) fluyen hacia el nodo (L) de un circuito eléctrico y las corrientes de tres ramas (I_3,I_4,I_5) salen del mismo. ¿ Cuál es la distribución de la corriente en el nodo ?

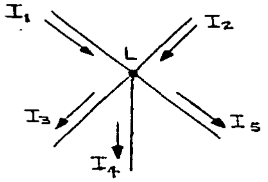


Fig. 17

Solución:

<u>Por la primera ley de Kirchhoff</u> la suma de las corrientes que fluyen hacia el nodo tiene que ser *igual* a la suma de las corrientes que salen del mismo.

De aquí que

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

o en forma equivalente pasando todos los elementos al lado izquierdo de la igualdad tendremos:

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0$$

Este ejemplo sugiere que la primera ley de Kirchhoff puede simplificarse más aún.

Asignándole signo positivo (+) a todas las corrientes que fluyan hacia el nodo y un signo negativo (-) a todas las que salen del mismo misma, dicha ley puede enunciarse con estas otras palabras:

la suma algebraica de todas las corrientes en una unión es cero.

Poniendo este enunciado en forma matemática podemos escribir concisamente:

$$\sum I = 0$$

<u>La segunda ley de Kirchhoff</u> no es nueva para nosotros; la hemos usado antes varias veces y se recordará que está basada en el concepto de la conservación de la energía, o sea, más específicamente, que la energía que se entrega a un circuito tiene que ser igual a la energía consumida por lo que el trabajo realizado en la creación de una elevación de voltaje en la fuente de f.e.m. debe ser igual al trabajo efectuado por la corriente en generar la caída de voltaje en el circuito.

Expresada en forma de ecuación esta ley enuncia:

$$\sum \text{F.E.M.} = \sum \text{Caídas de voltaje}$$

ó

$$\sum E = \sum IR$$

(alrededor de un circuito cerrado)

y por transposición de las caídas IR a la izquierda de la ecuación tendremos:

$$\sum E - \sum IR = 0$$

Segunda ley de Kirchhoff:

Esto puede ser también dicho en palabras como sigue: La suma algebraica de las diferencias de potencial (voltaje) en un circuito cerrado es igual a cero. Con el fin de obtener la suma algebraica debe asignársele signo positivo (+) a todas las f.e.m. en el anillo y negativo (-) a todas las caídas (IR) de voltaje.

V.3.5 Procedimiento para el uso de las Leyes de Kirchhoff.

Debe seguirse un proceso sistemático en el uso de las leyes de Kirchhoff para no verse envuelto en numerosas ecuaciones interrelacionadas y confusas y poder resolver el circuito en la forma más rápida posible. En forma breve, estos son los requisitos esenciales:

1. **Divídase el circuito en un número de *mallas*, que incluyan todas las resistencias y f.e.m. existentes en el mismo.**

2. **Asígnele una dirección al flujo de la corriente alrededor de cada una de las mallas. Si existe una f.e.m. en la malla, escójase la dirección del flujo de electrones, de menos (-) a más (+).**
   Si no hubiesen presentes una o varias f.e.m. asúmase una dirección arbitraria para la corriente ya sea en favor o en contra de las agujas del reloj.

   NOTA: Si se asume una dirección equivocada el valor de la corriente resultará con signo negativo pero su magnitud no se será afectada. Asígnele entonces un signo más (+) a aquellas f.e.m. y corrientes que fluyen en dirección opuesta a la escogida.

3. **Usando la primera ley de Kirchhoff (suma I = 0) formúlense tantas ecuaciones independientes de corriente como sea posible en varios nodos; las corrientes que fluyen hacia el punto son se consideran como positivas (+) y las que salen de él, como negativas (-).**

4. **Usando la segunda ley (Suma de E - Suma de caídas IR = 0) formúlese tantas ecuaciones independientes de voltaje, alrededor de las mallas, como número de estas existan en el circuito.**

   El número total de ecuaciones independientes de corriente y voltaje debe ser igual al número de corrientes incógnitas. (Las ecuaciones independientes no se reducen a formas idénticas por sustituciones algebraicas.)

5. **Resuelva las ecuaciones algebraicas simultáneas resultantes para cada una o todas las corrientes cuyo valor se desea conocer.**

Ejemplo No. 11

La fig. 18, ilustra un circuito que consta de dos f.e.m. y tres resistencias. Calcúlese la corriente que fluye a través de cada una de las resistencias, así como la caída de tensión en estás, aplicando las leyes de Kirchhoff.

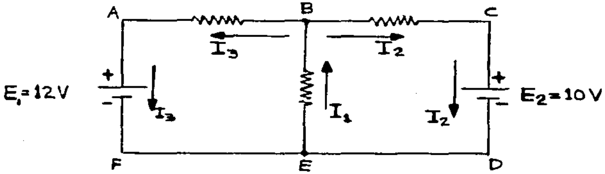


Fig. 18

Solución:

Observando el circuito tenemos la existencia de dos mallas, ABEF y BCDE, para la solución del circuito. El flujo de corriente en cada malla se ha escogido en la dirección de la terminal negativa al positivo de la f.e.m.

Designemos I_1, la corriente a través del resistor de 10 Ohms (R_1), e I_2 a la corriente a través del resistor de 6 Ohms (R_2) e I_3 a la que pasa a través del resistor de 12 Ohms (R_3).

Por la primera ley de Kirchhoff en el nodo B:

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad ó \quad I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Si se tratase de formular otra ecuación de corriente en el nodo E tendríamos:

$$I_1 + I_3 = I_1 \quad ó \quad I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

como puede observarse está última ecuación es igual a la ecuación a la ecuación (1) y por consiguiente <u>no es independiente</u> de ella.

Por la segunda ley de Kirchhoff, las caídas de voltaje en la malla ABEF son:

$$10\ I_1 + 12\ I_3 = 12\ \text{Volts} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (2)$$

y las caídas del voltaje alrededor de la malla BCDE son:

$$10\ I_1 + 6\ I_2 = 10\ \text{Volts} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (3)$$

Sustituyendo I_3 por su equivalente en la ecuación (2), tenemos:

de la ec. (1) se tiene que $I_3 = I_1 - I_2$, entonces

$$10\ I_1 + 12\ (I_1 - I_2) = 12\ \text{Volts}$$
$$10\ I_1 + 12\ I_1 - 12\ I_2 = 12\ \text{Volts}$$
$$22\ I_1 - 12\ I_2 = 12\ \text{Volts} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (4)$$

dividiendo la ecuación (4) por 2 :

$$11\ I_1 - 6\ I_2 = 6\ \text{Volts} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (5)$$

Sumando (3) y (5) :

$$21\ I_1 = 16\ \text{Volts}$$

y por consiguiente

$$I_1 = 16 / 21 = 0.762\ \text{Ampers}$$

y de la ecuación (3) :

$$I_2 = \frac{10 - 10\ I_1}{6} = \frac{10 - 7.62}{6} = 0.397\ \text{Ampers}$$

y por la ecuación (1) :

$$I_3 = I_1 - I_2 = 0.762 - 0.397 = 0.365\ \text{Ampers}$$

Conociéndose las corrientes, se pueden calcular las caídas de voltaje en cada una de las resistencias.

La caída de voltaje a través de la resistencia de 10 Ohms (R_1)

$$I_1 R_1 = (0.762)\ (10) = 7.62\ \text{Volts}$$

La caída de voltaje a través de la resistencia de 6 Ohms (R_2)

$$I_2R_2 = (0.397)\ (6) = 2.38\ \text{Volts}$$

y la caída de voltaje a través de la resistencia de 12 Ohms (R_3)

$$I_3R_3 = (0.365)\ (12) = 4.38\ \text{Volts}$$

V.4 Fundamentos de Corriente Alterna

La rotación en forma continua de la bobina de una armadura, de un generador de C.A., en un campo magnético crea un voltaje o corriente alterna (en un circuito cerrado) cuya magnitud aumenta o disminuye siguiendo una onda sinusoidal.

Debe recordarse que sólo la proyección vertical varía en función de una f.e.m. en la bobina y que la citada proyección vertical varía en función del seno del ángulo de rotación (sen Θ). Dibujando la onda sinusoidal de la C.A., trazando las proyecciones verticales de las secciones largas de la armadura (las que cortan al flujo) en función del tiempo o del número de grados correspondientes a una revolución. Para simplificar el procedimiento asúmase que los lados de la bobina de la armadura están representados por la longitud del radio del círculo ilustrado en la fig. 19, y que dicha longitud representa el voltaje máximo alternante, (Em).

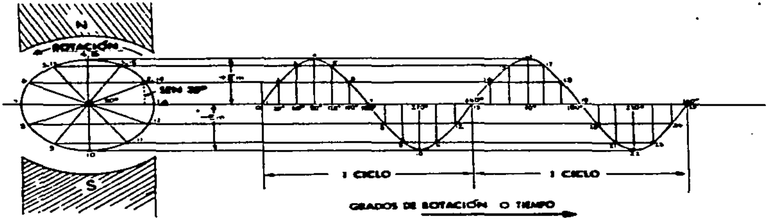


Fig. 19

Haciendo que el radio gire en dicho círculo, en sentido contrario al de las agujas del reloj, para simular la rotación real de la armadura de un generador de corriente alterna. La fuerza electromotriz instantánea e, inducida para cualquier posición de la bobina de la armadura estará representada por la proyección vertical del radio rotatorio, que es una línea dibujada desde el extremo del radio, perpendicularmente hasta el diámetro horizontal del referido círculo. La longitud de esta línea perpendicular (proyección) en cualquier momento es por supuesto igual al seno del ángulo que forma el radio con el diámetro horizontal.

A la derecha del radio rotatorio en la fig. 19, se han dibujado las longitudes de las proyecciones verticales, para los ángulos del radio con el diámetro horizontal en su giro contrario al de las manecillas del reloj.

De este modo, cuando el radio rotatorio tiene un ángulo de 30° con el diámetro horizontal (punto 2), una línea horizontal dibujada desde la intersección del radio con su proyección vertical hasta la ordenada de los 30° de la curva a la derecha, determina la altura de la proyección para un giro de 30° y por consiguiente el voltaje en ese instante. En forma similar cuando el radio forma una ángulo de 90° (punto 4) la línea horizontal dibujada hasta la ordenada de 90° de la onda de voltaje, determina el voltaje máximo (Em) en ese instante para un giro de 90°.

Es evidente que a medida que el radio gira, sus proyecciones verticales varían entre los valores máximos de +Em y -Em, generándose la onda de voltaje sinusoidal que se ilustra a la derecha de la fig. 18.

Después de una rotación completa, a sea, <u>1 ciclo</u>, la onda sinusoidal se repite, en cada siguiente rotación en idéntica forma. La forma de onda de una corriente instantánea (i) en un circuito cerrado, por supuesto, es exactamente la misma.

Se ha observado que durante el tiempo que la bobina de la armadura gira 360°, o sea, da una revolución completa, el voltaje de salida pasa por un ciclo completo consistente en una alternancia positiva (durante los primeros 180°) y una alternancia negativa (los 180° siguientes). En cada alternancia alcanza un valor máximo, también designado como amplitud o voltaje de cresta que es positivo (+Em) durante la primera alternancia, y negativo (-Em) durante la segunda alternancia de cada ciclo.

El tiempo requerido para completar un ciclo (dos alternancias) se denomina período y el número de ciclos que se completan por segundo se denomina frecuencia de la onda sinusoidal. El período (T) y la frecuencia (f) guardan entre sí una relación inversa; esto es, frecuencia es la recíproca de período ($f = 1/T$) y viceversa.

Por ejemplo, si una bobina gira entre dos polos de un electroimán a una velocidad de 3600 revoluciones por segundo, en la misma se generará una corriente alterna de 60 ciclos por segundo (c.p.s.) y el período será $T = 1/f = 1/60$ de segundo.

V.4.1 Velocidad Angular

La expresión matemática para los valores instantáneos de un voltaje de corriente alterna con una forma de onda sinusoidal (e), en términos del valor máximo (Em) y el ángulo de rotación θ, que también es conocido como el desplazamiento angular ha sido debidamente establecida y es como sigue:

$$e = Em \ \text{sen} \ \theta$$

donde θ se expresa usualmente en radianes en vez de grados. El desplazamiento angular o ángulo de rotación que se completa durante cierto tiempo t depende por supuesto de la velocidad angular de rotación w.

Así es que podemos sustituir θ por el producto de la velocidad angular y el tiempo t, por lo que la ecuación del voltaje instantáneo para la corriente alterna puede expresarse:

$$e = Em \ \text{sen} \ wt$$

y en forma similar los valores instantáneos para la corriente alterna (en circuito cerrado)

$$i = Im \ \text{sen} \ wt$$

Además, puesto que cada revolución comprende 2π radianes (360 grados = 2π radianes) la velocidad angular en radianes es simplemente 2π por el número de revoluciones completadas cada segundo, es decir, la frecuencia.

$$w = 2\pi f = 6.283 \ f$$

Ejemplo No. 12

Una bobina gira en el campo bipolar de un generador de corriente alterna a una velocidad de 3600 r.p.m.. Si el valor máximo (cresta) de la f.e.m. inducida es de 220 Volts y el valor máximo de la corriente a través de la carga es de 10 Ampers. Formúlense las expresiones para los valores instantáneos del voltaje

Solución:

Una velocidad de 3600 r.p.m. es equivalente a 60 r.p.s y la frecuencia por consiguiente es de 60 ciclos por segundo; de aquí que la velocidad angular en radianes es:

$$w = 2\pi f = 377$$

y por consiguiente

$$e = 220 \ \text{sen} \ 377t$$

$$i = 10 \ \text{sen} \ 377t$$

V.4.2 El Valor efectivo de la Corriente Alterna

(Raiz Cuadrada de la Media de los Cuadrados)

Aunque la onda de una corriente alterna luce estética, sus continuadas oscilaciones dificultan algo determinar con exactitud el valor particular de la corriente o voltaje que pueda considerarse como su valor efectivo.

De aquí que surga una pregunta, ¿ cuál de los muchos valores instantáneos posibles de voltaje o corriente, puede o debe indicar un medidor de voltaje (volmetro) o de corriente (amperímetro).

El mejor modo de responder a esta pregunta, es definir un valor efectivo de una corriente alterna que produzca trabajo a la misma velocidad, que un valor igual de corriente directa.

Por lo que ahora la pregunta es :

¿ Cuál es este valor efectivo de una corriente o voltaje alternos ?

La forma más fácil de comparar las velocidades en efectuar trabajo (Potencia) de una corriente alterna y otra directa es midiendo el efecto calorífico relativo de estás, cuando las mismas fluyan por resistencias de un mismo valor.

De acuerdo con esto, se define como valor efectivo de una corriente alterna aquel valor de C.A. que produce calor a la misma velocidad que una cantidad igual de corriente directa fluyendo a través de la misma resistencia; en otras palabras un valor efectivo de 1 amper de C.A. producirá el mismo calor en una resistencia dada, fluyendo durante el mismo tiempo que un amper de C.D.

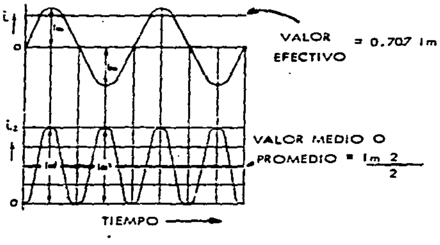


Fig. 20

Con esta definición, es fácil calcular el valor efectivo de una corriente alterna. Sabiendo que la potencia que disipa un resistor o carga, en forma de calor es proporcional al producto del cuadrado de la corriente, que circula a través de está, por la resistencia. Que representa la velocidad de calentamiento está, es decir:

$$\text{Potencia} = I^2 R.$$

Por lo tanto se deben elevar al cuadrado todos los valores instantáneos (ordenadas) de una onda de corriente alterna sinusoidal como la ilustrada en la fig. 20. En la parte superior de la misma, se muestra una corriente alterna sinusoidal típica con los valores instantáneos de corriente (I) trazados en función del tiempo y variando entre los valores máximos +Im e -Im.

La gráfica de la parte inferior de la fig. 19, ilustra la onda sinusoidal obtenida (elevada al cuadrado) cuando todos los valores de corriente instantánea (1) en la gráfica superior, son elevados al cuadrado y los correspondientes i^2 son también trazados en función del tiempo.

Nótese que la citada gráfica inferior, debido al proceso de elevación al cuadrado, sólo tiene valores positivos que oscilan entre cero e Im^2 en relación con un nuevo eje. Puesto que dicha curva varía uniformemente entre dichos valores extremos (0 e Im^2) su valor promedio debe ser igual a

$$\tfrac{1}{2}\, Im^2 \qquad \text{es decir.} \qquad (0 + Im^2) / 2 = \tfrac{1}{2}\, Im^2$$

Ahora sólo es necesario extraer la raíz cuadrada de este valor medio al cuadrado (½ Im^2) para obtener el valor efectivo de una corriente alterna según nuestra definición. Este valor con frecuencia es designado como *valor de raíz cuadrada de la media de los cuadrados. (Valor RMS)*

Así es que el valor efectivo o valor "I" es

$$Im^2 / 2 = Im / \sqrt{2} = Im / 1.414 = 0.707\ Im$$

De este modo para la corriente alterna

$$\text{valor efectivo}\quad I = 0.707\ Im$$

y en forma similar para un voltaje alterno:

$$\text{valor efectivo}\quad E = 0.707\ Em$$

Si se requiere determinar los valores máximos conociéndose los valores efectivos de corriente y voltaje, simplemente obténgase los valores recíprocos de dichas relaciones, o sea:

$$Em = 1.414\ E \qquad y \qquad Im = 1.414\ I$$

donde I y E son los valores efectivos de la corriente y del voltaje respectivamente.

Ejemplo No. 13

Cuando un voltaje alterno con un valor máximo (cresta) de 115 Volts es aplicado a un circuito, una corriente cresta de 28.3 Ampers fluye por el mismo, ¿cuáles son el valor máximo del voltaje y el valor efectivo de la corriente?

Solución :

$$Em = 1.414\ E = (1.414)\ (115) = 162.6\ \text{Volts}$$

$$I = 0.707\ Im = (0.707)\ (28.3) = 20\ \text{Ampers}$$

V.4.3 Valor Promedio de una Corriente Alterna.

Cuando se menciona el valor de un voltaje o corriente alterna sin alguna designación específica, siempre se entiende que se trata de un valor efectivo. Ocasionalmente se hace referencia al valor promedio de la corriente o voltaje y esto no significa el valor efectivo.

Si se observa la onda sinusoidal ilustrada en la fig. 29, es evidente que el valor promedio de una corriente alterna para un ciclo completo es cero, puesto que la curva varía uniformemente sobre y por debajo del eje de las X a cero. El valor promedio por consiguiente es considerado para la mitad de un ciclo (una alternancia) y puede demostrarse matemáticamente que es igual a 0.636 del valor máximo. Resumiendo las relaciones entre los valores promedios (I_{av} y E_{av}), cresta (Im y Em) y efectivos (I y E) se tiene:

$$I_{av} = 0.636\ Im = 0.9\ I$$

$$E_{av} = 0.636\ Em = 0.9\ E$$

BIBLIOGRAFIA

Fundamentos de
Electricidad y Magnetismo.
Francis W. Sears
Ed. Aguilar

Física para Estudiantes
de Ciencias e Ingeniería.
Resnick -Halliday.
Ed. C.E.C.S.A

Fisica. Tomo II
Serway
Ed. Mc Graw Hill.

Fundamentos de Electricidad
Gussow, Milton.
Ed. Mc Graw Hill.

Circuitos Electricos
Joseph A. Edminister.
Ed. Mc Graw Hill.

Electricidad Básica.
Libros 1, 2, 3 y 4
Van Valkenburgh
Ed. C.E.C.S.A.

Curso Practico de Electricidad.
Vols. 1, 2, 3 y 4
Harry Mileaf
Ed. Ciencia y Técnica, S.A.

Electricidad Simplificada
Jacobowitz, Henry
Cia. General de Ediciones, S.A.

Circuitos Electronicos y sus
Aplicaciones
Grob, Bernard.
Ed. Mc Graw Hill.

Metodos Experimentales para
Ingenieros.
Holman J. P.
Ed. Mc Graw Hill.

ANEXO

" PRACTICAS PROPUESTAS PARA EL LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO "

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CAMPUS ARAGÓN

LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRACTICA No. 1

" ELECTROSTÁTICA "

OBJETIVOS

- **Analizar los fenómenos de las cargas eléctricas inmóviles, tales como: frotamiento, inducción y contacto.**
- **Determinar la naturaleza de la carga eléctrica en diversos materiales, haciendo uso de un Generador y un Electroscopio de lámina móvil.**

INTRODUCCIÓN

La materia esta constituida esencialmente por átomos y estos a su vez de :

1.- Un núcleo, que contiene:

- **partículas eléctricamente neutras (neutrones), es decir, carecen de carga eléctrica, y**
- **de partículas con carga positiva (protones)**

2.- Electrones, distribuidos en torno del núcleo, los cuales tienen carga negativa.

La estructura natural de un átomo mantiene su estructura natural, debido al balance eléctrico, entre las partículas que lo forman. Es importante mencionar que ***dos partículas***

con una misma clase de carga , se repelen; y si estas poseen cargas opuestas, se atraen.

Un átomo en su estado natural, es eléctricamente neutro puesto que contiene igual número de partículas de carga positiva y negativa.

Sin embargo, algunos átomos presentan electrones que escapan a la atracción positiva del núcleo; se trata de electrones libres que bajo el efecto de diversas influencias abandonan el átomo, parta trasladarse a otro átomo que acepte con facilidad estos electrones libres.

Se dice que un cuerpo se carga positivamente (+) si tiene deficiencia de electrones, y negativamente (-) si tiene exceso de electrones.

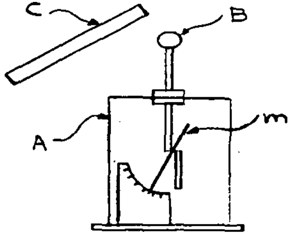
Benjamin Franklin estableció (de manera convencional), que cuando una barra de vidrio es frotada con seda, esta se carga positivamente y la seda se carga negativamente.

Un electroscopio de lámina móvil, es un aparato constituido por dos conductores A y B, aislados uno del otro.

El conductor A es una caja metálica que tiene una o dos ventanas de vidrio.

El conductor B esta formado por:

- **Una varilla, encima de la cual va una esfera, y**
- **Una lámina móvil, *m*, muy lijera que puede girar en torno a un eje horizontal.**



Cuando un cuerpo conductor C, cargado (por ejemplo) positivamente, se acerca al conductor B, inicialmente neutro, la lámina móvil *m*, se aparta de la lamina fija.

Esto es debido a que los electrones del cuerpo conductor B son atraídos por las cargas positivas que lleva C, y por consiguiente la varilla fija y la lámina móvil quedan cargadas positivamente, por lo que la lámina móvil se aparta de la varilla fija, obedeciendo a las leyes de atracción y repulsión de la materia.

EQUIPO Y MATERIAL

1 Generador Van de Graff.
1 Electroscopio de lámina móvil.
1 Esfera de descarga.
1 Muestreador de carga eléctrica.
4 Barras (Vidrio, hule duro, madera, plástico).
4 Excitadores (Piel, seda, franela, polietileno).
1 Caja de cerillos.
Cables y conectores.

DESARROLLO

- El instructor deberá dar una breve explicación acerca de como se adquiere carga eléctrica por frotamiento, inducción, y contacto.
- Implemente el arreglo de la fig. 1 y ponga a funcionar el generador Van de Graff por algunos segundos.

" PRECAUCIÓN "

Por ningún motivo toque el casco del generador con alguna parte del cuerpo.

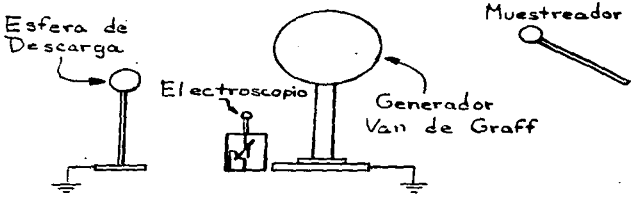


Fig. 1

- Observe que se induce carga en el electroscopio, sin que exista contacto físico con el casco del generador, esto se refleja en el desplazamiento de la lámina móvil del electroscopio.

- Toque con la esfera de descarga (conectada a tierra), el casco del generador y observe la descarga (por conducción) de este, cuando la lámina móvil del electroscopio "cae" a cero, volviendo a su posición original.

- Cargue nuevamente el generador.

  Ahora acerque al casco del generador la llama de un cerillo encendido, y observe la descarga por ionización al mismo instante, en la lamina del electroscopio.

- Vuelva a cargar el generador.
  Con el muestreador de carga, tome una muestra del casco del generador y acérquelo a la esfera del electroscopio sin llegar a tocarla.

- Observe el desplazamiento de la lámina móvil del electroscopio.

- Frote una barra de vidrio con seda.

- Acerque la barra de vidrio a la esfera del electroscopio sin llegar a tocarla y observe el desplazamiento de la lámina móvil del electroscopio; compare este desplazamiento con el observado en el punto anterior.

- Determine la carga del casco del generador.

  Considere que la carga adquirida por la barra de vidrio es positiva, y la adquirida por la seda es negativa (Convención de Franklin).

Carga del casco del Generador = __________

- Descargue el generador Van de Graff.

- Desconecte la tierra del generador (la cual esta conectada a la base del mismo) y hágalo funcionar.

- Tome muestras de carga del casco y de la base.

Observe el signo de cada una de ellas, acercando la muestra a la esfera del electroscopio.

- Cargue por frotamiento c/u de las barras proporcionadas, con c/u de los excitadores disponibles.

- Determine la carga que adquiere cada barra y excitador, acercando únicamente la barra a la esfera del electroscopio.

  Asuma que si el desplazamiento de la lámina móvil disminuye con respecto a la escala graduada, la carga de la barra es "positiva" y, si este aumenta, la carga de la barra es "negativa".

- Anote sus resultados en la tabla siguiente.

Excitador	Barra	Carga de la Barra	Carga del Excitador
Piel	Vidrio		
	Hule Duro		
	Plastico		
	Madera		
Seda	Vidrio		
	Hule Duro		
	Plastico		
	Madera		
Polietileno	Vidrio		
	Hule Duro		
	Plastico		
	Madera		
Franela	Vidrio		
	Hule Duro		
	Plastico		
	Madera		

Tabla 1

- Anote sus conclusiones

CUESTIONARIO

1.- Explique el proceso de carga por frotamiento.

2.- Explique la descarga por conducción.

3.- Dé una clasificación general de los materiales de acuerdo con su conductividad.

4.- ¿ En qué consiste la descarga por ionización ?

5.- ¿ Cuál es el principio de operación del generador Van de Graff ?

6.- Enuncie la ley de la Conservación de la Carga

7.- Diga si en los experimentos de esta práctica se creó carga eléctrica. Explique.

8.- ¿ Por qué con un mismo excitador, algunas barras adquieren diferente polaridad ?

9.- Explique porque sufre un aumento o disminución, el desplazamiento de la lamina móvil del electroscopio (previamente cargado) al acercar una barra cargada ?

10.- Investigue otras formas de producir carga eléctrica, dando un ejemplo práctico de aplicación para cada uno de ellos.

BIBLIOGRAFÍA

Física. Tomo II
Serway
Mc Graw Hill

Electricidad Básica. Libro 1
Van Valkenburgh
C.E.C.S.A.

Curso Practico de Electricidad. Vol. 1
Harry Mileaf
Ed. Ciencia y Técnica, S.A.

Fundamentos de Electricidad y Magnetismo.
Francis W. Sears
Ed. Aguilar

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CAMPUS ARAGÓN

LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRÁCTICA No. 2

" FUENTES DE ALIMENTACIÓN DE C.D. Y C.A "
" MULTIMETRO ANALÓGICO "
(Mediciones de Tensión y Corriente)

OBJETIVOS

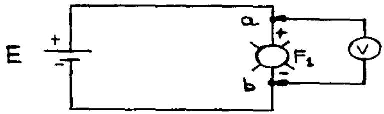
- Aprender a utilizar el multímetro analógico como Voltmetro y Amperímetro.
- Determinar experimentalmente las características de corriente y voltaje, de un circuito serie y paralelo.
- Identificar los controles y conmutadores de una fuente de alimentación de C.D.
- Conocer algunos tipos de fuentes de alimentación de C.A.

INTRODUCCIÓN

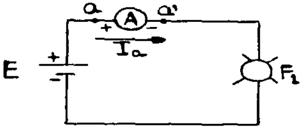
En la tecnología electrónica es inconcebible sin medir magnitudes eléctricas. Así, el análisis y la comprensión del funcionamiento de un circuito se facilitan por las mediciones fundamentales de tensión, corriente y resistencia.

La tensión o diferencia de potencial de un elemento que forme parte de un circuito cerrado, se mide conectando un voltmetro en "paralelo" con dicho elemento.

Cuando se efectúa la medición de una fuente de alimentación de C.D o C.A., sin que suministre corriente (circuito abierto) la lectura del Voltmetro es igual a la fuerza electromotriz (f.e.m.) de dicha fuente.



Para medir la corriente en un punto determinado de un circuito cerrado, es necesario romper o interrumpir el circuito en el punto deseado y conectar en "serie" un amperímetro, restableciendo con este el flujo de corriente a través del punto en cuestión.



Para experimentos en el laboratorio se requiere de fuentes de tensión y corriente. Las fuentes de alimentación de C.D., variables y reguladas satisfacen este requisito por lo que se usan ampliamente en escuelas y laboratorios industriales.

Una fuente de tensión regulada de C.D. mantiene un nivel preajustado de tensión, dentro de su margen de funcionamiento, a pesar de las variaciones que pueda haber en la corriente de salida y en la tensión de la línea de C.A..

En una fuente de tensión no regulada de C.D. la tensión de salida varía cuando cambia la corriente de carga y la tensión de la línea de C.A..

EQUIPO Y MATERIAL

1 Multimetro Analógico.
1 Fuente de Poder.
1 Transformador reductor 127-12 V, 1 A.
4 Focos de 12-16 Volts.
1 Tablero de Conexiones.
1 Juegos de Caimanes.
6 Nodos "T".

DESARROLLO

- El instructor deberá explicar brevemente los principios de operación, y conexión de un multimetro, en sus funciones de Volmetro y Amperímetro, tanto en C.D. como en C.A. Mencionando las principales medidas de seguridad para su uso.

Mediciones de Tensión y Corriente en C.D.

- Seleccione en el multimetro el modo de operación de C.D. (   ) con el selector de función.

- Con la perilla selectora de rango y función, elija el rango máximo de voltaje que posea el volmetro.

- Encienda la fuente de alimentación.
  Ajuste las perillas de regulación de voltaje y corriente al máximo.

- Seleccione en el volmetro un rango adecuado de voltaje, considerando que el voltaje máximo de la fuente de alimentación de C.D proporcionada.
  Recuerde que cada rango indica el valor máximo posible a medir ya sea de tensión o corriente.

- Mida el voltaje máximo de salida entre los bornes de la fuente, tomando en consideración la polaridad de la misma (si la aguja del volmetro se deflexiona hacia la izquierda intercambie las puntas de prueba sobre los bornes de la fuente).

Anote su lectura.

$V_{máx}$ D.C. = ____________

- **Con el regulador de voltaje ajuste la salida de la fuente de tal manera que la lectura medida, en la carátula del volmetro sea de 15 Volts.**

- **Arme el siguiente circuito serie**

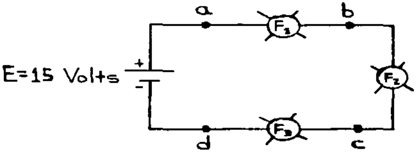


Fig. 1

***Nota.-* Si alguno de los focos del circuito no se enciende cheque, las conexiones entre los elementos.**

- **Con el regulador de corriente disminuya lentamente el valor de la corriente suministrada por la fuente al circuito.**
  Observe los efectos producidos en la carátula y foco indicador de corriente en la fuente de alimentación.

- **Restablezca nuevamente al máximo la perrilla de regulación de corriente.**
- **Mida la tensión en los extremos de cada uno de los focos (considerando la polaridad relativa a la fuente).**

Anote sus resultados en la tabla siguiente.

Tensión en un Cto. Serie (C.D.)			
V_{ab}	V_{bc}	V_{cd}	$V_T = V_{ab} + V_{bc} + V_{cd}$

Tabla 1

- **Compare el voltaje suministrado por la fuente con el V_T.**

- **Mida la corriente en los puntos indicados (intercalando el amperímetro en cada punto y considerando la polaridad relativa de la fuente).**

Anote sus resultados en la tabla siguiente.

Corriente en un Cto. Serie (C.D.)			
I_a	I_b	I_c	I_c

Tabla 2

- **Observe cual es la característica de la corriente en un circuito serie de acuerdo a los resultados obtenidos.**

- **Arme el siguiente circuito paralelo.**

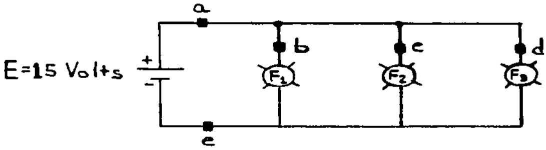


Fig. 2

- **Mida la tensión en cada uno de los focos de dicho circuito.**

Anote sus resultados en la tabla siguiente.

Tensión en un Cato. Paralelo (C.D.)			
V_{F1}	V_{F2}	V_{F3}	V_{Fuente}

Tabla 3

Observe cual es la característica de voltaje de cada una de los focos (ramas) conectados en paralelo.

- **Mida la corriente de cada uno de los puntos indicados en el circuito.**

Observe que dichos puntos se encuentran entre el nodo correspondiente a cada una de las ramas y el extremo de cada uno de los focos.

- **Anote sus resultados en la tabla siguiente y realice los cálculos indicados en la misma.**

Corriente en un Cto. Paralelo (C.D.)					
I_a	I_b	I_c	I_d	I_e	$I_b + I_c + I_d$

Tabla 4

- **Compare la corriente total suministrada por la fuente (punto "a" o punto "e") con la suma de las corrientes de cada una de las ramas.**

Mediciones de tensión y corriente en C.A.

- **Seleccione en el multimetro el modo de operación de C.A. (∼) con el selector de función.**
- **Elija el rango máximo de voltaje que posea el volmetro.**
- **Mida la tensión de la línea de C.A. (la tensión y corriente en C.A., no tiene polaridad definida, puesto que varia en tiempo).**
- **Conecte el transformador a la línea de C.A.**
- **Mida la tensión entre los bornes del secundario (salida del Transformador). Anote su lectura**

V_{SEC} **C.A. = ________________**

- **Arme los circuitos de las figuras 1 y 2, sustituyendo la fuente de alimentación de C.D., por el transformador reductor proporcionado, es decir, por una fuente de C.A.**
- **Efectúe las mismas mediciones de tensión y corriente, efectuadas en los circuitos alimentados por C.D.**
- **Anote sus resultados en tablas siguientes, realizando las operaciones indicadas.**

Tensión en un Cto. Serie (C.A.)			
V_{ab}	V_{bc}	V_{cd}	$V_T = V_{ab} + V_{bc} + V_{cd}$

Tabla 5

Corriente en un Cto. Serie (C.A.)			
I_a	I_b	I_c	I_c

Tabla 6

Tensión en un Cto. Paralelo (C.A.)			
V_{F1}	V_{F2}	V_{F3}	V_{Fuente}

Tabla 7

Corriente en un Cto. Paralelo (C.A.)					
I_a	I_b	I_c	I_d	I_e	$I_b + I_c + I_d$

Tabla 8

Cuestionario

1.- Mencione las precauciones que se deben tener cuando se realizan mediciones en C.A. y en C.D. con el multimetro ?

2.- Explique como se debe conectar el multimetro para efectuar mediciones de:

a) Voltaje b) Corriente

3.- De acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones de corriente y voltaje, describa cual es el comportamiento de estas, en un circuito:

a) Serie b) Paralelo

4.- Explique si las características del punto anterior se modifican cuando los circuitos se encuentran alimentados ya sea en con C.A. o C.D.

5.- Mediante un diagrama indique como se conectan "N" baterías en:

a) Serie b) Paralelo

6.- Dibuje un circuito eléctrico el cual muestre como se debe conectar un amperímetro , en un circuito serie que conste de una fuente de C.D, una lampara y un resistor.

7.- Dibuje un circuito eléctrico el cual muestre como se debe conectar un volmetro, para medir la caída de tensión (Voltaje),de una lampara que se encuentra conectada en paralelo con una fuente de C.A.

8.- Describa brevemente que es el valor eficaz o r.m.s. de una señal senoidal ?

9.- ¿ Cuales son los valores de voltaje y frecuencia de la red de alimentación de su casa ?

BIBLIOGRAFÍA

Electricidad Básica Vol. , II y III.
Van Valkenburg.
C.E.C.S.A.

Física para Estudiantes de Ciencias e Ingeniería.
Resnick -Halliday.
C.E.C.S.A

Electricidad y Magnetismo.
Francis W. Sears
Ed. Aguilar.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CAMPUS ARAGON

LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRACTICA No. 3

OSCILOSCOPIO Y GENERADOR DE FUNCIONES

OBJETIVOS

- **Familiarizarse con los mandos y controles de:**
  - **a) El Osciloscopio, interpretando las señales mostradas en la pantalla del tubo de rayos catodicos (TRC).**
  - **b) El Generador de Funciones, reconociendo la utilidad práctica de esté, de manera conjunta con el osciloscopio, para la simulación de diversas formas de onda en una amplia gama de frecuencias.**

INTRODUCCION

Osciloscopio

Un osciloscopio es uno de los tipos mas importantes de equipo de prueba, para verificar los circuitos electronicos porque puede mostrar la forma de onda de un voltaje aplicado, la pantalla de esté muestra una grafica de las variaciones de amplitud de voltaje con respecto del tiempo para la señal vertical de referencia.

Con una entrada de onda senoidal, el osciloscopio muestra las ondas senoidales en la pantalla. Con una entrada de ondas con forma cuadrada o con cualquier otra forma de onda, el patrón en la pantalla es una imagen de las variaciones de estas señales.
El numero de ciclos presentados depende de la frecuencia de la señal de entrada y de una frecuencia horizontal de referencia.
El osciloscopio no sólo puede medir voltaje, también se usa para medir la frecuencia de la señal de entrada.
Osciloscopios tipicos tienen una señal de respuesta de frecuencia que va desde 0 Hz, para corriente continua, hasta 40 Mhz. Pueden verificarse señales de AF y FI. Es posible hacer mediciones de amplitud de pico a pico (de cresta a cresta). El osciloscopio hace posible la verificacion de la distorsión observando realmente las formas de onda bajo prueba.

Generador De Funciones

El generador de funciones es una importante aplicacion de circuitos electronicos llamados "osciladores", que tienen la capacidad de producir varios tipos de ondas como señal de salida. Un circuito oscilador es básicamente un amplificador con realimentacion positiva , que consta de elementos analogicos lineales tales como amplificadores operacionales (OpAmps), resistencias, capacitores e inductancias.
Este tipo de osciladores pueden entregar señales del tipo cuadrado y senoidal, que se pueden variar tanto en amplitud como en frecuencia. Asi por ejemplo al pasar una señal cuadrada a un circuito electronico llamado integrador, la señal se convierte en una de tipo triangular, que también se puede variar tanto en amplitud como en frecuencia.
La mayor parte de los generadores de funcion pueden generar ondas senoidales, cuadradas y triangulares en un amplio rango de frecuencias. Otra modelos pueden generar señales tales como un tren de pulsos (TTL), rampas o de diente de sierra , además de los tres tipos mencionados.
La gama de frecuencias de un generador de funciones es por lo general de 0.001 HZ hasta 20 Mhz; cada una de las formas de onda que se producen es particularmente adecuada para un grupo diferennte de aplicaciones.
La señal de onda cuadrada se puede emplear para probar amplificadores electronicos y las respuestas transitorias de otros circuitos, dan una capacidad única de medición. Da el mismo tipo de datos acerca de sus caracteristicas eléctricas si fuera probado secuencialmente con las entradas de ondas senoidales de muchas frecuencias distintas.
Las salidas de onda triangular y de diente de sierra se emplean normalmente para aquellas aplicaciones que necesitan de una señal que aumente a una velocidad lineal especifica. También son utiles para excitar osciladores de barrido en osciloscopios.

EQUIPO Y MATERIAL

1 Generador de funciones
1 Osciloscopio
1 Multimetro Analogico.
1 Fuente de C.D.
1 Fuente de C.A (Transformador Reductor 127/12V, 1 amp).
Cables y conectores BNC.

DESARROLLO

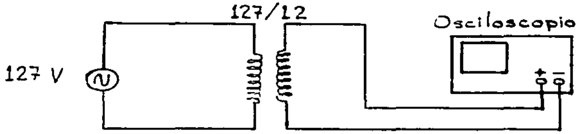
- El instructor deberá de dar una breve explicacion de los los mandos y controles más comunes en la mayoria de los osciloscopios y generadores de función sin importar marca, modelo o características particulares de cada uno ellos.

Osciloscopia.

- Mida el voltaje de salida del secundario del transformador reductor proporcionado Anote su lectura.

V_{SEC} = ____________ Volts

- Implemente el siguiente arreglo.



- Encienda el osciloscopio.

- Elija el modo de operación de C.A.

- Seleccione en el control de barrido horizontal o de tiempo un rango de 5 milisegundos por división (5 mseg/Div)

- Seleccione en el control de barrido vertical o de amplitud un rango de 10 volts por división (10 volt/div).
- Ajuste la intensidad y el enfoque del haz de electrones hasta obtener un trazo nitido y claro de la señal.

- Accione el control de ajuste a "cero" o referencia.
  Observe lo que sucede con la señal en la pantalla del osciloscopio.

- Con los controles de posición horizontal (eje X) y el de posición vertical (eje Y). Haga que la señal se desplace hasta el punto de referencia u origen de manera proporcional.

- Accione nuevamente el control de ajuste a "cero" o referencia.

- Dibuje la forma de onda de la señal.

- Calcule, la amplitud de pico a pico (V_{pp}) de la señal, como se indica en la expresión siguiente:

$$V_{pp} = [\ (\#)\ \text{divisiones}\ ]\ [\ (\text{rango})\ \text{Volts/Div}\ ]$$

Vpp = (   ) (   ) = __________ Volts

- Cambie de manera progresiva el rango de amplitud a 5 Volt/div, 2 Volt/div, 1 Volt/div y 0.5 Volt/div.
  Observe y describa, en sus conclusiones, el comportamiento de la señal en el eje de amplitud (Eje Y).

- Mida y Calcule, el valor del periodo (T) de la señal, como se indica en la expresión siguiente:

$$T = [\ (\#)\ \text{divisiones}\ ]\ [\ (\text{rango})\ \text{seg./Div}\ ]$$

T = (   ) (   ) = __________ segundos

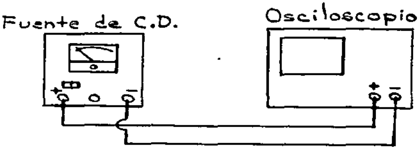
- Calcule la frecuencia (F)de la señal, aplicando la expresión:

F = 1/ T = __________ [Hertz] ó [Ciclos/Segundo]

- **Cambie de manera progresiva el rango de tiempo a (2, 1, 0.5, 0.2 , 0.1) mseg/div y 50 ms.**
  Observe y describa el comportamiento de la señal en el eje del tiempo (eje X).

- **Ajuste la salida de la fuente de C.D. a 10 Volts**

- **Alambre el siguiente circuito.**



- **Seleccione en el osciloscopio el modo de operación de C.D.**

- **Ajuste la señal a un punto de referencia u origen, accionando el control de ajuste a "cero" .**
  Realizado lo anterior accione nuevamente el control de ajuste a "cero"

- **Mida y Calcule la amplitud de la señal mostrada. Como se indica a continuación:**

$$V_{DC} = [\ (\#)\ \text{divisiones}\ ]\ [\ (\text{rango})\ \text{Volts/Div}\ ]$$

$$V_{DC} = (\qquad\qquad)\ (\qquad\qquad) = \underline{\qquad\qquad}\ \text{Volts}$$

- **Dibuje la forma de onda de la diferencia de potencial de C.D.**

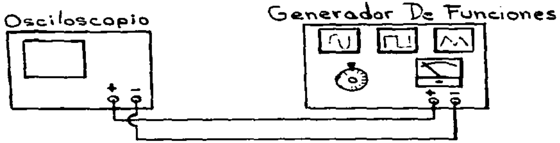
- **Compare este resultado de la lectura efectuada en el osciloscopio con la ajustada previamente en la fuente de C.D.**

- **Gire la perilla de voltaje de la fuente de poder y observe la variación de la señal en el osciloscopio.**

- **Invierta la polaridad de la fuente de poder y repita los dos puntos anteriores.**

Generador De Funciones

— Implemente el siguiente arreglo.



— En el generador de funciones seleccione el factor de X10 Hz y marque con el dial de frecuencia un valor de 6.

— Elija en la sección de forma de onda una función senoidal.

— Ajuste el control de amplitud al máximo.

— Efectúe los ajustes necesarios para visualizar la señal proporcionada por el generador de funciones, en la pantalla del osciloscopio.

— Mida y calcule la amplitud pico a pico (V_{pp}) y el periodo (T) de la señal., obteniendo además la frecuencia de está.

— Cambie en el osciloscopio el rango de amplitud y tiempo por división, realizando nuevamente el calculo de la amplitud, el periodo y frecuencia de la señal.

— Compare sus resultados de los dos puntos anteriores y comente sus observaciones en sus conclusiones.

— Modifique la amplitud de la señal del generador a 4 volts de pico a pico. Auxilandose para tal efecto con la señal que se visualiza en el osciloscopio.

— Accione los siguientes factores de frecuencia X1 Hz, X100 Hz, X10 Khz, X100 KHZ. Mida y calcule el valor del periodo y la frecuencia de la señal generada, para cada uno de estos factores.

CUESTIONARIO

1.- En que forma debe conectarse (electricamente), el osciloscopio al circuito en estudio para efectuar mediciones ?

2.- ¿ Qué precauciones y cuidados debemos tener al utilizar el osciloscopio ?

3.- Explique por que difiere la lectura de voltaje en el secundario del transformador reductor realizadas con el osciloscopio y con el volmetro.

4.- Diga si existe alguna diferencia entre el voltaje de 10 volts de la fuente (ajustado con el volmetro), con el medido en el osciloscopio. Explique

5.- Explique que sucede con la señal visualizada en la pantalla del osciloscopio, cuando se modifica de manera progresiva, el:

a) Rango de tiempo/división. b) Rango de Volts/División

6.- Diga qué tipo de señal entrega un generador de funciones, Directa o Alterna ? Explique.

7.- Explique de que manera se puede obtener una señal similar a la señal observada en el circuito de la figura 1, con un generador de funciones ?

BIBLIOGRAFIA

Circuitos Electronicos y sus Aplicaciones.
Bernard Grob.
Mc. Graw Hill- Electricidad Básica.

Metodos Experimentales para Ingenieros.
Holman J. P.

Física para estudiantes de Ciencias e Ingenieria.
Resnick - Halliday
C.E.C.S.A.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CAMPUS ARAGON

LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRACTICA No. 4

RESISTENCIA ELECTRICA

Resistores y Ley de Ohm

OBJETIVOS

- Aprender a utilizar el multimetro como Ohmetro.
- Analizar la relacion que guarda la longitud y el area de la sección transversal (Calibre) de un conductor con la resistencia eléctrica de esté.
- Determinar experimentalmente las relaciones que guardan el voltaje, la corriente y resistencia de un circuito electrico, para comprobar la ley de Ohm.
- Aprender el código de colores para resistores de pelicula de carbon.
- Comprobar experimentalmente las relaciones de resistencia equivalente de diferentes agrupamientos

INTRODUCCION

Los efectos utiles de la electricidad son el resultado del movimiento de cargas electricas en un circuito. Este movimiento de cargas electricas es lo que se llama "corriente ".
La oposicion que presentan todos los materiales al flujo de corriente electrica se le conoce como "Resistencia ", estos materiales se clasifican en:

- *Conductores*, que permiten el paso de la corriente a tráves de ellos con facilidad.
- *Aislantes*, que no permiten el paso de la corriente.

- *Semiconductores*, **los cuales no tienen ni muy alta ni muy baja resistencia.**

No obstante, todos los materiales conducen en menor o mayor grado la corriente electrica, tomando encuenta la diferencia de potencial que se les aplique, es decir, no existe un conductor perfecto, ni aislador perfecto.
La resistencia de un conductor es directamente proporcional a su longitud (L), e inversamente proporcional al área (A) de su sección transversal. La Resistividad (ρ) es la constante de proporcionalidad.

$$R = \rho \, (L/A)$$

El ohm (Ω) es la unidad de medida de la resistencia y su simbolo es . Los valores de resistencia, en los resistores de pelicula de carbon, se indican por el código de color estándar adoptado por los fabricantes.
Es importante mencionar que un resistor es todo dispositivo que sirve para introducir resistencia en un circuito, para variar la intensidad de la corriente o producir caidas de tensión o voltaje.
Ordinariamente los valores de resistencia, en los resistores de hilo bobinado y alta potencia no tienen código de color , y su valor de ohmios esta impreso en el cuerpo del resistor.

Ley De Ohm

Esta ley enuncia que la corriente I, en una resistencia es directamente proporcional a la tension V entre los extremos de la resistencia e inversamente proporcional a la resistencia R.

$$I = V / R$$

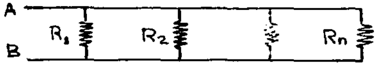
Combinacion Serie de Resistores

La resistencia equivalente o total se obtiene simplemnte sumando los valores de los resistores que formen parte de la combinación.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n$$

Combinación Paralelo de Resistores.

En este tipo de combinación, la resistencia equivalente o total por regla general, siempre es menor que cualquier valor de resistencia que posea alguno de los resistores de la combinación. Calculandose mediante:



$$R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}$$

EQUIPO Y MATERIAL

1 Tablero con Conductores de Nicromel
1 Fuente de alimentación de C.D.
1 Multimetro Analogico
1 Resistor de 1 KΩ de 1 Watt.
Resistores de: 100 Ω, 150 Ω, 330 Ω, 1 KΩ y 56 KΩ ; ½ Watt.
Juego de Caimanes.
Tablero de conexiones.

DESARROLLO

– **El instructor debera explicar brevemente:**
  a) El uso y manejo de un multimetro en su función de Ohmetro.
  b) Como se utiliza el codigo de colores.

- **Mida la resistencia de cada uno de los conductores de nicromel proporcionados, cuya longitud es de 2 mts. Anote sus resultados en la tabla 1.**

Resistencia de Conductores de Nicromel (Calibre Standar AWG)				
No. 18	No. 22	No. 26	No. 30	No. 34

Tabla 1

- **Observe como esta relacionado el calibre standar AWG, del conductor con respecto al area de la sección transversal de cada conductor.**
- **Ajuste el voltaje de la fuente de C.D a 1.5 Volts**
- **Alambre el circuito siguiente.**

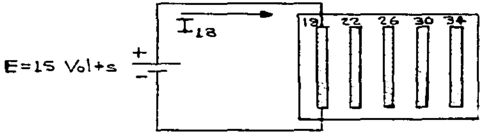


Fig. 1

- **Mida la corriente que circula a través de cada conductor de nicromel, aplicando un voltaje constante de 1.5 Volts.**
- **Anote sus resultados el la tabla 2.**

Corriente a traves del conductor de Conductores de Nicromel (Calibre Standar AWG)					
Voltaje Aplicado	No. 18	No. 22	No. 26	No.30	No. 34
1.5 Volts					

Tabla 2

- **Con los datos obtenidos en las tablas 1 y 2 , realice una grafica de Resistencia contra Corriente.**
- **Divida el conductor de nicromel Calibre No. 30 AWG, en cinco partes iguales, mida la resistencia de cada una de las secciones señaladas en la figura siguiente.**

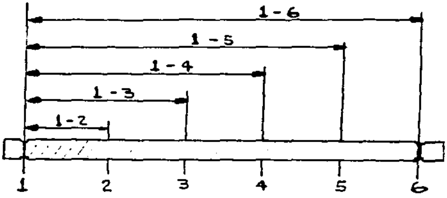


Fig. 2

– **Anote sus resultados en la tabla 2.**

Resistencia del Conductor de nicromel Calibre No. 30 AWG					
Sección	**1 - 2**	**1 - 3**	**1 - 4**	**1 - 5**	**1-6**
Resistencia (Ω)					

Tabla 3

– **Determine el valor nominal de los resistores de pelicula de carbón proporcionados, utilizando el código de colores y despues mida su valor real por medio del ohmetro. (Recuerde ajustar a "Cero" el multimetro cada vez que cambie de rango).**

– **Anote sus resultados en la tabla siguiente.**

Color Banda 1 1a. Cifra Signif.	**Color Banda 2 2a. Cifra Signif.**	**Color Banda 3 3a. Cifra Fact. multipl.**	**Color Banda 4 4a. Cifra % Toler..**	**Valor Código**	**Valor Medido**	**% Error**

Tabla 4

Nota.- El porcentaje de error para cada resistor, se calcula por la formula:

% de error = ((Valor Codigo - Valor Medido) / Valor Codigo) X 100

- **Arme el circuito de la fig. 3. utilizando un resistor de 1 Watt de potencia.**

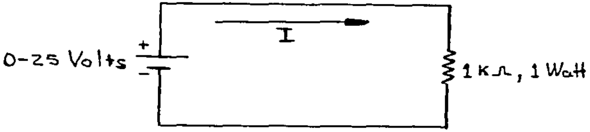


Fig. 3

- **Mida la corriente en el punto en el circuito, ajustando la salida de la fuente a los valores de voltaje indicados en la tabla siguiente.**

Precaución: *No exceda el voltaje de la fuente por arriba de los 25 Volts*

Voltaje (volts)	5	10	15	20	25
Corriente (mA)					

Tabla 5

- **Con los valores registrados en la tabla anterior realice una grafica de corriente contra voltaje.**

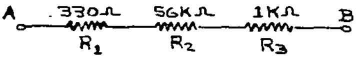
- **Calcule la Potencia, disipada por el resistor en forma de calor (Efecto Joule) del circuito de la fig. 3 para los diferentes valores de voltaje aplicado y los diferentes valores de corriente medida. Aplicando la siguiente formula.**

Potencia = V I **(Watts)**

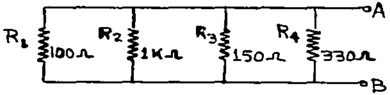
- **Implemente las siguientes combinaciones entre resistores midiendo la resistencia total equivalente entre los puntos A y B.**

– **Anote sus resultados en la tabla 6 y realice los calculos que se piden en la misma.**

Combinación Serie



Combinación Paralelo



Combinación Serie (Ω)	
R_{AB} Medida	R_{AB} Teorica $R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots$
Combinación Paralelo (Ω)	
R_{AB} Medida	R_{AB} Teorica $R_T = 1 / ((1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3) + \ldots\ldots)$

Tabla 6

CUESTIONARIO

1.- ¿ Como se comporta la resistencia de un conductor cuando su longitud se mantiene constante y el area de la sección transvesal va en disminuyendo ? (Tabla 1)

2.- ¿ Como afecta el calibre de un conductor a la corriente que fluye a traves de este ? (Tabla 2)

3.- ¿ Como se comporta la resistencia de un conductor conforme aumenta su longitud ? (Tabla 3)

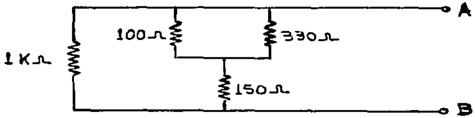
4.- Diga que indica el porcentaje de error en un resistor.

5.- Explique en base a los resultados de la Tabla 5. ¿ Cual es la relación que guardan el voltaje, la resistencia y la corriente, en un circuito eléctrico ?

6.- Diga que sucedería si el voltaje aplicado en el circuito de la fig. 3, excediera los 25 Volts ? Explique su respuesta en función del Efecto Joule.

7.- Diga como es la resistencia equivalente o total de una combinación paralelo de resistores, en relación con el valor de cualquiera de los resistores que la componen.

8.- Describa el procediento para calcular la resistencia total o equivalente del siguiente circuito.



BIBLIOGRAFIA

Física. Tomo II
Serway
Mc Graw Hill.

Física Parte 2
Halliday / Resnick.
C.E.C.S.A

Electricidad Básica. Libro 2
Van Valkenburgh
C.E.C.S.A

Electricidad Simplificada
Jacobowitz, Henry
Cia. General de Ediciones, S.A.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CAMPUS ARAGON

LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRACTICA No. 5

CAPACITANCIA ELECTRICA

OBJETIVOS

- **Analizar el comportamiento de los condensadores en C.D y C..A.**
- **Conocer la clasificación y código más utilizados por los capacitores.**
- **Aplicar la ley de Ohm para circuitos de C.A. en circutos capacitivos.**
- **Comprobar de manera experimental las caracteristicas de capacitancia equivalente o total en agrupamientos de condensadores conectados en serie y en paralelo.**

INTRODUCION

Un condensador esta constituido básicamente por dos placas metalicas separadas por un dielectrico.

Los condensadores se utilizan para muchos fines, se emplean para almacenar energía para bloquear la corriente directa y para dejar pasar la corriente alterna. Actúan como elementos de filtro, como componentes en circuitos resonantes o "sintonizados" y en muchos circuitos se utilizan como temporizadores, además de tener muchas otras funciones.

Es importante mencionar, en el caso de un condensador alimentado por C.A., que ya que existe un dielectrico o aislante entre las placas del condensador, no puede existir un flujo real de corriente a tráves del mismo, pero la existencia de corriente alterna, produce el mismo efecto de una corriente que fluyese a través del condensador. Por lo tanto un condensador no presenta obstaculo al flujo de la corriente alterna aunque sí lo reduce.

La dependencia entre la carga Q de un condensador, la capacidad C de éste y la tensión V entre las placas del condensador se expresa matematicamente como :

$$Q = CV$$

En esta formula Q está expresado en Coulombs, C en Faradios y V en Volts.

De esta se deduce que cuanto mayor es C, más carga Q almacenará el condensador estando completamente cargado con una fuente dada de tensión V.

Los condensadores conectados en paralelo se combinan como las resistencias conectadas en serie, es decir, la capacitancia total o equivalente es igual a la suma de las capacitancias individuales, conectadas en palralelo.

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + \ldots\ldots$$

Los condensadores conectados en serie se combinan como las resistencias conectadas en paralelo, es decir, la capacitancia total es igual al reciproco de la suma de los reciprocos de las capacitancias individuales, conectadas en serie. es decir:

$$C_T = 1 \;/\; (\;(1/C_1) + (1/C_2) + (1/C_3) + (1/C_4) + \ldots\ldots)$$

La capacidad total C_T de las combinaciones de condensadores se puede determinar experimentalmente de varias maneras. La más sencilla consiste en conectar la combinación de que se trate y medir C_T por medio de un puente universal que proporciona un alto grado de exactitud.

Un segundo metodo, utilizado en esta práctica, consiste en determinar la *reactancia capacitiva* Xc de la combinación.

La reactancia capacitiva Xc de un condensador es la magnitud de la oposición que presenta el condensador a la corriente en un circuito de C.A. y se mide en Ohms.

De donde se deduce que la Xc, puede ser calcula aplicando la ley de Ohm, es decir, si se conoce la tensión Vc entre las placas del condensador y la corriente I en el circuito, podemos aplicar la siguiente expresión:

$$Xc = Vc / I$$

Ahora bien, conociendo Xc y la frecuencia F de la corriente alterna, se halla C sustituyendo Xc y F en la expresión siguiente:

$$C = 1 / (2\pi F Xc)$$

donde Xc, está en Ohms, F en Hertz y C en Faradios.

EQUIPO Y MATERIAL

1 Fuente de Poder de C.D.
1 Transformador reductor 127 - 12 Volts.
1 Multimetro.
1 Foquito 12 - 16 Volts
1 Osciloscopio
1 Condensador de 23 μF, 150 volts
1 Condensadores electroliticos de: 1000, 100, 10 y 47 μF, 16 volts
1 Tablero con cables y conectores.

DESARROLLO

- **El instructor deberá dar una breve explicación acerca del comportamiento de un condensador cuando esta alimentado por C.D y por C.A.**
  Mencionando las precauciones que se deben de tener para trabajar con la mayoría de los condensadores, para protección del dispositivo y del alumno.

- Conecte el transformador reductor a la la linea de C.A
- Mida y anote tensión de salida entre los bornes del secundario.

Vsec = ________ Volts

- Conecte en paralelo transformador con el osciloscopio.
- Mida el periodo y determine la frecuencia de la señal senoidal que entrega la línea de alimentación.

T = _______ seg.
F = _______ Hertz.

- Arme el circuito que se muestra en la figura 1.

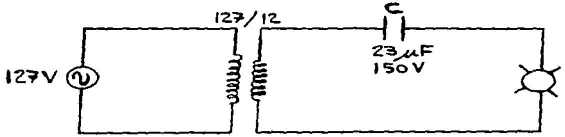


Fig. 1

- Mida la tensión entre los bornes de condensador

V_C = __________ Volts

Observe los efectos producidos en el circuito al ser alimentado por una fuente de C.A.

- Desconecte el condensador y cortocircuite sus terminales.
  Observelo que sucede.

- Describa en sus conclusiones que sucederia si accidentalmente se tocaran ambas terminales del condensador cargado.

- Utilice el volmetro para ajustar la salida de tension de la fuente de C.D., al mismo valor de salida del transformador reductor.

- Sustituya el transformador del circuito de la figura 1, por la fuente de C.D., previamente ajustada.

- Sin desconectar el capacitor cheque si existe tensión entre los bornes del condensador y anote su lectura

V_C = ___________ Volts

Observe los efectos producidos en el circuito al ser alimentado por una fuente de C.D.

- **Implemente el siguiente circuito**

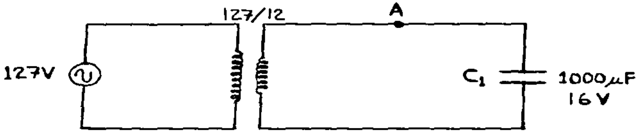


Fig. 2

- **Mida la corriente (I_A) en el punto "A" , así como la tensión en los extremos del condensador y compruebe si esta es igual a la suministrada por la fuente de C.A.**

- **Sustituya en el circuito de la figura 2. cada uno de los capacitores electroliticos proporcionados y efectue la medición de la corriente en el punto A.**

- **Anote sus resultados en la tabla siguiente y realice los calculos indicados.**
  Considere la frecuencia F, igual a la calculada para el caso del transformador reductor.

Valor Nominal μF	V_C Volts	I_A Ampers	$X_C = V_C / I_A$ Ohms	Valor Calculado $C = 1 / (2\pi F X_C)$ μF
1000				
100				
47				
10				

Tabla 1

Nota.- Antes y despues de alambrar los siguientes circuitos descarge los condensadores cortocircuitando las terminales de estos.

– Implemente el siguiente circuito.

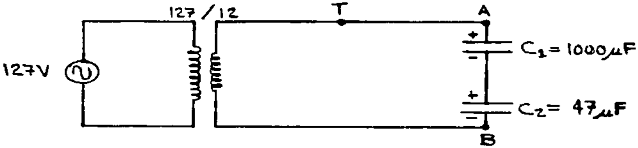


Fig. 3

– Mida la corriente total I_T de la combinación serie mostrada (en el punto " T "). Así como la tensión entre los puntos "A" y "B" (V_{AB}), del circuito.
Anote sus resultados en la tabla siguiente y realice los calculos indicados

Combinación de Capacitores en Serie				
V_{AB} Volts	I_T Amp.	$Xc_T = V_{AB} / I_T$ Ohms	Valor Práctico $C_T = 1 / (2\pi F Xc_T)$ µF	Valor Teorico $C_T = 1 / ((1/C_1) + (1/C_2))$ µF

Tabla 2

– Arme el circuito de la figura siguiente

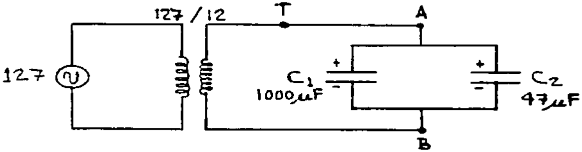


Fig. 4

- **Mida la corriente total I_T de la combinación paralelo mostrada (en el punto " T "). Así como la tensión entre los puntos "A" y "B" (V_{AB}), del circuito. Anote sus resultados en la tabla siguiente y realice los calculos indicados**

Combinación de Capacitores en Paralelo				
V_{AB} Volts	I_T Amp.	$X_{CT} = V_{AB} / I_T$ Ohms	Valor Práctico $C_T = 1 / (2\pi F X_{CT})$ µF	Valor Teorico $C_T = C_1 + C_2$ µF

CUESTIONARIO

1.- Explique con sus propias palabras. ¿ Por qué el foquito del circuito de la fig. 1, no enciede , cuando el circuito esta alimentado con una fuente de C.D. ?

2.- Explique con sus propias palabras. ¿ Por qué el foquito del circuito de la fig. 1, si enciede , cuando el circuito esta alimentado con una fuente de C.A. ?

3.- ¿ Que sucede si accidentalmente se tocaran las terminales de un ***condensador cargado*** con alto voltaje ya sea de C.D. o C.A. ?

4.- ¿ Corresponde la capacitancia calculada con la indicada por el fabricante sobre el cuerpo del capacitor ? Explique.

5.- Explique. ¿ Cual es el comportamiento de la corriente que circula por el circuito de la figura 2, conforme disminuye la capacitancia del circuito ?

6.- ¿ Cómo se comporta la corriente total de los circuitos de las figs. 3 y 4 ? Observe que los valores de capacitancia de cada uno los condensadores en ambos circuitos es el mismo.

7.- Explique, como se puede comprobar el buen estado de un condensador utilizando únicamente el Ohmetro ?

8.- Describa el procedimiento para calcular de manera experimental la capacitancia eqivalente o total del siguiente circuito.

BIBLIOGRAFIA

Física. Tomo II
Serway
Mc Graw Hill.

Circuitos Electricos
Joseph A. Edminister.
Ed. Mc Graw Hill.

Electricidad Básica. Libro 4
Van Valkenburgh
C.E.C.S.A

Electricidad Simplificada
Jacobowitz, Henry
Cía. General de Ediciones, S.A.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CAMPUS ARAGON

LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRACTICA No. 6

INDUCTANCIA

OBJETIVOS

- Analizar el comportamiento de las inductancias en C.D y C..A.
- Aplicar la ley de Ohm para circuitos de C.A. para obtener la Reactancia Inductiva (X_L) y así como la inductancia de una bobina.
- Comprobar de manera experimental las caracteristicas de inductancia equivalente o total en agrupamientos de bobinas conectadas en serie y en paralelo.

INTRODUCION

La inductancia L es la caracteristica de una bobina que se opone a la variación de la corriente. La unidad de medida de la inductancia es el *Henrio (H)*.

La oposición ue una inductancia presenta a la variación de la corriente se llama reactancia inductiva X_L, siendo medida en Ohms.
Toda bobina tiene alguna esistencia **R** asociada con ella. La continuidad del arrollamiento de una bobina se puede determinar midiendo la resistencia de la bobina. Si la resistencia medida es infinita, es que el arrollamiento de la bobina está abierto.
La corriente en C.D. de una bobina está limitada únicamente por la resistencia del arrollamiento, por lo que la inductancia de esta no afectá a la corriente en C.D.
La tensión en C.A., entre los extremos de una bobina V_L es igual al producto de la corriente **I** de la bobina por la X_L de está, es decir:

$$V_L = I \ X_L$$

Por lo tanto si la tensión de C.A. V_L entre los extremos de una bobina son conocidas, la reactancia inductiva de la bobina se puede calcular por la formula

$$X_L = V_L \ / \ I$$

En esta formula se supone que la resistencia **R** de la bobina es pequeña comparada con la reactancia de la bobina.
La inductancia total L_T de bobinas conectadas en serie, cuando no exista acoplamiento mutuo, es:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + ...$$

donde L_1, L_2, L_3, etc., son inductancias conectadas en serie.
Las inductancia total L_T de bobinas conectadas en paralelo, cuando no exista acoplamiento mutuo, es :

$$L_T = 1 \ / \ (\ \ (1 \ / L_1) + (1 \ / \ L_2) + (1 \ / \ L_3) + ...)$$

La inductancia de L_T se puede determinar midiendo la corriente **I** en C.A. de la combinación y la tensión entre los extremos de la L_T para obtener X_{LT}
Ahora bien, conociendo X_{LT} y la frecuencia F de la corriente alterna, se hallar el valor de del inductancia L, sustituyendo dichos valores en la expresión siguiente:

$$L = X_L \ / \ 2\pi F$$

donde XL, está en Ohms, F en Hertz y L en Herios.

EQUIPO Y MATERIAL

1 Fuente de Poder de C.D.
1 Autotransformador
1 Multimetro.
3 Solenoides de diversos tamaños.
1 Juego de caimanes.
1 Tablero con cables y conectores.

DESARROLLO

- Con uyuda del volmetro ajuste la tensión de salida de la fuente de alimentación de C.D. a 15 Volts.

- Arme el siguiente circuito

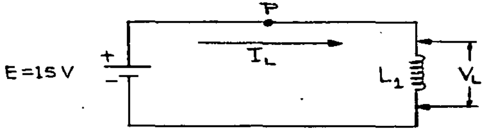


Fig 1

- Mida la corriente en el punto " P " y la tensión entre los extremos de la bobina. Anote sus resultados en la tabla 1.

- Ajuste la tensión de salida de la fuente de C.A. (autotransformador) a 15 Volts, y sustituya la fuente de C.D. en en circuito anterior por ésta.

- **Mida nuevamente la corriente en el punto " P " y la tensión entre los extremos de la bobina. Anote sus resultados en la tabla 1.**

Voltaje de alimentaión	I_L (Ampers)	V_L (Volts)
C.D.		
C.A.		

Tabla 1

- **Agrege al circuito alimentado por C.A. un osciloscopio conectado en paralelo con la bobina tal como se muestra en la figura siguiente.**

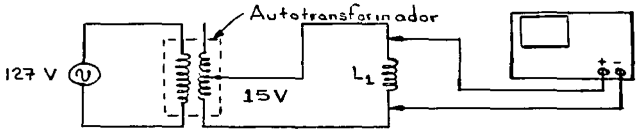


Fig. 2

- **Mida el periodo y determine la frecuencia, que posee el voltaje en los extremos de la bobina V_L**

T = ________ seg.
F = ________ Hertz.

- **Arme el circuito que se muestra en la figura 3.**

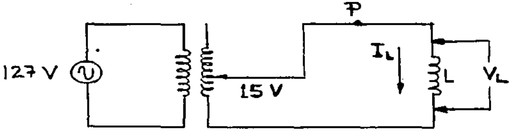


Fig. 3

- Mida la corriente en el punto " P ", así como la tensión V_L en los extremos de la bobina y verifique si esta es igual a la suministrada por la fuente de C.A.

- Realice las mismas mediciones efectuadas en el punto anterior para cada uno de las bobinas suministradas.

- Anote sus resultados en la tabla siguiente y realice los calculos indicados para determinar la inductancias de cada una de las bobinas.

V_C Volts	I_A Ampers	$X_L = V_L / I_A$ Ohms	Valor Calculado $L = X_L / 2\pi F$ Henrios

Tabla 2

- Arme el circuito de figura siguiente

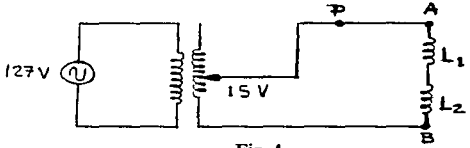


Fig. 4

- Mida la corriente total (en el punto "P") de la combinación serie mostrada, fig.4. Así como la tensión entre los puntos "A" y "B" del circuito.
Anote sus resultados en la tabla siguiente y realice los calculos indicados

Combinación de Inductancias en Serie				
V_{AB} Volts	I_T Amp.	$X_{LT} = V_{AB} / I_T$ Ohms	Valor Práctico $L_T = X_{LT} / 2\pi F$ Henrios	Valor Teorico $L_T = L_1 + L_2$ Henrios

Tabla 3

- Arme el siguiente circuito.

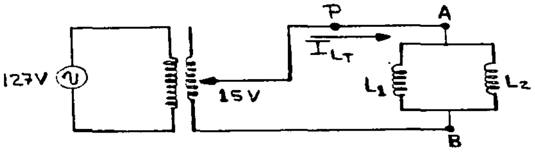


Fig. 5.

- Mida la corriente total (en el punto "P"), de la combinación paralelo mostrada en la Fig. 5.
  Así como la tensión entre los puntos "A" y "B" del circuito.
  Anote sus resultados en la tabla siguiente y realice los calculos indicados

Combinación de Inductancias en Paralelo				
V_{AB} Volts	I_T Amp.	$X_{LT} = V_{AB} / I_T$ Ohms	Valor Práctico $L_T = X_{LT} / 2\pi F$ Henrios	Valor Teorico $L_T = L_1 + L_2$ Henrios

Tabla 4

CUESTIONARIO

1.- Explique como se comporta el flujo de la corriente, a través de una bobina (inductancia) cuando éste se alimenta con una fuente de C.D.

2.- ¿ Cuál es el comportamiento del flujo de la corriente a través de una inductancia cuando se alimenta con C.A. ?

3.- Explique que es la fuerza contra electromotriz inducida (f.c.e.m.) y en que difiere de la fuerza electromotriz inducida (f.e.m.)

4.- Investigue que es la inductancia mutua y como se puede evitar tal efecto.

5.- De que manera se modifica la inductancia total o equivalente, en una combinación serie o paralelo de inductancias, cuando existe inductancia mutua.

6.- ¿ Cuál es el efecto que tiene el calibre del conductor con el cual se construye la mayoría de las bobinas o inductancias, con respecto a la corriente que puede fluir a través de éstas ?.

BIBLIOGRAFIA

Física. Tomo II
Serway
Mc Graw Hill.

Circuitos Electricos
Joseph A. Edminister.
Ed. Mc Graw Hill.

Electricidad Básica. Libro 4
Van Valkenburgh
C.E.C.S.A

Electricidad Simplificada
Jacobowitz, Henry
Cia. General de Ediciones, S.A.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CAMPUS ARAGON

LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRACTICA No. 7

" LEYES DE KIRCHHOFF "

OBJETIVOS

- Determinar experimentalmente la relación entre las caidas de tensión de cada una de las cargas (resistores) conectadas en un circuito y la tensión aplicada (L.K.V.).
- Determinar experimentalmente la relación entre las corrientes que entran a un "Nodo" en un circuito electrico, y las corrientes que salen del mismo (L.K.I.).

INTRODUCCION

La ley de Ohm es usada constantemente, siempre que tenga aplicación, en los cálculos de caidas de tensión corriente y resistencia, pero también existen otros métodos para la solución de circuitos, que nos dan las respuestas con mucha más rapidez y menos inconvenientes.

En adelante deberán tenerse presente algunos términos tales como *rama, nodo, lazo y malla.*

En el sentido estricto de la palabra, una **rama** de un circuito es un simple componente, como por ejemplo un resistor o una fuente.

Un **nodo** es un punto en que se conectan dos o más ramas. Dicho de otra manera un nodo indica que todos los puntos están a el mismo potencial.

Un **lazo** es cualquier trayectoria cerrada en un circuito. Una **malla** es un lazo que no tiene una trayectoria cerrada en su interior.

La *ley de tensión de Kirchhoff* (L.K.V.) se puede expresar de dos maneras:

1. La suma de las caídas de tensión (IR) en un circuito cerrado (malla) es igual a la tensión aplicada (E) por una f.e.m., ó
2. La suma algebraica de las tensiones en un circuito cerrado es igual a cero.

El concepto de signos algebraicos o polaridad es útil para resolver los problemas de redes electricas.
Para establecer el signo algebraico de las tensiones en el circuito cerrado nos movemos en el sentido convencional de la corriente (de + a -), considerando como negativo cualquier fuente de tensión (E) ó caída de tensión (IR) cuya terminal - (negativa) sea el primero alcanzado, y como positiva cualquier fuente o caida de tensión cuya terminal + (positiva) sea alcanzada.
Asi pues para el circuito siguiente, tendremos que partiendo de un punto de referencia A, que:

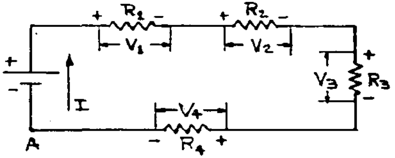


Fig . 1

$$- E + IR_1 + IR_2 + IR_3 + IR_4 = 0$$
$$- E + V_{R1} + V_{R2} + V_{R3} + V_{R4} = 0$$

La *ley de corriente de Kirchhoff* (L.K.I.), enuncia que la corriente que entra en un nodo de un circuito electrico es igual a la corriente que sale de dicho nodo.

El enunciado analítico de L.K.I., requiere la asignación de polaridad a la corriente que entra o sale del nodo, por lo que se considera que la corriente que entra en un nodo es + (positiva) y a la corriente que sale del nodo, como - (negativa).
Por lo que, con el convenio establecido, la L.K.I. se enuncia como sigue:

" La suma algebraica de las corrientes que entran y salen en un nodo es cero ".

Asi, en el circuito de la fig. 2 podemos establecer que:

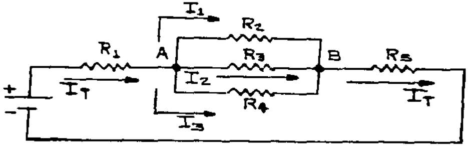


Fig. 2

en el nodo A .... IT - I1 - I2 - I3 = 0

y en el nodo B .... I1 + I2 + I3 - IT = 0

EQUIPO Y MATERIAL

1 Fuente de C.D.
1 Multimetro.
1 Resistor de 10 Ω, ½ Watt.
1 Resistor de 100 Ω, ½ Watt.
3 Resistores de 150 Ω, ½ Watt.
2 Resistores de 1 KΩ, ½ Watt.
1 Juego de caimanes.
1 Tablero de conexiones.

DESARROLLO

- El instructor dará una breve expliación acerca de como se establece el signo algebraico de voltaje y corriente , para su aplicación en las leyes Kirchhoff respectivas, conforme al sentido convencional y el sentido electronico, del flujo de la corriente.

- Arme el siguiente circuito.

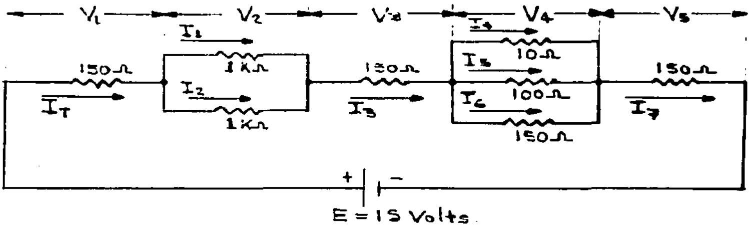


Fig. 3

- Ajuste la salida de la tensión de salida de la fuente de alimentación E = 15 volts

- Mida las caidas de tensión V_1, V_2, V_3, V_4 y V_5 en los puntos indicados en la fig. 1. Anote sus mediciones y realice los calculos indicados en la tabla siguiente.

Ley de kirchhoff para Voltaje (Volts)						
E	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$

Tabla 1

- Analice los resultados de la tabla anterior y escriba sus conclusiones.

– **Mida las corrientes I_T, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, e I_7.**
Anote sus mediciones en la siguiente tabla

Corriente a través del Circuito (mA).							
I_T	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7

Tabla 2

CUESTIONARIO

1.- En base a los resusltados de la Tabla 1. Describa cual es la relación que guarda la suma de cada una de las caidas de tensión (a lo largo de todo el circuito, y la tensión aplicada por la fuente (E).

2.- Anote la expresión algebraica que difine la caracterítisca de la pregunta 1.

3.- Describa lo que es un divisor de corriente y establesca si en el nodo A, existe o no tal característica.

4.- Escriba la expresión matematica para el calculo de I_1 e I_2

5.- Describa lo que es un divisor de tensión y diga si el circuito utilizado en la práctica posee tal característica.

6.- Con los datos de la tabla 2, indique, escriba en la tabla siguiente, la relación algebraica que guardan las corrientes comunes (que entran o salen), de cada uno de los nodos indicados. en la fig. 3.

Ley de kirchhoff para Corriente ($\sum I = 0$)			
Nodo A	Nodo B	Nodo C	Nodo D

Tabla 3

BIBLIOGRAFIA

Electricidad Básica Vol. I, II y III.
Van Valkenburg.
C. E. C. S. A.

Física para Estudiantes de Ciencias e Ingeniería.
ResnicK-Halliday.
C. E. C. S. A.

Electricidad y Magnetismo.
Francis W. Sears.
Ed. Aguilar

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

CAMPUS ARAGON

LABORATORIO DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

PRACTICA No. 8

CONSTANTES DE TIEMPO

Circuitos R-C y R-L

OBJETIVOS

- Determinar experimentalmente el tiempo que tarda en cargarse y descargarse un condensador en un circuito R-C.
- Determinar experimentalmente el tiempo requerido para que la corriente alcance su valor final en un circuito R-L.

INTRODUCION

Si las placas de un condensador son conectadas a una fuente de C.D. estás se cargan rapidamente y la energia que toma de esta es almacenada en el campo electrostatico existente entre dichas placas. Nada suscede despues de la breve pulsación de carga y la corriente cesa (debido a la repulsión electrostatica entre las cargas) cuando el potencial entre las placas alcanza el mismo valor que el de la fuente. Así mismo cuando el capacitor se a cargado completamente y se desconecta de la fuente de alimentación este se descargara tan rápido como se haya cargado.

Cuando se conecta un condensador a una fuente de C.A., sus placas primero se cargan, después se descargan, en rápida secuencia de acuerdo con la polaridad alternante del voltaje aplicado.

Si además del condensador conectamos una resistencia en serie con esté, se ocasionara una dilación del tiempo necesario para la carga o descarga del condesador.

El tiempo necesario para que se cargue un condensador hasta un 63.2 % (aproximadamente) de la tensión aplicada se le llama constante de tiempo t, calculandose matematicamente como:

$$t = RC$$

En donde t , se expresada en segundos, R en Ohms y C en Faradios.

En el caso de una bobina, por la cual circula una corriente que aumenta de intensidad, se convierte en un generador de fem cuyo sentido es opuesto al de la corriente. Como consecuencia de esta fuerza contraelectromotriz, la intensidad de la corriente en un circuito inductivo no alcazará su valor final en el instante mismo de cerrar el circuito, sino que aumentará en proporción del valor de la inductancia y la resistencia del mismo.

Como en el caso de una conexión serie de una resistencia y un condensador , se requiere un tiempo para que la corriente alcance su valor final.

La constante de tiempo t de un circuito circuito R-L, o sea, el tiempo requerido para que la intensidad aumente hasta un 63.2 % de su valor final es:

$$t = L / R$$

En donde t esta expresada en segundos, R en Ohms y L en Henrios.

La grafica siguiente muestra como aumenta la tensión (en el caso de los condensadores) ó la intensidad de corriente (en el caso de una inductancia), a través de una resistencia.

El eje horizontal es el eje del tiempo graduado en constantes de tiempo R-C o R-L. El eje vertical es el eje de porcentaje, en el cual el 100% representa la tensón máxima a la que puede cargarse un condensador ó la corriente final a través de una bobina.

Un exámen de este gráfico muestra que se requiere que transcurran cinco constantes de tiempo (5t) para alcanzar el 99% de la tensión ó corriente máximas, en un condensador y en una bobina, respectivamente.

En forma similar la grafica indica el tiempo neceuraio para que el porcentaje de carga se reduszca a varios porcentajes de su valor máximo.

EQUIPO Y MATERIAL

1 Fuente de Poder de C.D.
1 Generador de Funciones.
1 Multimetro Analogico.
1 Osciloscopio
1 Condensador de 47 μF, 16 volts
1 Condensador de 1000 μF. 16 Volts
1 Condensador de 4700 pF, 300 Volts
1 Solenoide.
1 Potenciometro de 0 -10 KΩ, 1 Watt.
1 Resistor de 100 Ω, ½ Watt.
1 Tablero con cables y conectores.

DESARROLLO

- El instructor explicará brevemente la manera de medir la constante de tiempo en circuitos R-C y R-L, en la pantalla del osciloscopio, en función de la señal aplicada por el generador de fuciones.

- Ajuste la fuente de tensión de C.D a 10 Volts

- Arme el circuito de la figura 1, sin encender la fuente.

- Observe con atención el desplazamiento de la aguja del volmetro, en cuanto se enciende la fuente de C.D. (previamente ajustada).

Fig. 1

- Cuando el voltaje del condensador se haya igualado al de la fuente apague la fuente de C.D. y observe la descarga del condensador en la caratula del volmetro.

- Realice nuevamente los puntos anteriores, sustituyendo el condensador de 47 μf, por uno de mayor capacidad (1000 μF).

- Anote en sus observaciones acerca del efecto que causa el valor de la capacitancia de un condensador, en relación al tiempo requerido para que éste se carge o se descarge a su valor máximo y mínimo respectivamente.

- Realice los ajustes necesarios para que el generador de funciones entregue una señal cuadrada de 10 Vpp y una frecuencia de 1khz., auxiliese del osciloscopio para tal efecto.

- Con ayuda del Ohmetro. Ajuste el potenciometro (resistencia variable), a su valor minimo, es decir, 0 Ohms aproximadamente.

- Implemente el siguiente circuito.

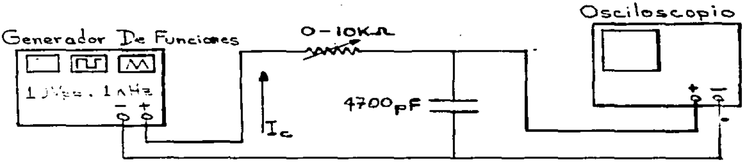


Fig. 2

Mida la corriente I_C que circula a traves del circuito, así como la tensión V_C en los extremos del condensador. Anote sus lecturas y realice los calculos indicados en la tabla siguiente.

Valor Nominal pF	V_C Volts	I_A Ampers	$X_C = V_C / I_A$ Ohms	Valor Calculado $C = 1 / (2\pi F X_C)$ pF
4700				

Tabla 1

- Observe y dibuje la curva de carga y descarga del condensador, mostrada en la pantalla del osciloscopio, cuando la resistencia conectada en serie con esté es igual a cero (R = 0 Ohms).
- Modifique el circuito de la fig. 2, aumentando lentamente el valor del potenciometro hasta llegar al máximo (Aprox. 10 KΩ).
- Observe en el eje del tiempo del osciloscopio , como se va modificando el tiempo de carga y descarga del condensador.

- Con el valor del potenciometro al máximo, mida en el osciloscopio la constante de tiempo t , ya sea en la curva de carga o en la curva de descarga. Anote su lectura.

t = _____________segundos

Nota.- En la curva de carga se toma el 63% del valor máximo de voltaje y/ó en la curva de descarga se toma el 37%.

- Desconecte del circuito el potenciometro (sin modificar el valor máximo del potenciometro), mida el valor de resistencia y anote su lectura

$R_{Pot.}$ = ___________ Ohms

- Con el valor de capacitancia C, calculada en la tabla 1. calcule la constante de tiempo t , aplicando la expresión que define dicha relación.

- Compare dicho resultado con el medido en el osciloscopio.

- Arme el circuito mostrado en la figura siguiente.

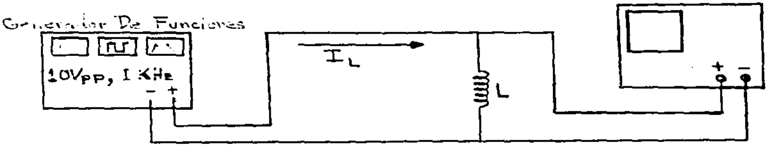


Fig. 3

- Observe en el osciloscopio, el tiempo necesario para que la corriente que circula por una bobina alcance su valor final.

- Mida la corriente I_L que circula por el circuito y la tensión V_L entre las terminales de la bobina. Anote sus lecturas y realice los calculos indicados en la tabla siguiente.

V_C Volts	I_A Ampers	$X_L = V_L / I_L$ Ohms	$L = X_L \;/\; 2\pi F$ Henrios

Tabla 2

- Incluya una resistencia de 100 Ω, en el circuito de la fig. 3, tal como se muestra a continuación.

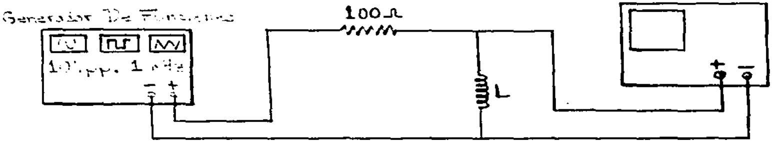


Fig. 4

- Mida en el osciloscopio la constante de tiempo t , en la curva en la cual la intensidad de corriente se va incrementado en el tiempo, hasta obtener su valor final. Anote su lectura.

t = ____________ segundos

- Mida el valor real de la resistencia cuyo valor nominal es de 1 KΩ, y anote su lectura.

R_{REAL} = ____________ Ohms

- Con el valor de inductancia L, calculada en la tabla 2, calcule la constante de tiempo t , aplicando la expresión que define dicha relación.

- Compare dicho resultado con el medido en el osciloscopio.

CUESTIONARIO

1.- Explique como varia el tiempo que transcurre para que un condensador se carge ó se descarge, de acuerdo a su valor de su capacitancia ?

2.- ¿ Cuanto tiempo transcurre para que el condensador de la Fig. 2,se carge o se descarge cuando el valor de resistencia en el circuito es igual a cero ?

3.- ¿ Explique que sucede con las curvas de carga y descarga del condensador de la Fig. 2, conforme se incrementa el valor del potenciometro (resistencia), conectado en serie con este ?

4.- Conforme al valor de la constante de tiempo t, para un circuito R-C determine cuanto tiempo transcurre para que el condensador se carge al 100 % de su carga ?

5.- Corresponde el valor teorico de la constante de tiempo t, con el medido en la pantalla del osciloscopio ? Explique.

6.- Explique. ¿ Cuál es la diferencia entre las curvas de carga y descarga, para el condensador, y la curva de intensidad máxima de corriente, para una bobina o inductancia ?

7.- ¿ Qué sucede con el valor de la constante de tiempo t , del circuito R-L utilizado en esta práctica, si el valor del resistor fuera del orden de millones de Ohms (MΩ) ?

BIBLIOGRAFIA

Circuitos Electricos
Joseph A. Edminister.
Ed. Mc Graw Hill.

Electricidad Básica. Libro 4
Van Valkenburgh
C. E. C. S. A.

Electricidad Simplificada
Jacobowitz, Henry
Cia. General de Ediciones, S.A.