

26
26j

ESTADO DE GUERRERO
SECRETARIA DE EDUCACION
CUALTILAN
1999



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**"ILUMINACION E INSTALACIONES ELECTRICAS
PRINCIPIOS EN QUE SE FUNDAMENTA
LA ILUMINACION"**

**TRABAJO DE SEMINARIO
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
DIEGO HERMILO GODOY RICALDE**

ASESOR: ING. RAMON OSORIO GALICIA.

270038

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
PRESENTE.

AT'N: Q. MA. DEL CARMEN GARCIA MIJARES
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Iluminación e Instalaciones Eléctricas. Principios Básicos en que se Fundamenta la Iluminación

que presenta el pasante: Diego Hermilo Godoy Ricalde,
con número de cuenta: 7411330-1 para obtener el Título de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 13 de Enero de 1999

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
II	Ing. Ramón Osorio Galicia	
III	Ing. Casildo Rodríguez Arciniega	
IV	Ing. Benjamín Contreras Santa Cruz	

A DIOS

**A MI PADRE,
ERMILO GODOY CAMARA**

I N D I C E

PAG.

PRÓLOGO

INTRODUCCION	1
CAPITULO 1 FUNDAMENTOS ELECTROMAGNETICOS	5
1.1 CARGA ELECTRICA Y CAMPO ELECTRICO	5
1.2 POTENCIAL ELECTRICO	11
1.3 MAGNETISMO	13
1.4 FUENTES DE FUERZA ELECTROMOTRIZ	14
1.5 RESISTENCIA, CAPACITANCIA E INDUCTANCIA	16
1.6 CORRIENTE ELECTRICA	18
1.7 CIRCUITOS	19
1.8 ECUACIONES DE MAXWELL	24
CAPITULO 2 FUNDAMENTOS DE OPTICA	39
2.1 ONDAS ELECTROMAGNETICAS	39
2.2 LA VISION HUMANA	43
2.3 EL CONCEPTO DE ONDA	46
2.4 REFLEXION Y REFRACCION	47
2.5 DIFRACCION Y POLARIZACION	49
CAPITULO 3 APLICACIONES DE LOS PRINCIPIOS EN INSTALACIONES ELECTRICAS	51
CAPITULO 4 APLICACIONES DE LOS PRINCIPIOS EN ILUMINACION	61
CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFIA	69

PROLOGO

El diseño de un sistema de iluminación y de una instalación eléctrica, requiere de un buen conocimiento de los métodos que se siguen en estas disciplinas. El "cómo" hacer las cosas, es decir, el "arte", como también se le conoce, depende en buena manera, de entender el "por qué" son las cosas como son. La respuesta a estos "por qué", se encuentra en los principios básicos de las disciplinas mencionadas.

Los principios básicos en este caso los proporcionan la Teoría Electromagnética, la Óptica y la Teoría de Circuitos. Estas brindan una serie de leyes, ecuaciones, conceptos fundamentales y una clara explicación de los fenómenos físicos, con los que inevitablemente se va a enfrentar el ingeniero electricista dedicado a la iluminación e instalaciones eléctricas. Estos principios fueron deducidos mediante la experimentación y la herramienta matemática adecuada entre los siglos XVII y XIX, principalmente.

La oportuna y adecuada aplicación práctica de estos principios, originó la creación no sólo de máquinas y dispositivos eléctricos, sino también de la infraestructura de lo que empezaría a ser la ingeniería eléctrica basada en la ciencia, a diferencia de la ingeniería empírica conocida hasta mediados del siglo XIX. Fue Thomas Alva Edison el que se encargó de proyectar y llevar a su realización, junto con su equipo de ingenieros y técnicos, el primer sistema de alumbrado incandescente en 1879 en Menlo Park, Nueva Jersey.

La Óptica en particular es una herramienta clave que proporciona los principios fundamentales para el diseño de un sistema de iluminación, explicando los fenómenos propios de la luz y la visión, que son la materia prima de un sistema de alumbrado.

Tomando en cuenta lo anterior, se entiende que si se quieren dominar estas áreas, es importante dominar sus principios. Si se comprenden y se conocen bien estos principios, que dan respuesta a los "por qué" de estas disciplinas, entonces será más fácil el proceder con eficacia y competencia ante cualquier problema que se presente al estar diseñando.

Así pues, todo esfuerzo encaminado a enfatizar y a fortalecer el conocimiento de los principios básicos anteriormente mencionados, se ve justificado.

Es el propósito del presente trabajo, contribuir en este esfuerzo.

En la introducción se habla de los primeros intentos que se hicieron en el campo de la iluminación artificial, hasta llegar al gran invento de la luz eléctrica.

En el capítulo 1, se dan las bases de la Teoría Electromagnética y de la Teoría de circuitos, sus principales leyes y modelos idealizados.

En el capítulo 2, se dan las bases de la Óptica, en particular los fenómenos de la visión, reflexión, refracción y de la difracción, por ser fundamental su comprensión para entender los por qué y los cómo de la Iluminación.

En el capítulo 3, se presenta la forma en que los principios se aplican en Instalaciones Eléctricas.

En el capítulo 4, se presenta la forma en que los principios se aplican en Iluminación.

Finalmente, se presentan las conclusiones en donde se reflexiona, desde un punto de vista general, la importancia que representa el conocimiento sólido de los principios básicos para el ingeniero que pretenda mejorar su competencia a la hora de proyectar sistemas de iluminación e instalaciones eléctricas.

INTRODUCCION

La iluminación es un campo de trabajo muy importante para el ingeniero electricista. Entre las tareas que realiza el ingeniero en esta área están: a) el diseño y la fabricación de fuentes de luz y de dispositivos de control de la misma, b) el diseño e instalación de sistemas de alumbrado.

Los sistemas de alumbrado pueden ser de tipo doméstico, de tipo comercial (por ejemplo tiendas departamentales), y de tipo industrial (por ejemplo plantas industriales). También se consideran los trabajos de iluminación de lugares abiertos como aeropuertos, centros de recreo, calles y autopistas, y finalmente tenemos la iluminación decorativa, como para exhibiciones y edificios públicos.

La luz es un elemento indispensable para las actividades del hombre, tan importante como la visión misma, pues vemos las cosas porque reflejan la luz. Es fácil, entonces, comprender el por qué desde la antigüedad se han tratado de encontrar formas de producir luz artificial, como un sustituto de la luz natural que proviene del sol, y que no siempre se cuenta con ella.

Entre las primeras formas de luz artificial que se conocen, se encuentran las antorchas que usaban los hombres primitivos, y cuyo uso duró miles de años. Los egipcios y los griegos ataban grupos de varas, las impregnaban con cera y las prendían, contando así con un medio de iluminación. También en la Edad Media se usaba un sistema similar, e incluso utilizaban sujetadores metálicos para poder colgar en las paredes de afuera de sus hogares las varas encendidas.

Otro tipo de medio de luz artificial muy socorrido, incluso desde la prehistoria, fue la lámpara de aceite. Este medio tuvo sus equivalentes hasta finales del siglo XVIII. Y el más famoso artefacto de este tipo fue el "quemador de Argand", inventado por el suizo Aimé Argand.

Otro importante medio de luz artificial, fue el proporcionado por las velas, "candles" en inglés, y que da su nombre a la unidad en que se mide el grado de iluminación. Su origen se encuentra en la época de los Romanos, y consistía en una mecha de lino impregnada con cera o brea. A partir del renacimiento se emplearon ampliamente para alumbrar las casas, los sitios públicos y los salones de baile, usando enormes candeleros con decenas de velas. Sus desventajas eran su poca luz y la gran cantidad de calor que generaban.

En 1792 aparece en escena el gas como medio de iluminación. Fue el escocés William Murdock, el que demostró que se podía usar el gas de carbón en este sentido. Para esto hizo el experimento de iluminar su casa y su oficina con gas.

A pesar del gran éxito que tuvo esta demostración de Murdock, todavía se criticaba el uso del gas de carbón como

medio de iluminación, por inseguro e impráctico.

Con todo y críticas, este tipo de iluminación se impuso poco a poco, y se fue perfeccionando. La primer instalación pública con iluminación de gas fue en Londres en 1807, después le seguiría París con la iluminación de sus calles en 1813. En E.U., el alumbrado de edificios mediante gas se inició con la iluminación del Teatro de Filadelfia.

A partir de 1828 se perfeccionó cada vez más el sistema de alumbrado por medio de gas. Sin embargo, todavía no se desarrollaba plenamente cuando ya tenía un competidor muy serio, que también empezaba a desarrollarse por la misma época, la luz eléctrica.

La historia de la luz eléctrica se remonta a un descubrimiento, casi fortuito, que hiciera el alemán Otto Von Guericke en 1658, experimentando con una máquina que él desarrollara para generar electricidad estática. Esta máquina producía electricidad estática al aplicar una fricción con la mano a un globo de sulfuro que se encontraba girando rápidamente. Durante el experimento Von Guericke notó que el aparato producía un resplandor.

Siglos más tarde, en 1802, un experimentador inglés, Sir Humphry Davy, estudió el fenómeno observado por Von Guericke y logró producir una luz continua al hacer pasar una corriente eléctrica a través de unas tiras, o filamentos, de platino. Y además demostró que también otros metales se podían llevar a la incandescencia al pasar una corriente eléctrica por ellos.

Las lámparas incandescentes modernas trabajan bajo este principio, es decir, la emisión de luz visible mediante el calentamiento extremo del filamento. Conforme la temperatura del filamento aumenta, las longitudes de onda de la radiación emitida por éste, se vuelven cada vez más cortas, hasta que se alcanza el rango de la luz visible (400 - 700 nm), y entonces el filamento empieza a resplandecer. Al mismo tiempo se produce calor como resultado de la resistencia que el conductor del que está hecho el filamento le opone al paso de la corriente eléctrica. Hay que señalar que no todos los conductores poseen la misma resistencia; la plata y el cobre presentan una mínima resistencia; el silicón y el antimonio poseen tanta resistencia que la mayoría de la energía que se genera se convierte en calor.

Así pues, el filamento de las lámparas incandescentes se convirtió en el objeto principal de estudio y de investigación para el perfeccionamiento de éstas.

Fueron varios los científicos y estudiosos que se avocaron a buscar un material para los filamentos, que soportara temperaturas extremas y que convirtieran en mayor proporción su energía irradiada en luz más que en calor.

Entre estos hombres de ciencia se encuentra el inglés Frederick de Moleyns, quién obtuvo la primer patente inglesa

de una lámpara incandescente. Su lámpara consistía en una esfera de cristal al vacío, con dos alambres de platino con una brecha entre sus puntas, espacio que estaba cubierto por una masa de carbón en polvo. Al pasar la corriente por los filamentos y por la masa de carbón, ésta se calentaba hasta el grado de la incandescencia. Como la esfera no tenía aire, el carbón no se desintegraba. Esta lámpara fue el prototipo en el que se basaron otras lámparas.

Otro importante personaje que estaba investigando la luz eléctrica y los materiales más eficaces para los filamentos, fue el norteamericano Thomas Alva Edison.

Después de muchos años de estar experimentando con diferentes materiales, Edison logró desarrollar una muy buena lámpara incandescente, con un hilo de carbón por filamento. Finalmente, el 31 de diciembre de 1879, Thomas Alva Edison hizo una importante demostración de su primer sistema completo de alumbrado de calles y casas con luz eléctrica, en Menlo Park, Nueva Jersey.

A partir de entonces, se fueron dando enormes mejoras en la fabricación de las lámparas incandescentes, y de los métodos de suministro de energía eléctrica a gran escala, para casas y edificios.

Gracias al desarrollo de la luz eléctrica, y de otros equipos eléctricos, también se mejoró el suministro de energía eléctrica. Hasta ese momento, la principal fuente de energía eléctrica era la batería química, pero era totalmente insuficiente para proporcionar la enorme cantidad de potencia que se necesitaba para operar todas las lámparas incandescentes que se empezaban a utilizar en grandes cantidades. Así que tomó un gran impulso la máquina electromagnética llamada Dinamo (generador de electricidad).

Faraday fue el primero en desarrollar un dinamo experimental, al hacer girar un disco de cobre entre los dos polos de un imán en forma de herradura.

En París, H. Pixii, produjo una máquina de corriente alterna en 1832 al hacer girar un imán permanente en forma de herradura por debajo de un par de bobinas fijas.

En 1868, Antonio Pacinotti y Sir William Siemens introdujeron los conmutadores, unos dispositivos pegados a la flecha del dinamo con lo que se podía entregar un flujo de corriente directa constante. Pero fue Zénobe-théophile Gramme quien construyó el primer dinamo industrial eficaz.

La compañía Edison Electric Light construyó una estación central de fuerza a base de dinamos, con una eficiencia del 98%.

Así pues, con las instalaciones listas para la distribución de la electricidad en los hogares, se tenía preparado el terreno para recibir la gran variedad de aparatos basados en los motores pequeños, de hp fraccionarios como aspiradoras, batidoras, etc., así como otros aparatos eléctricos como tos-

tadores, hornos eléctricos y calentadores.

Aumentó enormemente la demanda de energía eléctrica, tanto para el hogar como para la industria. Esto hizo que se llegara a la instalación de gigantescas plantas hidroeléctricas, como las de Niágara Falls; en las que se usa la fuerza del agua para accionar turbinas que generan electricidad. Así nació la era de la energía eléctrica.

Hasta aquí se ha vislumbrado como el uso práctico de los principios electromagnéticos, ha servido para iluminar y proporcionar tanto energía eléctrica, como máquinas eléctricas al ser humano. Pero, ¿cuáles son estos principios y cómo se desarrollaron? Ese será el objeto de estudio de los siguientes capítulos.

CAPITULO 1

FUNDAMENTOS ELECTROMAGNETICOS

1.1 CARGA ELECTRICA Y CAMPO ELECTRICO

Los primeros indicios que se tienen documentados de la existencia de la electricidad, datan del año 600 A.C. De estos documentos se sabe que los Griegos ya tenían conocimiento de la propiedad que tiene el ámbar de atraer materiales livianos después de haber sido frotado con alguna piel de animal. De hecho el término "electricidad" se deriva del nombre griego del ámbar, a saber, "elektron". Sin embargo para los Griegos esta fuerza de atracción que poseía el ámbar no pasó de ser más que una fuerza mágica o "fuerza de vida".

Pasaron varios siglos para que esta fuerza misteriosa empezara a ser estudiada en forma experimental. En el año 1600, Sir William Gilbert, médico de la reina Elizabeth I de Inglaterra, investigó en forma experimental esta fuerza, que dicho sea de paso, llamó por primera vez fuerza eléctrica (del griego elektron), y descubrió que no sólo el ámbar atraía objetos livianos al ser frotado, sino que también poseían la misma propiedad, el vidrio y el azufre entre otros. Y que además de atraer los objetos ligeros como plumas y trozos de paja, también atraían metales, madera, hojas, etc. Y aunque se puso de moda el hacer experimentos eléctricos, no fue sino hasta el siglo XVIII que se lograron grandes avances.

El que empezó a experimentar con más éxito con la electricidad, que en ese entonces se refería a los fenómenos existentes entre cargas estáticas (electricidad en reposo), fue el francés Charles Coulomb. Este utilizó una balanza de torsión con un mecanismo muy fino que él mismo inventó, para determinar cuantitativamente la fuerza ejercida entre dos objetos que tienen una carga estática de electricidad. Este tipo de balanza se ve en la Fig. 1.1.

En el experimento con esta balanza de torsión, Coulomb descubrió la siguiente relación:

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{R^2} \quad (1)$$

Es decir, la fuerza entre dos objetos muy pequeños, separados en un vacío o espacio libre por una distancia grande, en comparación con su tamaño, es proporcional a la carga en cada uno e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.

En donde Q_1 y Q_2 representan la cantidad de carga posi-

tiva o negativa contenida en las esferas, R es la separación entre las cargas y K es una constante de proporcionalidad.

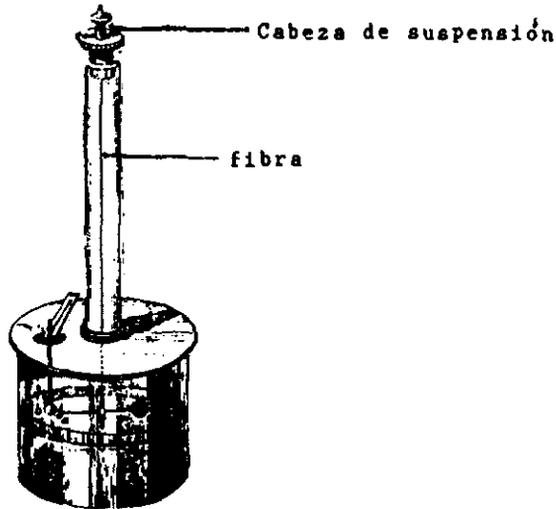


Fig. 1.1 Balanza de torsión que utilizó Coulomb para su experimento con cargas.

En esta relación para que F sea dada en newtons (N), Q debe ser dado en coulombs (C), R en metros (m), y la constante K, debe expresarse como $1/4\pi\epsilon_0$. En donde ϵ_0 es la constante de permitividad del espacio libre, y se da en $C^2/N\cdot m^2$, y su valor es

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \quad C^2 / N \cdot m^2 \quad (2)$$

Entonces la expresión (1) queda de la siguiente manera:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 R^2} \quad (3)$$

A esta expresión se le conoce como la ley de Coulomb.
Definición del Coulomb:

Un coulomb se define como la cantidad de carga que fluye

a través de cualquier sección transversal de un conductor, en un segundo y cuando hay una corriente constante de 1 ampere.

$$q = it \quad (4)$$

donde q está en coulombs si la corriente i está en amperes y t en segundos.

El análisis vectorial es la herramienta adecuada para analizar magnitudes vectoriales tales como fuerzas y campos, además de ayudar a simplificar, como si fuera una especie de taquigrafía matemática, el manejo de las ecuaciones que van surgiendo durante el estudio de la teoría, y que pueden llegar a ser muy complejas y extensas si no se usara el análisis vectorial. También nos ayuda a visualizar mejor, por lo compacto, lo que está pasando desde un punto de vista físico.

Para iniciar el planteamiento del modelo teórico que se va a usar para analizar el campo eléctrico, para varias situaciones, se va a dar forma vectorial a la expresión (3) que ahora queda

$$\vec{F}_2 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_{12}^2} \hat{R}_{12} \quad (5)$$

Esto se puede hacer porque según Coulomb la fuerza \vec{F}_2 actúa a lo largo de la línea que une a las dos cargas. Donde la flecha sobre la \vec{F} , y el símbolo $\hat{}$ indican un vector y un vector unitario respectivamente. También el símbolo en negrita indicará un vector.

Analizando la figura 1.2, vemos que el vector \hat{R}_{12} es un vector unitario en la dirección del vector \vec{R}_{12} .

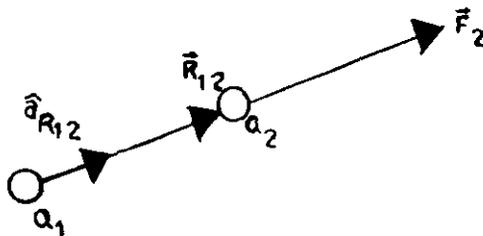


Fig. 1.2 Caso en el que Q_1 y Q_2 tienen signos iguales. La fuerza \vec{F}_2 sobre Q_2 tiene la misma dirección que el vector \vec{R}_{12} .

El vector unitario \hat{R}_{12} a lo largo del vector \vec{R}_{12} se puede definir también como

$$a_{R_{12}} = \frac{\vec{R}_{12}}{|\vec{R}_{12}|} = \frac{\vec{R}_{12}}{R_{12}} \quad (6)$$

Supóngase ahora que se tienen dos partículas con carga en el vacío, una localizada en el punto (1, 2, 3) con una carga de $3 \times 10^{-4} \text{ C}$, y otra localizada en el punto (2, 0, 5) con una carga negativa de -10^{-4} C (Fig. 1.3). Tenemos pues, una

$$Q_1 = 3 \times 10^{-4} \text{ C} \text{ y una } Q_2 = -10^{-4} \text{ C}.$$

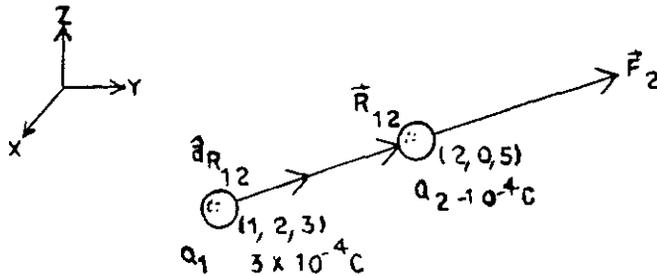


Fig. 1.3

Ahora vamos a emplear la expresión (5) y un poco de álgebra vectorial para calcular la fuerza F entre dos cargas.

$$\vec{R}_{12} = (2-1)\hat{a}_x + (0-2)\hat{a}_y + (5-3)\hat{a}_z$$

$$\vec{R}_{12} = \hat{a}_x - 2\hat{a}_y + 2\hat{a}_z$$

$$R_{12} = |\vec{R}_{12}| = \sqrt{1^2 - 2^2 + 2^2} = 3$$

$$a_{R_{12}} = \frac{\vec{R}_{12}}{|\vec{R}_{12}|} = \frac{\hat{a}_x - 2\hat{a}_y + 2\hat{a}_z}{\sqrt{1^2 - 2^2 + 2^2}} = \frac{\hat{a}_x - 2\hat{a}_y + 2\hat{a}_z}{3}$$

$$\vec{F}_2 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_{12}^2} a_{R_{12}} = \frac{(3 \times 10^{-4})(-10^{-4})}{4\pi(8.854 \times 10^{-12}) 3^2} \frac{(\hat{a}_x - 2\hat{a}_y + 2\hat{a}_z)}{3}$$

$$\vec{F}_2 = -30 \frac{(\hat{a}_x - 2\hat{a}_y + 2\hat{a}_z)}{3}$$

De este resultado se observa que la magnitud de la fuerza es de 30 N, en el sentido opuesto al de la Fig. 1.3, pues es atracción en vez de repulsión, y en la dirección que marca

el vector unitario. Si resolvemos la fuerza en sus tres componentes, también obtenemos su magnitud de 30 N.

$$\vec{F}_2 = -30 \frac{(ax - 2ay + 2az)}{3} = -10ax + 20ay - 20az$$

$$|\vec{F}_2| = \sqrt{-10^2 + 20^2 - 20^2} = 30 \text{ N}$$

Ahora vamos a considerar una carga en movimiento alrededor de otra carga que consideraremos como fija. La carga en movimiento, que llamaremos carga de prueba Q_t , experimenta una fuerza por todo el recorrido, es decir, se está detectando la existencia de un CAMPO ELECTRICO, y cuya intensidad se deduce de la siguiente forma:

Nuevamente se va a utilizar la Ley de Coulomb, pero esta vez una de las cargas será Q

$$\vec{F}_t = \frac{Q_1 Q_t}{4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2} a_{R_{1t}}$$

Esta expresión señala una fuerza mutua entre Q_1 y Q_t ; ahora se va a obtener la expresión que quedaría para la fuerza expresada como una fuerza por unidad de carga

$$\frac{\vec{F}_t}{Q_t} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_{1t}} a_{R_{1t}} \quad (7)$$

Uno se da cuenta que el miembro derecho de la ecuación es sólo función de Q y de la línea que une a las dos cargas. Y esta función describe un campo vectorial denominado INTENSIDAD DEL CAMPO ELECTRICO.

Formalmente la intensidad del campo eléctrico se define como el vector fuerza sobre una carga de fuerza positiva unitaria. Se va a usar la letra E para designar la intensidad del campo eléctrico.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_t}{Q_t} \quad (\text{N} / \text{C}) \quad (8)$$

$$\vec{E} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2} a_{R_{1t}} \quad (9)$$

La Ec. (8) define la intensidad del campo eléctrico en general, y la Ec. (9) define la intensidad de un campo eléctrico debido sólo a una carga puntual en un vacío.

La expresión anterior se refiere al caso en que se tiene una intensidad de campo eléctrico debida a una sólo carga puntual; sin embargo, ya que las fuerzas de Coulomb son lineales, se puede obtener una expresión para dos cargas puntuales Q_1 y Q_2 . Y en este caso la intensidad del campo eléctrico sobre la carga de prueba Q_1 , es sólo la suma de las fuerzas de Q_1 y Q_2 individuales (Fig. 1.4).

$$\vec{E} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1^2} \vec{a}_{R_1} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2^2} \vec{a}_{R_2} \quad (10)$$

Y se puede generalizar para n cargas puntuales como

$$\vec{E} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1^2} \vec{a}_{R_1} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2^2} \vec{a}_{R_2} + \dots + \frac{Q_n}{4\pi\epsilon_0 R_n^2} \vec{a}_{R_n} \quad (11)$$

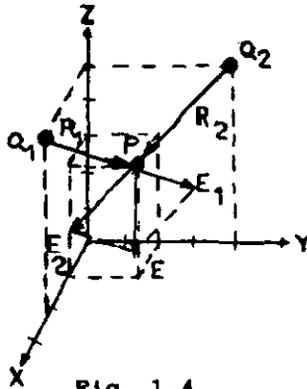


Fig. 1.4

A este tipo de distribución de la carga en el espacio se le conoce como distribución de carga puntual. Y ya se ha obtenido la expresión para la intensidad de campo debido a este tipo de distribución. Pero hay otros tipos de distribución de carga para los que existe también una expresión particular de la intensidad del campo eléctrico. Estas otras distribuciones son : distribución volumétrica continua, distribución de carga lineal y distribución de carga laminar. Se pueden considerar muchas otras distribuciones, pero las antes citadas son de geometrías más sencillas y su estudio no es tan complicado.

1.2 POTENCIAL ELECTRICO

En la sección anterior se estudió la Ley de Coulomb que describe la fuerza entre cargas en el espacio, y que sirve para calcular el importante concepto de intensidad de campo E .

Otro concepto importante entre los fenómenos eléctricos es el de potencial eléctrico, que se define como el trabajo que se requiere para transportar una carga positiva unitaria desde una gran distancia hasta un punto en particular. También se establecerá el concepto de diferencia de potencial.

Su definición cuantitativa es la siguiente. En la Fig. 1.5, se tiene una fuente de campo eléctrico \vec{E} , y se pone en él una carga unitaria positiva de prueba en movimiento, a lo largo de un recorrido L . La fuerza F se aplica en forma tangencial.

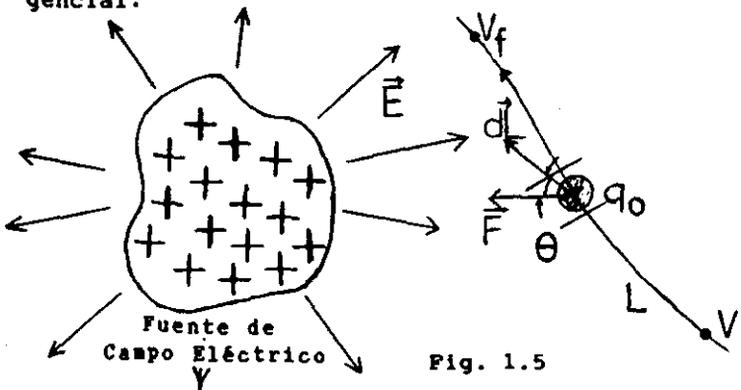


Fig. 1.5

Analizando el movimiento de esta carga de prueba q_0 , y considerando una sección diferencial dl se puede escribir la ecuación de trabajo para esta diferencial, como una diferencial de trabajo:

$$dw = \vec{F} \cdot d\vec{l} \quad \{ N.m \hat{=} J \} \quad (1)$$

Integrando

$$w = \int_{\text{inicial}}^{\text{final}} dw = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

De la definición de campo eléctrico sabemos que

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_E}{q_0} \quad ; \quad \vec{F}_E = -q_0 \vec{E}$$

De la ecuación (2) se puede deducir la fórmula del trabajo en forma escalar

$$\int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{l} = W_{i-f} = \int | \vec{F} | \cos \theta | dl | \quad (3)$$

En donde $| \vec{F} | \cos \theta$, es la componente de \vec{F} en la dirección de $d\vec{l}$.

Sustituyendo

$$W_{i-f} = \int_i^f (-q_0 \vec{E}) \cdot d\vec{l} = -q_0 \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{[Joules o Newton/metro]} \quad (4)$$

Si el campo \vec{E} es conservativo, se tiene ausencia de pérdidas de energía y entonces es válido decir que

$$W = U \text{ (energía)}$$

$$U = -q_0 \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (5)$$

De aquí se define a la razón del trabajo realizado por carga transportada como DIFERENCIA DE POTENCIAL ELECTRICO.

$$\frac{W_{i-f}}{q_0} = - \int_i^f \vec{E} \cdot d\vec{l} = V_{i-f} \text{ (Volts)} \quad (6)$$

1.3 MAGNETISMO

Así como en la antigüedad ya se sabía de la propiedad del ámbar de atraer pequeñas partículas al ser frotado con pieles de animal, también alrededor del año 600 A.C., ya se tenía conocimiento del fenómeno del magnetismo. En la ciudad griega de Magnesia existía un mineral ferroso que tenía la propiedad de atraer otras piezas del mismo material. Se le dió el nombre de magnetita por el nombre de esta ciudad.

Fue el mismo Dr. William Gilbert que estudió el fenómeno de la electricidad, el que también hizo estudios sobre el fenómeno magnético.

Una de las primeras características que se observan en una barra de material magnético natural, es que en presencia de pequeñas partículas de mineral de hierro, éstas no son atraídas con la misma fuerza por toda la barra. Se observa que es en los extremos donde se presenta la mayor fuerza. A estos extremos se les llama Polos. Polos magnéticos. También se observó que cuando se suspendía en el aire una barrita magnética con sus dos polos bien definidos, uno apuntaba siempre hacia el norte, y el otro hacia el sur. De ahí que naciera el concepto de polaridad. Se tiene un polo norte (el polo que apunta hacia el norte), y un polo sur (el polo que apunta hacia el sur).

Entre las cosas que se descubrieron de estos polos está el hecho de que los polos iguales se rechazan, y los polos diferentes se atraen (Ley de los polos).

Por otro lado, si se parte una barra magnética con dos polos, uno N y otro S, al quedar separados no se separan los polos, sino que en cada pieza individual nuevamente se tienen dos polos, uno norte y uno sur.

Esto quiere decir que no pueden existir polos aislados. Sin embargo si pueden haber más de dos polos en una misma barra.

Otra propiedad que tienen los materiales magnéticos naturales, es la de poder magnetizar a materiales como el acero. Si una barra de material magnético se pone en contacto por el lado de cualquiera de sus polos con una barra de acero que no esté magnetizada, se observa que después de haber sido tocada, esta barra queda magnetizada y con un polo opuesto al que lo tocó. A este fenómeno que ocurre incluso si las barras no entran en contacto directo, sino que basta que se aproximen lo suficiente, se le llama Inducción Magnética.

1.4 FUENTES DE FUERZA ELECTROMOTRIZ

La electricidad juega un importante papel en la sociedad moderna. Sirve para iluminar casas, calles e industrias. Gracias a ella pueden funcionar todos los motores eléctricos tan indispensables en los aparatos caseros y en las máquinas industriales.

Sin embargo, en la mayoría de sus aplicaciones la electricidad no se usa en forma directa. Es decir, generalmente la energía eléctrica se transforma en otro tipo de energía. Por ejemplo, para hacer funcionar una lavadora, el motor eléctrico convierte la energía eléctrica en energía mecánica, o para encender un foco, la energía eléctrica se convierte en energía calorífica, y ésta a su vez en energía luminica.

Esta electricidad se genera en plantas de energía eléctrica ubicadas lejos de los lugares a los que les da servicio. La electricidad se va generando de acuerdo a la demanda de ésta por medio de generadores eléctricos. Estos funcionan por medio de turbinas o máquinas de combustión interna. El principio básico del funcionamiento de estas máquinas, es la conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

Inmediatamente después de que se genera, es transmitida a los equipos que la requieran. Estos a su vez vuelven a transformar esta energía eléctrica en algún otro tipo de energía (mecánica, calorífica, etc.)

El funcionamiento de los generadores que transforman la energía mecánica en energía eléctrica es posible gracias a los fenómenos electromagnéticos. Cuando un campo magnético se mueve cortando la longitud de un conductor, y en ángulo recto a este, los electrones libres son forzados a irse a un extremo del conductor, haciendo que éste adquiera una carga eléctrica negativa. El otro extremo, por lo tanto, carecerá de electrones, y debido a esto adquirirá una carga eléctrica positiva. El mismo efecto se produce, si en lugar de mover el campo magnético, se mueve al conductor a través de un campo magnético fijo.

Esta diferencia en la carga eléctrica en los dos extremos del conductor es lo que se llama potencial eléctrico o voltaje. Al conectar una carga a los extremos del generador se producirá una corriente eléctrica debido al intercambio de electrones que ocurre, entre la parte que carece de ellos, y la parte que tiene un excedente de ellos, formando un circuito continuo.

Hay varias formas de generar una corriente eléctrica: a) por medios químicos, como en el caso de las baterías, en donde ocurre una reacción química continua entre dos electrodos y un electrolito; b) por medio de luz incidiendo en ciertos materiales como el selenio y el cesio (celdas fotoeléctricas); c) por el calentamiento de pares de materiales distintos, como el cobre y el acero (par termoeléctrico), que al

ser calentados se genera una corriente a través de ellos.

Desgraciadamente con estos métodos no se alcanza a proporcionar la energía necesaria que requieren suministrar los grandes sistemas de abastecimiento de energía eléctrica. Estos usan exclusivamente los generadores eléctricos.

La mayoría de los generadores eléctricos que se usan en las plantas generadoras son del tipo alterno. El campo magnético se produce por medio de conductores arrollados alrededor de núcleos de acero suave. El arreglo de estos conductores arrollados en núcleos -el Campo- se monta sobre una flecha. Cuando ésta gira, el campo magnético atraviesa los conductores generadores, que van montados en una estructura estacionaria llamada armadura.

Los generadores trifásicos tienen montados tres juegos de conductores y a través de ellos se establece el mismo voltaje, pero diferentes en fase.

Las fuentes de energía para estos generadores tienen algo en común. Todos convierten en energía mecánica, algún otro tipo de energía, como la energía química que se encuentra en todo tipo de combustible, o la energía cinética de las caídas de agua, o la energía calorífica del sol.

Los combustibles típicos son el carbón, el petróleo, el gas, la madera, etc. Hay combustibles nucleares como el uranio y el plutonio. Pero las fuentes principales de energía provienen de las caídas de agua. Cataratas, ríos y las olas del océano son los principales ejemplos.

Las principales plantas de generación de electricidad son: Las de vapor, las nucleares, las de máquinas de combustión interna, las de turbinas de gas y las hidroeléctricas.

En las plantas de vapor se convierte la energía calorífica en la energía mecánica que se requiere para mover las flechas de los generadores eléctricos. Las estaciones de vapor pueden funcionar en base a cualquier combustible químico. De hecho pueden utilizar cualquier fuente de energía que produzca calor. El calor se usa para convertir el agua en vapor, que será el que mueva a las turbinas de vapor, que a su vez moverán las flechas de los generadores eléctricos.

En las plantas nucleares, el calor es producido por fisión nuclear del uranio o plutonio. Este calor se aplica a un fluido, que puede ser agua a alta presión dentro de un sistema cerrado. En este sistema se convierte el agua en vapor y el vapor finalmente moverá a una turbina.

En las plantas con máquinas de combustión interna (básicamente diesel), estas mueven directamente a los generadores.

En las plantas de turbinas de gas, se usan turbinas de gas similares a las máquinas de combustión interna para mover a los generadores.

En las plantas hidroeléctricas, se usa la fuerza del agua en movimiento para mover las turbinas que accionan a los generadores de electricidad.

1.5 RESISTENCIA, CAPACITANCIA E INDUCTANCIA

Existen tres propiedades básicas de todo circuito eléctrico: Resistencia, Inductancia y Capacitancia.

La resistencia eléctrica es una propiedad de la materia que crea una oposición al paso de la carga eléctrica (corriente eléctrica) a través de material. Hay una enorme relación entre el número de electrones libres en un material y su resistencia. Si un material posee muchos electrones libres, tiene poca resistencia y es un buen conductor. Si tiene muy pocos electrones o no tiene electrones libres es un aislante. La resistencia se mide en ohms, y la resistencia de cualquier conductor es proporcional a su longitud e inversamente proporcional al área transversal. Los conductores largos tienen más resistencia que los conductores cortos del mismo calibre, por ejemplo. La temperatura afecta la resistencia. Cuando aumenta la temperatura aumenta la resistencia y viceversa.

La resistencia de cualquier material puede calcularse con la fórmula $R = K (L/A)$, donde R es la resistencia (en ohms), L la longitud (en pies), y A es el área transversal en (mils circulares). K es la constante de permitividad y depende del material. Esta ecuación es válida a 20 °C.

Si uno quiere introducir una cierta cantidad de resistencia en un circuito, se usa un Resistor (Fig. 1.6).

Una ecuación muy importante para los circuitos eléctricos, en donde aparecen relacionadas la corriente, el voltaje y la resistencia, es la ley de Ohm: $I = E / R$, donde I es la corriente, R es la resistencia y E es la fuerza electromotriz (fem) del circuito.

La inductancia, o auto-inductancia, es una propiedad de todo circuito eléctrico, y se opone a cualquier cambio en la corriente eléctrica que pasa por el circuito. Esta propiedad por sí misma es muy pequeña en los circuitos, así que si se quiere introducir una cantidad mayor de inductancia se deberá introducir un Inductor. Un inductor es un alambre enrollado en forma de bobina. La inductancia se mide en henrios, y su símbolo es una L (Fig. 1.6).

La inductancia se opone al cambio de la corriente al generar una fuerza contraelectromotriz. Si cambia la fuerza electromotriz original, según la ley de ohm también la corriente debe cambiar. Pero en el momento que la corriente intenta cambiar, se induce un voltaje en la inductancia del circuito, con magnitud igual a la del cambio de fem y de polaridad opuesta. Esta fuerza contraelectromotriz cancela a la del cambio de la fem original, y así se opone a cualquier cambio de corriente. Esta oposición no dura mucho y finalmente sí cambia la corriente hasta cumplir con la ley de ohm.

La fuerza contraelectromotriz aparece por que cuando la corriente pasa por el inductor, se forma un campo magnético alrededor del inductor. Este campo aumenta y se "sale" si la

corriente aumenta, y disminuye y se "mete" si la corriente disminuye. Y si un conductor se coloca en un campo magnético, y se mueve cualquiera de los dos, el conductor corta las líneas de flujo del campo. Este movimiento hace que aparezca un voltaje inducido a través del conductor. Esta es la fuerza contraelectromotriz, y se calcula mediante la ecuación:

$e = - L di / dt$. Donde e es el voltaje inducido, di/dt es la razón de cambio de la corriente en amperes por segundo, y L es el coeficiente de autoinducción o inductancia en henrios.

La energía almacenada se calcula mediante la ecuación:

$W = 1/2 L i^2$, donde W es la energía en Joules, L es la inductancia en henrios e i es la corriente inducida en amperes.

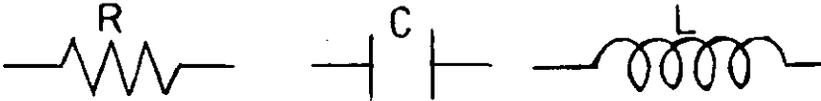


Fig. 1.6

La capacitancia, como la inductancia, es una propiedad de todo circuito eléctrico. La capacitancia se opone a cualquier cambio de voltaje a través de un circuito. Y aunque se encuentra en todos los circuitos, en general es muy pequeña y puede ser incrementada agregando un Capacitor. La Capacitancia no hace que el voltaje deje de cambiar, simplemente se opone a ello y provoca que esto ocurra en un cierto tiempo. La capacitancia se mide en faradios. Su símbolo es una C (Fig.1.6).

Un capacitor está formado por dos placas conductoras, separadas por un aislante o dieléctrico. Los dieléctricos pueden ser de mica, papel, vidrio, etc.

La capacitancia presentada por un capacitor es directamente proporcional al área de la placa e inversamente proporcional al grosor del dieléctrico. El tipo de dieléctrico también afecta el valor del capacitor.

La carga de un capacitor, la diferencia de potencial y la capacitancia están relacionados por la ecuación: $Q = CV$, donde Q es la carga del capacitor en coulombs, V es la diferencia de potencial entre las placas en volts (V), y C es la capacitancia en faradios.

Otras relaciones importantes entre la corriente, la capacitancia y la razón de cambio de voltaje en un circuito es: $i = C dv/dt$, o $V = 1/C \int i dt$, donde i es la corriente, C es la capacitancia y V es el voltaje. La cantidad de energía almacenada en un capacitor se puede encontrar mediante la ecuación: $W = 1/2 C V^2$, donde W es la energía en Joules, C es la capacitancia en faradios y V es la diferencia de potencial a través del capacitor en volts.

1.6 CORRIENTE ELECTRICA

La corriente eléctrica es el paso de la electricidad debido al movimiento de los electrones cargados negativamente a través de un conductor, y se mide en amperes.

La cantidad de corriente en un conductor es proporcional a la cantidad de carga que pasa por el conductor. El número de cargas negativas unitarias (electrones) que pasan por un punto dado en un segundo, es igual a la corriente del circuito. En forma matemática se tiene: $I = Q/T$, donde I es la corriente en amperes, Q es la cantidad de carga que pasa por un punto dado en un conductor, en coulombs, y T es el lapso de tiempo durante el que la carga se mueve por un mismo punto, en segundos.

Un ampere de corriente es igual a un coulomb de electricidad, que circula por un punto dado en un segundo. Un coulomb es igual a 6×10^{18} electrones. Un electrón tiene una carga negativa de 1.6×10^{-19} coulombs.

En un conductor se puede establecer una corriente eléctrica al aplicarle entre sus extremos una fuerza externa o voltaje. Este voltaje hace que los electrones libres que se encuentran en el conductor se empiecen a "desplazar" en una sola dirección. Estos electrones no pueden viajar muy lejos antes de chocar con otros electrones que a su vez chocan con otros. Este proceso se lleva a cabo a lo largo de todo el conductor, hasta que al final de éste algunos electrones libres se amontonan o salen del conductor. Es importante notar que cada electrón del conductor sólo se mueve a una pequeña distancia, pero la perturbación que causa el voltaje aplicado a éste, viaja a lo largo del conductor a la velocidad de la luz.

Básicamente hay tres tipos de corriente: corriente directa, corriente alterna, y corriente directa pulsante. La corriente directa viaja en una sola dirección. La corriente alterna, cambia su dirección y la corriente directa pulsante siempre tiene una misma dirección, pero la cantidad de corriente puede variar periódicamente.

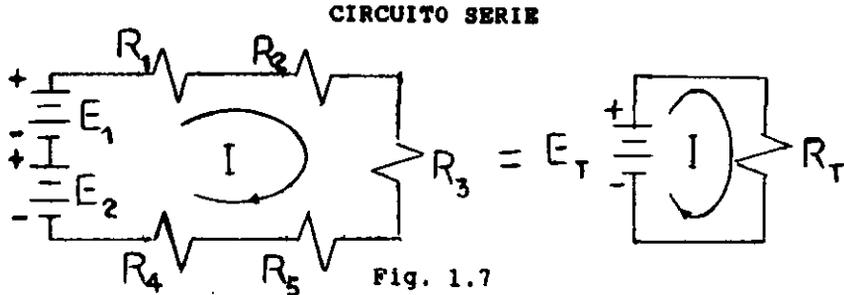
Entre los efectos más importantes que produce una corriente eléctrica al pasar por un conductor, hay dos muy importantes: a) un efecto térmico o calorífico, que es causado en parte por la colisión entre electrones, y en parte por la fricción subatómica que se produce entre electrones y átomos. La energía que se gasta en estos procesos es lo que calienta al conductor.

El otro efecto importante, es el efecto magnético. Siempre que hay una corriente circulando por un conductor se crea un campo magnético alrededor de éste. La fuerza de este campo es directamente proporcional a la corriente que circula por el conductor.

1.7 CIRCUITOS

Un circuito eléctrico es el camino o paso que siguen las cargas negativas (electrones) conforme viajan de la terminal negativa de una fuerza electromotriz, a través de un conductor y de regreso a la terminal positiva de la fuente. Ver la Fig. 1.7.

A continuación se ilustran algunos circuitos eléctricos básicos junto con las leyes que los rigen, y algunos teoremas de importancia.



Las ecuaciones que rigen este circuito son:

$$I = \frac{E_T}{R_T} ; E_T = E_1 + E_2 ; R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

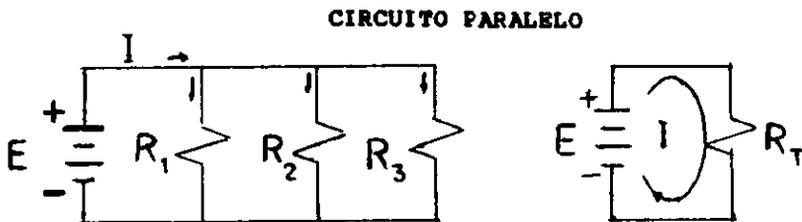


Fig. 1.8

Ecuaciones que rigen este circuito:

$$R_T = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3} ; I = \frac{E}{R_T} \quad \text{Ley de Ohm}$$

CIRCUITOS CAPACITIVOS SERIE Y PARALELO

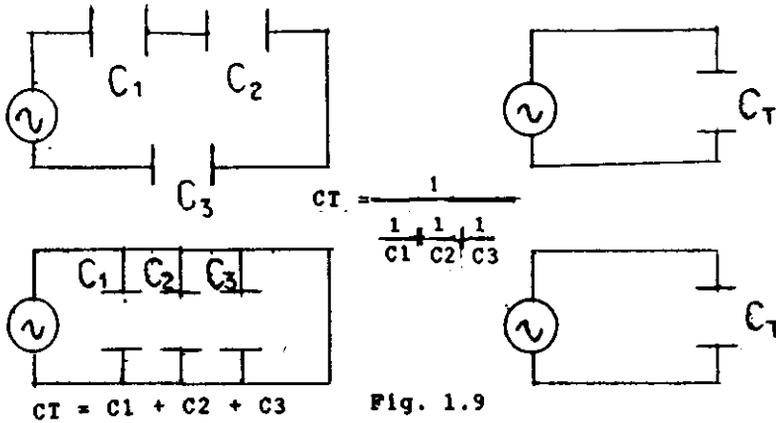


Fig. 1.9

PRINCIPIO DE SUPERPOSICION

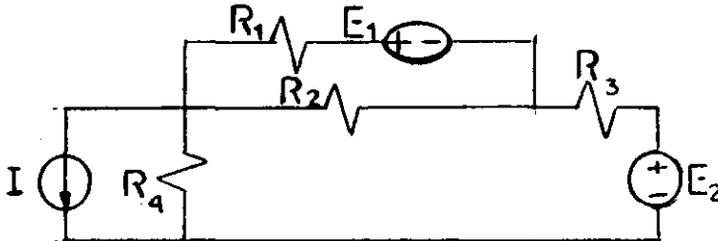


Fig. 1.18

Principio de Superposición

En cualquier circuito que contenga varias fuentes, el voltaje entre terminales, o la corriente a través de cualquier resistencia o fuente, se puede calcular sumando algebraicamente todos los voltajes o corrientes individuales causados por las fuentes independientes separadas, actuando individualmente, es decir, con todas las demás fuentes independientes de voltaje sustituidos por cortos circuitos y con todas las demás fuentes independientes de corriente sustituidas por circuitos abiertos.

DIVISOR DE CORRIENTE

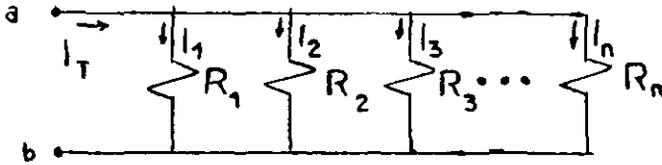


Fig. 1.11

$V_{a-b} = V_{R_1} = V_{R_2} = V_{R_3} \dots V_{R_n}$ por estar en paralelo

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

$$I_1 = \frac{V_{R_1}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V_{R_2}}{R_2} \dots I_{R_n} = \frac{V_{R_n}}{R_n}$$

$$I_T = \frac{V_{a-b}}{R_1} + \frac{V_{a-b}}{R_2} + \frac{V_{a-b}}{R_3} + \dots + \frac{V_{a-b}}{R_n}$$

$$I_T = V_{a-b} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right]$$

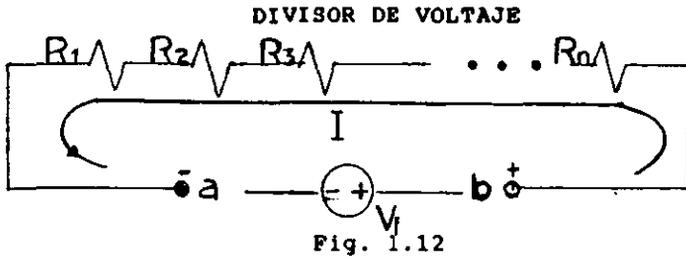
Particularizando

$$I_{R_j} = \frac{V_{R_j}}{R_j} ; j = 1, 2, 3, \dots, n.$$

$$V_{a-b} = \frac{I_T}{\left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right]}$$

$$V_{R_j} = V_{a-b}$$

$$I_{R_j} = \frac{V_{a-b}}{R_j} = \frac{1}{R_j} \left[\frac{I_T}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \right]$$



Para un circuito serie simple

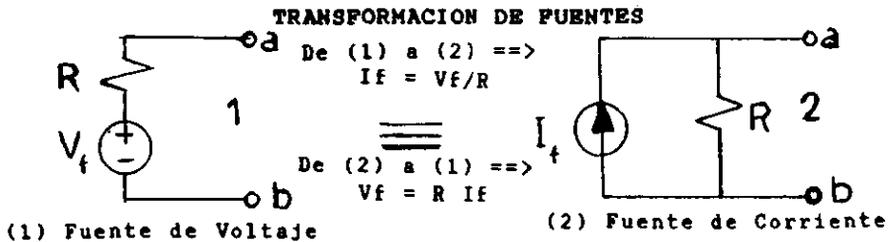
$$I = \frac{\sum V}{\sum R} \Rightarrow I = \frac{V_f}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}$$

$$I_{R_1} = I_{R_2} = \dots = I_{R_n} = I \text{ por estar en serie}$$

$$V_{R_j} = R_j I_{R_j} ; j = 1, 2, \dots, n.$$

$$I_{R_j} = I$$

$$V_{R_j} = R_j \left[\frac{V_f}{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n} \right]$$



TEOREMA DE THEVENIN

Una red activa con resistencias que contenga una o más fuentes de voltaje o corriente puede reemplazarse por una fuente única de voltaje, y una resistencia en serie. (El voltaje se llama voltaje equivalente de Thevenin).

Procedimiento

1. Se encuentra la resistencia equivalente entre a y b, eliminando las fuentes activas. (Las fuentes de voltaje se e-

liminan con un corto circuito, y las fuentes de corriente con un circuito abierto).

2. Se encuentra el voltaje equivalente entre los puntos a y b (a circuito abierto).

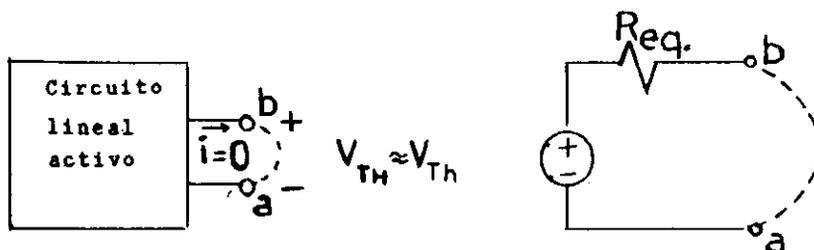


Fig. 1.14

TEOREMA DE NORTON

Una red activa con resistencias que contenga una o más fuentes de voltaje o corriente puede reemplazarse por una fuente única de corriente y una resistencia en paralelo.



Fig. 1.15

Procedimiento:

1. Se encuentra la resistencia equivalente entre los puntos de interés. Anulando fuentes.

2. Se encuentra la corriente de Norton, I_N , con un corto circuito entre los puntos de interés.

1.8 ECUACIONES DE MAXWELL

El trabajo experimental del inglés Michael Faraday le dio un gran impulso a la ciencia de la electricidad y el magnetismo, pero fue el trabajo matemático de James Clerk Maxwell, el que llevó a la Teoría electromagnética a su máximo esplendor y madurez.

Maxwell se propuso la tarea de traducir todas las investigaciones físicas de Faraday a un lenguaje matemático.

Lo primero que hizo fue escribir en forma matemática precisa cuatro leyes clave del electromagnetismo.

La primer ley no es más que una reformulación de la Ley de Coulomb, pero en lugar de describir la fuerza ejercida por una carga eléctrica sobre otra, Maxwell expresó en forma cuantitativa el campo que cualquier carga eléctrica crea en el espacio alrededor de sí misma:

$$\epsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = q$$

Ley de Gauss para la electricidad.
Relaciona y describe a la carga y el campo eléctrico.

La segunda ecuación de Maxwell estipula una situación análoga con respecto a los polos magnéticos:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

Ley de Gauss para el magnetismo.
Describe el campo magnético.

La tercer ecuación relaciona a las corrientes eléctricas y a los campos magnéticos. Oersted y Ampere habían demostrado que un campo magnético acompaña a una corriente eléctrica en un conductor y lo rodea.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (\epsilon_0 d\phi E / dt + i) \quad \text{Ley de Ampere extendida por Maxwell.}$$

Describe el efecto magnético de un campo eléctrico en movimiento o de una corriente.

La cuarta ecuación describe el comportamiento matemático de la inducción electromagnética:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - d\phi_B / dt \quad \text{Ley de Inducción de Faraday.}$$

Describe el efecto eléctrico de un campo magnético cambiante.

Pero estas no son las únicas formas de expresar las ecuaciones de Maxwell. Si se utiliza el cálculo vectorial se pueden deducir las 4 ecuaciones de Maxwell tanto en forma diferencial como integral. Pero en esencia todas nos dicen lo mismo.

FORMA INTEGRAL DE LAS ECUACIONES DE MAXWELL

1. Ley de Gauss para campos eléctricos

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho dV$$

2. Ley de Gauss para campos magnéticos

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

3. Ley de Ampère

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$$

4. Ley de inducción de Faraday

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s}$$

FORMA PUNTUAL O DIFERENCIAL DE LAS ECUACIONES DE MAXWELL

1. Ley de Gauss para campos eléctricos

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

2. Ley de Gauss para campos magnéticos

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

3. Ley de Ampere

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

4. Ley de Faraday

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Donde

$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ = vector de desplazamiento eléctrico

$\vec{H} = \vec{B} / \mu$ = vector de intensidad magnética

Deducción de las Ecuaciones de Maxwell

Ley de Inducción Electromagnética de Faraday

Esta ley establece que todo circuito que eslabone un flujo magnético, inducirá en él una corriente eléctrica como consecuencia de una fuerza electromotriz inducida (fig. 1.16)

En forma matemática se tiene que

$$v(t) = -N \frac{d\Phi_B(t)}{dt} \quad [V] \quad (5)$$

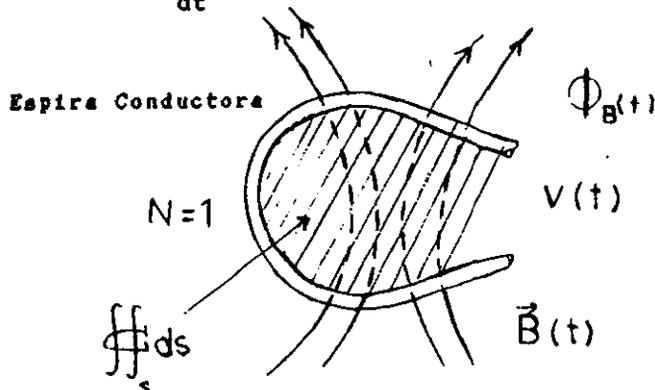


Fig. 1.16

Donde:

Φ_B = flujo magnético

$$\Phi_B = \iint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad [\text{Weber, Wb}] \quad (6)$$

\vec{B} = campo magnético (se representa por líneas de fuerza)

$\iint_s ds$ = Superficie abierta

También se puede considerar el caso para una superficie cerrada (fig. 1.17).

Para esta caso

$$\Phi_B = \iint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \text{Ley de Gauss para campos magnéticos} \quad (7)$$

Esta ley indica que para una superficie hipotética cerrada, el número de líneas del campo \vec{B} que entran, es igual al número de líneas de \vec{B} que salen al considerar dicha superficie.

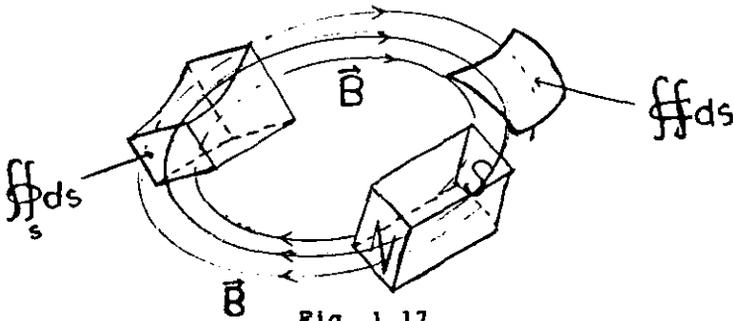


Fig. 1.17

Retomando la ecuación (5) donde

$v(t)$ - la fuerza electromotriz inducida en las terminales del circuito.

N - número de espiras conductoras

$\Phi_B(t)$ - flujo magnético eslabonado por la espira o espiras

$$v(t) = -N \frac{d\Phi_B(t)}{dt} \quad [V]$$

También tenemos que la fuerza electromotriz $v(t)$ se puede expresar como

$$v(t) = -N \frac{d}{dt} \left[\iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \right] \quad [V] \quad (8)$$

$$v(t) = - \iint_S \frac{\partial}{\partial t} \left[\vec{B}(t) \right] \cdot d\vec{S} \quad [V] \quad \text{Ley de Inducción de Faraday} \quad (9)$$

El signo (-) se justifica por la ley de Lenz que dice: "la corriente eléctrica inducida tiene un sentido tal que un campo magnético (inducido) o generado tenga un sentido tal que se oponga al campo magnético original."

De la ley de Faraday siguen muchas aplicaciones importantes: motores, generadores, transformadores, etc.

Ahora, analizando la figura 1.18, y tomando las ecuaciones para $v(t)$, se pueden relacionar el campo eléctrico y el campo magnético

$$v(t) = -N \iint_S \frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad [V] \quad \text{Ley de inducción electromagnética de Faraday} \quad (9)$$

$$v(t) = - \oint_l \vec{E}(t) \cdot d\vec{l} \quad \text{Diferencia de potencial eléctrico} \quad (10)$$

Igualando las ecuaciones (9) y (10)

$$N \iint_S \frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \cdot d\vec{S} = \oint_l \vec{E}(t) \cdot d\vec{l} \quad (11)$$

$$N \underbrace{\iint_S \frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \cdot d\vec{S}}_1 - \underbrace{\oint_l \vec{E}(t) \cdot d\vec{l}}_2 = 0 \quad \text{Ley de inducción electromagnética (forma integral generalizada)} \quad (12)$$

1 - fuerza electromotriz debida al flujo magnético $\Phi_B(t)$

2 - fuerza electromotriz debida al campo eléctrico $\vec{E}(t)$

Y esta es la forma como están relacionadas en la naturaleza el campo eléctrico y el campo magnético.

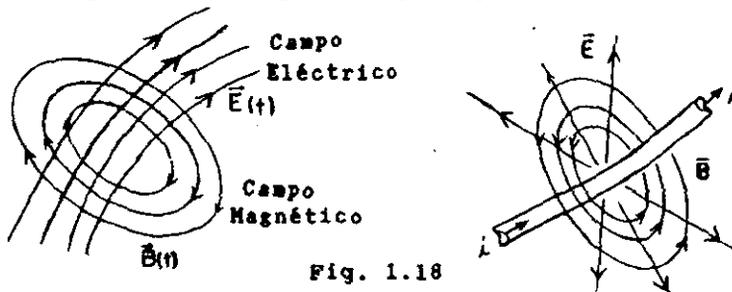


Fig. 1.18

Apoyándonos en los conceptos matemáticos para campos vectoriales y en especial en el Teorema de Stokes que relaciona una superficie cerrada con una superficie abierta de la siguiente forma

$$\oint_l \vec{A} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot d\vec{S} \quad \text{Rotacional} \quad (13)$$

En donde \vec{A} es un campo vectorial cualquiera; $\iint_S d\vec{S}$ es una superficie abierta y $\oint_l d\vec{l}$ es una superficie cerrada, (fig. 1.19).

Se puede llegar a deducir la ley de inducción de Faraday en forma diferencial de la siguiente forma:

Haciendo $\vec{A} = \vec{E}$ se tiene

$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\nabla \times \vec{E}(t)) \cdot d\vec{S} \quad (14)$$

$$N \iint_S \frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \cdot d\vec{S} - \iint_S (\nabla \times \vec{E}(t)) \cdot d\vec{S} = 0 \quad (15)$$

dividiendo ambos términos entre $\iint_S d\vec{S}$ finalmente se tiene

$$\nabla \times \vec{E}(t) = -\frac{\partial \vec{B}(t)}{\partial t} \quad (16)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(t) = \frac{\rho(t)}{\epsilon_0} \quad (17)$$

Y esta es la ley de inducción electromagnética generalizada en forma diferencial. Y se conoce como la Ecuación de Maxwell-Paraday.

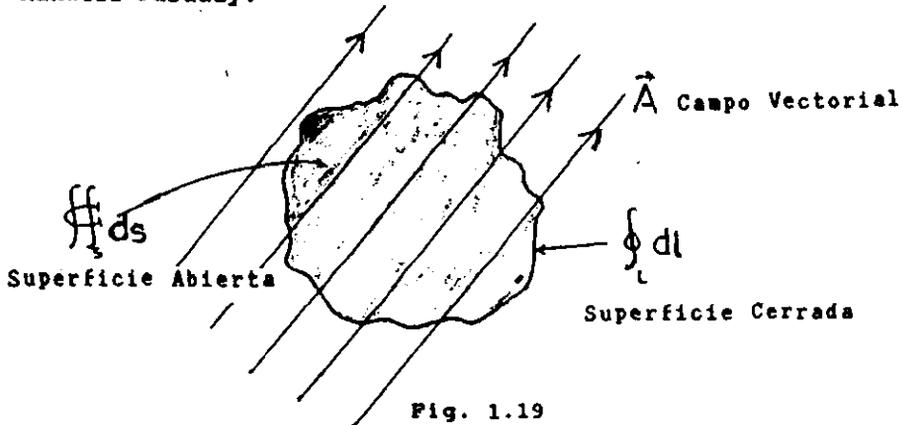


Fig. 1.19

LEY DE GAUSS APLICADA A CAMPOS MAGNETICOS

Retomando la ecuación (7), que es la ley de Gauss para campos magnéticos, y haciendo uso de la herramienta matemática vectorial que brinda el teorema de la divergencia (fig.1.20), y que dice:

$$\iint_S \vec{A} \cdot d\vec{S} = \iiint_V (\nabla \cdot \vec{A}) dV \quad (18)$$

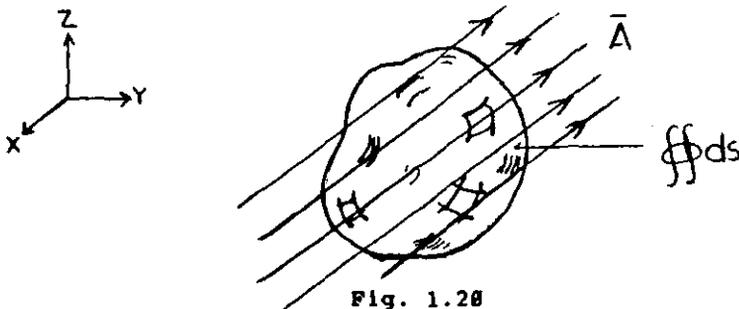


Fig. 1.20

Haciendo $\vec{\lambda} = \vec{B}$ entonces

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = \iiint_V (\nabla \cdot \vec{B}) dv \quad (19)$$

y también se tiene que

$$\phi_B = \iiint_V (\nabla \cdot \vec{B}) dv = 0 \quad (20)$$

dividiendo los términos entre un volumen $\iiint_V dv$, finalmente se tiene que

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ley de Gauss para campos magnéticos} \quad (21)$$

(forma diferencial).
Ecuación Maxwell-Gauss aplicada a campos magnéticos.

LEY DE GAUSS APLICADA A CAMPOS ELECTRICOS

Partiendo del análisis de la fig. 1.21, se tiene que

$$\phi_E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{Q_n}{\epsilon} \quad \text{Ley de Gauss aplicado a campos eléctricos.} \quad (22)$$

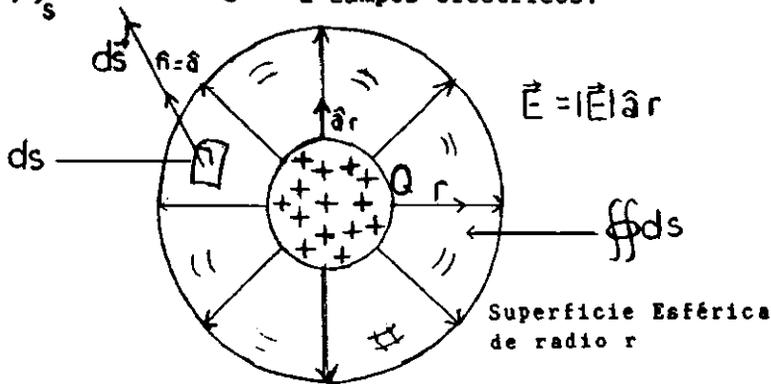


Fig. 1.21

En la fig. 1.21, se toma una superficie esférica imaginaria centrada en un cuerpo cargado Q. El análisis de la figura usando la herramienta matemática vectorial requerida arroja

$$\phi_E = \oint |E| \hat{a}_r \cdot |d\vec{s}| \hat{a}_r \quad (23)$$

donde

$\vec{E} = |\vec{E}| \hat{a}_r$; \hat{a}_r - vector unitario con dirección radial
 $d\vec{S} = |d\vec{S}| \hat{n}$; \hat{n} - vector unitario normal a dS
 como $\hat{a}_r = \hat{n}$ y $\hat{a}_r \cdot \hat{a}_r = 1$ entonces:

$$\Phi_E = \iint_S |\vec{E}| |d\vec{S}| \quad (24)$$

$$\Phi_E = \iint_S E ds \quad (25)$$

Considerando ahora que E sea uniforme, y que el término $\iint_S ds$ representa una superficie esférica de radio " r ", es decir, que $\iint_S ds = 4\pi r^2$ se tiene la nueva ecuación

$$\Phi_E = E(4\pi r^2) \quad (26)$$

y como sabemos que el campo eléctrico E también se da como

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} ; \text{ y en un punto particular } E_p = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2}$$

(N/C), se tiene finalmente sustituyendo en la ecuación (26) que

$$\Phi_E = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} \right) (4\pi r^2) = \frac{Q}{\epsilon} \quad (27)$$

Lo que nos dice la ecuación 27 es que el flujo eléctrico es igual a la carga encerrada por la superficie seleccionada $\iint_S ds$. Así se tiene que

$$\Phi_E = \iint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon} \quad \text{Ley de Gauss aplicado a campos eléctricos (forma integral).} \quad (28)$$

Si ahora introducimos el concepto de densidad volumétrica de carga (ρ_v) y que se define como la razón de la carga del cuerpo al volumen de dicho cuerpo (fig. 1.22), se tiene la relación

$$\rho_v = \frac{Q}{V} \left[\frac{C}{m^3} \right] \quad (29)$$

Del análisis de la fig. 1.22, se tiene la nueva relación

$$\rho_v = \frac{dq}{dv} \quad (30)$$

Despejando dq e integrando la ecuación resultante se

tiene que

$$Q = \int dq = \int \rho_v dv \quad (31)$$

$$Q = \iiint_V \rho_v dv \quad (32)$$

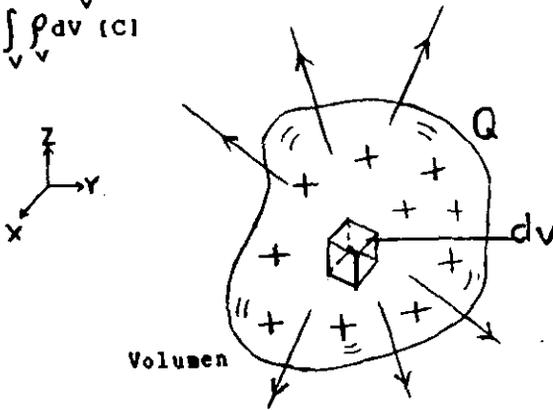


Fig. 1. 22

Sustituyendo la ec. (32), en la ec. (28) se tiene que

$$\Phi_E = \oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon} \left(\iiint_V \rho_v dv \right) \quad (33)$$

Volviendo a utilizar la herramienta matemática del Teorema de la Divergencia, donde

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \iiint_V (\nabla \cdot \vec{E}) dv \quad (34)$$

sustituyendo en (33)

$$\Phi_E = \iiint_V (\nabla \cdot \vec{E}) dv = \frac{1}{\epsilon} \iiint_V \rho_v dv \quad (35)$$

dividiendo ambos términos entre $1/\iiint_V dv$, se llega finalmente a

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon} \rho_v \quad \text{Ley de Gauss aplicado a campos eléctricos (forma diferencial)} \quad (36)$$

Ecuación de Maxwell-Gauss aplicado a campos eléctricos.

LEY DE AMPERE

Para deducir la ley de Ampere se parte del análisis de la fig. 1.23, y de la ley de Biot-Savart que dice

$$dB_{\vec{p}} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \hat{a}_r}{r^2} \left(\frac{\text{Weber}}{\text{metro}^2}, \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \right) \quad (37)$$

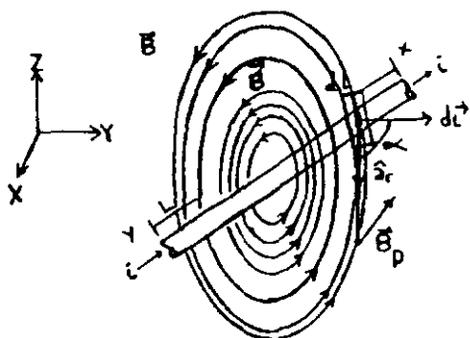


Fig. 1.23

Esta ley fue deducida experimentalmente y sirve para cuantificar campos magnéticos (intensidades de campos magnéticos) en un punto debido a hilos conductores por los cuales fluye corriente eléctrica. Donde

- $d\vec{l}$ - diferencial de longitud, cuya dirección está dada por la corriente.
- r - distancia entre $d\vec{l}$ y P
- \hat{a}_r - vector unitario dirigido desde $d\vec{l}$ hacia el punto P
- i - corriente eléctrica que fluye en el hilo conductor
- μ_0 - constante de permeabilidad magnética para el espacio (o el aire) y vale $4\pi \cdot 10^{-7}$ [Wb/A.m]
- μ - $\mu_r \mu_0$ y es la constante de permeabilidad magnética absoluta
- μ_r - cte. de permeabilidad magnética relativa
- B_p - intensidad de campo magnético

En la ley de Biot-Savart, ec. (37), hay un producto vectorial cuyo significado puede visualizarse mejor si recordamos que en el álgebra vectorial se tienen la siguiente situación:

Si \vec{A} y \vec{B} son vectores, entonces: $\vec{A} \times \vec{B} = \vec{C}$, y físicamente se representa en la fig. 1.24.

Con esto en mente, se puede ver muy bien que según la ley de Biot-Savart

$$\vec{B}_p \perp d\vec{l} \quad \text{y} \quad \vec{B}_p \perp \hat{a}_r$$

También del álgebra vectorial se sabe que

$$\vec{A} \times \vec{B} = \vec{C} \Rightarrow |\vec{A}| |\vec{B}| \operatorname{sen} \alpha = |\vec{C}| \quad (38)$$

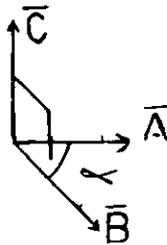


Fig. 1.24

Asociando la ec. (38), con la ec. (37) se tiene

$$|d\vec{B}_p| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{|d\vec{l}| |\hat{a}_r| \operatorname{sen} \alpha}{r^2} \quad (39)$$

y tomando en cuenta que $(|\hat{a}_r| = 1)$ entonces

$$|d\vec{B}_p| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \operatorname{sen} \alpha}{r^2} \quad (40)$$

Esta ecuación sólo representa el valor para un "pequeño" pedazo de la longitud. Para encontrar el valor de toda la longitud finita se va a integrar y queda

$$\vec{B}_p = \int d\vec{B}_p = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \hat{a}_r}{r^2} \quad (41)$$

$$\vec{B}_p = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dl \operatorname{sen} \alpha}{r^2} \quad (42)$$

Para visualizar el uso de las ec. (41) y (42) se va a analizar un problema en particular. En la figura 1.25, se va a considerar un hilo conductor rectilíneo por el cual fluye una corriente eléctrica constante. En este modelo hipotético se va a tomar una diferencial de longitud (dl), un vector $d\vec{l}$ y un vector unitario \hat{a}_r , con un radio r que va de un punto P al $d\vec{l}$.

Si se analiza la figura 1.25.b, se ve que conviene hacer todo el análisis en coordenadas cilíndricas, en donde un punto en el espacio queda definido por el radio, el ángulo y la altura. $P(a, \phi, z)$.

Considerando lo anterior se tiene ahora la ley de Biot-Savart como:

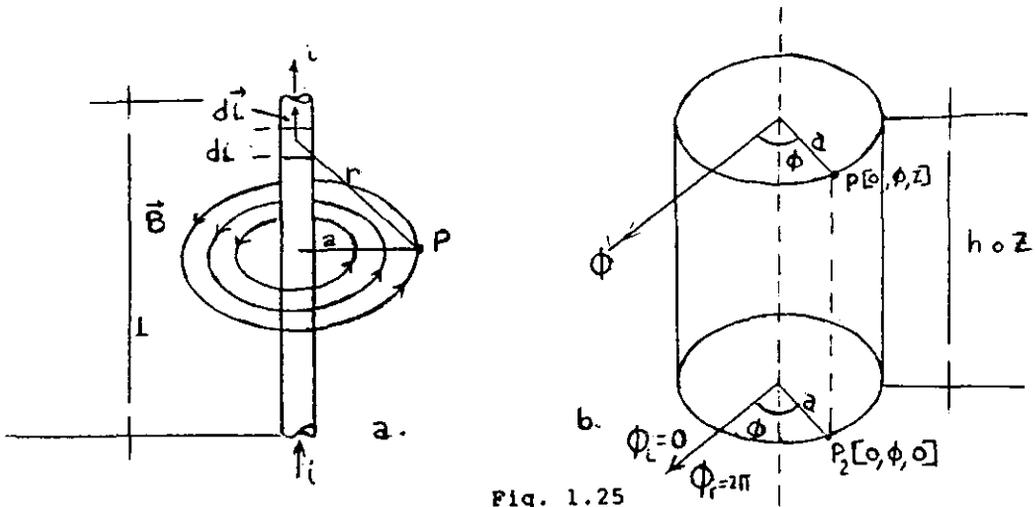


Fig. 1.25

$$\vec{B}_P = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{a}_r}{r^2} \quad \text{donde,}$$

$d\vec{l} = |d\vec{l}| (-\hat{a}_z)$ y $\vec{a}_r = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$; donde \vec{a}_r en coordenadas cilíndricas estaría dado por

$$\vec{a}_r = \frac{|a, \phi, z| - (\theta, \phi, \theta)}{|\text{MODULO}|} \quad (43)$$

$$\vec{a}_r = \frac{a \hat{a}_r + z \hat{a}_z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \quad (44)$$

donde, $r = \sqrt{a^2 + z^2}$, y finalmente la ley Biot-Savart para este problema queda como

$$\vec{B}_P = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{|d\vec{l}| (-\hat{a}_z)}{(\sqrt{a^2 + z^2})^2} \times \frac{a \hat{a}_r + z \hat{a}_z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \quad (45)$$

Procediendo a hacer los productos vectoriales e integrando se tiene

$$\vec{B}_P = \frac{\mu_0 i a}{4\pi a^2} \left(\frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right) \hat{a}_\phi (-a \phi) \quad (46)$$

Si se considera que $a \lll 1$ ($Z \rightarrow +\infty$ y $Z \rightarrow -\infty$), entonces se tiene que

$$\vec{B}_p = \frac{\mu_0 I a}{4\pi a^2} \left(\frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right)_{z=-\infty}^{z=+\infty} (-a\phi) \quad (47)$$

De los elementos de la ec. (47), se puede probar mediante la teoría de límites que

$$\left(\frac{z}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right)_{z=-\infty}^{z=+\infty} = 2$$

con lo que, si y sólo si $a \lll 1$

$$\vec{B}_p = \frac{\mu_0 I a}{4\pi a^2} (2) (-a\phi) \quad (48)$$

$$\vec{B}_p = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} (-a\phi) \left(\frac{wb}{m^2} \right) \quad (49)$$

Ahora se va a introducir el concepto vectorial de la circulación de un campo vectorial C (fig. 1.26), y que se evalúa de la siguiente manera:

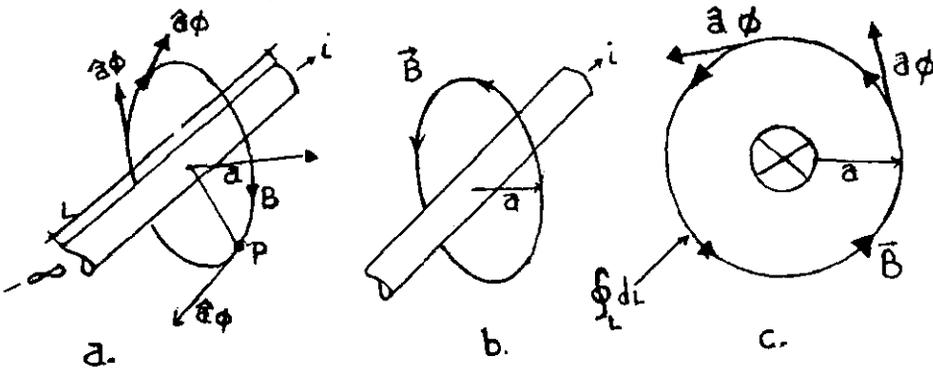


Fig. 1.26

$$C_A = \oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (50)$$

donde L
 \vec{A} - campo vectorial
 $\oint_L d\vec{l}$ - integral de línea cerrada
 Si ahora se hace $\vec{A} = \vec{B} \implies$

$$C_B = \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad \text{Circulación del campo magnético} \quad (51)$$

Según la figura 1.26, se puede hacer el producto escalar $\vec{B} \cdot d\vec{l}$ considerando las siguientes relaciones:

$$\vec{B} = |\vec{B}| a \phi$$

$$d\vec{l} = |d\vec{l}| a \phi$$

$$C_B = \oint |\vec{B}| a \phi \cdot |d\vec{l}| a \phi \quad (52)$$

$$\text{como } a \phi \cdot a \phi = 1 \implies$$

$$C_B = \oint |\vec{B}| |d\vec{l}| ; |\vec{B}| \text{ es una constante } \implies$$

$$C_B = B \oint dl \quad (53)$$

Para $l \gg a$; $B_p = \frac{\mu_0 i}{2\pi a}$ que ya se obtuvo antes, y la

$\oint dl$ representa una circunferencia de radio "a" = $2\pi a$. Entonces se puede reescribir la ec. (51), que representa la circulación de campo como:

$$C_B = \frac{\mu_0 i (2\pi a)}{2\pi a} = \mu_0 i \quad (54)$$

Igualando las ecuaciones (51) y (54) se tiene

$$C_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad (55)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i \quad \text{Ley de Ampere} \quad (56)$$

Ahora bien, si se considera el concepto de Densidad de corriente eléctrica que está definido como

$$\vec{J} = \frac{di}{dS} \quad (57)$$

se puede definir la corriente i en otros términos como:

$$i = \int di = \int \vec{J} \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (58)$$

La ecuación (57) puede quedar expresada ahora como:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad \text{Ley de Ampere en forma integral} \quad (59)$$

Nuevamente, si se utiliza la herramienta matemática que ofrece el Teorema de Stokes, en el que se señala que

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\nabla \times \vec{B}) \cdot d\vec{S}$$

entonces la ecuación (60) se transforma en

$$\iint_S (\nabla \times \vec{B}) \cdot d\vec{S} = \mu \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (60)$$

y dividiendo ambos miembros entre $\iint_S d\vec{S}$ nos queda

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad \text{Forma diferencial de la Ley de Ampere} \quad (61)$$

que es válida para corrientes de conducción (flujos de electrones libres en materiales conductores).

Finalmente Maxwell generalizó estas leyes de Ampere al considerar y descubrir matemáticamente un tipo de corriente de la que Ampere no se percató, y que no se debe a los electrones libres de los conductores, sino a un campo eléctrico variable en el tiempo. Esta corriente se denomina corriente de desplazamiento.

Entonces Maxwell incluyó esta corriente de desplazamiento en la ecuación (60), quedando:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \mu \iint_S \left(\frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \quad (62)$$

corriente de conducción
corriente de desplazamiento

$$\text{en donde } i_D(t) = \epsilon A \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} \quad (63)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{i_D(t)}{A} &= \vec{J}_D \\ \vec{J}_D &= \epsilon \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Densidad de} \\ \text{corriente de} \\ \text{desplazamiento} \end{array}$$

Y la forma diferencial de la ecuación (62) queda:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J}_c + \epsilon \frac{\partial \vec{E}(t)}{\partial t} \quad \text{Ley de Ampere generalizada (ley Maxwell-Ampere)} \quad (64)$$

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS DE OPTICA

2.1 ONDAS ELECTROMAGNETICAS

Desde la antigüedad ya se hacían las preguntas; ¿qué es la luz?, ¿cómo es que vemos? Los griegos, y en particular los que seguían la escuela de Pitágoras, pensaban que la visión se debía a partículas que salían de los ojos y caían en los objetos. Los seguidores de la escuela de Platón pensaban que la visión se debía a una interacción entre los rayos emitidos por el sol, o cualquier otra forma de luz, el objeto visto y el ojo. Aristóteles decía que los colores eran mezclas de luz y oscuridad. Entre los árabes, Alhazan, quien era una autoridad en óptica, sostenía que la forma del objeto observado pasaba a través del ojo y sufría una transmutación debido a lentes.

Fue en el siglo XVIII cuando la óptica (la ciencia de la luz y de la visión) empezó a estudiarse más que nunca, y con ideas mucho más exactas. También en esta época empezaron a tratar de medir la velocidad de la luz.

Surgieron dos Teorías importantes que trataban de explicar la naturaleza de la luz. Una proponía que la luz se propagaba en ondas como el sonido, y de ahí su nombre de Teoría Ondulatoria, del latín "unda" que significa onda.

La otra teoría, llamada teoría de la emisión, supone que la luz está formada de cuerpos luminosos que son reflejados o refractados (doblados) por otros objetos.

Los primeros en ver la luz como un fenómeno ondulatorio fueron Leonardo da Vinci y Galileo. Otro italiano que visualizó la luz como un fenómeno de ondas fue Francesco Maria Grimaldi del siglo XVIII. Este consideraba que la luz, era un fluido capaz de moverse en ondas como cualquier otro fluido. A él se debe el descubrimiento de que la luz que pasa por las orillas de cuerpos opacos muy delgados se desvía, es decir, descubrió la difracción de la luz.

Pero el principal promotor de la teoría ondulatoria de la luz fue el matemático, físico y astrónomo Holandés Christian Huygens (1629 - 95). Este hizo toda una investigación con respecto a la teoría ondulatoria de la luz. Según él, los diferentes puntos de un frente de onda (o cresta de onda) de luz originaba una serie infinitamente numerosa de ondas secundarias. Estas ondas se reforzaban unas a otras después de cierto tiempo y producían un nuevo frente ondulatorio. De este frente se volvían a originar otras ondas secundarias que nuevamente se convertían en otro frente ondulatorio, y así sucesivamente la luz se estaba propagando.

Debido a estas explicaciones de cómo se propaga la luz surgió la inquietante idea de saber cuál era el medio por el que se propagaban estas ondas. No podía ser el aire, puesto que la luz sí se propaga por el vacío. Entonces, Huygens propuso la idea de la existencia del Ether; un medio formado por partículas elásticas que se encargaban de transmitir los impulsos ondulatorios. Este Ether ha sido uno de los conceptos más controvertidos de la ciencia, y aunque ha habido experimentos muy precisos tratando de demostrar su presencia, no se ha podido lograr. De hecho, este concepto del Ether ya ha sido desechado desde hace mucho tiempo.

Isaac Newton fue el gran promotor de la otra teoría de la luz; la teoría de la emisión o corpuscular. Newton pensaba que la luz estaba formada por pequeñas partículas que emanaban de los cuerpos luminosos. Según él, la luz se propagaba en líneas rectas (rayos).

Estas dos teorías siguen prevaleciendo hasta la fecha, sólo que los físicos han encontrado una forma de "convivir" en armonía con las dos. Así, según el fenómeno que estén estudiando, es la teoría que adoptan. Por ejemplo, para explicar los efectos de la refracción y reflexión de la luz, utilizan la teoría corpuscular imaginando pequeñas "cantidades" de luz llamadas "cuantos" y que viajan en líneas rectas. Pero para explicar la Difracción y la Polarización, se supone que la luz es transmitida en forma de ondas electromagnéticas.

En el siglo XIX, Faraday, Maxwell y Hertz lograron demostrar que existe una conexión íntima entre la luz, la electricidad y el magnetismo. Mostraron la existencia de las ondas de radio, y descubrieron que la luz, el calor que irradia un cuerpo y las ondas de radio todas son radiaciones electromagnéticas.

Otros dos personajes importantes del siglo XIX para la teoría ondulatoria, fueron el inglés Young y el francés Fresnel. Young pudo mostrar mediante experimentos, el fenómeno de la interferencia, y con ello pudo demostrar la teoría ondulatoria de la luz.

Young sostenía que se producen bandas de colores debido a la interferencia de dos porciones de luz. Para probar esto hizo el siguiente experimento (Fig. 2.1). Hizo dos pequeños agujeros cercanos del tamaño de la cabeza de un alfiler sobre un cartón. Pasó un haz de luz solar a través de los agujeros y puso otro cartón detrás del primero a manera de pantalla.

Al traslaparse los dos rayos sobre el segundo cartón, su luz se dividió en bandas de luz y franjas oscuras completamente visibles. La conclusión de Young fue que dos series de ondas que salen de dos centros próximos el uno del otro, aparentemente destruyen sus efectos en ciertos puntos y los suman en otros. Con esto Young concluyó que la luz que pasaba por los pequeños agujeros de su experimento viajaban en forma de onda. Las bandas claras indicaban que las ondas de luz

provenientes de los agujeros se reforzaban unas a otras, y en las franjas oscuras las ondas se cancelaban también unas a otras.

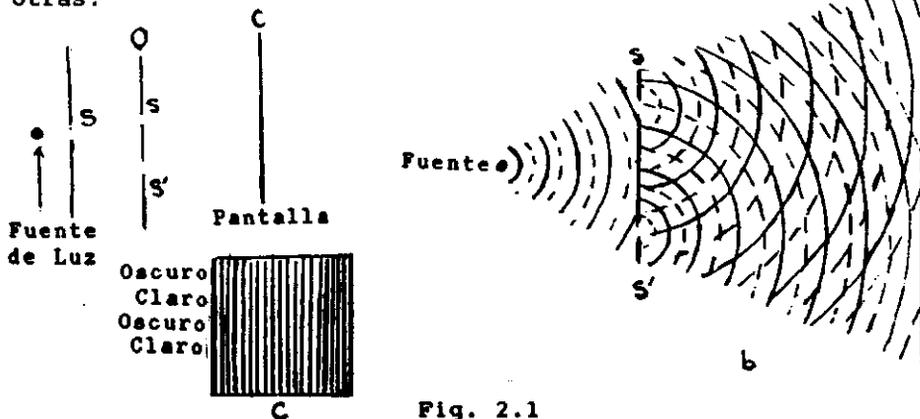


Fig. 2.1

A estas ondas Young les llamó ondulaciones, y sostenía que la luz de cualquier color consiste de "ondulaciones de un cierto ancho", lo que ahora conocemos como longitud de onda. Calculó estos anchos y encontró que el "ancho" de el color rojo era de $1/36,000$ de pulgada, y el violeta $1/60,000$ de pulgada.

Otro personaje importante por sus aportaciones al entendimiento de la naturaleza de la luz, fue el físico francés Augustin Jean Fresnel (1788-1827). Una de las grandes cualidades de este científico era su habilidad matemática y gracias a ella hizo un estudio abstracto de las ondas de luz. También fue un gran experimentador. Precisamente hizo experimentos sobre la polarización de la luz. Según sus experimentos, se podía "polarizar" la luz haciéndola pasar a través de una clase especial de vidrio, de tal forma que sus ondas se movieran solamente en una dirección, y no en forma caótica.

De este experimento Fresnel llegó a una conclusión muy importante: que las ondulaciones de un rayo de luz viajan transversalmente con respecto a la dirección en que viaja la luz. Quiere decir que cuando la luz viaja hacia adelante, por ejemplo la luz de una estrella llegando a nuestros ojos, sus ondulaciones se están moviendo hacia arriba y hacia abajo, más que hacia adelante y hacia atrás.

Aquí cabe mencionar que la luz es la interpretación que hace el cerebro de ciertos tipos y longitudes de onda que inciden sobre la retina del ojo.

Alrededor de 1848 Michael Faraday hizo una contribución muy importante a la teoría de la luz. Cuando estaba experimentando con la polarización plana de la luz y un campo magnético, dio a entender que las ondas de luz podían ser vibra-

ciones transversales viajando a lo largo de la líneas de fuerza eléctrica y magnética. Sus conclusiones estaban basadas en sus observaciones y en su enorme intuición, aunque no en un análisis matemático riguroso, pues él no era matemático.

La tarea de realizar un análisis matemático riguroso la llevó a cabo un gran físico con enorme talento matemático, James Clerk Maxwell.

Este se propuso investigar rigurosamente la idea que estaba sugiriendo Faraday, es decir, que la luz podría ser un fenómeno electromagnético.

Maxwell sostenía que los fenómenos asociados con el magnetismo y la electricidad se debían a la tensión y el movimiento que ocurrían en un medio material llamado Ether. Este medio permitiría el desplazamiento de sus partes. Gracias a estos desplazamientos continuos se podían propagar la electricidad y el magnetismo en el espacio. Así, concluyó que la luz misma (incluyendo otros tipos de radiaciones) es una alteración electromagnética en forma de ondas que se propagan a través del campo electromagnético.

Así es que la intuición de Faraday y el análisis matemático de Maxwell produjeron una teoría que explicaba la luz visible y la radiación de calor, pero faltaba probar que existían otro tipo de radiaciones electromagnéticas como lo predecía la teoría.

Fue el profesor alemán Heinrich Rudolph Hertz, el que demostró que existían tales ondas, y que ahora llevan su nombre; ondas hertzianas u ondas de radio.

Existen otros tipos de radiaciones electromagnéticas. Y todas estas radiaciones en conjunto forman lo que se llama el espectro electromagnético (Fig. 2.2).

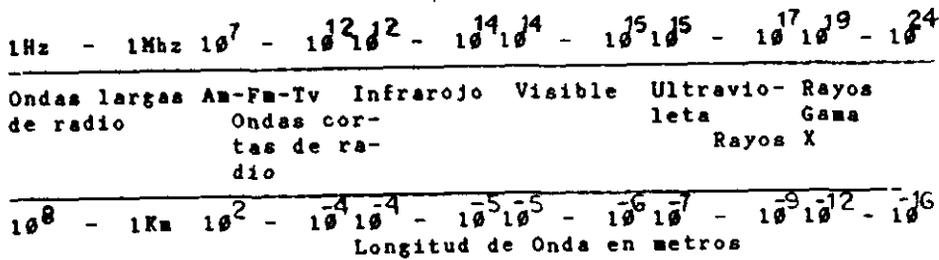


Fig. 2.2 Espectro electromagnético

En este espectro se ven ordenados en forma ascendente con respecto a su longitud de onda, a los rayos gama, rayos X, rayos ultravioleta, luz visible (del violeta al rojo), rayos infrarrojos (calor), y ondas de radio. Todos viajan a la velocidad de la luz: 300,000 Km/seg. Su única diferencia está en su longitud de onda, y por consiguiente, en su frecuencia.

2.2 LA VISION HUMANA

El órgano de la visión es el ojo (fig 2.3). Vemos gracias a que éste es sensible a los rayos de luz. Los rayos luminosos entran por el cristalino a través de la pupila y golpean la parte interna posterior del ojo. En esta parte del ojo -la retina- se encuentran unas células fotosensibles. Estas células se componen de dos tipos básicos: bastones y conos.

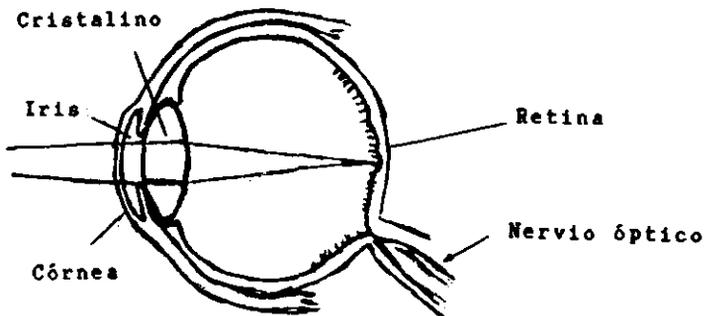


Fig. 2.3 El ojo humano

Los conos se encuentran distribuidos en forma de mosaico a partir del centro de la retina, y es ahí donde se forma la imagen que será transmitida por el nervio óptico hasta el cerebro. Su distribución es más densa en las cercanías del centro de la retina y va disminuyendo conforme se aleja de ella. Gracias a los conos se puede leer y distinguir objetos cercanos, y es sensible al color. A ellos se debe la visión de campo angosto.

Los bastones se encuentran distribuidos en menor densidad y por toda la parte interna del globo ocular. A ellos se debe la visión de campo ancho y de bajos niveles de iluminación.

CARACTERISTICAS DE LA VISION

ADAPTACION

- Capacidad del ojo para ajustarse a la iluminación.
- La adaptación se realiza por medio de las pupilas.
- Para altas iluminaciones se reduce hasta 2 mm.
- Para bajas iluminaciones se abre hasta 8 mm.
- De un lugar iluminado a otro casi oscuro 30 min.
- De un lugar casi a oscuras a iluminado sólo segundos.

ACOMODACION

- La acomodación se efectúa variando la curvatura del cristalino.
- Objetivo cercano, curvatura mayor.
- La acomodación disminuye con la edad por el endurecimiento del cristalino.

CARACTERISTICAS BASICAS DE LA LUZ

- Casi el 80% de las impresiones sensoriales humanas son de orden óptico.
- La luz es la sensación producida por el ojo humano por la incidencia de las ondas electromagnéticas.
- Posee todas las características de las ondas electromagnéticas.
- La longitud de las ondas visibles suele medirse en nanómetros.
- El rango de las ondas visibles oscila entre 380 y 780 nanómetros.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VISION

ILUMINACION

- Tamaño de los detalles a captar.
- Distancia entre el ojo y el objeto.
- Factor de reflexión del objeto observado.
- Tiempo empleado en la observación.
- Mayor dificultad de percepción visual.
- Misma actividad (lectura): niño de 10 años 175 luxes, 40 años 500 luxes, 60 años 2500 luxes.
- 1 lux = 1 lumen / metro cuadrado.

CONTRASTE

- El ojo aprecia diferencias de luminancia (contraste).
- Trabajos de mayor agudeza requieren de un mayor contraste.
- La relación de luminancia en el campo visual no debe ser menor de 1 : 3, ni mayor de 3 : 1.

SOMBRAS

- Los ojos dan la sensación de relieve.
- El relieve se capta por una diferencia de iluminación (sombras).
- Las sombras destacan las formas plásticas de los objetos.
- Las sombras fuertes se consiguen con luz directa.
- Las sombras suaves se consiguen con luz difusa.

DESLUMBRAMIENTO

- Produce molestias y disminución de la capacidad visual.
- Actua sobre la retina.
- Se obtiene deslumbramiento a partir de 45 grados con relación al eje vertical.
- Mayor contraste produce mayor deslumbramiento.

AMBIENTE CROMATICO

- El ambiente cromático son los efectos psicofísicos.
- El ambiente cromático influye en el estado de ánimo.

2.3 EL CONCEPTO DE ONDA

Para poder visualizar y entender bien el comportamiento de muchos fenómenos físicos y en particular los de la óptica, es importante tener muy en claro el concepto de onda y de movimiento ondulatorio. El ejemplo más conocido de un fenómeno de este tipo, es el de una piedra que cae en el centro de un estanque de agua. La forma en que la perturbación que genera la piedra se expande en todas direcciones, desde el punto en donde cayó la piedra, es muy ilustrativo de lo que es una onda y el comportamiento ondulatorio general.

Lo interesante del movimiento ondulatorio, es la forma en que la perturbación original llega hasta los puntos más distantes a ésta. El movimiento que ocurre en la perturbación original de la superficie del agua desde donde cae la piedra, es transferido a los puntos más distantes. Es decir, aquí se está hablando de un movimiento, no del material en sí, sino de un movimiento del cambio en la configuración del material. Y precisamente a este tipo de movimiento, se le conoce como movimiento ondulatorio. Se puede definir una onda como una perturbación que se propaga en un medio continuo.

El concepto de onda es pues, una forma de explicar algunos fenómenos físicos (acústica, óptica, etc.), desde un mismo punto de vista. Si se le quiere conceder el nombre de "fenómeno ondulatorio" a algún fenómeno en particular, tendrá que mostrar las características que presenta toda onda. Entre estas características se pueden mencionar: la reflexión, la refracción, la interferencia, la difracción, la polarización y la dispersión. En las siguientes secciones se van a describir en particular la reflexión, la refracción, la difracción y la polarización del fenómeno de la luz, que es una onda electromagnética.

Otra característica importante con respecto a las ondas, es que éstas se pueden propagar tanto en un plano (agua por ejemplo) como en un espacio tridimensional (luz y sonido).

En el caso de la propagación tridimensional, se necesita entender el concepto de frente de onda para estudiar este tipo de propagación. Un frente de onda se define como aquella superficie en la que todos los puntos tienen la misma fase en el mismo instante.

Y a menudo será conveniente, al estudiar el movimiento ondulatorio, reemplazar los frentes de onda por rayos. Muy en particular con respecto a la reflexión y la refracción.

Cuando empleamos rayos y estamos interesados solamente en la configuración geométrica de éstos, se usa la óptica geométrica. Por otro lado, cuando son problemas en los que intervienen la intensidad y el flujo de energía de las ondas de luz, así como su interferencia, difracción y polarización, se tendrá que considerar el movimiento real de los frentes de onda completos. Y esto es lo que estudia la óptica física.

2.4 REFLEXION Y REFRACCION

La luz viaja en línea recta y si se encuentra en el espacio libre permanecerá imperturbada en su recorrido. Sin embargo, cuando choca con una superficie plana, como un vidrio liso o agua, o atraviesa a este tipo de materiales transparentes, experimentará los fenómenos de la Reflexión y de la Refracción.

En la figura 2.4, se ve el caso en el que un haz de luz golpea una superficie de agua. Al ocurrir esto, una parte de la luz es reflejada y otra es doblada o refractada cuando la luz entra en el agua.

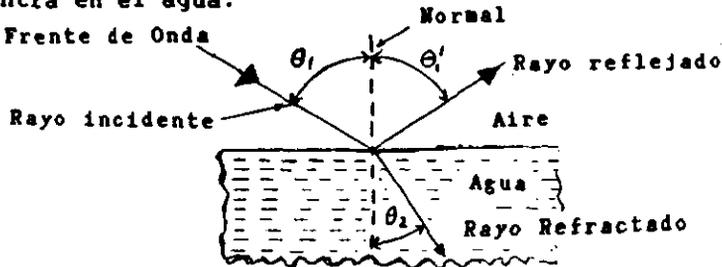


Fig. 2.4

Como se ve en la Fig. 2.4, el haz de luz se representa por medio de un solo rayo incidente, que es paralelo a la dirección de propagación. En este caso estamos hablando de una onda plana cuyos frentes de onda son normales al rayo de incidencia. Los rayos reflejados y refractados también se representan con líneas individuales.

Los ángulos de incidencia (θ_1), de reflexión (θ_1'), y de refracción (θ_2), se miden entre la línea normal a la superficie y los rayos respectivos.

Las leyes que rigen tanto a la reflexión como a la refracción se obtienen experimentalmente y dicen:

1. Los rayos reflejados y refractados se encuentran en el plano que forman el rayo incidente, y la normal a la superficie en el punto de incidencia, es decir, el plano de la figura 2.4.

2. Para la reflexión se tiene que

$$\theta_1' = \theta_1 \quad (1)$$

3. Para la refracción se tiene que

$$\frac{\text{sen} \theta_1}{\text{sen} \theta_2} = n_{21} \quad (2)$$

donde n_2 es una constante denominada constante de índice de refracción del medio 2 con respecto al medio 1.

En la tabla 2.1, se ven algunos índices de refracción para algunas sustancias comunes con respecto a un vacío, para una longitud de onda (luz de sodio) de 589 nm (=5890 Å).

El índice de refracción de un medio con respecto a otro varía generalmente con la longitud de onda.

Algunos índices de refracción
(para una $\lambda = 589\text{nm}$ (=5890Å))

Medio	Índice de Refracción
Agua	1.33
Alcohol etílico	1.36
Bisulfido de Carbono	1.63
Aire (1 atm y 20 °C)	1.0003
Cuarzo fundido	1.46

Tabla 2.1

Reflexión regular y difusa

Vemos todos los objetos que no son luminosos por si mismos (no producen su propia luz) por medio de la luz que es reflejada o esparcida por ellos. La mayoría de las superficies son tan ásperas que la luz reflejada es esparcida en muchas direcciones, la diferencia de intensidad de la luz reflejada en distintas direcciones nos permite tener una idea de la forma del objeto correspondiente. Tal reflexión, que es la más común, se llama difusa. Por otro lado, si la superficie reflejante es muy lisa, podemos obtener lo que se llama reflexión regular, es decir, la superficie actúa como un espejo.

2.5 DIFRACCION Y POLARIZACION

Difracción. Entre los experimentos que se pueden realizar con las ondas de agua en un tanque de ondas, está aquel en el que una onda plana se encuentra con un obstáculo OO' paralelo al frente de onda (fig. 2.5). Uno podría pensar que el obstáculo le permitiría a la onda pasar más allá de la línea OA , y la cortaría completamente en la región que está

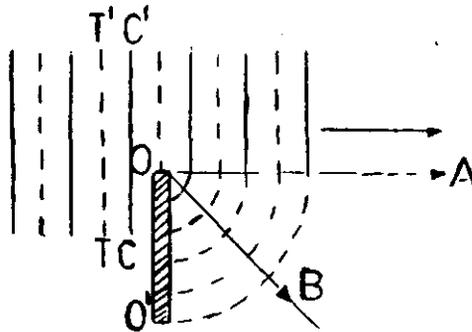


Fig. 2.5

por debajo de la línea OA . Es decir, esperaríamos que el obstáculo produjese algo así como una "sombra" de onda de agua, de tal forma que por debajo de la región AOO' no debería aparecer ninguna perturbación, moviéndose toda la onda como una onda plana más allá del obstáculo. De hecho, esto no sucede. Los experimentos indican que además de las ondas planas en la región que está arriba de la línea OA , hay algunos frentes de ondas circulares en la región que se encuentra por debajo de la línea OA , es decir, existe propagación de ondas en la dirección OB . La onda que avanza actúa como si pudiera curvarse alrededor del obstáculo. Esta habilidad que posee una onda de poderse curvar alrededor de un obstáculo se conoce como Difracción, y es una propiedad sumamente importante de las ondas de todas clases.

La luz es un movimiento ondulatorio, y se han hecho experimentos que demuestran que la luz se curva o dobla alrededor de los obstáculos.

Polarización. Un experimento muy instructivo que se puede hacer con ondas transversales con una cuerda o una manguera flexible de plástico, consiste en hacer pasar la cuerda a través de una ranura angosta hecha en un pliego de cartón (fig. 2.6). Si la dirección longitudinal de la ranura es paralela a la dirección del desplazamiento de la cuerda, el movimiento de la onda pasa fácilmente a través de las ranuras (como, por ejemplo, a través de S1 S2 en la figura).

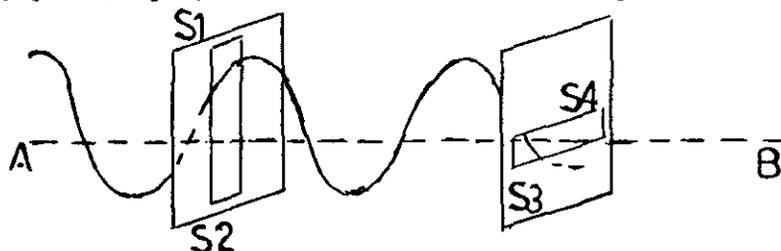


Fig. 2.6

Por otro lado, si la ranura es perpendicular a la dirección de desplazamiento (S3 S4 en la figura), el movimiento de la onda ya no pasa por la ranura. En general, si la ranura se coloca con el ángulo adecuado a la dirección del desplazamiento, sólo la componente del desplazamiento que sea paralela a la ranura pasará. Pero si una onda con una dirección de desplazamiento cambiante o arbitrario se encuentra esa misma ranura, al salir esta onda se ha polarizado, y en este caso en particular se ha polarizado planamente, ya que el desplazamiento ahora yace continuamente en un plano que contiene la dirección de propagación. Evidentemente, una ranura como la que se describió en el ejemplo anterior puede actuar como un polarizador plano para ondas transversales.

Al mismo tiempo si una onda transversal polarizada planamente encuentra una ranura similar, la ranura puede actuar como un analizador de la onda, ya que le permitirá a la onda pasar con su amplitud original sólo en una cierta orientación.

Estos efectos sólo son válidos para las ondas transversales, pues no existen para las ondas longitudinales.

En base a experimentos de este tipo, se ha encontrado que las ondas sonoras son longitudinales (paralelas a la dirección del desplazamiento), y las ondas de luz son transversales (perpendiculares a la dirección de desplazamiento).

La luz en consecuencia es susceptible de ser polarizada.

CAPITULO 3

APLICACIONES DE LOS PRINCIPIOS EN INSTALACIONES ELECTRICAS

Como se vió en el capítulo 1, los conceptos de electricidad y magnetismo pueden estudiarse desde esquemas conceptuales muy abstractos, desde el punto de vista físico matemático, como todo el trabajo hecho por Maxwell. Estos esquemas, a pesar de su abstracción, tienen el poder de ayudarnos a visualizar y a predecir el comportamiento de los fenómenos eléctricos y magnéticos. Además, este esquema conceptual tiene la virtud de poderse transformar en conceptos más prácticos desde el punto de vista del ingeniero electricista. A éste le son más útiles las relaciones directas entre voltajes y corrientes de un circuito, sus relaciones con los parámetros de resistencia, capacitancia e inductancia, que los conceptos más generales de campos eléctricos y campos magnéticos. Es en este tipo de uso de un esquema conceptual más práctico, aunque idealizado, surgido de los esquemas conceptuales más generales, en el que está basada la ciencia de las instalaciones eléctricas.

Los circuitos eléctricos representan precisamente este tipo de esquema práctico que está basado en los principios básicos. Por otro lado, todas las máquinas eléctricas y dispositivos auxiliares llevan en forma intrínseca en su funcionamiento y en su diseño estos mismos principios.

Se va a ver ahora la forma en que se usan los principios básicos en Instalaciones Eléctricas.

En la Figura 3.1, se ve el recorrido de la corriente eléctrica, desde la planta generadora hasta los consumidores domésticos e industriales. Este recorrido ilustra los puntos en donde se requerirá de una instalación eléctrica.

El recorrido de la corriente eléctrica empieza desde las plantas de fuerza electromotriz, por ejemplo una planta de vapor, en donde la fuerza del vapor va a mover unas turbinas que accionarán un generador eléctrico. Antes de ser transmitida la corriente generada, su voltaje es elevado por medio de transformadores elevadores. De ahí se manda generalmente a una subestación a través de las líneas de transmisión montadas en postes a una gran altura. La línea de transmisión puede llegar directamente a una planta industrial grande, o puede llegar a una subestación en donde el gran voltaje se reduce por medio de transformadores reductores. De la subestación se manda la corriente a tiendas, oficinas y hogares mediante cables que van colgados en postes, o van en forma subterránea. Ya dentro de las industrias, o en las casas, la corriente sirve para accionar todo tipo de motores eléctricos que se encuentran en máquinas y aparatos domésticos, generar luz y

calor, entre sus usos más importantes.

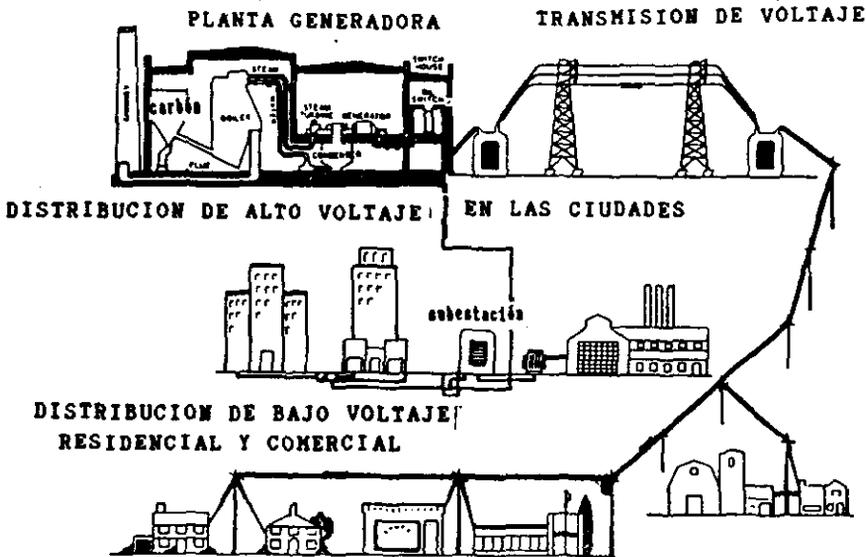


Fig. 3.1

De la teoría de circuitos se toman las configuraciones y las ecuaciones o leyes eléctricas necesarias para realizar una instalación eléctrica eficiente y segura.

En la Fig. 3.2 se presenta el circuito eléctrico básico con las cuatro partes fundamentales de toda instalación eléctrica.

1. Una fuente de energía eléctrica encargada de hacer fluir una corriente eléctrica a través del circuito.
2. Conductores por los que circulan los electrones de la corriente por todo el circuito.
3. Una carga, a la que se va a suministrar la energía.
4. Un dispositivo de control que permita conectar y desconectar el circuito en el momento que se desee.

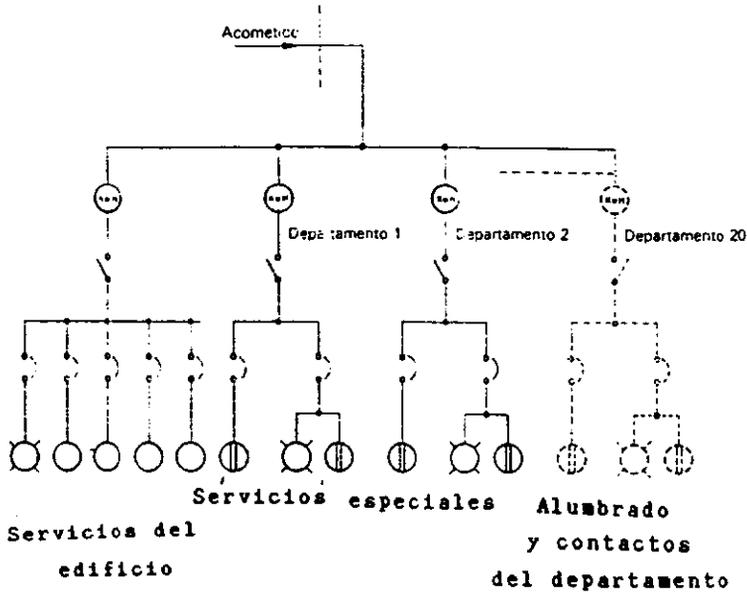


Fig. 3.4 Diagrama unifilar simplificado

Además del uso de los principios básicos de la teoría de circuitos en las instalaciones eléctricas, también es muy importante tomar en cuenta, que los principios de la teoría electromagnética se encuentran intrínsecamente en el diseño y construcción de las máquinas eléctricas. Una instalación eléctrica bien proyectada requiere un conocimiento más allá de lo superficial de estas máquinas. El conocer los principios en que se basan todas estas máquinas ayuda a adquirir una mayor destreza en su conexión y control.

A continuación se describen los principios en los que están basados el generador eléctrico, el motor eléctrico, los transformadores y los solenoides. Todos ellos miembros muy importantes de una instalación eléctrica industrial.

El Generador Eléctrico. El principio básico para la generación de una FEM (fuerza electromotriz) en un generador de c.a. o alternador es el mismo que el de un generador de c.d. La generación de una fem en el conductor de una armadura depende solamente de un movimiento relativo entre el conductor y el campo magnético. Se pueden tener dos tipos de construcciones. El campo magnético puede ser estacionario y la arma-

dura puede girar. En este caso, el campo magnético se llama "estator" y la armadura se llama "rotor". O, el campo magnético puede girar, y la armadura puede ser estacionaria, en cuyo caso el campo magnético recibe el nombre de rotor y la armadura se llama estator.

En casi todos los generadores de CD, el campo es estacionario y la armadura es giratoria. Pero en casi todos los generadores de CA, la armadura es estacionaria y el campo es el que gira.

La figura 3.5 muestra un dibujo simplificado de un generador de CA. Las características básicas de este generador son compartidas por todos los generadores de CA.

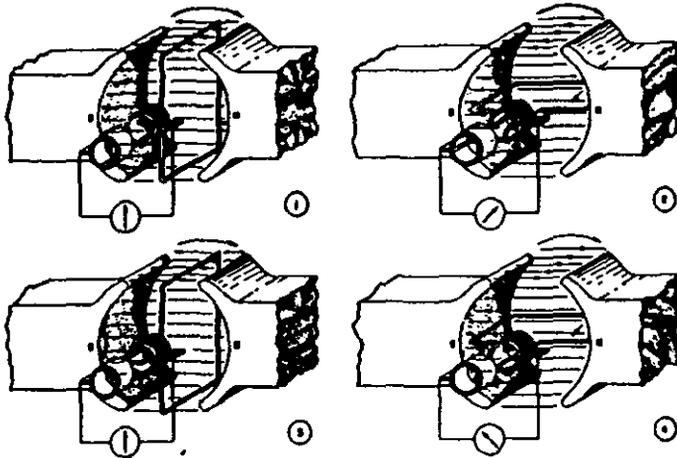


Fig. 3.5

En esta figura se ilustra como el movimiento giratorio del alambre conductor va generando una onda senoidal como salida (fig. 3.6).

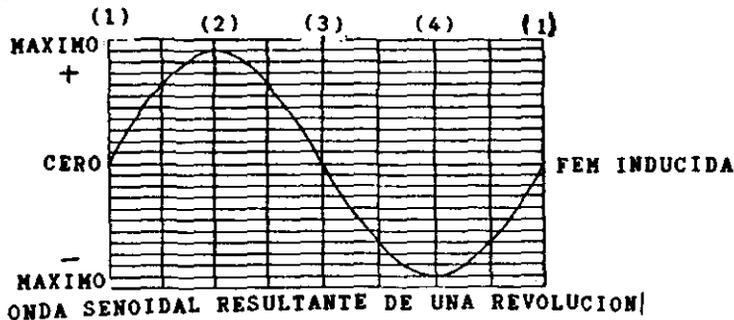
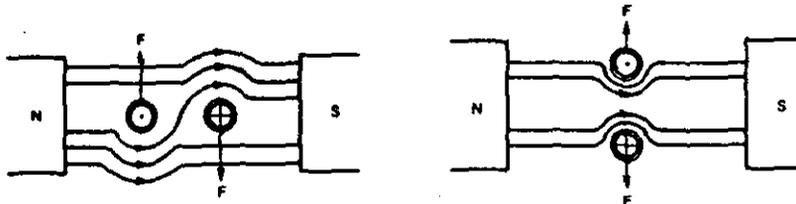


Fig. 3.6

El voltaje producido por este generador es un voltaje alterno. Una revolución completa del conductor giratorio produce 1HZ de voltaje. Es decir, el voltaje va creciendo de cero hasta un máximo, luego cae a cero, y vuelve a crecer de nuevo, pero en la dirección opuesta hasta llegar a un máximo. Finalmente, el voltaje cae a cero para completar el ciclo.

El Motor Eléctrico. Hay tres tipos básicos de motores en una clasificación muy general. El motor de corriente directa, que funciona sólo con cd. El motor de corriente alterna que funciona sólo con corriente alterna, y el motor universal que puede funcionar con corriente directa o alterna.

La operación básica de un motor se basa en el principio de que un conductor por el que circule una corriente eléctrica colocado en un campo magnético, perpendicular a las líneas de flujo, tiende a moverse en una dirección perpendicular a las líneas magnéticas de flujo (fig. 3.7).



Fuerzas ascendentes y descendentes creadas por la interacción del flujo del campo y de la armadura

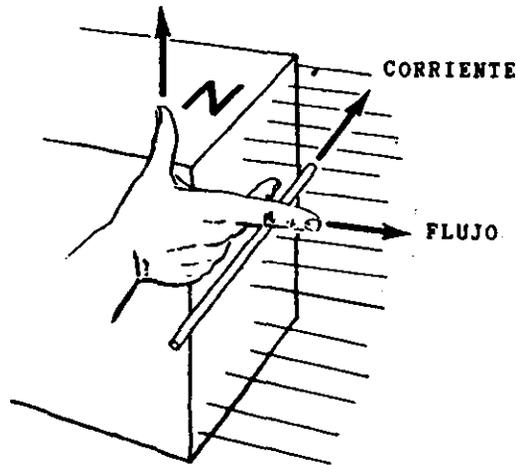
Fig. 3.7

La relación entre la dirección del campo magnético, la dirección de la corriente en el conductor, y la dirección en la que el conductor se tiende a mover se conoce como la regla de la mano derecha para motores (fig. 3.8).

La regla de la mano derecha puede usarse para encontrar la dirección de rotación de un motor. Si se desconoce el movimiento de un conductor, se puede encontrar extendiendo el pulgar, el dedo índice, y el dedo medio de la mano derecha, de tal suerte que formen ángulos rectos entre sí. Si el dedo índice se apunta en la dirección del flujo magnético (de norte a sur) (revisar la polaridad de la fuente de poder para determinar esto), y el dedo medio se apunta en la dirección del flujo de la corriente en el conductor, el pulgar apuntará en la dirección en que se moverá el conductor.

Un motor de cd, por ejemplo, rota debido a la interacción de dos campos magnéticos. La armadura de un motor de cd, actúa a través de sus espiras. Y, ya que la armadura se loca-

MOVIMIENTO DEL CONDUCTOR



Regla de la mano derecha para motores

Fig. 3.8

liza dentro del campo magnético de los polos del campo, estos dos campos magnéticos interaccionan. Los polos magnéticos iguales se repelen, y los polos magnéticos diferentes se atraen. El motor de cd tiene polos de campo que son estacionarios y una armadura que gira sobre cojinetes en el espacio que hay entre los polos del campo. La armadura de un motor de cd, posee bobinas que están conectadas a unos segmentos de conmutación. En la figura 3.9, se ve el funcionamiento de un motor de cd simple.

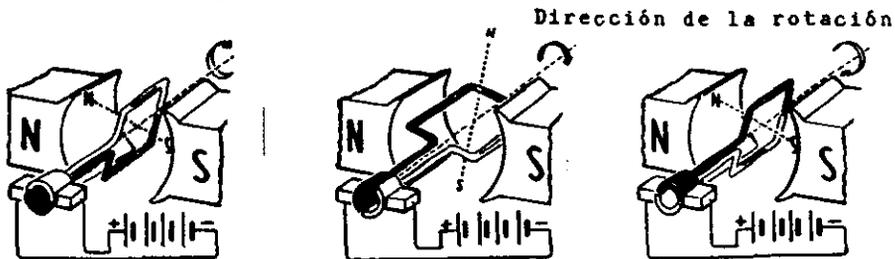


Fig. 3.9

Transformadores. Un transformador es un dispositivo que se usa para cambiar las amplitudes de corrientes o voltajes alternos. Consiste generalmente en dos bobinas de alambre separadas, aisladas y enrolladas alrededor de una estructura llamada núcleo (fig. 3.10).

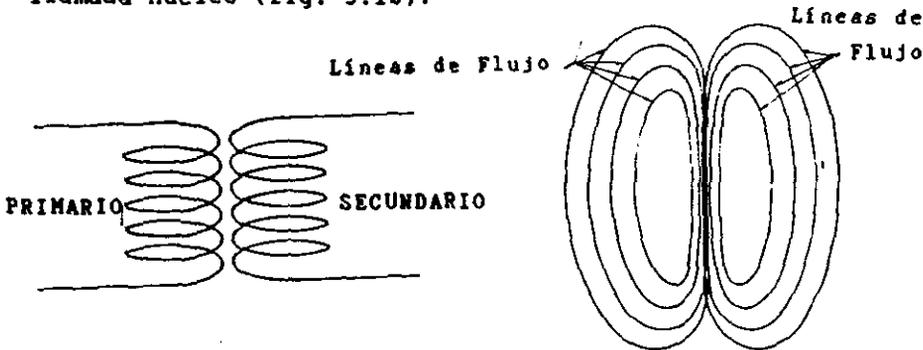


Fig. 3.10

Cuando se hace circular corriente por una de las bobinas se establece un campo magnético alrededor de este enrollamiento. Debido a la proximidad del otro enrollamiento, se induce un voltaje a través de éste a causa de la acción del campo magnético que se expande y contrae alternadamente de acuerdo a la corriente alterna de la primera bobina. El principio utilizado se conoce como inducción mutua.

Los transformadores hacen posible la utilización de los altos voltajes que se generan en las plantas generadoras. Pueden usarse para elevar voltajes que permitan la transmisión de la potencia eléctrica desde el lugar donde se genera la electricidad hasta el usuario. Los transformadores ayudan a hacer muchas cosas con la electricidad. Es un dispositivo relativamente silencioso, no posee partes móviles y su eficiencia es del 99%.

Los transformadores pueden ser elevadores o reductores. Si el voltaje de entrada es mayor que el voltaje de salida, se trata de un transformador reductor.

En un transformador elevador el voltaje de salida es mayor que el de entrada. La relación de voltaje de entrada a voltaje de salida depende de la razón de vueltas, es decir, la relación de enrollamientos de las bobinas del primario y secundario. El primer número en dicha razón es el secundario. El segundo número es el primario. La razón de voltaje primario a secundario es la misma que la razón de vueltas del primario al secundario: $E_s/E_p = N_s/N_p$.

También se puede señalar que la potencia en el primario es igual a la potencia en el secundario, menos pérdidas.

Una sobrecarga moderada hace que suba la temperatura del transformador. Por consiguiente, la corriente disponible es en realidad una función de la cantidad de calor permisible en el transformador mismo.

En la figura 3.11, se ilustra un caso en el que se utiliza un transformador para reducir el voltaje de una fuente de alto voltaje trifásica a un voltaje monofásico de 120 a 240 volts.

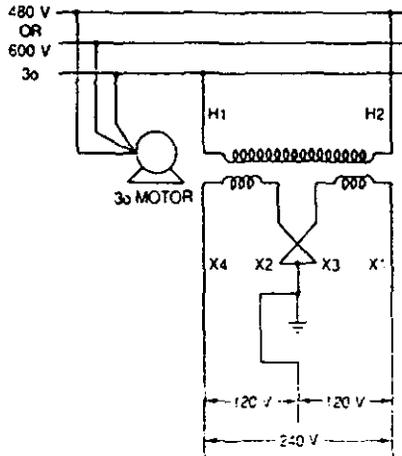


Fig. 3.11

Los transformadores se usan en los negocios, industria, comercio, escuelas y casas. Se fabrican en muchos tamaños y formas. Las seis aplicaciones típicas dentro de la industria son:

1. Distribución de potencia de altos voltajes.
2. Eliminación de hilos de conexión dobles.
3. Operación de equipos de 120/240 V, a partir de los circuitos de potencia.
4. Aislamiento de circuitos.
5. Cambio de circuitos de 4 hilos a circuitos de 3 hilos.
6. Incremento o reducción de voltaje.

Solenoides. Un dispositivo que surgió gracias al desarrollo de la potencia eléctrica y su transmisión fue el solenoide. El solenoide es una bobina conductora de corriente que se usa como un imán (fig. 3.12). En un solenoide, el núcleo tiene la tendencia de moverse de tal forma que cubre el número máximo de líneas de fuerza magnética con el recorrido mínimo posible. En la figura 3.12, se puede ver el núcleo fuera

de la bobina. Debido a que está hecha de un material ferromagnético, presenta un camino de baja reluctancia a las líneas de fuerza magnética en la parte norte de la bobina. Estas líneas de fuerza concentran al núcleo de acero suave y entonces completan sus recorridos de regreso al polo sur del electroimán.

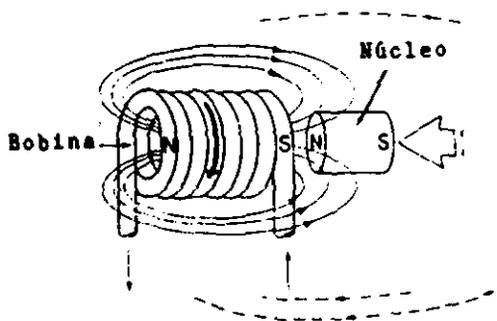


Fig. 3.12

Un núcleo de acero móvil tiende a ser jalado hacia el centro del solenoide. Las líneas de fuerza electromagnética que pasan a través del material del núcleo lo magnetizan. La dirección de las líneas magnéticas ha producido un polo sur en el núcleo en la parte norte del electroimán. Las líneas de fuerza electromagnéticas salen del extremo opuesto del núcleo de acero, y este extremo es el polo norte del núcleo magnetizado.

Una atracción entre el polo norte de la bobina y el polo sur del núcleo de acero tiende a jalar al núcleo dentro de la bobina. Las líneas de fuerza magnéticas se expanden hacia afuera desde el polo norte del núcleo magnetizado. Tienen un recorrido magnético más corto en dirección al polo sur de la bobina. Conforme el núcleo de acero es jalado hacia adentro de la bobina, este recorrido se hace cada vez más corto. Las líneas de fuerza magnética viajan la distancia más corta posible cuando el núcleo se centra por sí mismo dentro de la bobina. Este movimiento del núcleo entrando en la bobina puede ser aprovechado para hacer que los contactos de un interruptor se cierren, o para abrir alguna válvula que esté controlando el flujo de aire, gas, fluido hidráulico o cualquier otro fluido.

CAPITULO 4

APLICACIONES DE LOS PRINCIPIOS EN ILUMINACION

Un sistema de iluminación es parte de una instalación eléctrica. Desde este punto de vista, todo lo que se mencionó con respecto a la forma en que se aplican los principios básicos en instalaciones eléctricas se aplica a los sistemas de alumbrado también. Sin embargo, la ciencia de la iluminación depende muy en particular de la ciencia de la Óptica, que como se vio en el capítulo 2, es la ciencia que estudia la luz y todos los fenómenos asociados con ésta. La luz es la materia prima de un sistema de iluminación. El conocer todas sus características como "elemento" de trabajo para el que está proyectando un sistema de iluminación es fundamental.

Los principios provenientes de la Óptica se encuentran en forma intrínseca en el diseño de las lámparas, pantallas y proyectores, y todo tipo de luminarios en general. Así como en el uso de criterios de diseño, como la selección de colores, consideración de superficies, ubicación de lámparas, etc.

En la Fig. 4.1, se muestra en forma sumamente simplificada el circuito de un sistema de iluminación. Posee los cuatro elementos básicos de todo circuito eléctrico, pero en este caso la lámpara representa la carga a alimentar.

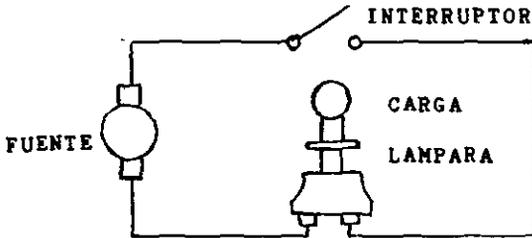
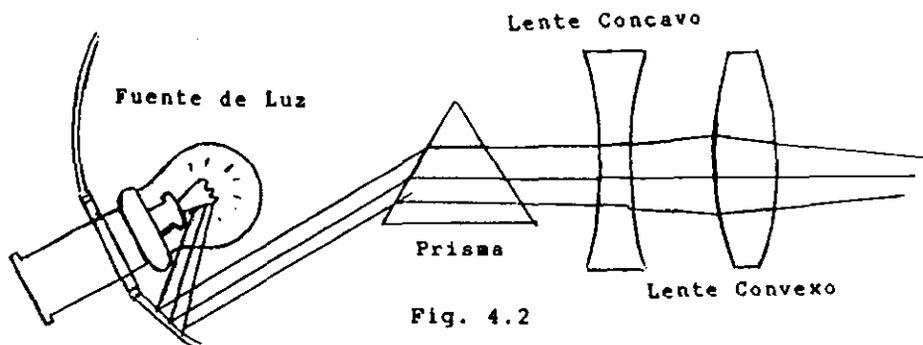


Fig. 4.1

El foco o lámpara en este diagrama representa, en una forma muy simbólica, que la iluminación es parte de una instalación eléctrica, pero que tiene su propia ciencia (o Arte como también se le conoce).

En las figuras 4.2 y 4.3, se ilustran algunos puntos que hay que considerar en el momento de proyectar un sistema de iluminación, y en donde se manifiestan los principios ópticos.



Los principios que hay que recordar y que se ven ilustrados en esta figura son:

1. Siempre que un cuerpo se calienta lo suficiente, emite o irradia luz, o se vuelve incandescente.
2. Siempre que la luz golpea o choca contra un cuerpo opaco, parte de la luz es reflejada, y el resto es absorbida.
3. Siempre que la luz golpea a un cuerpo transparente o translucido, una parte es reflejada, otra parte pasa a través del cuerpo, y el resto es absorbida.
4. Siempre que la luz pasa de un medio transparente a otro de diferente densidad, es refractada, o doblada.
5. La luz viaja en líneas rectas.
6. Los rayos de luz "coloreados" diferentemente son refractados en cantidades diferentes, y de aquí que sean doblados a diferentes ángulos.
7. Cuando los rayos pasan a través de una lente convexa, la lente los dobla y los hace converger, es decir, los aproxima.
8. Cuando los rayos pasan a través de una lente concava, la lente los dobla y los hace divergir, es decir, los aparta.

Con respecto al color y a las superficies:

1. Algunos materiales transmiten la luz más fácilmente que otros.

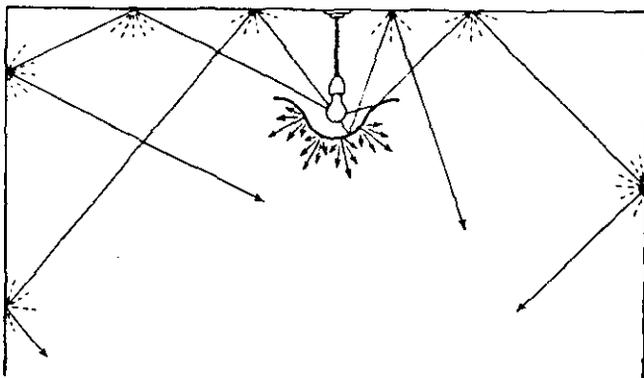


Fig. 4.3

2. Algunos materiales reflejan la luz más fácilmente que otros.

3. Diferentes materiales no sólo transmiten y reflejan diferentes cantidades de luz, sino que también transmiten y reflejan diferentes colores de luz.

4. El color de un objeto no luminoso es el color de la luz que pasa a través de él, o que es reflejada de él.

5. Las superficies de colores oscuros, asperas, o sin pulir absorben más fácilmente la luz y la energía de calor radiante, que las superficies de colores claros, lisas o pulidas.

En la Fig. 4.3, se ve una lámpara con una pantalla translúcida. Debido a la pantalla, la luz se expande y esto ayuda a iluminar uniformemente la parte inmediatamente por debajo de la lámpara. Por otro lado, se ve la luz reflejada en el techo y de ahí se refleja a las paredes y a todo el cuarto. Este tipo de iluminación no deslumbra, e ilumina bien la habitación. A esto también contribuiría el usar colores claros que reflejan mejor la luz. Este es un ejemplo de un buen sistema de iluminación.

La generación de la luz a través de los distintos tipos de lámparas, es un asunto en el que entran en acción tanto los principios ópticos como los eléctricos y electromagnéticos. Además de ser el punto fundamental para empezar un proyecto de iluminación.

A continuación se presentan las características de los tipos de lámparas más importantes para los proyectos de iluminación (fig. 4.4).

Lámparas Incandescentes. Una lámpara incandescente produce luz cuando una corriente eléctrica pasa a través de un filamento metálico de cierta resistencia eléctrica, que hace que el filamento llegue a la incandescencia emitiendo radiaciones luminosas y caloríficas. Su uso es prácticamente universal y se construye en una gran variedad de formas y de voltajes y emiten una luz de bastante calidad. La más común de estas lámparas posee un filamento de tungsteno. Se usa principalmente para la iluminación de casas y edificios. Se fabrica en muchas formas y tamaños. El tungsteno es un metal blanco que no se derrite ni cuando alcanza el grado de incandescencia máximo, aunque si tiende a evaporarse. Para evitar esto, el filamento de tungsteno se sella en un bulbo de vidrio, se le saca el aire, y se le introduce una mezcla de nitrógeno y argón. Gracias a esta mezcla se retarda la evaporación del tungsteno.

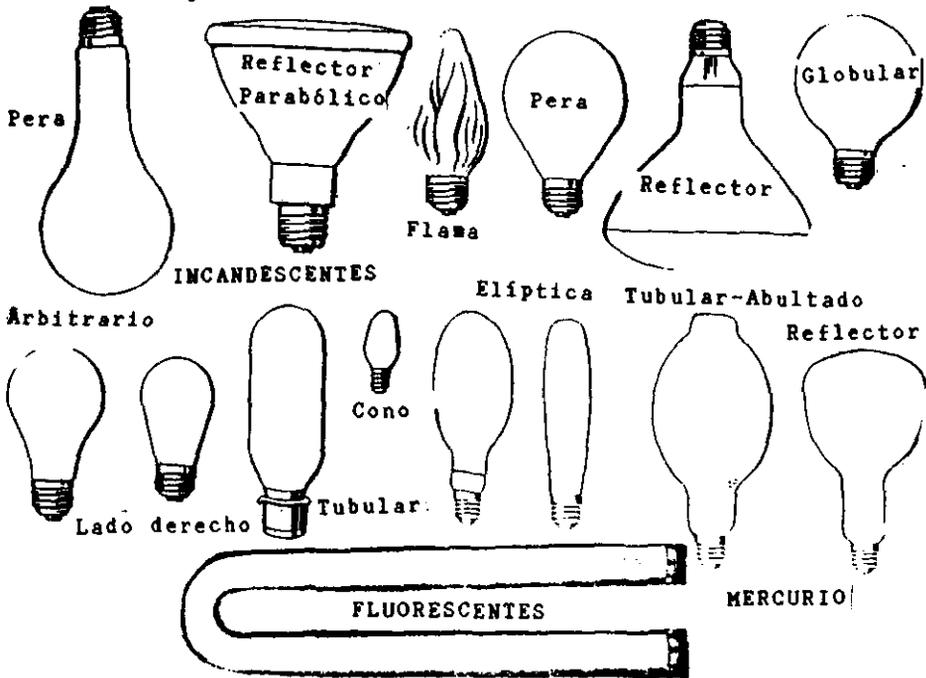


Fig. 4.4 Distintos tipos de lámparas

Lámpara Fluorescente. Una lámpara fluorescente consiste en un tubo largo de vidrio sellado en ambos extremos. Su superficie interior está recubierta con una sustancia fluorescente llamada fósforo. Una sustancia fluorescente es aquella que brilla cuando los rayos ultravioleta la golpean. Se saca

el aire del tubo de la lámpara, y se agrega una pequeña cantidad de argón o kriptón y una gota de mercurio.

Cuando se "enciende" la lámpara, mediante una descarga eléctrica en una atmosfera de vapor de mercurio a baja presión, el mercurio se transforma en vapor. El vapor de mercurio emite principalmente rayos ultravioleta, pero también algunas ondas de luz azul. Los rayos ultravioleta son invisibles. Sin embargo, estos producen prácticamente toda la iluminación que la lámpara produce. Conforme estos rayos dan en el fósforo, lo hacen fosforescer, o brillar fuertemente.

Se pueden tener diferentes tonos de color debido a una mezcla adecuada de sustancias fluorescentes. Entre estos tonos los más usados son: luz de día, blanco frío y blanco cálido.

Estas lámparas se utilizan principalmente en oficinas, despachos, escuelas, ascensores, transportes, bibliotecas y tiendas comerciales. Su éxito se debe a que proporcionan una buena iluminación y emiten poco calor, lo que las hace agradables a la vista.

Usan mucho menos energía eléctrica que las lámparas incandescentes para producir luz de la misma intensidad.

Lámparas de Vapor. Todos los tipos de lámparas de vapor producen luz debido al paso de la electricidad a través de un vapor o gas contenido en un tubo sellado. En este aspecto se parecen a las lámparas fluorescentes. Pero su luz la produce un vapor o gas resplandeciente en lugar de un fósforo resplandeciente, como en las lámparas fluorescentes.

Todos los tipos de lámparas de vapor son más baratos de operar que las lámparas incandescentes que producen una iluminación igual de intensa. Además, las lámparas de vapor sirven mucho mejor para algunos casos que los otros tipos de lámparas.

Lámparas de Vapor de Mercurio. Todavía no se ha tenido éxito en producir una luz artificial blanca como la del sol. La mejor luz solar artificial todavía no tiene todos los "rayos de color" que la luz solar verdadera contiene. Debido a esto, no se pueden distinguir pequeñas diferencias en el color de los objetos con ninguna luz artificial. Pero para las industrias como la de confección de ropa y las que producen papel, es esencial una comparación muy precisa de los colores. La mejor luz artificial para este propósito es la de la lámpara de vapor de mercurio. Esta luz, sin embargo, es azulada más que blanca. Hace que la piel de las personas se vea verdosa, lo que produce un efecto desagradable a la vista. Estas lámparas de vapor de mercurio se usan mucho en fotografía, en oficinas de diseño y en las industrias del papel y de la confección de ropa.

Lámparas de Vapor de Sodio. Cuando uno va por las autopistas, se pueden ver un tipo de lámparas que emiten una luz amarilla fuerte. Estas son las lámparas de vapor de sodio. No son adecuadas para la iluminación de interiores, ya que su luz hace que los objetos se vean con colores poco naturales. Por ejemplo, hacen que la gente se vea con un color entre gris y verde. Pero de todos los tipos de lámparas que se han inventado, son las que proporcionan la mejor visibilidad para exteriores en la noche, especialmente cuando hay neblina. También, son las que salen más baratas en su operación.

Lámparas de Neón. Las lámparas de neón se usan mucho en los anuncios luminosos. En estas se usan tubos de vidrio doblados que brillan fuertemente con luces de color. Al principio se usó el gas neón para llenar estos tubos, y la luz que emitían era de un color rojo amarillento. Si se usa el gas xenón, el color de la luz producida tiene diferentes matices de azul, lo mismo que si se combinan tanto el neón y el argón como el neón y vapor de mercurio. Se pueden conseguir otros colores de luz si se colorea el vidrio de los tubos.

Además de la generación de la luz, en donde los fenómenos electromagnéticos tienen un papel principal, el control de ésta mediante la redirección adecuada de los rayos de luz, gracias a los principios proporcionados por la óptica, es un punto esencial en el diseño y fabricación de lámparas y proyectores.

Para ilustrar esta idea, se va a mostrar la forma en que un faro de automóvil, con su espejo en forma paraboloide, puede direccionar los rayos de luz en diferentes ángulos.

En la figura 4.5, se observa un faro de luz, formado por un espejo paraboloide, y una lámpara incandescente como fuente de luz. Cuando la lámpara está exactamente en el foco (F) de la paraboloide, el haz de la luz del faro brilla directamente hacia adelante. A veces queremos que este haz de luz ilumine un área más amplia, por ejemplo, los lados de la carretera y el camino. En otras ocasiones queremos iluminar el camino, lo que quiere decir que el haz debe apuntar un poco hacia abajo. Estos objetivos y muchos otros se pueden lograr

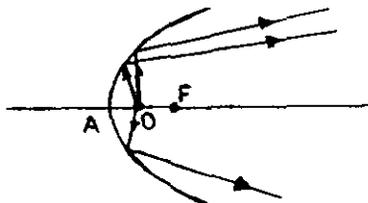


Fig. 4.5

utilizando las propiedades matemáticas de los espejos paraboloïdes y las leyes del comportamiento de los rayos de luz.

Si la fuente de luz (O) se coloca sobre el eje de una superficie paraboloidal pero un poco atrás del foco (F) (fig. 4.5), entonces si seguimos el curso de unos cuantos rayos, que, por supuesto, continuarán satisfaciendo la ley de la reflexión, vemos que el haz de luz se esparce.

Si la fuente de luz (O) se coloca por arriba del foco (F), entonces el haz es direccionado o dirigido hacia abajo (fig. 4.6).

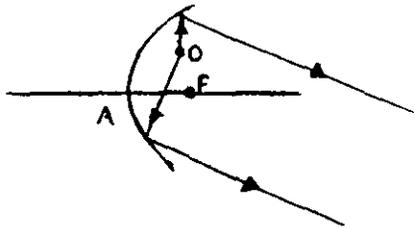


Fig. 4.6

Alternativamente, si la fuente de luz (O) se coloca por debajo del foco (F), el haz es dirigido hacia arriba (fig. 4.7).

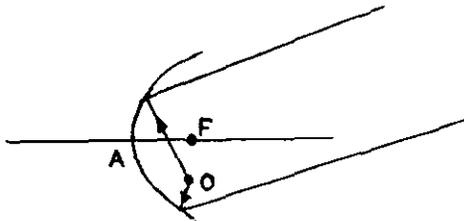


Fig. 4.7

CONCLUSIONES

Los principios básicos de la Teoría Electromagnética y de la Óptica, además de estar incluidos en forma intrínseca en el diseño y construcción de las máquinas eléctricas, y en todo tipo de dispositivos que se usan en las instalaciones eléctricas e iluminación, también se encuentran en los razonamientos que se siguen para seleccionar los importantes criterios de diseño a la hora de proyectar dichos sistemas.

Por otro lado, son la base en la que se sostienen los principios prácticos o metodológicos del Arte de la iluminación y de las instalaciones eléctricas.

De esto se puede concluir que al comprender mejor y más profundamente los principios básicos que arroja la ciencia, se está en una mejor posición de comprender el por qué los principios prácticos del Arte son como son, y se podrán asimilar más rápido. Y que en el caso de alguien que empiece a desarrollarse en la disciplina de proyectar sistemas de iluminación, o instalaciones eléctricas, le permitirá adquirir este Arte en un menor tiempo y con una mayor profundidad y convicción.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Camarena, Pedro M. INSTALACIONES ELECTRICAS INDUSTRIALES. 17 ed. México: CECSA, 1998.
- 2) Desoer, Charles A., y Ernest S, Kuh. BASIC CIRCUIT THEORY. E.U.A.: Mc Graw-Hill, 1970.
- 3) Halliday, David., y Robert Resnick. PHYSICS: Part 2. 3a ed. E.U.A.: John Wiley and Sons, 1970.
- 4) Harper, Gilgerto E. El ABC de las instalaciones eléctricas residenciales. México: LIMUSA, 1998.
- 5) Hayt, William H.Jr. TEORIA ELECTROMAGNETICA. México: McGraw Hill, 1981.
- 6) Hecht, Eugene., y Alfred Zajac. OPTICA. E.U.A.: Addison-Wesley Iberoamericana, 1974.
- 7) Kemmer, N. ANALISIS VECTORIAL: Matemáticas de los campos tridimensionales para físicos. España: Reverté, 1968.
- 8) Kline, Morris. Mathematics and the Physical World. New York: Dover, 1981.
- 9) Landa, Jacinto Viqueira. REDES ELECTRICAS. Vol. 1., México: Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., 1970.
- 10) Lindsay, Robert B. GENERAL PHYSICS: for students of science. E.U.A.: John Wiley and Sons, Inc., 1960.
- 11) Mc Connell, Robert L., Wils L. Cooley, y Nigel T. Middleton. ELECTRICAL ENGINEERING DESIGN COMPENDIUM. E.U.A.: Addison-Wesley, 1993.
- 12) Miller, Rex., y Mark R. Miller. ELECTRIC MOTOR CONTROLS. E.U.A.: Prentice Hall, 1992.
- 13) Richter, Herbert P. PRACTICAL ELECTRICAL WIRING: RESIDENTIAL, FARM, AND INDUSTRIAL. 14 ed. E.U.A.: Mc-Graw Hill, 1987.
- 14) Van Valkengurg, M.E. ANALISIS DE REDES. 3a. ed. México: Limusa, 1979.

OTRAS REFERENCIAS

- 15) "CATALOGO CONDENSADO 1997". HOLOPHANE: México, 1997, P.P. 110.
- 16) "El mago de Menlo Park." COLECCION CIENTIFICA DE TIME LIFE: EL INGENIERO. 1976. 32-51.
- 17) "POWER OVER DARKNESS: The Wonder of Modern Illumination." THE BOOK OF POPULAR SCIENCE. Vol.4., 1970. 232-241.
- 18) "Principios de Iluminación y Niveles de Iluminación en México." HOLOPHANE: México, 1997. P.P. 20.