

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
Secretaría Académica

**M8**

REFORMA ACADÉMICA DEL NIVEL MEDIO SUPERIOR

*Texto*

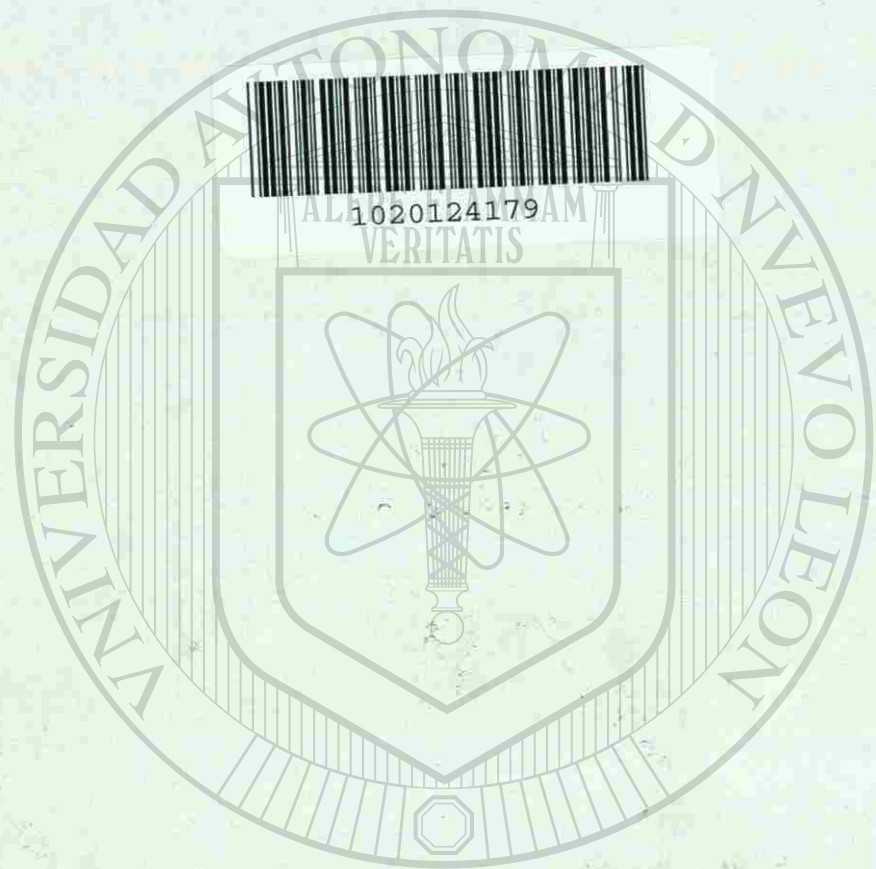
FISICA, PRIMERA EDICION 1995

*f*

**Física**  
PRIMERA PARTE

0  
5a  
1

QC21  
U530  
1995  
v. 8  
pte.



AL1020124179AM  
VERITATIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

SECRETARÍA ACADÉMICA

FÍSICA

FÍSICA

MÓDULO VIII

UNANIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

COMITÉ TÉCNICO DE FÍSICA  
Ing. Domingo Espinoza Guayra

Ing. Carlos Mata Martín

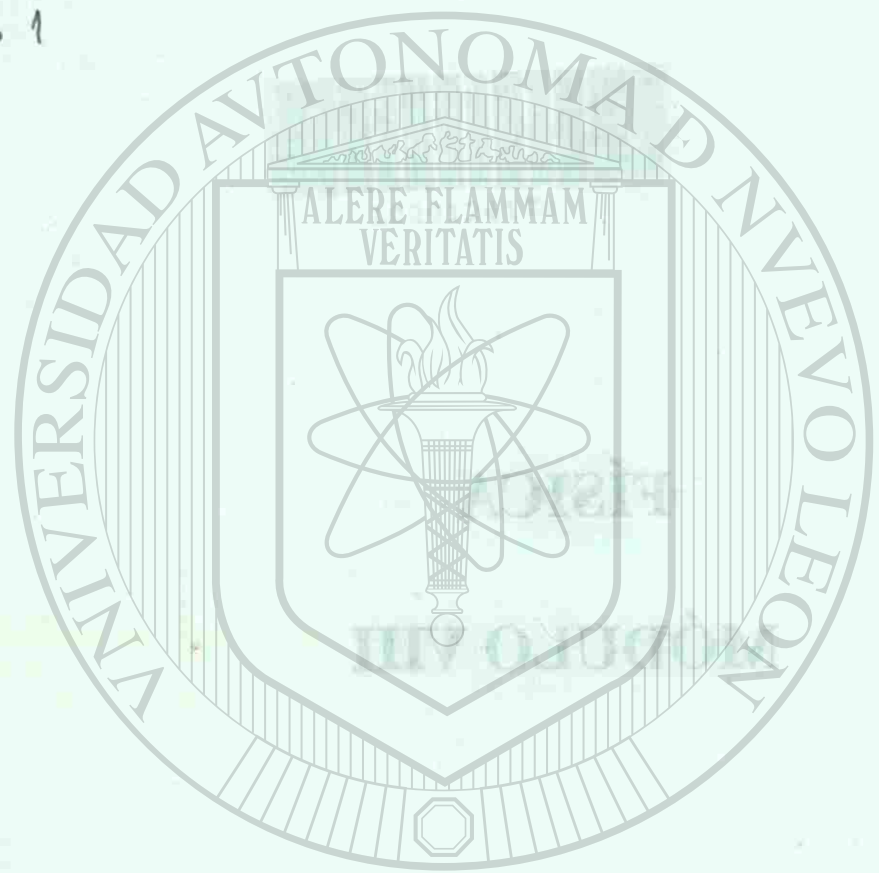
Ing. José Antonio Matto Garza

Lic. Marco Antonio Gaytán Cortés



QC21  
U530  
1995a  
N.8  
Pte. 1

0120-21260



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

SECRETARÍA ACADÉMICA

OBJETIVO:

Describir las características fundamentales de los fluidos, a través del Principio de Pascal y el Principio de Arquímedes, en flujo laminar, a través de la ecuación de Bernoulli, y la ecuación de continuidad, así como su aplicación y relación con la física clásica y la física moderna.

FÍSICA

METAS:

Describir los estados de agregación de la materia, y las propiedades esenciales de cada uno.

MÓDULO VIII

U A N L

COMITÉ TÉCNICO DE FÍSICA

Ing. José Luis Gutiérrez Alvarado

Ing. Domingo Espinoza Guevara

Lic. Carlos Mata Martínez

Ing. José Antonio Matta Garza

Lic. Marco Antonio Gaytán Cortés

## MÓDULO VIII

### OBJETIVO MODULAR

Al término de este capítulo el alumno será capaz de diferenciar entre las distintas formas de energía y su transferencia, así como su cálculo y aplicación en la vida diaria; desde una perspectiva clásica hasta su concepción moderna.



I. FLUIDOS	15 FRECUENCIAS
II. CALOR	15 FRECUENCIAS
III. ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO	33 FRECUENCIAS
IV. TRANSFERENCIA DE ENERGÍA	33 FRECUENCIAS
V. FÍSICA MODERNA	24 FRECUENCIAS
<b>TOTAL</b>	<b>120 FRECUENCIAS</b>

## FLUIDOS

### OBJETIVO:

- Describir las características fundamentales: de los fluidos ideales, en reposo, a través del Principio de Pascal y de Arquímedes, así como de los fluidos incompresibles, en flujo laminar, a través de la ecuación de continuidad y de la ecuación de Bernoulli, destacando en ambos casos ejemplos de aplicaciones prácticas.

### METAS:

- 1.- Describir los estados de agregación de la materia, destacando los rasgos esenciales de cada uno.
- 2.- Relacionar las características de los fluidos en sus propiedades macroscópicas.
- 3.- Definir la densidad y el peso específico.
- 4.- Definir el concepto de presión, destacando su importancia para el estudio de los fluidos.
- 5.- Formular la relación de la dependencia de la presión con la profundidad, en los líquidos.
- 6.- Enunciar el Principio de Pascal, destacando ejemplos de su aplicación.
- 7.- Enunciar el Principio de Arquímedes, aplicándolo en la explicación de la flotación de los cuerpos.
- 8.- Formular la ecuación de continuidad, destacando su papel como ley de conservación.
- 9.- Formular la ecuación de Bernoulli, aplicándolo en la explicación de situaciones prácticas.

### CONTENIDO:

INTRODUCCIÓN.

LOS ESTADOS DE AGREGACIÓN DE LA MATERIA.

LOS FLUIDOS.

DENSIDAD.

PESO ESPECÍFICO.

DENSIDAD RELATIVA.

PRESIÓN. CONCEPTO.

PRESIÓN Y FLUIDOS.  
 PRESIÓN ATMOSFÉRICA.  
 EQUIPOS PARA MEDIR LA PRESIÓN.

PRINCIPIO DE PASCAL.

PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES.

FLUIDOS EN MOVIMIENTO.

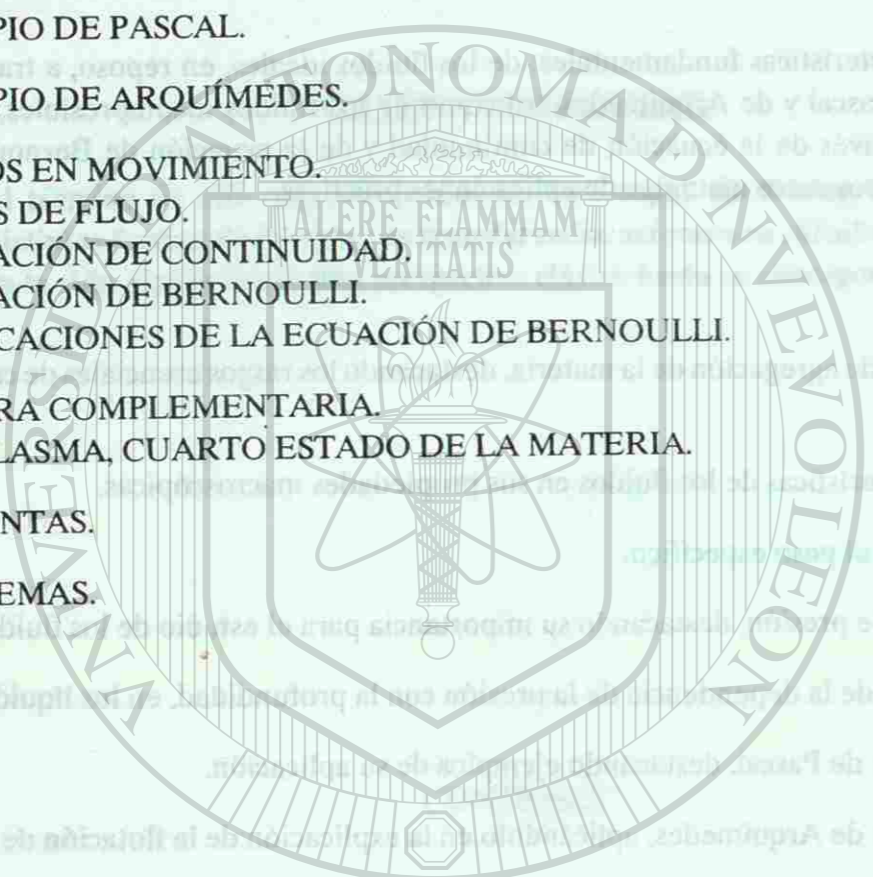
TIPOS DE FLUJO.  
 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.  
 ECUACIÓN DE BERNOULLI.  
 APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.

LECTURA COMPLEMENTARIA.

EL PLASMA, CUARTO ESTADO DE LA MATERIA.

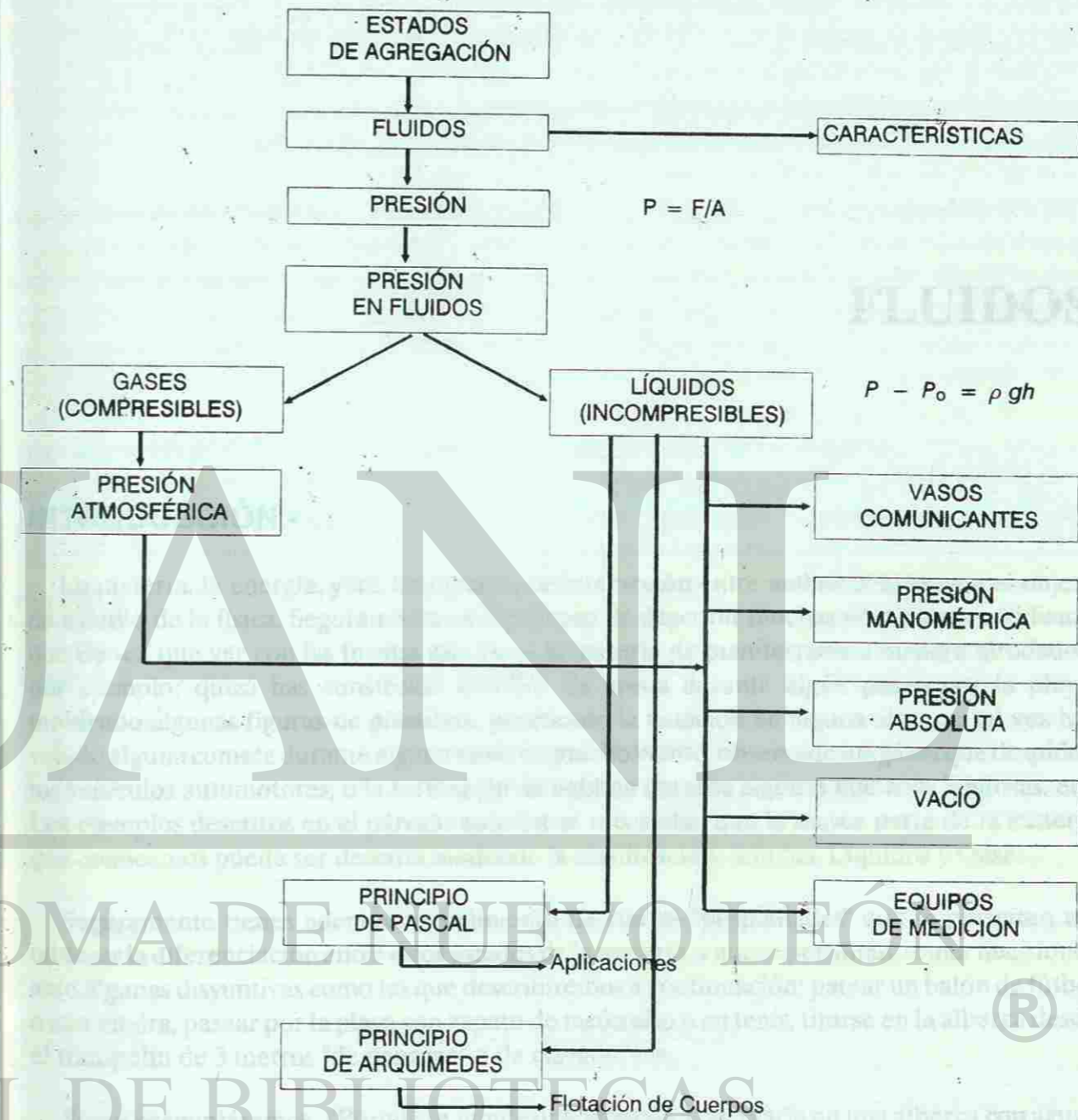
PREGUNTAS.

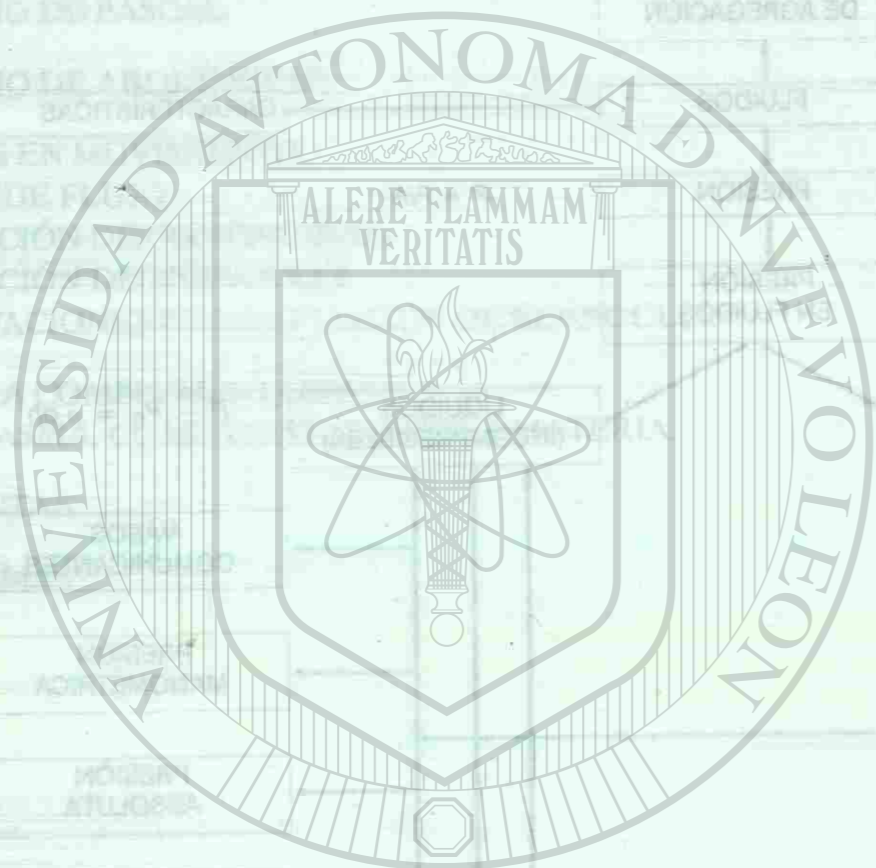
PROBLEMAS.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
 DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

MAPA CONCEPTUAL PARA EL DESARROLLO DE LA UNIDAD: FLUIDOS





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## FLUIDOS

### INTRODUCCIÓN.-

La materia, la energía, y los fenómenos de interacción entre ambos constituyen el objeto de estudio de la física. Seguramente tú eres capaz de describir muchas situaciones cotidianas que tienen que ver con las formas que tiene la materia de manifestarse a nuestro alrededor, por ejemplo; quizá has construido castillos de arena durante algún paseo por la playa, moldeado algunas figuras de plastilina, practicado la natación en alguna alberca, tal vez has volado alguna cometa durante alguna tarde de mucho viento, observado los gases que despiden los vehículos automotores, o la formación de neblina durante algunas mañanas lluviosas, etc. Los ejemplos descritos en el párrafo anterior te recuerdan que la mayor parte de la materia que conocemos puede ser descrita mediante la clasificación: Sólidos, Líquidos y Gases.

Seguramente tienes además conocimiento de ciertas "propiedades" que te permiten establecer la diferenciación entre estos estados de la materia, y que te permitan, tomar decisiones ante algunas disyuntivas como las que describiremos a continuación: patear un balón de fútbol o una piedra, pasear por la playa con zapato de tacón alto o en tenis, tirarse en la alberca desde el trampolín de 3 metros "de panzazo" o de clavado, etc.

Si nos preguntáramos, ¿Porqué se hunde una moneda al arrojarla en una alberca con agua? ¿porqué flotan los barcos en el agua?, ¿porqué vuelan los aviones? o ¿Cómo navegan los submarinos? Para responder a estas preguntas debemos profundizar más en la diferenciación entre los estados de la materia, conocer acerca de la estructura de las sustancias para explicar como difieren "microscópicamente" estas formas de materia unas de otras.

## LOS ESTADOS DE AGREGACIÓN DE LA MATERIA

En tus cursos previos de química has aprendido que: Todos los cuerpos están **formados** por partículas (átomos y moléculas), que dichas partículas se encuentran en **ininterrumpido** movimiento y que existen fuerzas de interacción entre ellas. En dependencia de la **energía** que posean las moléculas o átomos (estructura molecular) que forman una sustancia, la materia puede encontrarse en cuatro estados de agregación: Sólido, Líquido, Gas y Plasma.

Los sólidos tiene una forma definida, son capaces de soportar y transmitir **esfuerzos**<sup>1</sup> (tensión, compresión, corte etc.) porque "microscópicamente", sus moléculas estan dispuestas de manera ordenada, existen fuerzas relativamente fuertes entre ellas, son capaces de soportar dichos esfuerzos porque no es fácil desplazar a un átomo de un lugar (imagínate una casa construida con blocks y que quieres mover solo uno de ellos) sin tener que **desplazar** a muchos otros.

Los líquidos son capaces de fluir (varían su forma fácilmente), muchos líquidos son relativamente incompresibles (o se pueden comprimir muy poco). De la **capacidad de fluir** se puede inferir que las fuerzas de atracción intermoleculares son **menos fuertes** que en los sólidos, ya que en esta fase las moléculas pueden deslizarse **unas sobre otras** tomando la forma del recipiente que los contiene, pero manteniendo un **volumen** definido; de la **segunda** propiedad mencionada, se infiere que las distancias intermoleculares no son muy **grandes** por eso o no se comprimen, o se comprimen muy poco.

Los gases se comprimen con facilidad, ocupan todo el recipiente que los contiene; propiedades que nos permiten inferir que en su estructura molecular, los espacios entre las moléculas de que está constituido son "relativamente grandes" así como el movimiento ininterrumpido de las moléculas (propiedad de fluir) significa que estas interactúan sólo débilmente.

Un plasma es un gas en el cual los átomos están ionizados, esto significa que de los **átomos** que lo forman se han separado algunos (o todos los) electrones, convirtiéndose en una mezcla eléctricamente neutra. Su comportamiento difiere en gran medida con el de un gas ordinario en virtud de que en este caso se manifiestan fuertes interacciones eléctricas entre dichos iones y su entorno. El gas atrapado en una lámpara fluorescente se convierte en plasma cuando ésta es encendida; en mayor escala el sol y las demás estrellas son bolas de plasma. (Ver lectura complementaria al final del capítulo).

<sup>1</sup> Una fuerza aplicada en los extremos de una varilla, origina un estiramiento o acortamiento de la longitud original de la varilla dependiendo del sentido de la fuerza. El Esfuerzo ocasionado por la fuerza sobre la varilla se define como Fuerza entre Área.

(Esfuerzo =  $F/A$ ) y la Deformación como la relación de cambio de la longitud con la longitud original.

(Deformación =  $L_f - L_0/L_0$ )

Como se mencionó anteriormente, los cuatro estados de agregación están **directamente** relacionados con la energía que poseen las moléculas o átomos de que está constituido, por ejemplo la sustancia  $H_2O$  en estado sólido (más conocida como hielo) tiene sus moléculas "ordenadas", pero vibrando constantemente con respecto a ejes fijos debido a que las fuerzas de atracción entre ellas son muy grandes. Si aumentáramos la energía cinética molecular (calentándolo por ejemplo), hasta un punto tal, que lográramos el desplazamiento relativo entre ellas lo haríamos fluir (estado líquido), tendríamos ahora agua. Si continuamos calentando el agua, sus moléculas adquieren aún más energía separándose tanto como les sea posible pasando ahora a la fase de gas, (vapor de agua) si incrementamos la temperatura del vapor por encima de los  $2000^\circ C$  se desprenderían electrones de los átomos formándose una mezcla eléctricamente neutra a muy alta temperatura de iones y electrones (gas ionizado). La sustancia estaría ahora en la fase de plasma. En el siguiente capítulo se estudiarán los cambios de fase de las sustancias más detenidamente.

Si revisamos los párrafos anteriores, la propiedad de fluir la comparten líquidos y gases. Esto nos permite agrupar en forma conjunta a los gases y los líquidos (incluso el plasma) bajo la denominación de "FLUIDOS". Fluere: vocablo latín que significa posibilidad de fluir o manar, (los sólidos no fluyen o fluyen muy poco). La clasificación de la materia en sólidos y fluidos nos permite estudiar de manera conjunta, propiedades comunes a líquidos y gases en una rama de la física denominada "Mecánica de los Fluidos".

## LOS FLUIDOS

Es tiempo ahora de desarrollar una formulación especial de leyes para explicar la mecánica de los fluidos, y familiarizarnos con los fenómenos físicos relativos a los fluidos y las múltiples facetas de su aplicación en la vida diaria, dándole respuesta a las preguntas que se comentaron en la introducción, ¿Porqué flotan los barcos en el agua?, etc.

Iniciemos el estudio de los fluidos analizando una magnitud física relativa a la concentración de la masa por unidad de volumen de la sustancia, conocida como densidad.

## DENSIDAD

El valor de la densidad de un objeto homogéneo se obtiene dividiendo la masa de todo el objeto por el volumen que ocupa.

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$\rho$  = densidad  
 $m$  = masa  
 $V$  = volumen



La densidad no tiene propiedades direccionales y es por lo tanto un escalar. Experimentalmente se ha encontrado que la densidad de un material depende además de factores ambientales, incluyendo la presión y la temperatura. La variación de la densidad en los líquidos y los sólidos (recuerda que estos son prácticamente incompresibles) es muy pequeña para rangos grandes de presión y temperatura, para muchas de las aplicaciones que estudiaremos en este capítulo dicha variación se considerará despreciable, por lo tanto la densidad puede considerarse como una constante. Para los gases la consideración anterior no es válida, en virtud de que éstos se comprimen con facilidad reduciendo su volumen (o expandiéndose según sea el caso) y por lo tanto variando significativamente su densidad.

En el sistema internacional (SI) las unidades de densidad son:  $\text{kg/m}^3$  pero a menudo se utilizan las unidades cgs,  $\text{g/cm}^3$ .

En la siguiente tabla podrás observar algunas densidades de objetos o materiales según sea el caso. Puedes observar como la densidad del aire (estado gaseoso) varía significativamente cuando variamos la presión a la que es sometido.

Tabla No. 1. Valores típicos de densidad

	MATERIAL U OBJETO	$\rho \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$
1	ESPACIO INTERESTELAR	$10^{-20}$
2	EL MEJOR VACÍO OBTENIDO EN EL LABORATORIO	$10^{-17}$
3	AIRE: (20° Y 1 ATM)	1.21
4	AIRE: (20° Y 50 ATM)	60.5
5	HIELO	$0.917 \times 10^3$
6	AGUA: (20° Y 1 ATM)	$0.998 \times 10^3$
7	AGUA: (20° Y 50 ATM)	$1.000 \times 10^3$
8	AGUA DE MAR: (20° Y 1 ATM)	$1.030 \times 10^3$
9	HIERRO	$7.8 \times 10^3$
10	MERCURIO	$13.6 \times 10^3$
11	URANIO (SÓLIDO A 13°)	$18.7 \times 10^3$
12	LA TIERRA (VALOR PROMEDIO)	$5.5 \times 10^3$
13	EL SOL (VALOR PROMEDIO)	$1.4 \times 10^3$
14	HOYO NEGRO (1 MASA SOLAR)	$1.0 \times 10^{19}$

Recuerda que la masa se considera prácticamente constante para objetos que se mueven a velocidades comunes (no cercanas a la velocidad de la luz), entonces en la relación  $\rho = m/V$ , es posible cambiar la densidad de un objeto si variamos su volumen. Por ejemplo una "barra de pan" tiene su valor de densidad y lo calculamos dividiendo su masa por el volumen que

ocupa, pero si la comprimimos entre nuestras manos reduciendo su volumen, la masa no cambia pues se trata del mismo objeto pero su densidad aumenta cuantitativamente. Del mismo modo un trozo de plastilina con una forma compacta, una bola por ejemplo, tiene un valor de densidad y puedes observar que al colocarla en una cubeta con agua se hundirá, pero si esa misma plastilina la extendemos dándole forma de lanchita con sus paredes muy delgadas, cambiando la distribución de la masa para ocupar un mayor volumen, disminuye sustancialmente su valor de densidad y ahora al colocarla en la cubeta con agua si flotará. Más adelante, en este mismo capítulo analizaremos cómo influye la densidad de las sustancias en el fenómeno de flotación. (Para que un objeto flote en el agua su densidad neta tiene que ser menor que la densidad del agua).

Ejemplos de cálculo de la densidad de objetos.

- a) Calcular el valor de la densidad de una barra de pan de 300 gramos que mide  $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}^3$ .

$$\begin{aligned} \text{datos} \\ m &= 300 \text{ g} \\ V &= 3000 \text{ cm}^3 \\ \rho &= \frac{m}{V} \\ \rho &= \frac{300 \text{ g}}{3000 \text{ cm}^3} \\ \rho &= \frac{0.1 \text{ g}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

- b) ¿Cual será el valor de la densidad de la misma barra de pan si la comprimimos con ambas manos reduciendo su volumen original a la mitad?

$$\begin{aligned} \text{datos} \\ m &= 300 \text{ g} \\ V &= 1500 \text{ cm}^3 \\ \rho &= \frac{m}{V} \\ \rho &= \frac{300 \text{ g}}{1500 \text{ cm}^3} \\ \rho &= \frac{0.2 \text{ g}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

Observa cómo se duplicó el valor de la densidad del objeto al reducir el volumen a la mitad.

Piensa un poco: ¿Cómo esperarías que "se acomodaran" en un recipiente dos líquidos que no sean solubles entre sí con diferente valor de densidad?

Antes de que se seleccionara al SI como la base para el manejo de las unidades de las magnitudes físicas utilizadas, con mucha frecuencia se comparaban los distintos materiales por medio del "peso específico".

## PESO ESPECÍFICO

El peso específico de un objeto homogéneo se obtiene cuando dividimos su peso entre el volumen que ocupa.

$$\gamma = \frac{w}{V} \left[ \frac{N}{m^3} \right]$$

$\gamma$  = peso específico  
 $w$  = peso  
 $V$  = volumen

Tú debes ser capaz, mediante transformaciones matemáticas de la ecuación anterior de obtener la ecuación  $\rho = \frac{\gamma}{g}$  que te permite calcular la densidad de un objeto en función de su peso específico.

Piensa un poco: Si comparas volúmenes iguales de hierro y aluminio, ¿podrás concluir cuál tiene mayor peso específico? Justifica tu respuesta.

La densidad de una sustancia puede ser expresada además en una escala relativa, llamada "gravedad específica".

## DENSIDAD RELATIVA (O GRAVEDAD ESPECÍFICA).-

Para líquidos y sólidos la densidad relativa se define como la razón de la densidad de la sustancia entre la densidad del agua.

$$\rho_r = \frac{\rho_s}{\rho_a}$$

$\rho_r$  = densidad relativa  
 $\rho_s$  = densidad de la sustancia  
 $\rho_a$  = densidad del agua

Este parámetro nos indica cuántas veces es mayor la masa de una sustancia comparada con la masa de un volumen igual de agua. Por ejemplo:

$$\rho_{\text{hierro}} = 7.8 \times 10^3 \text{ kg./m}^3$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1.0 \times 10^3 \text{ kg./m}^3$$

De donde concluimos que: la masa de un volumen de hierro es 7.8 veces mayor que la masa de un volumen igual de agua.

Para los gases la densidad relativa se define como el cociente de la densidad del gas entre la densidad del aire.

El método de medición de densidades para líquidos más comúnmente utilizado, es el llamado método del Picnómetro. Un picnómetro es un recipiente hecho de vidrio con un bajo coeficiente de expansión térmico en el cual es posible determinar con mucha precisión su volumen en términos de su capacidad para contener líquidos estándares (agua destilada). La

mayoría de los picnómetros tienen capacidades de 30 ml aproximadamente. El procedimiento para obtener la densidad de un líquido desconocido consiste en llenar el picnómetro con el líquido al cual se desea obtener su densidad determinando el volumen ocupado por éste y luego pesando el picnómetro.

## PRESIÓN. CONCEPTO.

Cuando viajamos en avión y éste cambia su altura podemos notar cierta sensación extraña en los oídos. También cuando buceamos podemos notar la misma sensación al variar la profundidad. De la misma forma podemos plantearnos otras interrogantes como: ¿por qué un cuchillo afilado corta mejor que uno mellado?, ¿por qué los cimientos de los edificios tienen un área mayor que la base del propio edificio?, ¿cómo puede un niño pequeño, con poca fuerza, introducir un clavo en una pared de concreto?, ¿por qué puede volar un avión, de gran peso, o flotar un barco?

Estas y otras muchas interrogantes se pueden responder con ayuda de un concepto fundamental de la Física que es el concepto de presión.

En Mecánica estudiamos que la medida fundamental de la interacción entre los cuerpos es la fuerza. Sin embargo no nos detuvimos a analizar el problema de cómo estaba aplicada esta fuerza. Pensemos en lo siguiente: una mujer camina por la arena de la playa con zapatos de tacón fino o camina sin zapatos, en qué caso sus huellas en la arena serán mayores?. Antes de responder debemos tener en cuenta que en este caso la fuerza total que la mujer ejerce sobre la arena es la misma, independiente del calzado que lleve, y es igual a su peso. Sin embargo está claro que su acción sobre la arena será mayor cuando lleve zapatos de tacón fino que cuando esté sin zapatos. ¿Qué ha cambiado de un caso al otro? El área donde actúa la fuerza por lo que se puede deducir es que la misma fuerza aplicada a áreas diferentes provocan diferentes acciones.

Un ejemplo similar ocurre cuando estamos acostados sobre el colchón de la cama o estamos parados sobre él. En ambos casos la fuerza aplicada es la misma ( el peso de nuestro cuerpo), sin embargo cuando estamos parados la deformación del colchón es mucho mayor y es posible hasta romperlo. De nuevo en este caso lo que ha cambiado es el área donde se aplica la fuerza, que es mayor cuando estamos acostados y por lo tanto el efecto que causamos en el colchón es menor.

De estos ejemplos se puede concluir la necesidad de introducir un nuevo concepto, que refleje la fuerza por unidad de área que se denomina PRESIÓN. De esta forma la presión queda definida como la fuerza por la unidad de área y su ecuación queda como:

$P = \frac{F}{A}$  donde:  
 F es la fuerza,  
 A es el área donde se aplica la fuerza F,  
 P es la presión.

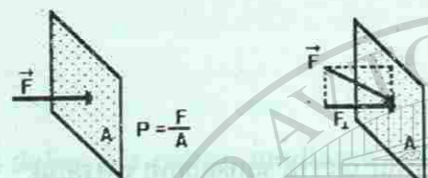


Figura No. 1

Un aspecto importante es que la fuerza que se utiliza es la perpendicular al área A. Si la fuerza F no es perpendicular al área, solo debe tenerse en cuenta la componente de la fuerza, que sea perpendicular al área.

Las unidades de la presión se derivan de las unidades de la fuerza y del área. Así como en el sistema internacional (SI) de unidades la fuerza se expresa en Newton (N) y el área en metros cuadrados ( $m^2$ ), las unidades de la presión en el SI son  $N/m^2$ , que fue llamada **Pascal (Pa)** en honor al físico francés **Blaise Pascal** (1623-1662) cuya contribución al estudio de los fluidos fue fundamental. La presión es una de las magnitudes físicas que más unidades tiene. Otras unidades son: libras por pulgada cuadrada ( $lb/plg^2$ ) o en inglés psi, muy utilizada al medir la presión en las llantas de los automóviles, milímetros de mercurio (mm de Hg), la atmósfera (atm) y el bar, utilizadas generalmente al referirse a la presión atmosférica; por mencionar solo las más comunes. Algunas conversiones entre estas unidades se dan a continuación:

1 bar =  $10^5$  Pa = 14.50 psi  
 1 atm = 760 mm de Hg =  $1.013 \times 10^5$  Pa  
 1 atm = 1.013 bar = 1.013 mbar (milibar)

Analicemos ahora el ejemplo que vimos al principio de la mujer caminando en la arena. Supongamos que la mujer tiene una masa de 60 kg, por lo que su peso será de aproximadamente:

$W = m \cdot g$  recordando que g es la aceleración de la gravedad, que tomaremos igual a  $9.8 \text{ m/s}^2$ .  
 $W = 60 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$   
 $W = 588 \text{ N}$

Cuando está sin zapatos el área de los pies es aproximadamente  $0.0392 \text{ m}^2$ , por lo que la presión que ejerce sobre la arena es de:

$P = \frac{F}{A}$   
 $P = \frac{588 \text{ N}}{0.0392 \text{ m}^2}$   
 $P = 15000 \text{ Pa}$

Cuando tiene zapatos de tacón fino el área es de  $0.0052 \text{ m}^2$  aproximadamente, por lo que la presión que ejerce sobre la arena es de:

$P = \frac{F}{A} = \frac{588 \text{ N}}{0.0052 \text{ m}^2} = 113076.9 \text{ Pa}$

Como se observa la presión en este segundo caso es mucho mayor, lo que explica el hecho de que la huella en la arena sea mucho más profunda.

Con ayuda del concepto de presión pueden responderse las otras interrogantes planteadas.

**Ejemplo No. 1**

Calcule la presión que un niño ejerce sobre el suelo, si su masa es de 45 kilogramos y el área de las suelas de su zapatos es de  $300 \text{ cm}^2$ .

Datos  
 $m = 45 \text{ kg}$   
 $A = 300 \text{ cm}^2 = 0.03 \text{ m}^2$

Solución:

$P = \frac{F}{A}$

$P = \frac{mg}{A}$

$P = \frac{45 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0.03 \text{ m}^2}$

$P = \frac{441 \text{ N}}{0.03 \text{ m}^2}$

$P = 14\,700 \text{ Pa}$

Si el mismo niño estuviera parado sobre la nieve con esquíes, de 1.5 metros de largo y 10 centímetros de ancho, ¿cuál sería la presión que ejerce sobre la nieve?

Datos:  
 $m = 45 \text{ kg}$   
 $A = l \times a = 1.5 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.15 \text{ m}^2$   
 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$P = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{45 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{0.15 \text{ m}^2}$

$P = \frac{441 \text{ N}}{0.15 \text{ m}^2} = 2\,940 \text{ Pa}$

**Ejemplo No. 2**

Un tractor de orugas tiene una masa de 6 610 kilogramos y el área de apoyo de las 2 orugas es de  $1.4 \text{ m}^2$ . ¿Qué presión ejerce el tractor sobre la calle?

Datos:  
 $m = 6\,610 \text{ kg}$   
 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$   
 $A = 1.4 \text{ m}^2$

Solución:

Peso:  $W = mg$

$w = 6\,610 \text{ kg} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$w = 64\,778 \text{ N}$

Presión:  $P = \frac{W}{A}$

$P = \frac{64\,778 \text{ N}}{1.4 \text{ m}^2}$

$P = 46\,270 \text{ Pa}$

## Ejemplo No. 3

Un niño clava una tachuela en la pared ejerciendo una fuerza de 50 N. ¿Cuál es la presión que la punta de la tachuela ejerce sobre la pared, si el área de la punta es de  $0.1 \text{ mm}^2$ ?

Datos:  
 $F = 50 \text{ N}$   
 $A = 0.1 \text{ mm}^2 = 0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$

Solución:  
 $P = \frac{F}{A}$   
 $P = \frac{50 \text{ N}}{0.000001 \text{ m}^2}$   
 $P = 500\,000\,000 \text{ Pa} = 500\,000 \text{ kPa}$

Compare la respuesta con la del ejercicio anterior.

## PRESIÓN Y FLUIDOS

Cuando tenemos un sólido podemos aplicarle una fuerza a cualquiera de sus puntos, incluso en un área muy pequeña, y ello provocará que el mismo se deforme, de acuerdo a la magnitud de la fuerza. En el caso de los fluidos, debido a sus propiedades y específicamente a la de fluir, es imposible aplicarle una fuerza en un punto. Por ello, para el tratamiento de los fluidos, tiene gran importancia el concepto de presión, ya que las fuerzas sobre ellos se aplica con ayuda de una superficie, de determinada área.

Por otra parte los fluidos ejercen fuerzas sobre las superficies con las cuales están en contacto. Estas fuerzas pueden ser calculadas si se conoce el valor de la presión, ejercida por el fluido, y el área de la superficie dada.

Ya conocemos que la presión se define como la fuerza por unidad de área, teniendo en cuenta que la fuerza es perpendicular a la superficie. Por ello los fluidos ejercen fuerzas que son siempre perpendiculares a las superficies con las que están en contacto. Ello puede demostrarse si en las paredes de un recipiente que contiene un líquido se abren agujeros. Se observará que los chorros de líquido al salir del recipiente lo hacen en dirección perpendicular a las paredes.

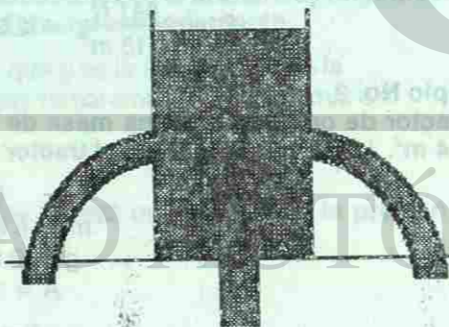


Figura No. 2

Cuando colocamos un sólido sobre una mesa, éste ejerce fuerza sobre ella, pero no sentimos fuerza si colocamos las manos en las paredes laterales del sólido. En el caso de los fluidos la situación es diferente, ya que ellos ejercen fuerzas sobre cualquier superficie con la que estén en contacto, independiente de su dirección. Desde el punto de vista de la presión esto se resume con la frase: *los fluidos ejercen presión en todas direcciones.*

Por lo anterior podemos concluir que cualquier cuerpo que esté sumergido en un fluido soportará una presión, ejercida sobre él, por parte del fluido. Este hecho ha sido experimentado por todos al nadar por debajo de la superficie del agua, sobre todo por la sensación en los oídos, que se debe a la presión del agua sobre los tímpanos.

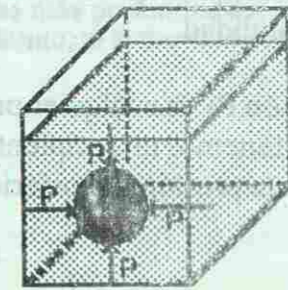


Figura No. 3

Consideremos un fluido en reposo. Si analizamos un cubo de volumen muy pequeño, de forma que se pueda despreciar la fuerza de gravedad sobre él, en el centro del fluido, tendremos que significar que sobre cada cara del cubo se ejerce una presión, por parte del resto del fluido. Estas presiones sobre las diferentes caras del cubo tienen que ser iguales, ya que de lo contrario el cubo se desplazaría hacia otro lugar, contradiciendo el hecho planteado al inicio que el fluido estaba en reposo. De aquí hacemos una conclusión muy importante: *El fluido ejerce la misma presión en todas direcciones, en un punto del mismo.*

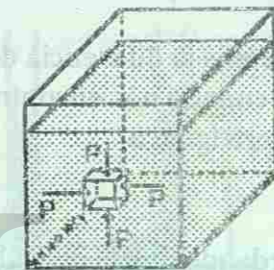


Figura No. 4

Para determinar de qué factores depende la presión, en el interior de un fluido debemos analizar que la presión que el fluido ejerce sobre una superficie depende del peso de la columna del mismo que se encuentra sobre la superficie. Por ello si consideramos un cuadrado de área  $A$ , de esta superficie, el peso de la columna de fluido sobre este cuadrado será:

$$W = mg$$

$$W = \rho Vg$$

$$W = \rho gAh$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $A$  es el área del cuadrado y  $h$  es la profundidad a la que se encuentra el cuadrado por debajo de la superficie libre del fluido.

Para obtener la presión recordamos su definición, fuerza por unidad de área, por lo que la diferencia de presión entre el fondo y la superficie será:

$$P - P_0 = \frac{W}{A} = \frac{\rho gAh}{A} = \rho gh$$

$$P - P_0 = \rho gh$$

Donde  $P$  es la presión en el fondo y  $P_0$  es la presión en la superficie.

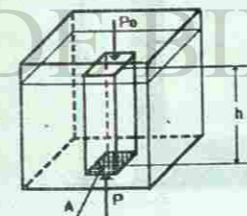


Figura No. 5

Toda esta deducción se ha hecho en la suposición de que la densidad del fluido  $\rho$  es constante y no cambia con la presión. Esta suposición es válida para la mayoría de los líquidos, por lo cual se dice que son incompresibles (no es posible comprimirlos), no así para los gases, que si son compresibles, o sea que su densidad depende de la presión.

De manera que la presión dentro de un líquido es directamente proporcional a su densidad y a la profundidad.

La presión  $P_0$  es cualquier presión que esté influyendo sobre la superficie del líquido. Por ejemplo si tenemos un recipiente abierto (puede ser un vaso de agua), sobre la superficie está influyendo la presión atmosférica y por lo tanto la presión a una profundidad  $h$  será igual a:

$$P = P_0 + \rho gh$$

Muy importante es observar que la presión en el interior del fluido solo depende de la profundidad y de la densidad del fluido y no de la forma del recipiente. Por ello si nos encontramos en una alberca, a un metro de la superficie del agua, o en un lago a la misma profundidad, la presión será en ambos casos la misma.

Evaluemos la diferencia de presión cuando nos encontramos a 1 metro de profundidad en el agua y cuando nos encontramos en la superficie. De la ecuación ya vista esta diferencia de presión será igual a:

$$P - P_0 = \rho gh$$

Recordando que la densidad del agua es de  $1000 \text{ kg/m}^3$  y que la aceleración de la gravedad es de  $9.8 \text{ m/s}^2$ , podemos calcular:

$$P - P_0 = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1 \text{ m} = 9800 \text{ Pa}$$

Si el cálculo lo realizáramos para el mercurio tendríamos que la densidad es de  $13600 \text{ kg/m}^3$  por lo que la presión será de:

$$P - P_0 = 13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1 \text{ m} = 133280 \text{ Pa}$$

Observe que la presión en este caso es mucho mayor, debido a la mayor densidad del mercurio.

A la expresión " $\rho gh$ " generalmente se le conoce como presión hidrostática, ya que es típica para fluidos en reposo.

#### Ejemplo No. 4

Determine la presión hidrostática sobre el fondo de una cisterna que contiene petróleo, si la altura de la columna del líquido es de 10 metros y su densidad es de  $800 \text{ kg/m}^3$

Datos:

$$h = 10 \text{ m}$$

$$\rho = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

Solución:

$$P_{\text{hidrost}} = \rho gh$$

$$P_{\text{hidrost}} = 800 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 10 \text{ m}$$

$$P_{\text{hidrost}} = 78400 \text{ Pa}$$

#### Ejemplo No. 5

La fosa de las Marianas, en el Océano Pacífico, es uno de los lugares más profundos del mundo, con una profundidad de 10 900 metros. ¿Cuál será la presión en el fondo, si la densidad del agua de mar es de  $1030 \text{ kg/m}^3$ ?

Datos:

$$h = 10900 \text{ m}$$

$$\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

Solución:

$$P_{\text{hidrost}} = \rho gh$$

$$P = 1030 \text{ kg/m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 10900 \text{ m}$$

$$P = 110024600 \text{ Pa}$$

Supongamos que tenemos un tubo en forma de U con cierta cantidad de líquido. Cómo será el nivel de líquido en las 2 ramas del tubo? En el fondo del tubo la presión tiene un valor dado por la densidad del líquido, la aceleración de la gravedad y la profundidad  $h$ , a partir de la superficie. Si medimos la profundidad por la rama de la izquierda o de la derecha su valor tiene que ser igual pues de lo contrario obtendríamos valores de presión diferentes para la rama izquierda y para la rama derecha del tubo. Por ello podemos concluir que si  $h$  tiene que ser igual para las 2 ramas del tubo, el nivel del líquido tiene que ser el mismo. Observe que el resultado se obtuvo a partir de dos cuestiones:

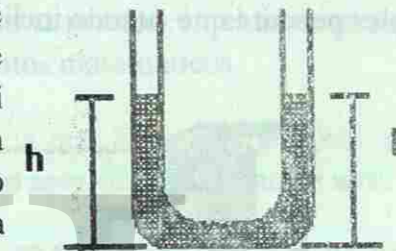


Figura No. 6

1. La presión en el fondo del tubo tiene que tener un valor dado.
2. La presión solo depende de la densidad del líquido y de la profundidad  $h$ .

El resultado obtenido no depende de la forma de las ramas del tubo. Puede ser que una rama sea de sección cuadrada y otra de sección cilíndrica, o de mayor diámetro. Así también lo mismo se cumplirá si hay tres o más ramas.

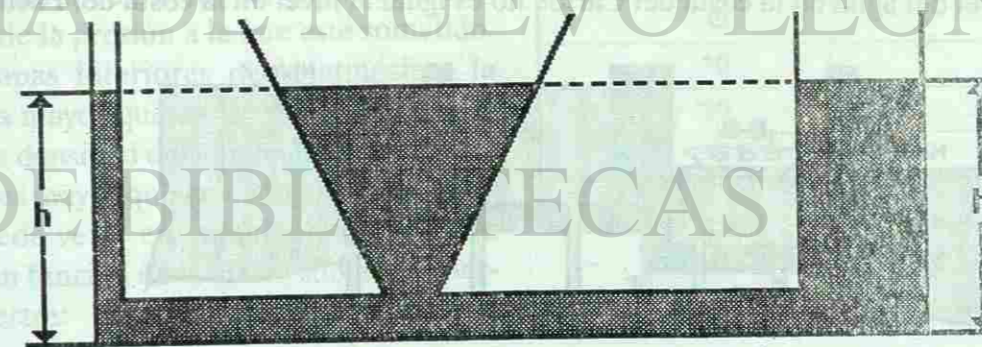


Figura No. 7

Este principio que hemos obtenido aquí se conoce con el nombre de principio de los vasos comunicantes y tiene importantes aplicaciones prácticas. En ocasiones vemos cuando los albañiles levantan paredes que para comprobar si las alturas son iguales toman una manguera con agua y se guían por los niveles del agua en dos ramas de la manguera. Están aplicando el principio de los vasos comunicantes aún sin saberlo.

En el mismo principio se basa el funcionamiento de los acueductos de las ciudades. Un tanque elevado se llena de agua y de allí fluye a las casas. Hasta qué nivel subirá el agua en las casas? Pues hasta el mismo nivel que tenga el tanque elevado. Si se construye un edificio de mayor altura que la del tanque, el agua no podrá llegar hasta allí pues su altura sólo puede igualar a la del tanque. El más simple dispositivo de vasos comunicantes es una cafetera, donde el nivel del café dentro de la cafetera y en el tubo para servir son siempre iguales; esta igualdad de los niveles permite que cuando inclinamos la cafetera podamos servir el café.

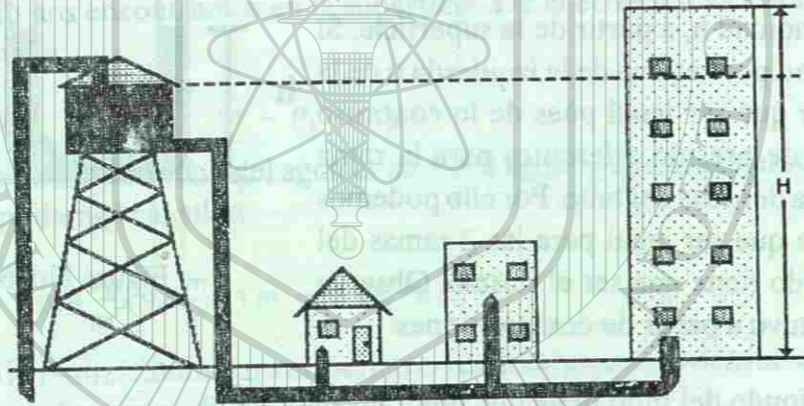


Figura No. 8

Una aplicación muy importante del principio de los vasos comunicantes es el sistema de esclusas en los canales, como por ejemplo el Canal de Panamá. En este caso los vasos comunicantes se utilizan para variar la altura de los barcos sobre el nivel del mar, ya que como se conoce el nivel del agua en la costa del Caribe no es igual al nivel en la costa del Pacífico.

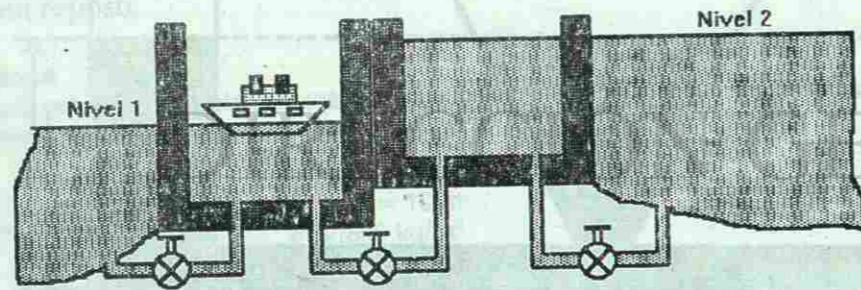


Figura No. 9

## PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Cuando escuchamos el informe del estado del tiempo muchas veces recibimos la información sobre la presión atmosférica. ¿Qué es este parámetro y a qué se debe su existencia?

Ya se ha mencionado el hecho de que todo fluido ejerce presión sobre los cuerpos que estén inmersos en él. Para el caso de los líquidos obtuvimos una expresión que nos permite calcular el valor de la presión en dependencia de la profundidad. Los gases, que también son fluidos, ejercen una presión sobre los cuerpos inmersos en ellos. Sin embargo la expresión para el cálculo de la presión en el interior de un gas es diferente de la de los líquidos, debido a que la densidad del gas depende muy fuertemente de la presión. A esto se debe el hecho de que los gases se consideran compresibles, o sea que se pueden comprimir aplicándoles una presión.

Por ello no vamos a dar una expresión para el cálculo de la presión en el interior de los gases, pues obtenerla requiere de determinados conocimientos matemáticos.

La Tierra se encuentra rodeada de una capa de gas, a la que llamamos atmósfera. En realidad es una mezcla de gases, pero se comporta como uno solo, al que llamamos aire.

La composición de la atmósfera es: 78 % de Nitrógeno, 20 % de Oxígeno, 1 % de Argón y el resto tiene gases como el dióxido de Carbono, Neón, Helio, vapor de agua, etc.

Es decir que todos nosotros nos encontramos constantemente en el interior de un fluido, la atmósfera, que ejerce una presión sobre nosotros, a la que llamamos presión atmosférica, debido a su peso. Esta enorme capa de aire "pesa" sobre nosotros y si no sentimos su acción en una dirección determinada se debe a que, como ya se dijo, los fluidos ejercen su presión en todas direcciones. O sea que de abajo hacia arriba también se ejerce igual presión.

Tabla No. 2. Densidad del aire.

Como ya se ha mencionado la densidad de los gases depende de la presión. Así para el aire, considerándolo como un gas, su densidad depende de la presión a la que esté sometido. En las capas inferiores de la atmósfera la presión es mayor que en las capas superiores, por ello la densidad del aire en la superficie de la Tierra es mayor que en las capas superiores, como puede verse en la tabla de la densidad del aire en función de la altura sobre la superficie terrestre:

ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR (km)	DENSIDAD DEL AIRE (kg/m <sup>3</sup> )
0	1.23
10	0.41
20	0.09
30	0.018

Otros factores que hacen complicado el cálculo de la presión atmosférica son: la diferencia

de temperaturas en las distintas capas, el hecho de que la mezcla de gases atmosféricos no es uniforme y el hecho de que no es exacto el límite superior de la atmósfera.

La presión atmosférica normal, a nivel del mar, es igual a 760 mm de Hg. En otras unidades:

$$760 \text{ mm de Hg} = 1013 \text{ mbar} = 14.7 \text{ psi} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Con la altura sobre el nivel del mar, la presión atmosférica disminuye, entre otras causas, como consecuencia de la disminución de la densidad del aire ya señalada. Por ejemplo en la ciudad de México, situada a aproximadamente 2250 m, sobre el nivel del mar, la presión atmosférica tiene valores típicos de 586 mm de Hg. Esta variación de la presión con la altura sirve para determinar la altura midiendo la presión atmosférica, pero debe tenerse en cuenta que ésta puede depender de otros factores como el estado del tiempo.

Esto puede verse en la siguiente tabla de dependencia de la presión atmosférica con la altura sobre el nivel del mar.

La medición de la presión atmosférica tiene gran importancia para la predicción del estado del tiempo. Por ejemplo en el centro de un huracán la presión atmosférica tiene valores por debajo de los valores normales y mientras más bajos quiere decir que más fuerte es el huracán. Generalmente valores bajos de presión atmosférica indican la proximidad de la lluvia y valores altos indican buen tiempo, aunque pueden haber excepciones pues las condiciones en las atmósfera son en extremo complejas y dependen de otros muchos factores además de la presión atmosférica.

Cuando se mide la presión con respecto a la presión atmosférica se le llama presión manométrica. Muchos instrumentos para medir presión están calibrados de tal forma que indican esta presión, o sea que cuando están abiertos al aire indican en su escala cero. Este es el caso de los instrumentos para medir la presión en el interior de las llantas de los automóviles, que normalmente debe ser de 25 a 30 lbf/plg<sup>2</sup> (psi). Esto quiere decir que en el interior de la llanta hay 25 o 30 psi por encima de la presión atmosférica.

De manera que:

$$P_{\text{man}} = P - P_{\text{atm}}$$

Como se observa aquí la presión manométrica puede tener valores positivos (si  $P > P_{\text{atm}}$ ), negativos (si  $P < P_{\text{atm}}$ ) o cero (si  $P = P_{\text{atm}}$ ).

Por otra parte cuando se mide la presión total, teniendo en cuenta la presión atmosférica, se dice que se tiene la presión absoluta. O sea que:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{man}}$$

#### Ejemplo No. 6

Calcule la presión absoluta, que sobre el fondo de la cisterna, del ejemplo No. 4, ejerce el petróleo, si la presión atmosférica es  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ .

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{hidrost}}$$

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + \rho gh$$

$$P_{\text{abs}} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} + 78\,400 \text{ Pa} = 179\,700 \text{ Pa}$$

#### Ejemplo No. 7

¿Cuál será la presión absoluta en el fondo de la fosa de las Marianas, descrita en un problema anterior, si la presión atmosférica es de  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ?

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{hidrost}}$$

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + \rho gh$$

$$P_{\text{abs}} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} + 110\,024\,600 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{abs}} = 110\,125\,900 \text{ Pa}$$

¿Cuántas veces mayor que la presión atmosférica, es esta presión?

$$\frac{P}{P_{\text{atm}}} = \frac{110\,125\,900 \text{ Pa}}{101\,300 \text{ Pa}}$$

$$\frac{P}{P_{\text{atm}}} = 1\,087.12 \text{ veces}$$

O sea que a esa profundidad la presión es más de mil veces la presión atmosférica.

Si la presión absoluta en un recipiente es menor que la presión atmosférica, tendremos una presión manométrica negativa y a este estado se le denomina vacío. El vacío absoluto, que significaría una presión absoluta cero, es un estado ideal, pues no se ha logrado, hasta ahora, en ningún lugar. En los laboratorios se han logrado estados de vacío, con presiones absolutas de hasta  $10^{-12} \text{ Pa}$ . En el espacio cósmico también existe vacío con valores muy bajos de presión.

El cuerpo humano, así como el de los animales terrestres, está acostumbrado a funcionar bajo la acción de la presión atmosférica. Los fluidos internos del cuerpo, que ejercen una presión compensadora hacia afuera, hacen posible que el cuerpo no se comprima bajo la acción de la presión atmosférica. Los astronautas, en el espacio cósmico, llevan una escafandra que sirve no sólo para suministrarles el oxígeno para la respiración, sino también para mantenerlos a una presión externa similar a la de la Tierra.

La presión atmosférica hace posible el funcionamiento de muchos aparatos en la industria y la vida doméstica. Un ejemplo de ello puede ser el simple popote con el que tomamos líquidos de recipientes. Cuando aspiramos en el popote logramos que la presión en el interior del popote disminuya; como sobre el líquido, en el recipiente está actuando la presión atmosférica, ésta "empuja" el líquido para el interior del popote y por ello lo podemos tomar. De la misma forma podemos mencionar los goteros, que consisten en un tubo con un extremo afinado y en el otro extremo se le superpone una membrana de caucho. Al oprimir la membrana el aire que está en el interior del tubo sale al exterior, provocando que la presión

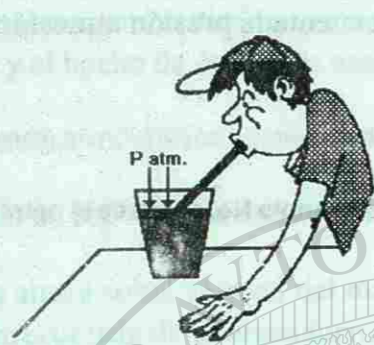


Figura No. 10

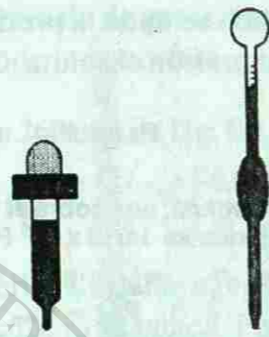


Figura No. 11

en el interior sea menor que la atmosférica; si ahora se sumerge el extremo del tubo en un líquido y se libera la membrana, el líquido penetrará en el tubo bajo la acción de la presión atmosférica. Un instrumento similar es utilizado en los laboratorios de Química, para depositar gotas de líquidos o volúmenes determinados.

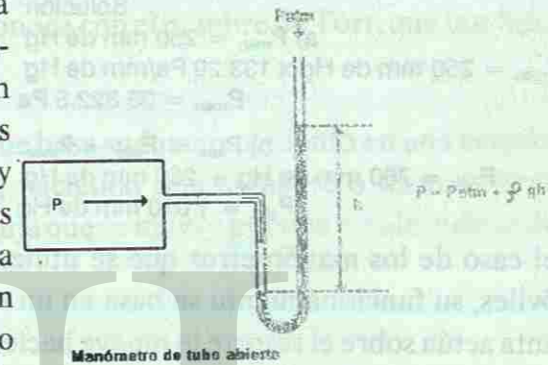
La respiración de nuestro cuerpo se realiza por un principio similar. Aspiramos el aire cuando aumentamos el volumen de nuestros pulmones, lo cual provoca que la presión en el interior disminuye con respecto a la presión atmosférica, por lo que el aire penetra al interior. Al expulsar el aire lo hacemos disminuyendo el volumen de nuestros pulmones, con lo cual aumenta la presión, con respecto a la presión atmosférica haciendo que el aire salga al exterior. Es por ello que en las alturas es más difícil respirar, pues aunque aumentamos el volumen de nuestros pulmones y la presión interna disminuye, la presión externa es pequeña y no es suficiente para que el aire penetre.

Lo mismo ocurre en las profundidades del agua; supongamos que un hombre está sumergido en el agua, a 10 metros de profundidad, y tiene en la boca una manguera que lo une al aire en la superficie del agua. Debido a que sobre su cuerpo está actuando una presión absoluta de alrededor de 2 atm (la atmosférica más la presión hidrostática del agua) no puede con su fuerza muscular hacer que el volumen de los pulmones aumente lo suficiente, para que la presión atmosférica sea mayor que la presión interna y provoque que el aire penetre en los pulmones. Por ello los tanques de aire para los buzos contienen aire a una presión muy grande (por ejemplo a 2 atm), de forma que sea mayor que la presión a la que está sometido el cuerpo del buzo y el aire penetre en los pulmones fácilmente.

## EQUIPOS PARA MEDIR LA PRESIÓN

Existen gran cantidad de dispositivos que permiten medir la presión. Los más simples se basan en el principio de los vasos comunicantes, que ya hemos explicado, otros se basan en un resorte y otros en sensores que reaccionan a diferencias de presión, como puede ser un material piezoeléctrico.

Supongamos que tenemos un tubo en forma de U, con cierta cantidad de líquido en el interior. Ya sabemos que si sobre las dos ramas de la U actúa la misma presión el nivel del líquido será el mismo. Supongamos ahora que una de las ramas se deja abierta al aire, por lo que en ella actuará la presión atmosférica, y la otra rama se conecta a un recipiente donde hay un gas cuya presión queremos medir. Si la presión en el recipiente es mayor que la atmosférica el gas empujará al líquido y provocará que el nivel ya no será igual en ambas ramas. De manera que ahora la presión en una rama es la que queremos medir y en la otra será la presión atmosférica más la producida por la capa del líquido que excede al nivel de la otra rama, en una altura  $h$ . De esta forma midiendo la diferencia de altura de líquido en las dos ramas del tubo podemos conocer la presión en el recipiente:



Manómetro de tubo abierto

Figura No. 12

$$P = P_{\text{atm}} + \rho g h$$

Donde  $\rho$  es la densidad del líquido.  
 $g$  es la aceleración de la gravedad  
 $h$  es la diferencia de alturas entre las dos ramas del tubo.

Esta es la misma expresión de la presión en el interior de un líquido, que ya habíamos obtenido.

El dispositivo descrito se denomina manómetro y por cuanto tiene una rama abierta a la atmósfera se le llama manómetro de tubo abierto.

En la mayoría de los casos el líquido utilizado es el mercurio, pues por tener una densidad muy grande ( $13\,600\text{ kg/m}^3$ ) permite medir presiones grandes. Puede en principio utilizarse cualquier líquido, pero está claro que si la densidad es menor, la altura  $h$  tendría que ser mayor, para poder medir iguales presiones.

Como se ve, la presión queda determinada por la altura que tenga el líquido, por lo cual algunas unidades de presión se han tomado como si fueran unidades de longitud. Tal es el caso de la unidad mm de Mercurio (mm de Hg), de la que ya hablamos anteriormente.



## Ejemplo No. 8

Se tiene un tanque cerrado, lleno de oxígeno, que al conectarle un manómetro de tubo abierto la diferencia entre las dos columnas de mercurio fue de 250 milímetros como se muestra en la figura. Si la presión atmosférica era de 760 mm de mercurio:

- a) Calcule la presión manométrica del oxígeno, dentro del tanque. Expresé el resultado en mm de mercurio y en Pascal.  
 b) Calcule la presión absoluta del oxígeno dentro del tanque.

Datos:  
 $h = 250 \text{ mm de Hg}$   
 $P_{\text{atm}} = 760 \text{ mm de Hg}$   
 $1 \text{ mm de Hg} = 133.29 \text{ Pa}$

Solución:  
 a)  $P_{\text{man}} = 250 \text{ mm de Hg}$   
 $P_{\text{man}} = 250 \text{ mm de Hg} \times 133.29 \text{ Pa/mm de Hg}$   
 $P_{\text{man}} = 33\,322.5 \text{ Pa}$   
 b)  $P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} + P_{\text{man}}$   
 $P_{\text{abs}} = 760 \text{ mm de Hg} + 250 \text{ mm de Hg}$   
 $P_{\text{abs}} = 1\,010 \text{ mm de Hg}$

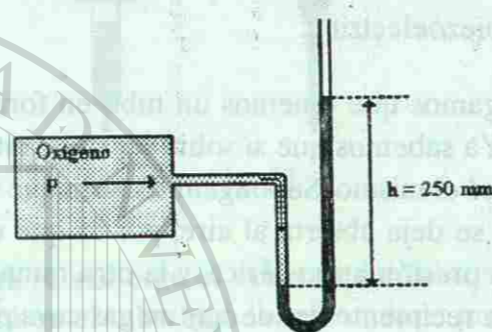


Figura No. 13

En el caso de los manómetros que se utilizan para medir la presión en las llantas de los automóviles, su funcionamiento se basa en un resorte acoplado a una escala. Cuando el aire de la llanta actúa sobre el resorte lo mueve haciendo salir la escala, lo cual nos permite conocer el valor de la presión manométrica en el interior de la llanta. Recuerde que en este caso cuando el manómetro está al aire (presión atmosférica), su escala marca cero, o sea que lo que mide es la presión por encima de la atmosférica.

Normalmente la presión atmosférica se mide con el barómetro, que fue inventado por Evangelista Torricelli (1608-1647). En realidad el barómetro es un manómetro modificado. Se toma un tubo, cerrado por un extremo y abierto por el otro, lleno de mercurio y se sumerge en una cubeta, también llena de este líquido. Luego se saca de la cubeta el extremo cerrado del tubo y se sitúa en posición vertical. Se observará que el nivel del mercurio en el tubo disminuirá un poco, dejando un espacio vacío en la parte superior del tubo. Ello se debe a que la presión atmosférica está actuando sobre la superficie abierta del mercurio de la cubeta y "empuja" al mercurio en el interior del tubo, teniendo en cuenta que en el extremo superior del tubo no hay aire, pues en un inicio el tubo estaba lleno de mercurio. Para una presión atmosférica normal la altura del mercurio sobre el nivel del líquido, en la cubeta, debe ser de 760 mm. Por ello a la presión atmosférica normal se la ha dado el valor de 760 mm de mercurio (760 mm de Hg). Cuando la presión atmosférica disminuye la altura de la columna de mercurio también disminuirá. Si se usara otro líquido, en lugar de mercurio, la columna que compensaría una presión atmosférica normal tendría mayor altura. Por ejemplo para el agua la altura sería de alrededor de 10.3 m. Esto se comprueba cuando sacamos un vaso invertido de una cubeta con agua y vemos que la misma no se sale del vaso. El mismo principio se aplica en los dispositivos para recolectar el agua de los garrafones de agua potable, donde el garrafón se mantiene invertido, pero el agua no se derrama pues está soportada por la presión atmosférica.

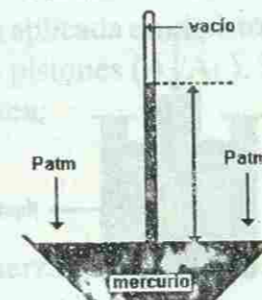
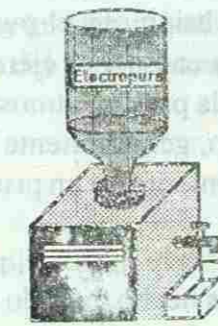
Barómetro de Mercurio  
Figura No. 14

Figura No. 15

En honor a Torricelli, a un mm de mercurio se le conoce con el nombre de Torr, que también es una unidad de medida de la presión.

Otro tipo de barómetro es el llamado anerode, que basa su funcionamiento en una cámara flexible sobre la cual actúa la presión atmosférica, haciendo que aumente o disminuya su volumen. Esta cámara flexible está acoplada a una aguja que se mueve por una escala indicando la presión atmosférica existente.

## PRINCIPIO DE PASCAL

Analicemos de nuevo la expresión de la presión en el interior del volumen de un líquido:

$$P - P_0 = \rho g h$$

de la cual podemos ver que la diferencia entre las presiones sólo depende de la densidad del líquido, de la aceleración de la gravedad y de la altura.

Consideremos dentro del volumen de un líquido dos puntos, A y B, situados a diferentes profundidades, de tal forma que la diferencia de las profundidades entre los dos puntos es h. (ver figura 16). La diferencia entre las presiones en A y en B, sólo depende de la densidad del líquido, de la aceleración de la gravedad y de la altura h, por ello:

$$P_A - P_B = \rho g h$$

Si por alguna causa, la presión en A aumenta en un valor dP, la presión en B tiene que aumentar en un valor igual dP, pues si no fuera así la ecuación dada estaría incorrecta y sabemos que es correcta. O sea:

$$(P_A + dP) - (P_B + dP) = \rho g h$$

Observe que aquí se está suponiendo, que al aumentar la presión, la densidad sigue con el mismo valor, lo cual ya se había explicado, es válido para líquidos, pero no para gases.

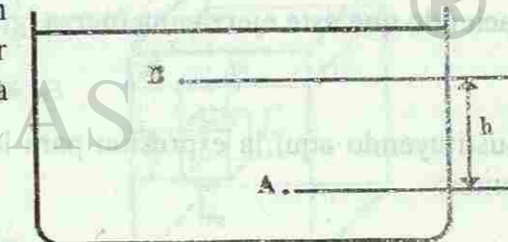


Figura No. 16

El aumento de la presión, en el punto A, puede ser provocado por cualquier causa. Por ejemplo puede que, si el recipiente es abierto, la presión atmosférica aumente; si es un recipiente cerrado, generalmente el aumento de la presión se debe al movimiento de un pistón oprimiendo el líquido (ver figura).

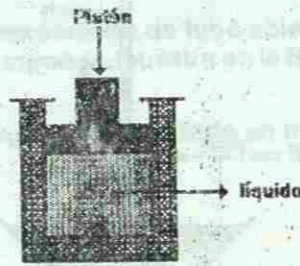


Figura No. 17

El análisis que hemos hecho, basado en la ecuación de la presión en el interior de un líquido, nos lleva al enunciado de un principio de la Hidrostática, conocido con el nombre de *Principio de Pascal* y que se formula de la siguiente forma:

*Los cambios de presión, en cualquier punto en un fluido encerrado y en reposo, se transmiten a todos los puntos del fluido y actúan en todas direcciones.*

Este principio fue descubierto por Blaise Pascal (1623 -1662), matemático, físico y teólogo francés, en forma experimental. Ahora, como ya hemos visto, se puede obtener a partir de la aplicación de la ecuación de la presión en el interior de un líquido.

El principio de Pascal se aplica en muchos dispositivos que se utilizan en la vida diaria y en la industria. El ejemplo más típico es el de las máquinas hidráulicas como pueden ser los elevadores y prensas hidráulicas. En estos dispositivos se utiliza un sistema de pistones, llenos de líquido, para "multiplicar" la fuerza aplicada.

Así supongamos que tenemos 2 cilindros, con sus pistones. El cilindro 1 con un área  $A_1$  y el cilindro 2 con un área  $A_2$ . Ambos están conectados y totalmente llenos de un líquido, generalmente aceite. Si sobre el pistón del cilindro 1 se ejerce una fuerza  $F_1$ , ésta provoca un aumento de la presión en el líquido de:

$$P = \frac{F_1}{A_1}$$

Como ya se ha dicho, según el principio de Pascal, el líquido transmite la presión sin cambio, por lo que en el cilindro 2 existirá una presión igual, que actuará sobre el pistón del cilindro 2, haciendo que éste ejerza una fuerza igual a:

$$F_2 = P \cdot A_2$$

Sustituyendo aquí la expresión para la presión  $P$ , obtenemos:

$$F_2 = \left(\frac{F_1}{A_1}\right) \cdot A_2 = F_1 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)$$

Como se puede ver la fuerza obtenida en el pistón 2 es

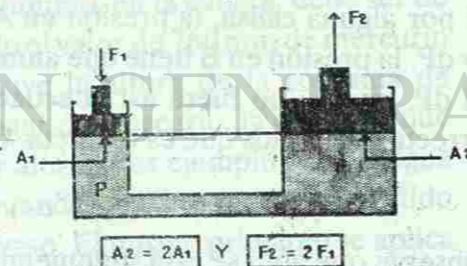


Figura No. 18

igual a la fuerza aplicada en el pistón 1, pero multiplicada por un factor igual a la relación entre las áreas de los pistones ( $A_2/A_1$ ). Supongamos que el área del pistón 2 sea dos veces el área del pistón 1, o sea:

$$\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = 2$$

por lo que la fuerza en el pistón 2 será dos veces la fuerza aplicada en el pistón 1:

$$F_2 = 2F_1$$

de lo que se ve que la fuerza obtenida es el doble de la aplicada. Note que esto es una consecuencia del principio de Pascal, pues se consideró que la presión se transmite del pistón 1 al 2 sin cambio.

El conocido gato hidráulico, utilizado para elevar los automóviles, funciona en base a este principio. Asimismo los frenos hidráulicos de los vehículos y las prensas utilizadas para comprimir materiales.

Existen equipos similares que funcionan con aire, como los sistemas para abrir y cerrar las puertas en los autobuses, y que en este caso se denominan máquinas neumáticas.

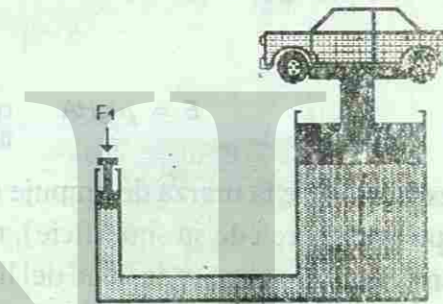


Figura No. 19

## PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

El otro principio fundamental de la hidrostática es el principio de Arquímedes, que nos permite explicar el hecho de que los cuerpos floten en los fluidos.

El principio de Arquímedes es también una consecuencia de la dependencia de la presión, dentro del fluido, con la profundidad. Por ello vamos a comenzar el análisis a partir de la expresión de la presión con la profundidad, en el fluido:

$$P - P_0 = \rho g h$$

Supongamos que tenemos un cuerpo, en forma de cubo de lado  $H$ . Lo sumergimos totalmente en un líquido, de forma que su superficie superior esté a una profundidad  $h$  de la superficie del líquido.

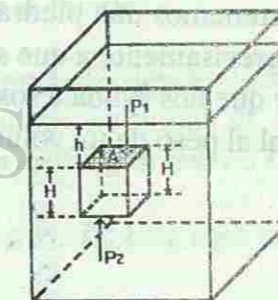


Figura No. 20

Sobre la superficie superior del cuerpo actúa una presión de  $\rho g h$  y por lo tanto la fuerza sobre esa superficie será de:

$$F_1 = \rho g h A \quad \text{dirigida hacia abajo. } A \text{ es el área de la superficie superior del cuerpo.}$$

Sobre la superficie inferior del cuerpo actúa una presión de  $\rho g (h + H)$ , pues recordemos que esta superficie está a diferente profundidad, que la superficie superior. La fuerza total sobre la superficie inferior del cuerpo será de:

$$F_2 = \rho g (h + H) A$$

y dirigida hacia arriba. De estas ecuaciones vemos que sobre el cuerpo actúa una fuerza resultante, dirigida hacia arriba y que podemos calcular restando las fuerzas  $F_2$  y  $F_1$  lo que nos daría:

$$E = F_2 - F_1 = \rho g (h + H) A - \rho g h A$$

o sea:

$$E = \rho g H A \quad \text{que es la llamada fuerza de empuje o fuerza de flotación (E).}$$

Analizando la expresión de la fuerza de empuje obtenida, vemos que el producto de  $H$  por  $A$  (altura del cuerpo por el área de su superficie), no es más que el volumen del cuerpo  $V$ ,  $E = \rho g V$ . El volumen del cuerpo por la densidad del líquido nos da la masa de líquido desplazada por el cuerpo sumergido. Esta masa multiplicada por la aceleración de la gravedad nos da el peso del volumen del líquido desplazado por el cuerpo sumergido.

O sea que la fuerza de empuje que recibe el cuerpo, es numéricamente igual al peso del líquido desplazado por el cuerpo. Este es el enunciado del principio de Arquímedes:

**Un cuerpo sumergido recibe una fuerza de empuje igual al peso del fluido que desplaza.**

Este principio es válido para líquidos y gases, pues ambos son fluidos.

Cuando sostenemos una piedra dentro del agua notamos que pesa menos que en el aire. Esto se debe precisamente a que sobre la piedra está actuando la fuerza de empuje, dirigida hacia arriba, y que nos ayuda a sostenerla. La magnitud de la fuerza de empuje que recibe la piedra, es igual al peso de un volumen de agua igual al volumen de la piedra.

### Ejemplo No. 9

Determinar la fuerza de empuje que actúa sobre una piedra de  $1.6 \text{ m}^3$  de volumen, sumergida en una alberca de agua dulce ( $\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

Datos:

$$V = 1.6 \text{ m}^3$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

Solución:

$$E = g \rho V$$

$$E = 9.8 \text{ m/s}^2 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 1.6 \text{ m}^3 = 15680 \text{ N}$$



Figura No. 21

Observe que la magnitud de la fuerza de empuje está directamente relacionada con el volumen del cuerpo, y por tanto con el peso del volumen de líquido desplazado por el cuerpo. Si un cuerpo está totalmente sumergido en el líquido desplaza un volumen de líquido igual a su propio volumen. Si está parcialmente sumergido desplaza un volumen de líquido menor que su propio volumen, pero igual al volumen del cuerpo que esté sumergido.



Figura No. 22

Note que la fuerza de empuje no está relacionada con el peso del cuerpo. Cuerpos de igual volumen, pero diferentes pesos, totalmente sumergidos en un fluido, sufren iguales fuerzas de empuje.

A partir del principio de Arquímedes podemos analizar la flotación de los cuerpos. ¿De qué depende que un cuerpo flote en el agua y otro no? ¿Por qué un cuerpo de madera maciza flota en el agua, pero uno, de igual volumen, de hierro macizo se hunde?.

Para responder estas preguntas debemos partir de que la fuerza que tiende a que el cuerpo flote es la fuerza de empuje ( $E$ ) y la que tiende a que el cuerpo se hunda es el peso del cuerpo ( $P$ ). En dependencia de la relación entre estas 2 fuerzas se pueden tener 3 situaciones:

1. La fuerza de empuje es menor que el peso del cuerpo ( $E < P$ ). En este caso el cuerpo se hundirá.
2. La fuerza de empuje es igual al peso del cuerpo ( $E = P$ ). El cuerpo puede flotar en cualquier posición dentro del fluido.

3. La fuerza de empuje es mayor que el peso del cuerpo ( $E > P$ ). El cuerpo se moverá hacia la superficie del fluido y comenzará a salirse del fluido. Al disminuir el volumen de fluido desplazado disminuirá la fuerza de empuje y cuando sea igual al peso, el cuerpo quedará flotando. En este caso el peso del volumen de fluido desplazado será igual al peso del cuerpo.

**Ejemplo No. 10**

Si la densidad de la piedra es de  $2\,800\text{ kg/m}^3$ , ¿podría flotar la piedra en la alberca?

Datos:

$$V = 1.6\text{ m}^3$$

$$\rho_c = 2\,800\text{ kg/m}^3$$

$$G = 9.8\text{ m/s}^2$$

$$E = 15\,680\text{ N}$$

Solución:

$$W = mg$$

$$W = \rho V g$$

$$W = 2\,800\text{ kg/m}^3 \times 1.6\text{ m}^3 \times 9.8\text{ m/s}^2 = 43\,904\text{ N}$$

Como se observa el peso es mayor que el empuje, por lo que la piedra se hundirá en el agua.

$$W > E$$

$$43\,904\text{ N} > 15\,680\text{ N}$$

Podemos analizar estas relaciones a partir del concepto de densidad. La densidad del cuerpo es la masa del cuerpo dividida por el volumen del mismo. Observe que no es lo mismo la densidad del cuerpo, que la densidad del material del que esté hecho el cuerpo. Un barco de hierro tiene una densidad menor que la densidad del hierro, ya que no es un cuerpo compacto.

El peso del cuerpo es igual a su densidad ( $\rho_c$ ), multiplicada por el volumen ( $V$ ) del cuerpo y por la aceleración de la gravedad ( $g$ ). La fuerza de empuje es igual a la densidad del fluido ( $\rho$ ), multiplicada por el volumen ( $V$ ) del cuerpo y por la aceleración de la gravedad ( $g$ ).

Por ello, comparando ambas fuerzas:

$$P = \rho_c V g$$

$$E = \rho V g$$

De donde puede verse que si la densidad del cuerpo es mayor que la densidad del fluido, el peso del cuerpo será mayor que el empuje ( $P > E$ ) y el cuerpo se hundirá. Si por otra parte la densidad del cuerpo es menor que la del fluido, el peso será menor que el empuje ( $P < E$ ) y el cuerpo flotará.

**Ejemplo No. 11**

Un tronco de árbol, con forma de cilindro de 0.25 metros de diámetro y 4 metros de largo, cae al río. Si la densidad de la madera del tronco es de  $610\text{ kg/m}^3$ , determine si el tronco flotará en el agua del río.

Datos:

$$d = 0.25\text{ m}$$

$$L = 4\text{ m}$$

$$\rho_{\text{madera}} = 610\text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1\,000\text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.8\text{ m/s}^2$$

$$P = mg$$

$$m = \rho_{\text{madera}} V$$

$$V = \pi r^2 L = \pi d^2 L g / 4$$

$$V = 3.14 \times (0.25\text{ m})^2 \times 4\text{ m} / 4 = 0.1962\text{ m}^3$$

$$P = \rho_{\text{madera}} \pi d^2 L g / 4$$

$$P = 610\text{ kg/m}^3 \times 3.14 \times (0.25\text{ m})^2 \times 4\text{ m} \times 9.8\text{ m/s}^2$$

$$P = 1\,173.18\text{ N}$$

Peso del tronco.

La masa del tronco es igual a la densidad por el volumen del tronco.

El volumen del tronco se calcula por la fórmula del volumen de un cilindro.

Sustituyendo en la fórmula.

La fuerza de empuje, cuando el tronco está completamente sumergido, es igual al peso del volumen del líquido desplazado por todo el tronco:

$$E = \rho_{\text{agua}} V g$$

$$E = \rho_{\text{agua}} \pi d^2 L g / 4$$

$$E = 1\,000\text{ kg/m}^3 \times 3.14 \times (0.25\text{ m})^2 \times 4\text{ m} \times 9.8\text{ m/s}^2$$

$$E = 1\,923.25\text{ N}$$

Como se ve la fuerza de empuje es mayor que el peso, por lo que el tronco flotará. Observe que se asumió que el volumen del agua desplazada por el tronco es igual al volumen del tronco, considerando que el tronco estaba completamente sumergido. Así el tronco comienza a moverse hacia la superficie del agua y parte de él saldrá del río, quedando una parte dentro del agua y una parte fuera. ¿Qué parte del tronco quedará dentro del agua?

Para responder debemos recordar que la ascensión del tronco se detiene cuando el empuje sea igual al peso del tronco. Por ello:

$$E = \rho_{\text{agua}} V_{\text{sumergido}} g = P = \rho_{\text{madera}} V g$$

Observe que aquí se considera diferente el volumen sumergido ( $V_{\text{sumergido}}$ ) al volumen del tronco completo ( $V$ ).

$$\rho_{\text{agua}} V_{\text{sumergido}} = \rho_{\text{madera}} V$$

De donde podemos obtener el volumen sumergido:

$$V_{\text{sumergido}} = \frac{\rho_{\text{madera}} V}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{610\text{ kg/m}^3 \times 0.1962\text{ m}^3}{1\,000\text{ kg/m}^3}$$

$$V_{\text{sumergido}} = 0.1197\text{ m}^3$$

Cada barco, submarino o dirigible debe diseñarse de tal forma que desplace un volumen de fluido, cuyo peso sea igual al peso propio. Así un barco de 10 000 toneladas se construye lo bastante amplio para que desplace 10 000 toneladas de agua antes de que se hunda demasiado. En el caso de los submarinos se varía su peso haciendo entrar agua o aire en sus tanques interiores; la fuerza de empuje depende de su volumen, que es constante, mientras esté sumergido totalmente. Cuando el submarino debe sumergirse se hace entrar agua en los tanques.

aumenta el peso y se sumerge; para mantenerlo a una profundidad constante debe lograrse que el peso sea igual a la fuerza de empuje y para salir a la superficie hay que disminuir el peso, para lo cual expulsan agua de los tanques, mediante aire comprimido. Esto es independiente de los timones, que le permiten variar la profundidad cuando se mueven en el agua.

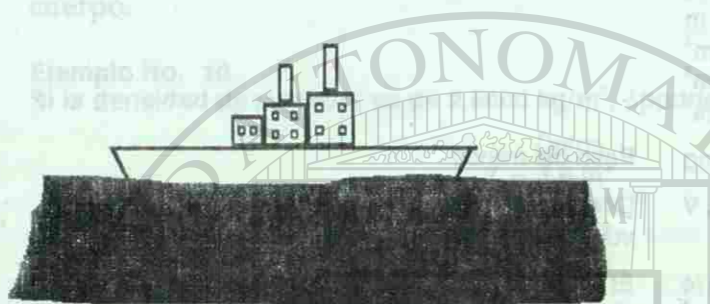


Figura No. 23

Las personas que no pueden flotar se debe a que tienen una densidad media de sus cuerpos grande, comparada con la del agua; generalmente son personas musculosas y por ello tienen mayor densidad. Por otra parte en el mar es más fácil flotar que en una alberca, pues el agua de mar tiene mayor densidad que el agua dulce.

## FLUIDOS EN MOVIMIENTO

Comenzaremos ahora el estudio de los fluidos en movimiento. La parte de la Física que se dedica al estudio de los fluidos en movimiento se denomina *Dinámica de los fluidos*. Existen muchas situaciones en las que observamos fluidos en movimiento: el agua al correr por las tuberías, ríos, el viento, el aire empujado por un abanico, etc. En dependencia del fluido que se esté analizando podemos diferenciar *la hidrodinámica*, cuando se trata de líquidos y *la aerodinámica*, cuando se trata de gases, fundamentalmente el aire.

La dinámica de los fluidos ha sido desarrollada a lo largo de mucho tiempo, gracias al trabajo de muchos científicos como Newton, Bernoulli, Pascal, etc. La hidrostática, estudiada anteriormente, puede considerarse como un caso particular de la hidrodinámica, cuando la velocidad del líquido es cero.

Por cuanto es imposible desarrollar todos los aspectos de la hidrodinámica, trataremos sólo los fundamentales.

## TIPOS DE FLUJO

Cuando observamos un fluido en movimiento, como puede ser el humo de un cigarro o el agua que sale de la llave, podemos ver que al inicio del chorro el movimiento del fluido es



Figura No. 24

ordenado, mientras que a una determinada distancia el fluido comienza a mezclarse y forma como torbellinos. Para realizar el estudio de los flujos y darse cuenta de cómo se realiza el movimiento del fluido se utiliza la representación de las trayectorias de las partículas que componen el fluido. Así si dibujamos una serie de líneas que correspondan con las trayectorias que siguen, en su movimiento, algunas de las partículas que componen el fluido, tendremos un cuadro aproximado de cómo está ocurriendo el movimiento. A estas líneas se les llama *líneas de corriente* y cuando tenemos un haz de las líneas de corriente se le llama *tubo de corriente*.

La diferencia entre las formas de fluir es determinada por el tipo de flujo que se establece. Así diferenciamos dos tipos de flujo: el laminar y el turbulento.

El flujo laminar es aquel en el que las partículas del fluido, que van una detrás de la otra, recorren trayectorias similares, las cuales no se cruzan. Las líneas de corriente de un fluido en el flujo laminar formarán un cuadro como el mostrado en la figura 25, donde puede observarse que las líneas de corriente no se cruzan. Generalmente este tipo de flujo existe cuando las velocidades de las partículas no es muy grande, aunque también depende de los obstáculos que se presentan durante el movimiento.

El flujo turbulento es el que presenta remolinos, las trayectorias de las partículas no son similares, sino que cambian con el tiempo. El cuadro de un flujo turbulento puede ser como el representado en la figura 26 y se puede observar en la columna de humo del cigarro, a cierta distancia del mismo, donde se observa la formación torbellinos y por tanto las líneas de corriente forman un cuadro complejo.

En nuestro estudio consideraremos solamente los flujos laminares, no los turbulentos, al estudio de los cuales se dedican muchos laboratorios en el mundo dado que presentan gran complejidad.

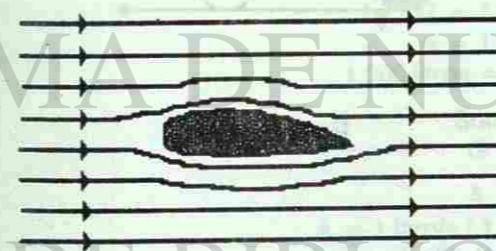


Figura 25. Líneas de corriente para un flujo laminar.

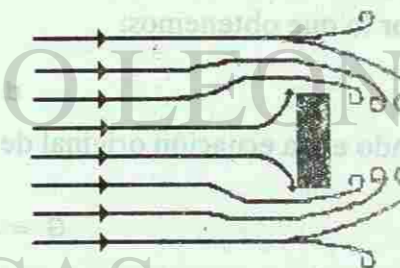


Figura 26. Líneas de corriente para un flujo turbulento.

Otra característica de los fluidos en movimiento es que en general al fluir unas capas del fluido deslizan sobre otras. Este deslizamiento se realiza con cierta resistencia, o sea que en general los fluidos presentan fricción o rozamiento. Esta fricción o rozamiento está relacionada con la viscosidad del fluido. Todos han notado cuán diferente fluye el agua, el aceite o la miel de abeja, lo cual se debe a la diferente viscosidad de estos fluidos. En nuestra presentación consideraremos que la fricción en los fluidos es muy pequeña por lo que no la tendremos en cuenta.

Una magnitud que caracteriza un flujo de un fluido determinado es el *gasto*. En general diferenciamos dos tipos de gasto:

- 1.- Gasto volumétrico (G): volumen del fluido por unidad de tiempo, que atraviesa una sección transversal del tubo de corriente.
- 2.- Gasto másico (Q): masa del fluido por unidad de tiempo, que atraviesa una sección transversal del tubo de corriente.

De acuerdo a la definición de gasto volumétrico, tenemos:

$$G = \frac{V}{t}$$

donde V es el volumen que atraviesa la sección transversal del tubo, en el tiempo t.

El volumen V es igual al área de la sección transversal A por la distancia d que recorre una capa de fluido en el tiempo t, por lo que: (figura 3)

$$V = Ad$$

La distancia es igual a la velocidad del flujo por el tiempo a partir de la definición conocida de velocidad, por lo que obtenemos:

$$d = vt$$

Sustituyendo en la ecuación original de gasto:

$$G = \frac{Avt}{t}$$

o sea:

$$G = Av$$

el gasto es igual a la velocidad del flujo, multiplicada por el área de la sección transversal del tubo por donde se desplaza el fluido. Las unidades quedarán en m<sup>3</sup>/s, en el Sistema Internacional de Unidades, aunque en ocasiones se utilizan otras unidades como litros por segundo o galones por segundo.

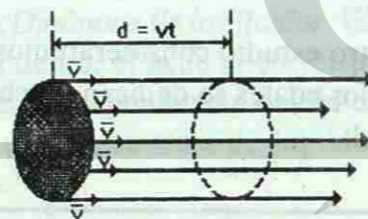


Figura No. 27

El gasto másico está relacionado con el volumétrico por la siguiente expresión:

$$Q = G\rho = Av\rho \quad \text{donde } \rho \text{ es la densidad del fluido.}$$

Analizando las unidades el gasto volumétrico tiene unidades de m<sup>3</sup>/s y la densidad de kg/m<sup>3</sup> por lo que las unidades del gasto másico son kg/s, correspondientes con la definición de gasto másico como masa del fluido por unidad de tiempo.

**Ejemplo No. 12**

Una tubería que comunica la presa de La Boca con la planta de distribución de agua del Municipio de Guadalupe tiene un área de la sección transversal de 0.5 m<sup>2</sup>. Si la velocidad del flujo de agua es de 2 m/s, calcule el gasto volumétrico de agua que suministra la tubería.

Datos:

$$A = 0.5 \text{ m}^2$$

$$v = 2 \text{ m/s}$$

Solución:

$$G = Av$$

$$G = 0.5 \text{ m}^2 \times 2 \text{ m/s}$$

$$G = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$G = 1 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ litros/m}^3$$

$$G = 1000 \text{ litros/s}$$

Teniendo en cuenta que 1 m<sup>3</sup> = 1000 litros el gasto volumétrico, en litros por segundo.

Calcule el gasto másico del flujo por la tubería, del problema anterior.

Datos:

$$G = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Solución:

$$Q = \rho G = 1 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$Q = 1000 \text{ kg/s}$$

**Ejemplo No. 13**

Se desea hacer la instalación de entrada de agua a una casa. Si se conoce que el agua llega a la entrada de la casa con una velocidad de 1.5 m/s y el gasto de los habitantes de la casa será de 1 litro/s, ¿cuál debe ser el área de la sección transversal de la tubería que se coloque?

Datos:

$$G = 1 \text{ litro/s}$$

$$v = 1.5 \text{ m/s}$$

$$1000 \text{ litros} = 1 \text{ m}^3$$

Solución:

$$G = Av$$

$$A = G/v$$

$$A = 1 \text{ litro/s} / 1.5 \text{ m/s}$$

$$A = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} / 1.5 \text{ m/s}$$

$$A = 0.00077 \text{ m}^2$$

De aquí se puede calcular el diámetro de la tubería, que es el parámetro por el que se compran normalmente, en la ferretería.

## ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

Analicemos un tubo a través del cual fluye un líquido determinado. En la sección 1 del tubo el gasto másico es  $Q_1$  (figura 28) supongamos 2 kg/s. ¿Cuál será el gasto en la sección 2 del tubo? La respuesta la podemos hallar si pensamos que si al tubo entran 2 kg de fluido por segundo, debe salir la misma masa de fluido por segundo, pues de lo contrario se desaparecería o se crearía fluido dentro del tubo, lo cual no es posible. O sea en el caso analizado:

Es importante notar que el área de la sección transversal del tubo puede ser diferente.

Con este razonamiento llegamos a una ecuación fundamental de la dinámica de fluidos: la ecuación de continuidad, que expresa que el gasto másico debe ser el mismo para cualquier sección del tubo de fluido, siempre que no haya desviaciones, por supuesto.

Esta ecuación puede escribirse:

$$Q = A v \rho = \text{constante}$$

Como puede verse la ecuación de continuidad es una consecuencia de la ley de conservación de la masa.

Si el fluido es incompresible, o sea que la densidad es constante, se puede hablar de que el gasto volumétrico también será constante a lo largo del tubo de fluido. O sea para fluidos incompresibles:

$$G = A v = \text{Constante}$$

De esta expresión se puede ver que si disminuye el área de la sección transversal  $A$ , por donde fluye el fluido, la velocidad  $v$  debe aumentar, pues el gasto  $G$ , debe ser constante. A partir de este análisis podemos obtener la explicación de por qué la velocidad de la corriente, en los ríos, aumenta cuando el cauce se hace más estrecho debido a la configuración del terreno por donde pase el río. De la misma forma cuando un chorro de agua cae libremente, de cierta altura, se puede observar como el diámetro del chorro va disminuyendo a medida que se acerca al punto donde choque con el piso; aquí la explicación se da a partir de que la velocidad del agua aumenta, bajo la acción de la fuerza de gravedad, y por tanto el área de la sección transversal del chorro debe disminuir, o sea disminuye el diámetro del chorro.

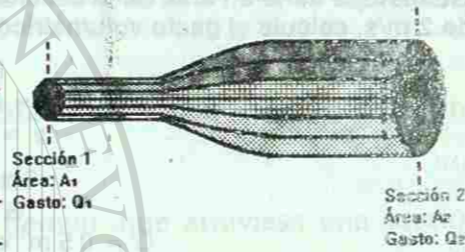


Figura No. 28

## ECUACIÓN DE BERNOULLI

Una relación fundamental de la dinámica de los fluidos es la Ecuación de Bernoulli, formulada por primera vez por el físico Daniel Bernoulli (1700-1782) en el año 1738. La ecuación es obtenida a partir del análisis energético de una corriente de un fluido incompresible (densidad constante) y sin fricción (viscosidad despreciable), en flujo laminar (las líneas de corriente no se cruzan).

Independientemente de las consideraciones señaladas para la obtención de la ecuación, la misma resulta muy útil para explicar muchos fenómenos que nos encontramos a nuestro alrededor como por ejemplo el vuelo de los aviones, las trayectorias curvas que describen los balones de fútbol o las pelotas de beisbó, la navegación de los barcos a velas, y otros muchos más.

Para realizar el análisis consideremos un tubo de corriente de un fluido, como se muestra en la figura 29, en el instante inicial  $T_1$  y luego en el instante posterior  $T_2$ . Debemos tener en cuenta el trabajo realizado, la variación de energía potencial y la variación de energía cinética del fluido, entre los dos instantes analizados.

Así podemos tener:

- 1) El trabajo realizado sobre el sistema por la fuerza de presión, en la sección 1 del tubo, será:

$$W_1 = P_1 A_1 d_1$$

recordando que el trabajo es igual a la fuerza por el desplazamiento y que la presión es la fuerza por unidad de área, por lo que la fuerza es presión ( $P$ ) por el área ( $A$ ) de la sección y  $d$  es el desplazamiento que tuvo el fluido.

- 2) El trabajo efectuado sobre el sistema por la fuerza de presión, en la sección 2 del tubo, será:

$$W_2 = -P_2 A_2 d_2 \quad (2) \text{ o sea una expresión similar, pero con signo negativo, pues la fuerza actúa en sentido opuesto al desplazamiento del fluido en esa sección del tubo.}$$

- 3) La variación de energía potencial está asociada al cambio de la altura del fluido entre las secciones 1 y 2 del tubo. Así, teniendo en cuenta que las alturas están dadas por  $Y_1$  y  $Y_2$ , la variación de la energía potencial de un elemento de fluido de masa  $M$  será:

$$E_p = M g (Y_1 - Y_2)$$

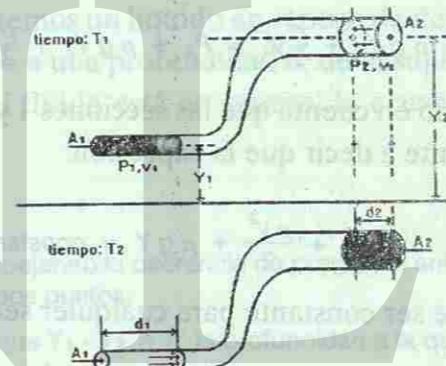


Figura No. 29

4) La variación de energía cinética, del mismo elemento de fluido de masa  $M$ , está relacionada con las diferentes velocidades del flujo en la sección 1 y 2 del tubo. Así:

$$E_{cin} = \frac{M(V_1^2 - V_2^2)}{2}$$

agrupando todos los miembros descritos tenemos:

$$P_1 A_1 d_1 - P_2 A_2 d_2 + Mg(Y_1 - Y_2) + \frac{M}{2}(V_1^2 - V_2^2) = 0$$

Aquí podemos introducir un cambio de variables, a través del concepto de densidad  $\rho$ , como la masa de la unidad de volumen, por lo que:

$$M = \rho V$$

y podemos observar que en la expresión del trabajo, el producto del área  $A$  por el desplazamiento  $d$ , es el volumen  $V$ , por lo que toda la ecuación puede quedar, simplificando el volumen  $V$ , en función de la densidad:

$$P_1 + \rho g Y_1 + \frac{\rho}{2} V_1^2 = P_2 + \rho g Y_2 + \frac{\rho}{2} V_2^2$$

y teniendo en cuenta que las secciones 1 y 2 del tubo fueron elegidas arbitrariamente, esto es equivalente a decir que la expresión:

$$p + \frac{\rho V^2}{2} + \rho g Y = \text{constante}$$

tiene que ser constante para cualquier sección del tubo de fluido.

En esta expresión el segundo término es la energía cinética por unidad de volumen y el tercero es la energía potencial por unidad de volumen del fluido. De esta forma la ecuación de Bernoulli no es más que una expresión de la ley de conservación de la energía aplicada al caso de fluidos.

### APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli, como ya se dijo, tiene muchas aplicaciones en la explicación de muchas situaciones prácticas.

Analicemos el caso del vuelo de los aviones. La fuerza de sustentación, en las alas de los aviones, aparece debido a la configuración del ala. En la figura 30 se muestra el perfil del ala de un avión. Se observa que en la parte superior del ala el fluido recorre una mayor distancia, por lo que la velocidad



Figura No. 30

debe ser mayor, por lo que, según la ecuación, la presión debe ser menor en la parte superior que en la parte inferior del ala. Esto implica que la fuerza resultante sobre el ala está dirigida hacia arriba, y aplicada al ala, es la que sustenta el avión en vuelo.

Una explicación similar se le puede dar al caso de las bolas de beisbó, cuando el lanzador las envía hacia el home con una rotación. Supongamos que el lanzador le dió a la bola una rotación, como la indicada en la figura 31. En este caso la velocidad del fluido en la parte superior de la bola es menor que en la parte inferior y por tanto la presión en la parte superior es mayor haciendo que la bola "caiga" más rápidamente, ocasionando el lanzamiento llamado normalmente "curva" hacia abajo. El mismo caso ocurre con los balones de fútbol cuando se les imprime una rotación al patearla, lo que hace que la trayectoria sea una curva.

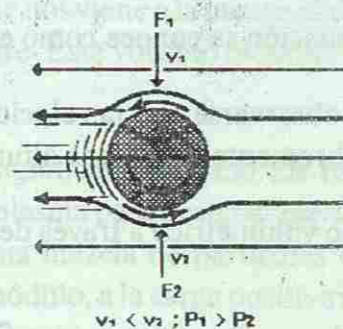


Figura No. 31

Ya habíamos señalado que la hidrostática puede considerarse un caso particular de la hidrodinámica. Consideremos un líquido en reposo de densidad  $\rho$ . Examinemos 2 puntos: uno en la superficie y el otro a una profundidad  $h$ , de la superficie. Como en ambos puntos la velocidad es cero, pues el fluido está en reposo, la ecuación de Bernoulli quedaría:

$$P_1 + \rho g Y_1 = P_2 + \rho g Y_2$$

$$P_2 - P_1 = \rho g (Y_1 - Y_2)$$

$$P_2 - P_1 = \rho g h$$

Despejando la diferencia de presiones entre ambos puntos:

Ya que  $Y_1 - Y_2 = h$ ; la profundidad a la que se encuentra.

que es la misma ecuación que la obtenida anteriormente, para la presión en el interior de un líquido.

Analicemos un nuevo caso cuando un recipiente muy grande y abierto, tiene un orificio pequeño a una distancia "h" de la superficie libre del líquido.

La presión en la superficie libre y en el orificio, es igual a la presión atmosférica, pues estos puntos están abiertos a la atmósfera. Se considerará que la velocidad del fluido en la superficie libre del recipiente es muy pequeña ( $v_2 = 0$ ), ya que el recipiente es muy grande y el orificio muy pequeño, por lo que el descenso del nivel del líquido es muy lento. Utilizando la ecuación de Bernoulli hallemos la velocidad de salida del líquido, por el orificio:

$$P_2 + \rho g Y_2 = P_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + \rho g Y_1$$



$$\rho g (Y_2 - Y_1) = \rho \frac{v_1^2}{2} \quad P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$$

$$2gh = v_1^2 \quad Y_2 - Y_1 = h$$

$$v_1 = \sqrt{2gh}$$

Esta ecuación se conoce como el teorema de Torricelli.

Puede observarse que la velocidad de salida del líquido, es la misma que la de un cuerpo que cae libremente desde una altura  $h$ .

El gasto volumétrico a través del orificio puede calcularse como:

$$G = A v \quad \text{donde } A \text{ es el área de sección transversal del orificio.}$$

$$G = A \sqrt{2gh}$$

Otra aplicación de la ecuación de Bernoulli es la relacionada con los medidores de Venturi, que permiten medir la velocidad o el gasto de un fluido dentro de un tubo.

Supongamos un tubo horizontal, que tenga un estrechamiento (figura ).

Planteando la ecuación de Bernoulli, para la sección 1 y 2 del tubo:

$$\rho + \rho g Y_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = \rho + \rho g Y_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad \text{dado que } Y_1 = Y_2, \text{ pues el tubo es horizontal.}$$

De la ecuación de continuidad, para fluidos incompresibles, tenemos  $A_1 v_1 = A_2 v_2$

de donde se ve que dado que  $A_2$  es menor que  $A_1$ , la velocidad  $v_2$  debe ser mayor que  $v_1$ . Por otra parte de la ecuación de Bernoulli se ve que si  $v_2$  es mayor que  $v_1$ , la presión en 2 ( $P_2$ ) debe ser menor que la presión en 1 ( $P_1$ ).

$$\rho + \frac{\rho}{2} v_1^2 = \rho + \frac{\rho}{2} v_2^2 \quad \text{para mantener la igualdad}$$

Colocando manómetros en las secciones 1 y 2, podemos medir la diferencia de presiones ( $P_1 - P_2$ ) y con ayuda de la ecuación de continuidad y la de Bernoulli, podemos determinar la velocidad del líquido en cualquier sección (1 ó 2) del tubo.

Dispositivos basados en este principio se utilizan ampliamente en la técnica para determinar velocidades o gastos de fluidos en tuberías.

Obsérvese que en este dispositivo se pone de manifiesto la misma regularidad, que en los otros ejemplos de la aplicación de la ecuación de Bernoulli, y que en forma resumida podemos expresar como: la presión disminuye en las regiones del fluido, donde la velocidad aumenta. Esta regularidad se utiliza para crear zonas de baja presión, p. ej., en aspiradoras y aspersores, en zonas donde se provoca una alta velocidad del fluido.

## LECTURA COMPLEMENTARIA

## EL PLASMA, CUARTO ESTADO DE LA MATERIA

Normalmente al escuchar la palabra plasma lo primero que nos viene a la mente es el plasma sanguíneo, o sea el componente líquido e incoloro de la sangre. Este vocablo es usado con este significado desde mediados del siglo pasado.

Sin embargo desde 1923 esta palabra tiene un nuevo significado, cuando los físicos estadounidenses Y. Langmuir y L. Tonks utilizaron la palabra plasma para designar cierto estado singular del gas ionizado. El plasma, para los físicos, es una mezcla de partículas cargadas eléctricamente en la que la carga negativa total es igual, en módulo, a la carga positiva sumaria. De modo que en conjunto el plasma es un medio eléctricamente neutro que conduce, a la perfección, la corriente eléctrica.

Se distingue el plasma débil y fuertemente ionizado. El primero contiene, en lo fundamental, electrones e iones positivos. En el segundo además de electrones e iones, hay átomos y moléculas excitados y neutros.

Aunque el desarrollo de la Física del plasma comenzó en los años 20 de nuestro siglo, algunos científicos, sin que ellos lo supieran, ya habían trabajado con el plasma antes. Ya en 1667 los científicos de la Academia de Ciencias de Florencia descubrieron que la llama del quemador tenía la propiedad de conducir la electricidad. En el siglo XIX se descubrió el arco eléctrico. Semejante descarga solo es posible cuando se crea una suficiente cantidad de partículas cargadas y el aire se convierte en conductor de la electricidad o sea en plasma.

Los estudios posteriores demostraron que las propiedades del gas en el que ocurre la descarga eléctrica se diferencian mucho de las propiedades del gas no conductor, por lo que **el plasma fue considerado un nuevo estado de la materia.**

Para lograr obtener el estado de plasma es necesario aumentar mucho la temperatura de un gas, o sea entregarle energía, de forma que los átomos y moléculas del gas pierdan parte de sus electrones y se conviertan en iones positivos. En general se considera que a temperaturas mayores de 10 000 C todas las sustancias se encuentran en su cuarto estado, en forma de plasma, pero el plasma puede existir a temperaturas menores.

El plasma existe en el interior de las lámparas que utilizamos en la iluminación de las calles de nuestras ciudades, como por ejemplo las de neón o sodio. Existe mucha materia en estado de plasma en el espacio interestelar, en las estrellas, en nuestro Sol. La Tierra también está rodeada de plasma, las capas altas de la atmósfera están formadas por un gas ionizado, que protege a la Tierra contra el efecto de la radiación del Sol.

Muchas aplicaciones tiene el plasma en nuestros días. En la industria se utilizan los generadores de plasma o plasmatrones, mediante los cuales se puede concentrar gran cantidad de calor en un pequeño volumen y calentar los gases hasta 7 000 - 8 000 C. Este chorro de plasma puede utilizarse para cortar láminas de metal, teniendo la ventaja que los bordes no requieren posterior maquinado pues queda un corte casi perfecto. En la industria minera se utilizan equipos parecidos para perforar la roca y así hacer más rápida la construcción de pozos y cavidades en la tierra.

Una de las direcciones más perspectivas de la utilización del plasma está relacionada con la producción de energía a partir de las reacciones termonucleares controladas. En esta dirección se trabaja en muchos laboratorios del mundo desde hace algún tiempo, pero aún los resultados no han conducido a una aplicación práctica. La forma de producir energía, en estas instalaciones, es similar a los procesos que tienen lugar en las estrellas, y el combustible a utilizar es el hidrógeno, del cual tenemos suficiente cantidad en la Tierra, de forma que la humanidad tendría resuelto el problema energético por muchos años.

Ya se habla del quinto estado de la materia, al que se ha denominado Condensado de Bose Einstein, por los apellidos de los científicos que describieron sus características hace bastante tiempo. Este estado está formado por un gas enfriado a una temperatura próxima al cero absoluto, de forma que los átomos pierden energía y se unen formando como un "gran" átomo. Recientemente aparecieron, en la prensa, referencias de la detección de este nuevo estado de la materia, que es objeto de estudio de los científicos.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## PREGUNTAS

- 1.- Cuando una persona bebe un vaso de agua, ¿qué sucede con su peso? ¿Con su volumen? ¿Con su densidad?  
\_\_\_\_\_
- 2.- Explica por qué es importante ascender con lentitud en especial cuando se ha buceado a gran profundidad.  
\_\_\_\_\_
- 3.- Si se pesa una bolsa de plástico que contiene 1 litro de agua, la balanza registra 1 kilogramo. Es evidente que la bolsa de plástico es muy ligera. ¿Cuál es la lectura de la balanza si la medición se efectúa bajo el agua?  
\_\_\_\_\_
- 4.- Si nadas dos veces más profundo en el agua, ¿qué tanta más presión se ejerce sobre tus oídos? ¿Si nadas en agua salada? ¿La presión a la misma profundidad será mayor que en agua dulce? Justifica tus respuestas.  
\_\_\_\_\_
- 5.- ¿Cuál es la relación de la fuerza de empuje o flotación que actúa sobre un pez con el peso del pez?  
\_\_\_\_\_
- 6.- ¿Cuál es la relación del volumen de un objeto sumergido en agua con el volumen de agua desplazada?  
\_\_\_\_\_
- 7.- ¿Qué sucede con el volumen de una pieza de pan si se aplasta? ¿Con la masa? ¿Con la densidad?  
\_\_\_\_\_
- 8.- El uranio es el átomo más pesado. ¿Por qué el metal de uranio no es el material más denso?  
\_\_\_\_\_
- 9.- ¿Cuál tiene mayor densidad, un lingote de oro puro o un anillo de oro puro?  
\_\_\_\_\_

10.- Si la fuerza de empuje o flotación sobre un objeto sumergido en agua es igual al peso del objeto, ¿cuál es la relación entre las densidades del objeto y el agua?

11.- Si la fuerza de empuje sobre un objeto sumergido en agua es mayor que el peso del objeto, ¿cuál es la relación entre las densidades del objeto y del agua?

12.- Si la fuerza de empuje sobre un objeto sumergido en agua es menor que el peso del objeto, ¿cuál es la relación entre las densidades del objeto y el agua?

13.- Si la llave de agua en la planta baja y otra en el primer piso se abren por completo, ¿saldrá más agua por segundo de la llave de abajo o de la llave de arriba?

14.- ¿Por qué descansa más el cuerpo en posición acostada que sentada?

15.- En la siguiente figura se muestra el depósito que suministra agua a una granja. Está hecho de madera y reforzado con aros metálicos. ¿Por qué está elevado? ¿Por qué los aros están más juntos cerca de la parte inferior del tanque?

16.- Un trozo de hierro colocado sobre un bloque de madera lo hace flotar más abajo en el agua. Si el hierro se suspendiera por debajo de la madera, ¿flotaría el bloque igual debajo, más abajo o más arriba? Justifica tu respuesta.

17.- Un globo se equilibra colgándole una pesa de modo que apenas sea capaz de flotar en el agua. Si se empuja el globo hacia abajo del recipiente, ¿regresará a la superficie? ¿Permanecerá a la profundidad a la cual haya sido empujado? ó ¿se hundirá? Explica tus respuestas.

18.- Cuando un cubo de hielo se derrite en un vaso de agua, ¿el nivel del agua en el vaso sube, baja o permanece constante?

19.- ¿Por qué una persona parada se hunde en la nieve y cuando tiene esquíes no se hunde?

20.- ¿Por qué los cuchillos cortan más fácil cuando están afilados que cuando están mellados?

21.- Si al ir caminando se encuentra un terreno fangoso, ¿es correcto pararse en las puntas de los pies?

22.- ¿Por qué los cimientos de los edificios se hacen de gran área?

23.- ¿Por qué los calvos tienen las puntas muy finas?

## PROBLEMAS

1.- El concreto es alrededor de tres veces más denso que el agua. La gravedad específica del concreto es de 3.0:  
 a) ¿Cuál es la masa de  $1\ 000\text{ cm}^3$  de concreto?  
 b) ¿Cuánto volumen ocupa 1 kilogramo de concreto?  
 c) ¿Si la mitad de un contenedor de  $1\ 000\text{ cm}^3$  tiene concreto y la otra mitad es agua, ¿cuál es la masa total del contenido?

2.- La densidad relativa del agua de mar es casi igual a 1.025. Esto significa que su densidad es de  $1.025\text{ g/cm}^3$ .  
 a) ¿Cuánto pesa un litro de agua de mar?  
 b) ¿Cuántos litros de agua de mar pesan 1 kilogramo?

3.- La densidad relativa de una balsa de madera es de 0.15. Cuando la balsa flota, ¿qué fracción de ella está sumergida?

4.- La densidad relativa de la plata es 10.3. Esto significa que un volumen dado de plata tiene una masa de 10.3 veces mayor que la misma masa del agua. Si se pesa un anillo de plata bajo el agua, ¿qué fracción de su "peso verdadero" registra la balanza? ¿Qué sucede al resto del peso?

5.- Determina la masa de un cubo de aluminio que tiene 5 centímetros por lado. La densidad del aluminio es de  $2\ 700\text{ kg/m}^3$ .

6.- En condiciones estándar, el aire tiene una densidad de  $1.21\text{ kg/m}^3$ . ¿Cuál es la masa del aire que se encuentra en un cuarto de dimensiones de 10 metros por 8 metros por 3 metros?

7.- ¿Cuál es la densidad de la materia contenida en el núcleo del átomo de hidrógeno? Puedes suponer que el núcleo es una esfera de un radio de  $1.2 \times 10^{-15}$  metros y su masa es de  $1.67 \times 10^{-27}$  kilogramos. el volumen de una esfera es  $(4/3)\pi r^3$ .

8.- ¿Qué volumen ocupa un sólido si tiene una masa de 2 kilogramos y una densidad de  $6\ 000\text{ kg/m}^3$ .

- 9.- ¿Qué volumen ocuparán 3 kilogramos de mercurio? y ¿Cuál será el peso de éste volumen?
- 10.- Calcula la masa de un cubo de aluminio que mide 10 centímetros por lado. La densidad relativa del aluminio es de 2.7.
- 11.- ¿A qué profundidad está nadando una persona dentro de una alberca si la presión absoluta sobre ésta es de 156 kPa.
- 12.- ¿Cuál será la presión absoluta a 1.5 metros de profundidad en una cisterna llena de agua?
- 13.- Encuentra la presión hidrostática a 5.6 metros de profundidad en un tanque lleno aceite abierto a la atmósfera, si su densidad es de  $700 \text{ Kg/m}^3$ .
- 14.- Encuentra la presión en kilopascales debido a una columna de mercurio de 45 centímetros de altura.
- 15.- El diámetro del pistón grande de una prensa hidráulica es de 20 centímetros y el área del pistón pequeño es de  $0.5 \text{ cm}^2$ . Si una fuerza de 400 newtons es aplicada al pistón pequeño,
  - a) ¿cuál es la fuerza resultante que se ejerce sobre el pistón grande?
  - b) ¿Cuál es el incremento de presión debajo del pistón pequeño?
  - c) ¿Cuál es el incremento de presión debajo del pistón grande?
- 16.- Un sistema hidráulico tiene dos pistones, uno pequeño con área de  $0.9 \text{ m}^2$ , y uno grande con  $4 \text{ m}^2$  de área; si al pistón pequeño se le aplica una fuerza de 25 N, ¿qué fuerza puede ejercer el pistón grande?
- 17.- Se aplica una fuerza de 500 newtons al émbolo pequeño de una prensa hidráulica que tiene un diámetro de 10 centímetros. ¿Cuál debe ser la fuerza que puede levantar si el diámetro del émbolo grande es de 20 centímetros?
- 18.- En un sistema hidráulico al aplicar una fuerza de 12 N, en el pistón chico con  $0.4 \text{ m}^2$  de área, se debe obtener 110 N en el pistón grande. ¿Qué área del pistón grande se requiere?
- 19.- Una piedra de composición desconocida pesa 90 newtons en el aire. Su peso aparente es de 70 newtons cuando se sumerge en el agua. ¿Cuál es el volumen de la piedra y cual es su densidad?
- 20.- Una pieza de aleación pesa 10 newtons en el aire y 4 newtons cuando está sumergida en agua. Calcular su volumen y densidad.
- 21.- Un cilindro sólido de aluminio con una densidad de  $2700 \text{ kg/m}^3$ , pesa 80 newtons en el aire y 58 newtons cuando se sumerge en trementina. Calcula la densidad de la trementina.
- 22.- ¿Qué porcentaje de un témpano de hielo permanecerá por debajo del nivel del agua de mar? La densidad del agua de mar es  $1024 \text{ kg/m}^3$ .
- 23.- El agua fluye por una manguera de 4 centímetros de diámetro con una velocidad promedio de 2.5 m/s. ¿Cual es el gasto en  $\text{m}^3/\text{minuto}$ ?
- 24.- Por un tubo de 8 centímetros de diámetro fluye agua a 5m/s, al conectarlo a otro tubo de 4 centímetros de diámetro, ¿cuál es la velocidad en el tubo pequeño? ¿Es el gasto mayor en dicho tubo?
- 25.- Un tanque abierto a la atmósfera lleno de agua, tiene un orificio a 6 metros por debajo de la superficie, si el área del orificio es de  $2 \text{ cm}^2$ , ¿con qué velocidad saldrá el agua por el orificio? y ¿Cuál será el gasto en un tiempo de 20 segundos?
- 26.- A través de un tubo horizontal fluye agua permanentemente. En un punto donde la presión es de 600 kPa, la velocidad es de 4 m/s.
- 27.- ¿Cuál será la presión si el tubo cambia de tamaño y provoca que la velocidad se incremente a 24 m/s?
- 28.- Entra agua a un tubo Venturi, a una velocidad de 8 m/s. En la reducción la presión es de 4 kPa y después de ésta es de 7 kPa, ¿cual es la velocidad del fluido en la reducción?

## CALOR

### OBJETIVO:

- Describir las características fundamentales de los sistemas, así como las condiciones de intercambio de materia y energía, y calcular el calor involucrado en intercambios térmicos con o sin cambio en el estado de agregación; verificando su conservación y aplicación en el funcionamiento de máquinas térmicas.

### METAS:

- 1.- Definir equilibrio térmico entre sistemas.
- 2.- Definir la temperatura, como la propiedad macroscópica que describe los sistemas que tienen la característica que cuando están en equilibrio térmico, la temperatura tiene el mismo valor. (Definición inicial)
- 3.- Describir algunas de las propiedades termométricas más utilizadas en la medición de la temperatura.
- 4.- Describir las escalas de temperatura más utilizadas en la medición de la temperatura.
- 5.- Resolver problemas relacionados con la dilatación térmica.
- 6.- Definir el concepto de calor como una forma de energía que se transmite entre dos sistemas con un determinada diferencia de temperaturas.
- 7.- Explicar la diferencia entre calor y temperatura.
- 8.- Resolver problemas que involucren el cálculo del calor transmitido y la temperatura de equilibrio de sistemas, incluso donde se involucren cambios en el estado de agregación.
- 9.- Describir los mecanismos de transferencia de calor:
  - a) conducción,
  - b) convección y
  - c) radiación.
- 10.- Enunciar los aspectos fundamentales de la Teoría Cinética Molecular a partir del modelo del gas ideal.
- 11.- Interpretar la temperatura como una medida de la energía cinética media de las moléculas que componen el sistema.
- 12.- Definir el concepto de energía interna de un sistema.

- 13.- Formular la Primera ley de la Termodinámica, destacando su papel como ley de la conservación de la energía.
- 14.- Formular la Segunda ley de la Termodinámica, destacando su importancia para la determinación de la eficiencia de las máquinas térmicas.

**CONTENIDO:**

## INTRODUCCIÓN

## EQUILIBRIO TÉRMICO. CONCEPTO DE TEMPERATURA

## TERMOMETRÍA. TERMÓMETROS Y ESCALAS

## DILATACIÓN [EXPANSIÓN] TÉRMICA

## CALOR

EQUIVALENTE MECÁNICO DEL CALOR

CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA

CALORIMETRÍA

CALOR LATENTE DE CAMBIO DE FASE

## TRANSFERENCIA DE CALOR

CONDUCCIÓN

CONVECCIÓN

RADIACIÓN

## GAS IDEAL

## ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA CINÉTICO MOLECULAR.

MODELO CINÉTICO DE UN GAS

INTERPRETACIÓN CINÉTICA DE LA PRESIÓN

INTERPRETACIÓN CINÉTICA DE LA TEMPERATURA

## TERMODINÁMICA

## PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

PROCESOS TERMODINÁMICOS: ISOBÁRICO, ISOCÓRICO, ISOTÉRMICO Y ADIABÁTICO

## SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

MÁQUINAS DE CALOR

## LECTURA COMPLEMENTARIA: LA ESCALA DE TEMPERATURA KELVIN

## PREGUNTAS Y PROBLEMAS

**CALOR****INTRODUCCIÓN**

En nuestra vida diaria nos relacionamos con muchos conceptos que tienen que ver con el tema que comenzamos a estudiar en este capítulo. Por ejemplo continuamente escuchamos y decimos frases como "qué calor hace" o "está muy frío". Cuando enfermamos y el médico nos dice: "Ud. tiene alta temperatura" o "tiene fiebre", de nuevo estamos en una situación donde se manejan conceptos de este tipo. El parte meteorológico, que escuchamos cada mañana, nos indica qué temperatura hay ese día, o habrá en los siguientes, y de esa forma podemos elegir qué ropa usar. A la hora de elegir la ropa a usar, intuitivamente, sabemos que en días de altas temperaturas, muy frecuentes en nuestra ciudad, es preferible usar ropa ligera, de colores claros, y en días de bajas temperaturas, ropa gruesa, de colores más oscuros; ¿por qué hacemos esto?, no siempre podemos explicarlo, pero de todas formas lo hacemos. A veces nos sorprendemos, cuando al oír una transmisión de un partido de beisbol, desde los Estados Unidos, nos dicen que la temperatura en el estadio es de 70 grados; ¿cómo pueden resistir esa temperatura, tan alta, según nuestro criterio?, cuando debemos tener en cuenta la escala de temperaturas que se está utilizando.

Utilizamos equipos de aire acondicionado, estufas, hornos de microondas, calentadores de agua, en base a gas, y otros, todos asociados a la transferencia de calor. ¿Cuál es el principio de funcionamiento de estos equipos?

Muchos fenómenos están asociados a los conceptos de calor y temperatura, y a la transformación del calor en otras formas de energía o a los mecanismos de transferencia de un cuerpo a otro. El planeo de las aves en el cielo, la ebullición del agua, al preparar el café, el uso de los termos, para mantener las sodas frías, los termómetros, usados para medir la

- 13.- Formular la Primera ley de la Termodinámica, destacando su papel como ley de la conservación de la energía.
- 14.- Formular la Segunda ley de la Termodinámica, destacando su importancia para la determinación de la eficiencia de las máquinas térmicas.

**CONTENIDO:**

## INTRODUCCIÓN

## EQUILIBRIO TÉRMICO. CONCEPTO DE TEMPERATURA

## TERMOMETRÍA. TERMÓMETROS Y ESCALAS

## DILATACIÓN [EXPANSIÓN] TÉRMICA

## CALOR

EQUIVALENTE MECÁNICO DEL CALOR

CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA

CALORIMETRÍA

CALOR LATENTE DE CAMBIO DE FASE

## TRANSFERENCIA DE CALOR

CONDUCCIÓN

CONVECCIÓN

RADIACIÓN

## GAS IDEAL

## ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA CINÉTICO MOLECULAR.

MODELO CINÉTICO DE UN GAS

INTERPRETACIÓN CINÉTICA DE LA PRESIÓN

INTERPRETACIÓN CINÉTICA DE LA TEMPERATURA

## TERMODINÁMICA

## PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

PROCESOS TERMODINÁMICOS: ISOBÁRICO, ISOCÓRICO, ISOTÉRMICO Y ADIABÁTICO

## SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

MÁQUINAS DE CALOR

## LECTURA COMPLEMENTARIA: LA ESCALA DE TEMPERATURA KELVIN

## PREGUNTAS Y PROBLEMAS

**CALOR****INTRODUCCIÓN**

En nuestra vida diaria nos relacionamos con muchos conceptos que tienen que ver con el tema que comenzamos a estudiar en este capítulo. Por ejemplo continuamente escuchamos y decimos frases como "qué calor hace" o "está muy frío". Cuando enfermamos y el médico nos dice: "Ud. tiene alta temperatura" o "tiene fiebre", de nuevo estamos en una situación donde se manejan conceptos de este tipo. El parte meteorológico, que escuchamos cada mañana, nos indica qué temperatura hay ese día, o habrá en los siguientes, y de esa forma podemos elegir qué ropa usar. A la hora de elegir la ropa a usar, intuitivamente, sabemos que en días de altas temperaturas, muy frecuentes en nuestra ciudad, es preferible usar ropa ligera, de colores claros, y en días de bajas temperaturas, ropa gruesa, de colores más oscuros; ¿por qué hacemos esto?, no siempre podemos explicarlo, pero de todas formas lo hacemos. A veces nos sorprendemos, cuando al oír una transmisión de un partido de beisbol, desde los Estados Unidos, nos dicen que la temperatura en el estadio es de 70 grados; ¿cómo pueden resistir esa temperatura, tan alta, según nuestro criterio?, cuando debemos tener en cuenta la escala de temperaturas que se está utilizando.

Utilizamos equipos de aire acondicionado, estufas, hornos de microondas, calentadores de agua, en base a gas, y otros, todos asociados a la transferencia de calor. ¿Cuál es el principio de funcionamiento de estos equipos?

Muchos fenómenos están asociados a los conceptos de calor y temperatura, y a la transformación del calor en otras formas de energía o a los mecanismos de transferencia de un cuerpo a otro. El planeo de las aves en el cielo, la ebullición del agua, al preparar el café, el uso de los termos, para mantener las sodas frías, los termómetros, usados para medir la

temperatura, el efecto invernadero y su relación con la contaminación ambiental, son sólo algunos ejemplos de esos fenómenos.

Durante el estudio de este tema podremos asimilar los conocimientos necesarios para analizar éstos y otros fenómenos del mismo tipo.

### EQUILIBRIO TÉRMICO. CONCEPTO DE TEMPERATURA.

En el capítulo de fluidos nos referimos al hecho de que todas las sustancias están compuestas por un gran número de partículas: átomos y moléculas. Como ya se ha visto el estado en que se encuentra la sustancia determina, en cierto grado, la distancia y la interacción entre estas partículas.

Si queremos describir las características de un cuerpo podemos elegir dos formas de hacerlo:

1. Podemos intentar describir las características de cada una de las partículas que conforman el cuerpo, o sea expresar la posición, velocidad o energía de cada una de las partículas, y a partir de ellas calcular ciertas magnitudes promedios, que se puedan medir, del sistema. A esta forma de descripción le llamaremos microscópica y las magnitudes que se utilizan se llaman magnitudes microscópicas.
2. Otra forma de descripción es a través de magnitudes que reflejen el estado del cuerpo como un todo, o sea magnitudes que se relacionen con el estado medio de todas las partículas que forman el cuerpo y que podamos medir en forma sencilla. A esta descripción se la llama macroscópica y las magnitudes que se utilizan se llaman magnitudes macroscópicas. Ejemplos de magnitudes macroscópicas pueden ser: la presión, la temperatura, el volumen, etc.

Puedes imaginar la descripción de los alumnos de tu escuela por edades. La forma microscópica sería dar la edad de cada alumno y la forma macroscópica sería, por ejemplo dar el promedio de las edades.

Ambas formas de descripción deben ser equivalentes, ya que se está describiendo un mismo sistema, pero podemos imaginar que la descripción microscópica es más compleja pues la cantidad de partículas que componen un cuerpo puede ser muy grande (recordar que en un centímetro cúbico de un sólido existen alrededor de  $10^{23}$  átomos y un litro de gas contiene unas  $10^{22}$  moléculas). De todas formas pueden obtenerse expresiones que relacionen las magnitudes microscópicas y las macroscópicas.

La magnitud macroscópica que más nos interesa es la temperatura. Todos tenemos hemos utilizado alguna vez la magnitud temperatura, ya sea porque hemos medido la temperatura

de algún cuerpo o porque hemos escuchado el valor de la temperatura atmosférica. Sin embargo podremos preguntarnos ¿qué significado tiene esta magnitud?

La idea más común de la temperatura de un cuerpo la obtenemos cuando lo tocamos con nuestras manos. Así decimos "este cuerpo está más caliente" o "más frío" que ése. sin embargo la sensación que obtenemos a través de nuestro sentido del tacto no es exacta, pues está influenciada por otros factores. Así las partes metálicas de un cuerpo nos parecen más frías que las partes compuestas por tejidos o madera, a pesar que tengan iguales temperaturas.

Para definir la temperatura vamos a partir del concepto de equilibrio térmico. Todos hemos comprobado que cuando tenemos un cuerpo a determinada temperatura, por ejemplo una soda fría, y lo ponemos en contacto con otro cuerpo a diferente temperatura, o sea ponemos la soda al aire fuera del refrigerador, al cabo de un tiempo ambos tendrán la misma temperatura, la soda se calienta. Precisamente decimos que cuando los dos cuerpos están a igual temperatura están en equilibrio térmico. El equilibrio térmico se define como el estado cuando las magnitudes macroscópicas de ambos cuerpos no varían con el tiempo. Cuando los cuerpos están en equilibrio térmico tienen igual temperatura. Cuando ponemos en contacto dos cuerpos con diferentes temperaturas, podemos predecir la temperatura de equilibrio que alcanzará este sistema, si conocemos las características de cada cuerpo y las condiciones en que se realiza el contacto térmico.

Está claro que para que dos cuerpos alcancen el equilibrio térmico debe pasar un tiempo, lo suficientemente largo y además deben tener un buen contacto térmico, que permita el intercambio de energía entre ellos.

De manera que podemos definir la temperatura como:

*La temperatura es la propiedad macroscópica de los sistemas que tiene la característica que cuando dos sistemas están en equilibrio térmico, la temperatura tiene el mismo valor en ambos.*

Recordar que identificamos el equilibrio térmico como el estado cuando las magnitudes macroscópicas de los sistemas no cambian con el tiempo. El hecho de que no cambien no quiere decir que en los dos sistemas tengan el mismo valor. La única magnitud macroscópica que toma el mismo valor en los dos sistemas es la temperatura. La presión o el volumen de los dos sistemas pueden ser diferente, pero la temperatura tiene que ser la misma.

Analicemos un sistema de 3 cuerpos A, B y C. Supongamos que ponemos el cuerpo A en contacto con el B y comprobamos que están en equilibrio térmico. Luego ponemos en contacto el cuerpo B y el C y comprobamos que también están en equilibrio térmico. Entonces podemos afirmar que A y C están en equilibrio térmico y aún cuando no hayamos puesto en contacto los cuerpos A y C podemos asegurar que ambos tienen la misma temperatura. Este procedimiento es el que utilizamos con los termómetros. El termómetro, en este caso, sería el cuerpo B, que se pone en contacto con los demás cuerpos de forma que si se establece el

equilibrio térmico con los dos cuerpos, A y C, por separado, podemos afirmar que estos cuerpos tienen la misma temperatura.

Pudiera parecer que este análisis es obvio, sin embargo no es así, pensemos en otros ejemplos. Supongamos 3 personas: Juan, Pedro y Pablo. Pedro conoce a Juan y a Pablo, sin embargo esto no implica que Juan conozca a Pablo. Así se pueden pensar en otros ejemplos que no cumplan esta condición del equilibrio térmico entre 3 cuerpos.

Hemos definido la temperatura de una forma sencilla. Posteriormente daremos una descripción más detallada de los fenómenos relacionados con este concepto y definiremos la temperatura desde el punto de vista microscópico.

**Pregunta:** ¿Es correcta la expresión "este cuerpo está muy caliente"?

En realidad lo más correcto sería decir "este cuerpo tiene una alta temperatura".

Una vez conocidos los conceptos de temperatura y de equilibrio térmico, veamos las técnicas que empleamos para su medición.

## TERMOMETRÍA. TERMÓMETROS Y ESCALAS.

La termometría se ocupa de los métodos y técnicas de medición de la temperatura.

Hay muchas propiedades de la materia que cambian al cambiar su temperatura, por ejemplo la mayoría de los materiales aumentan su tamaño al aumentarle la temperatura; la resistencia eléctrica de muchas sustancias varía también con la temperatura; también lo hace el color de los objetos, a altas temperaturas, lo cual puede comprobarse al observar el color de una hornilla eléctrica. A una propiedad física, de un cuerpo, que cambie con la temperatura, de una manera conocida, se le llama propiedad termométrica.

Se le llama termómetro al instrumento que se utiliza para medir la temperatura. Hay muchos tipos de termómetros, pero su principio es el mismo: se basan en una propiedad termométrica, de alguna sustancia.

El primer termómetro fue propuesto por Galileo, basándose en la propiedad de expansión de un gas que se encuentra dentro de un recipiente de volumen constante, que se ponía en contacto con el cuerpo cuya temperatura se deseaba medir.

El termómetro más común es el de líquido y vidrio. El líquido (generalmente mercurio o alcohol teñido con un colorante rojo o azul) se encuentra dentro de un bulbo de vidrio, conectado a un tubo capilar cerrado. El bulbo se pone en contacto con el medio, cuya temperatura se desea medir, por lo cual la temperatura del líquido varía lo que provoca que se dilate o se contraiga, de acuerdo a si la temperatura aumentó o disminuyó (en realidad el vidrio también se dilata o se contrae, pero mucho menos que el líquido, por lo cual no se toma en consideración). Esta contracción o dilatación del líquido se refleja en las variaciones que

sufre su nivel en el capilar, conectado al bulbo, por lo cual el nivel del líquido en el capilar es una indicación de la temperatura.

Para lograr una medición objetiva es necesario tener una escala numérica. En principio cualquier escala numérica pegada al tubo capilar serviría, pero en este caso cada termómetro daría un valor de temperatura diferente y sería muy difícil la comparación entre valores.

Para tener uniformidad entre los valores y poder todos asignarle valores iguales a temperaturas iguales, aún cuando se midan con termómetros diferentes, se establecen escalas internacionales. Estas escalas se construyen en base a otorgarle valores determinados de temperaturas a 2 puntos, que puedan ser reproducidos por todos, y así establecer el número de divisiones que tendrá la escala entre esos 2 puntos, llamados puntos fijos.

Una de las primeras escalas introducidas fue la escala Fahrenheit, propuesta en 1714 por el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736). Para su escala Fahrenheit tomó como puntos fijos los siguientes:

- 1) Punto inferior: la temperatura de una solución congelada de agua y sal, a la cual le asignó el valor cero (0°F).
- 2) Punto superior: la temperatura del cuerpo humano, a la cual le asignó el valor de 96 (96°F). [En realidad la temperatura del cuerpo humano es de 98.6°F].

En los Estados Unidos y algunos países europeos es utilizada esta escala para medir la temperatura, por lo cual los valores de la temperatura ambiente pueden ser de 70°F.

La escala más utilizada internacionalmente es la escala Celsius, propuesta por el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744) en el año 1742. En esta escala como punto inferior se tomó el punto donde coexisten el agua y el hielo, en equilibrio térmico, a una presión de 1 atm, y se le asigna el valor cero (0°C) y como punto superior se tomó el punto donde coexisten el agua y el vapor de agua, en equilibrio térmico, a una presión de 1 atm, y se le asignó el valor de cien grados (100°C). O sea que entre los 2 puntos fijos hay un total de 100 grados, por lo cual en un inicio esta escala fue conocida como centígrada, pero en 1948 fue oficialmente denominada escala Celsius, en honor a su creador, por lo que debemos decir grados Celsius y no grados centígrados.

Para efectuar la conversión de una escala a otra debemos tener en cuenta que según la escala Fahrenheit el punto de congelación del agua corresponde a una temperatura de 32°F y el punto de ebullición del agua a una temperatura de 212°F, o sea que entre estas temperaturas hay un total de 180°F. Teniendo en cuenta que entre estas mismas temperaturas existe una diferencia de 100°C, podemos establecer una relación entre los intervalos de temperaturas:

$$\Delta(180^\circ\text{F}) = \Delta(100^\circ\text{C}) \quad \text{por lo que podemos decir que un intervalo de } 1^\circ\text{F} \text{ equivale a un intervalo de } 5/9^\circ\text{C}.$$

De aquí podemos establecer la relación para convertir de una temperatura en grados Fahrenheit a grados Celsius:



$$t(^{\circ}\text{C}) = 5/9[t(^{\circ}\text{F}) - 32]$$

La otra escala de temperaturas reconocida es la escala Kelvin o absoluta, nombrada así por William Thomson (lord Kelvin) (1824-1907), físico, matemático e ingeniero inglés. Esta escala es la unidad oficial del sistema internacional de unidades para la temperatura, independientemente que es más común utilizar la escala Celsius. La escala Kelvin se establece a partir de que se conoce que existe un límite inferior de temperatura que pueden alcanzar los cuerpos y que es igual a  $-273^{\circ}\text{C}$ . O sea ningún cuerpo puede alcanzar una temperatura igual a ésta o inferior. A este límite inferior de temperatura se le asignó el valor de cero, en la escala Kelvin (0 K). Por otra parte se establece que el intervalo de una unidad en la escala Kelvin es igual a la unidad en la escala Celsius, o sea  $\Delta(1\text{ K}) = \Delta(1^{\circ}\text{C})$ , por lo que la temperatura de congelación del agua ( $0^{\circ}\text{C}$ ) corresponde a 273 K y la temperatura de ebullición del agua ( $100^{\circ}\text{C}$ ) a 373 K. Para la conversión entre estas 2 escalas utilizamos las expresiones:

$$\begin{aligned} \text{TK} &= \text{TC} + 273 \\ \text{TC} &= \text{TK} - 273 \end{aligned}$$

Note que en la escala Kelvin no existen temperaturas negativas. En 1967 se estableció que la unidad de temperatura fuera llamada Kelvin y no "grados" Kelvin, por lo que debe escribirse la unidad con una K solamente.

**NOTA:** En realidad la escala absoluta o Kelvin de temperaturas se basa en consideraciones termodinámicas, algunas de las cuales se darán en los siguientes puntos. El punto patrón fijo es el punto triple del agua (estado donde coexisten el hielo, el agua y el vapor de agua, en equilibrio) cuya temperatura se seleccionó como 273.16 K.

En el uso práctico, como en la calibración de termómetros ha sido adoptada la Escala Internacional de Temperatura, que consta de un grupo de procedimientos que permiten, en la práctica, las mejores aproximaciones posibles a la escala Kelvin. La escala adoptada consta de un conjunto de puntos fijos, además de los instrumentos que deben utilizarse para interpolar entre estos puntos fijos y extrapolarlos más allá del punto fijo más alto. En la tabla se muestran algunos de los puntos fijos adoptados por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en el 1990.

**TABLA:** Algunos puntos fijos de la Escala Internacional de Temperaturas (1990).

SUSTANCIA	ESTADO	TEMPERATURA (K)
Hidrógeno	Punto triple	13.8033
Neón	Punto triple	24.5561
Agua	Punto triple	273.16
Estaño	Punto de congelación	505.078
Aluminio	Punto de congelación	933.473
Oro	Punto de congelación	1 337.33
Cobre	Punto de congelación	1 357.77

Además de los termómetros ya descritos de vidrio y líquido, existen otros dispositivos que permiten medir temperaturas, como por ejemplo los termopares y termómetros de resistencia eléctrica. Estos dispositivos (que también pueden ser llamados termómetros pues permiten medir la temperatura) tienen algunas ventajas sobre los termómetros de vidrio como que son más pequeños por lo que registran los cambios de temperatura más rápidamente, pueden medir un rango de variación de temperatura mayor que el rango para el mercurio ( $-50^{\circ}\text{C}$  a  $450^{\circ}\text{C}$ ), su señal de salida es eléctrica lo cual facilita su control y procesamiento electrónico, entre otras.

Los termopares basan su funcionamiento en el hecho que cuando una juntura de unión, entre 2 materiales diferentes, se coloca a diferentes temperaturas, aparece una diferencia de potencial entre sus extremos. Por ello se han construido tablas de calibración, para juntas de materiales específicos, de diferencia de potencial generada para cada valor de temperatura. Así resultan muy utilizados, en la industria, los termopares de platino-rodio (se dan los nombres de los 2 materiales que componen la juntura), que permiten medir muy altas temperaturas, del orden de  $2\,000^{\circ}\text{C}$ , o los de cobre y constantán, caracterizados por su gran exactitud.

Los termómetros de resistencia, también llamados termoresistores, se basan en materiales que cambian marcadamente el valor de sus resistencia a la corriente eléctrica cuando cambia su temperatura.

Observe el hecho que la medición de temperaturas utilizando termómetros se hace teniendo en cuenta el fenómeno del equilibrio térmico, del que ya hablamos anteriormente. Esto se debe al hecho de que cuando queremos conocer la temperatura de un cuerpo, ponemos en contacto con él un termómetro y leemos la temperatura que nos indica el termómetro que asumimos igual a la del cuerpo. La igualdad de estas temperaturas solo se logra cuando el cuerpo y el termómetro están en equilibrio térmico; el equilibrio se alcanza cuando el cuerpo y el termómetro han estado en contacto un tiempo suficientemente largo; por ello en los dispositivos para medir temperaturas es importante el tiempo que demoran en indicar la temperatura del cuerpo con el que están en contacto. Es típico el caso de los termómetros clínicos, usados para medir la temperaturas del cuerpo humano, que producto de que están fabricados de forma que mantengan la indicación de la temperatura un tiempo largo (para ello en el capilar, a la salida del bulbo tienen un estrechamiento), se demoran en adquirir la temperatura del cuerpo, por lo cual los médicos nos indican que esperemos un tiempo entre 1 y 3 minutos para realizar la lecturas y garantizar que ésta sea correcta. Por otra parte es importante que exista un buen contacto entre el cuerpo y el termómetro, para que puedan alcanzar el equilibrio térmico. Es común el caso, que cuando queremos medir la temperatura de un sólido con un termómetro de vidrio, sólo una pequeña parte del bulbo está en contacto con el sólido y la mayor parte del bulbo está en contacto con el aire, por lo que la temperatura que indica el termómetro no es exactamente igual a la del sólido y deben introducirse factores de corrección.

Resumiendo lo expuesto indicamos, en la siguiente tabla, la correspondencia entre temperaturas en diferentes escalas.

PUNTO	°C	K	°F
Ebullición del agua	100	373	212
Fusión del hielo	0	273	32
Cero absoluto	-273	0	-460

Algunos valores de temperatura absoluta típicos se ofrecen en la siguiente tabla:

PROCESO	TEMP. (K)
Interior del Sol	10 000 000
Superficie del Sol	6 500
Fusión del Plomo	600
Congelación del agua	273
Ebullición del Nitrógeno	77
Ebullición del Helio	4.2
Temperatura media del Universo	2.7
Más baja obtenida en laboratorio	$10^{-7}$

## DILATACIÓN (EXPANSIÓN) TÉRMICA.

Como ya se mencionó anteriormente, la mayoría de los cuerpos aumentan su tamaño cuando sufren un aumento de su temperatura. Por el contrario al disminuir la temperatura la mayoría de los cuerpos se contraen o disminuyen sus dimensiones.

Este fenómeno debe ser tenido en cuenta en múltiples instalaciones de la industria y la técnica en general, pues puede ocasionar efectos no deseables. Así, por ejemplo, las estructuras como puentes o líneas de ferrocarril deben construirse de tal forma que al aumentar o disminuir la temperatura ambiente, no se deformen por los efectos de la expansión térmica. Se puede observar como los cables telefónicos o los de energía eléctrica son colocados en los postes con cierta holgura, pues de lo contrario si se ponen al largo justo, al disminuir la temperatura del aire se contraen y pueden romperse.

El fenómeno de dilatación térmica se observa tanto en sólidos como en gases y líquidos. Ya se señaló el hecho de que la dilatación de los líquidos es utilizada ampliamente para medir la temperatura. A nivel microscópico se puede explicar este fenómeno, a partir de que a mayores temperaturas las partículas (átomos y moléculas) que componen los cuerpos realizan un movimiento con mayor amplitud, por lo que la distancia promedio entre ellas aumenta.

Consideremos un cuerpo sólido, en forma de un hilo, cuyas dimensiones transversales sean muy pequeñas en comparación con el largo. Si la longitud inicial, de este hilo, es  $L_0$ , estando a una temperatura  $T_0$ , al cambiarle la temperatura en un intervalo  $\Delta T$  ( $\Delta T = T - T_0$ ), la longitud cambia en un valor  $\Delta L$  ( $\Delta L = L - L_0$ ). Experimentalmente se ha determinado que si  $T$  no es muy grande, el cambio de longitud  $\Delta L$  es proporcional al cambio de temperatura  $\Delta T$  y al largo inicial  $L_0$ . O sea puede escribirse:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

El coeficiente de proporcionalidad  $\alpha$  se conoce con el nombre de coeficiente de dilatación lineal y es característico de cada material. Sus dimensiones son del inverso de temperatura ( $1/K$  o  $1/^\circ C$ ) y sus valores son generalmente pequeños, lo cual puede verse en la tabla que se muestra para algunos sólidos.

La fórmula para  $L$  puede ser escrita en la forma:

$$L - L_0 = \alpha L_0 (T - T_0)$$

de donde puede verse que si  $T$  es mayor que  $T_0$  (la temperatura aumentó),  $L$  será mayor que  $L_0$  (dado que el coeficiente  $\alpha$  es positivo), o sea ocurrió un aumento de la longitud del cuerpo (dilatación). Esto es válido para la mayoría de las sustancias, aunque hay algunas excepciones. Cuando la temperatura del cuerpo disminuye ( $T < T_0$ ) entonces el paréntesis de la derecha es menor que cero lo cual indica que la longitud final es menor que la inicial ( $L < L_0$ ) o sea el cuerpo se contrae. Está claro que el hilo sufre dilatación en todas las dimensiones, pero debido a que las dimensiones transversales son muy pequeñas y el incremento del largo es proporcional al largo inicial ( $\Delta L$  proporcional a  $L_0$ ) puede despreciarse el alargamiento de las dimensiones transversales.

El sentido físico del coeficiente  $\alpha$  se puede obtener escribiendo la fórmula en la forma:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$$

de donde vemos que  $\alpha$  representa la fracción que se alarga el cuerpo cuando el cambio de temperatura  $T$  es igual a la unidad.

La longitud final del cuerpo se calcula despejando la fórmula inicial de la forma:

$$L = L_0 + \Delta L$$

o también sustituyendo la expresión para  $\Delta L$ :

$$L = L_0 + \alpha L_0 \Delta T = L_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

## Ejemplo No. 1

Una regla de aluminio fue graduada a una temperatura de 300 K (27°C), con una escala en mm. ¿Cuál será la longitud de 1 milímetros de la escala si la temperatura de la regla es de 400 K (127°C)?

Datos:

$$L_0 = 1 \text{ mm}$$

$$T = T - T_0 = 400 \text{ K} - 300 \text{ K} = 100 \text{ K}$$

$$\alpha = 24 \times 10^{-6} \text{ 1/K (de la tabla)}$$

Solución:

$$L = L_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

$$L = 1 \text{ mm} (1 + 24 \times 10^{-6} \text{ 1/K} \cdot 100 \text{ K})$$

$$L = 1 \text{ mm} (1 + 24 \times 10^{-4})$$

$$L = 1 \text{ mm} (1.0024)$$

$$L = 1.0024 \text{ mm}$$

Como se ve esto puede ser una causa de error en la medición de longitudes con reglas.

Una vez analizada la dilatación lineal que sufren los cuerpos podemos comprender que si el sólido tiene una forma determinada, por ejemplo un cubo, y su temperatura varía, todas sus dimensiones cambiarán en una misma fracción, ya que cada dimensión sufre una dilatación lineal igual (\*). Si el cubo tiene las aristas de largo  $L_0$ , al aumentarle la temperatura un intervalo  $\Delta T$ , cada arista aumentará su longitud en un valor  $\Delta L$ , igual para todas ya que el material es el mismo. El volumen del cuerpo cambiará en un valor  $\Delta V$  que puede plantearse será proporcional al volumen inicial  $V_0$  y al intervalo de temperatura  $\Delta T$ , o sea:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad \text{donde } \beta \text{ es el coeficiente de dilatación volumétrica y para los sólidos comunes (ver nota) se considera igual a } 3\alpha.$$

$$\beta = 3\alpha$$

MATERIAL	COEFICIENTE $\alpha$ (1/K)
Plomo	$30 \times 10^{-6}$
Aluminio	$24 \times 10^{-6}$
Cobre	$17 \times 10^{-6}$
Acero	$12 \times 10^{-6}$
Vidrio (ordinario)	$9 \times 10^{-6}$
Vidrio (Pyrex)	$3 \times 10^{-6}$
Cuarzo	$5 \times 10^{-6}$

LIQUIDO	COEFICIENTE $\beta$ (1/K)
Etanol	$1100 \times 10^{-6}$
Gasolina	$1080 \times 10^{-6}$
Agua (por encima de 4°C)	$210 \times 10^{-6}$
Mercurio	$180 \times 10^{-6}$

Puesto que los fluidos no tienen forma definida el coeficiente más importante es el de dilatación volumétrica y para algunos líquidos se muestran sus valores en la tabla:

De los valores dados puede verse que la dilatación en los líquidos es alrededor de 10 veces más grande que la de los sólidos. Este hecho es el que hace posible el funcionamiento de los

(\* ) NOTA: Existen sólidos que tienen propiedades diferentes en diferentes direcciones. Para estos sólidos la dilatación no será igual en cada dirección, por lo que el valor del coeficiente de dilatación lineal es diferente en cada dirección. Estos sólidos se denominan anisótropos

termómetros de líquido y vidrio; puede compararse la dilatación del mercurio con la del vidrio ordinario, de acuerdo a los datos de las tablas.

La mayoría de los líquidos se dilatan al aumentarle su temperatura, sin embargo el agua presenta una anomalía en su comportamiento en el rango de 0°C a 4°C. Cuando el agua se calienta de 0°C a 4°C se contrae en lugar de dilatarse y cuando se enfría de 4°C a 0°C se dilata en lugar de contraerse. Este comportamiento anómalo del agua puede explicarse en base a su estructura molecular y es el que provoca, junto al fenómeno de la convección que estudiaremos posteriormente, que los ríos y lagos se congelen sólo en la capa superficial y no en el interior. Asimismo el hecho de que el agua se dilate cuando se enfría desde 4°C a 0°C provoca que la densidad del agua es máxima a la temperatura de 4°C, por lo que el hielo tiene menor densidad que el agua y ésta es la causa que el hielo flote en el agua (recordar el principio de Arquímedes).

De manera que para considerar el cálculo de la variación de volumen utilizamos la fórmula:

$$V = V_0 + \beta V_0 \Delta T \quad \text{similar a la utilizada para la dilatación lineal.}$$

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta T)$$

## Ejemplo No. 2

Un automovilista de Monterrey llenó el tanque de su auto con 40 litros de gasolina, en la mañana, cuando la temperatura ambiente era de 20°C. Luego estacionó el auto al Sol y la temperatura del mismo subió a 55°C. El automovilista notó que se había derramado gasolina del tanque. ¿Cuánta gasolina se derramó del tanque? (Considere que el tanque, de latón, no se dilata para el mismo cambio de temperatura).

Datos:

$$V_0 = 40 \text{ litros}$$

$$\Delta T = 55^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 35^\circ\text{C}$$

$$\beta = 1080 \times 10^{-6} \text{ 1/K (De la tabla)}$$

Solución:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

$$\Delta V = 1080 \times 10^{-6} \text{ 1/K} (40 \text{ litros}) 35^\circ\text{C}$$

$$\Delta V = 1.512 \text{ 000} \times 10^{-6} \text{ litros}$$

$$\Delta V = 1.512 \text{ litros}$$

Observe el uso de las unidades de volumen en litros y el hecho de que dado que el intervalo de grados Celsius y Kelvin son iguales se puede simplificar las unidades del intervalo de temperatura y del coeficiente de dilatación volumétrica.

¿Es válido no considerar la dilatación del tanque? El coeficiente de dilatación lineal del latón es, según la tabla, de  $19 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ . Para hallar el coeficiente de dilatación volumétrica utilizaremos la fórmula que relaciona ambos coeficientes:

$$\beta = 3\alpha$$

$$= 3 (19 \times 10^{-6} \text{ 1/K})$$

$$= 57 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$$

La dilatación del tanque sería de:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

$$\Delta V = 57 \times 10^{-6} \text{ 1/K} (40 \text{ litros}) 35^\circ\text{C}$$

$$\Delta V = 79 \text{ 800} \times 10^{-6} \text{ litros}$$

$$\Delta V = 0.0798 \text{ litros}$$

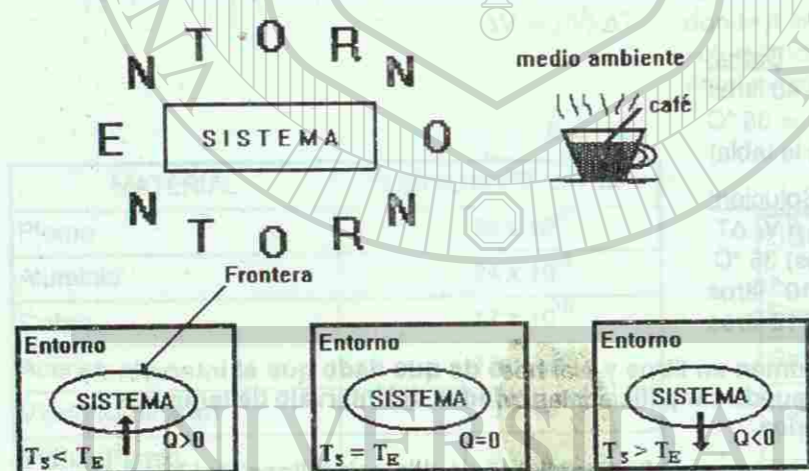
que como se observa es mucho menor que la dilatación de la gasolina y por ello es posible despreciarla. Si se requiere una mayor exactitud del cálculo entonces debe tenerse en cuenta esta dilatación también.

## CALOR

¿Que queremos decir realmente? Cuando expresamos algunas veces al platicar con nuestros compañeros de escuela mensajes como los siguientes: Está haciendo bastante calor, este verano ha sido muy caluroso etc, o que significado físico encierran mensajes que utilizan derivaciones de dicho término como: La ciudad de Monterrey se verá afectada por la llegada de un frente cálido para mañana según el pronóstico del tiempo, o Pedro Pérez lleva una dieta baja en calorías. Analicemos las siguientes situaciones:

Una humeante taza de café colocada sobre una mesa, al cabo de cierto tiempo "se enfría". Un refresco bien frío, recién sacado de la hielera colocado sobre una mesa, al cabo de un tiempo se calienta, sabemos que estos efectos se producen por la interacción del entorno con el objeto físico, analicemos que es lo que sucede por separado en cada caso.

Simplifiquemos la observación de este fenómeno físico diciendo que la humeante taza de café será nuestro "sistema" y el medio ambiente que la rodea "el entorno" y que la interacción ocurre entre ellos por "contacto térmico" entre la frontera del sistema y su entorno. Mediante un punto de vista "energético" el sistema cede al entorno alguna forma de energía, en tanto se establece el equilibrio térmico entre ellos. Durante el contacto térmico el flujo de energía se establece en la dirección del sistema de mayor temperatura al sistema de menor temperatura.



*Calor se define como una forma de energía que se transfiere (fluye) entre un sistema y su entorno, en virtud de una diferencia de temperatura entre ellos.*

en el segundo caso bajo estudio, el entorno (de temperatura mayor que el sistema) es quien cede calor al sistema (refresco) durante la aproximación al equilibrio térmico.

*El mecanismo de transferencia de calor siempre se establece en la dirección del sistema de mayor temperatura al sistema de menor temperatura.*

Para simplificar el análisis energético (ley de la conservación de la energía) consideremos los fenómenos físicos descritos como contacto térmico entre dos sistemas con diferente temperatura, donde solo ocurre intercambio de calor entre ellos, es decir un modelo donde no existen pérdidas, ni ninguna otra forma de intercambio de energía.

La temperatura de equilibrio térmico, como ya sabes debe ser alguna temperatura intermedia entre los valores de temperaturas iniciales de cada sistema y el flujo de calor se establece en la dirección del sistema de mayor temperatura al sistema de menor temperatura iniciales. Alguna fracción de la energía inicial que posee la humeante taza de café se trasfiere en forma de calor al entorno, la cantidad de calor, considerada como una magnitud de la energía transferida representa una medida de la variación de la energía inicial del sistema bajo estudio. Debemos ser cuidadosos con el término cantidad de calor porque pudiera pensarse erróneamente que la humeante taza de café a la que hacemos referencia posee calor, y lo cede al entorno mediante algún mecanismo de transporte y no es así, El calor no es una propiedad intrínseca de un sistema, Desde un punto de vista microestructural (que analizaremos con detenimiento más adelante en este capítulo) La energía inicial total del sistema tiene que ver con algunas formas de energías debidas al ininterrumpido movimiento de las partículas, que lo forman (energía cinética de moléculas y átomos, energía potencial debida a la interacción entre ellas, entre otras formas de energía) y la fracción de la energía inicial que es transferida al entorno, es lógicamente, alguna de estas formas de energías mencionadas, mientras que el calor es claramente otra forma de energía, es una forma de energía en tránsito.

La unidad de calor es la unidad de energía en el sistema internacional es decir el JOULE (J), previo a la construcción del concepto de calor como una forma de energía se pensaba que los cuerpos o sistemas intercambiaban un fluido invisible llamado calórico, mediante estas concepciones previas del calor se definieron algunas unidades arbitrarias de calor como. La caloría, la kilocaloría (gran caloría Cal) y el B.T.U.

Caloría cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 gramo de agua a un grado celcius. (cal)

BTU cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de una libra de agua en 1 grado fahrenheit.

Estas unidades son utilizadas aun en ciertos casos, sin embargo se han redefinido mediante la relación que guardan con el joule

$$\begin{aligned} 1 \text{ cal.} &= 4.186 \text{ J.} \\ 1 \text{ kilocaloría} &= 1000 \text{ cal.} = 4,186 \text{ J.} \\ 1 \text{ BTU} &= 1055 \text{ J.} \end{aligned}$$

Un cuerpo o sistema puede ser calentado mediante dos formas distintas.

- 1) Mediante un proceso de transporte de calor (los mecanismos de transferencia de calor: Conducción, Convección y Radiación se estudiarán con detenimiento más adelante en el desarrollo de este capítulo)
- 2) Mediante la realización de un trabajo sobre él, en el siglo XIX, los experimentos llevados a cabo por Benjamín Thomson (Conde Rumford 1753 - 1814) demostraron fehacientemente que el trabajo mecánico podía producir calor, este resultado condujo al desarrollo de la ley de la conservación de la energía.

### EQUIVALENTE MECÁNICO DEL CALOR

Benjamín Thompson mientras supervisaba la perforación sobre barriles de cañón en Alemania notó que el agua que se ponía en la perforación del cañón para evitar un sobrecalentamiento durante el barrenado llegaba a hervir y se evaporaba teniendo que reabastecerla periódicamente, concluyó que el trabajo mecánico era responsable de dicho calentamiento, identificando el calor como una forma de energía y poniendo de manifiesto que debiera existir una relación de equivalencia con el trabajo mecánico.

Esta conclusión fue probada tiempo después, en 1850 por James Joule en un experimento para determinar el equivalente mecánico del calor. La figura No. 1 muestra un diagrama básico del aparato de Joule. El trabajo  $W$  efectuado sobre el agua por las pesas al caer (medida en Joules) producía una elevación de la temperatura mensurable en el agua, equivalente a la absorción por el agua de cierto calor (medido en calorías) y a partir de esta equivalencia determinó una relación empírica entre la caloría y el Joule. Este resultado proporcionó durante casi un siglo una conversión entre el Joule y la caloría,  $1 \text{ cal} \approx 4.19 \text{ J}$ .

Hoy en día este factor de conversión ha perdido la importancia que tuvo en el tiempo de Joule, después de la adopción en el año de 1948 del Joule como la unidad del calor en el S.I.

¿Qué ocurre cuando nos frotamos repetidamente las manos?

Este experimento sencillo nos da la clave para entender la definición correcta del calor y lo que ocurre en el experimento de Joule. Cuando frotamos nuestras manos, se realiza un trabajo sobre ellas (debido a la fuerza de fricción que se opone al movimiento relativo de las superficies en contacto) Aumentando por lo tanto la energía inicial total del sistema ya que ahora aumenta la energía cinética de las moléculas, la energía potencial debida a la interacción entre ellas, entre otras formas de energías elevándose la temperaturas de nuestras manos.

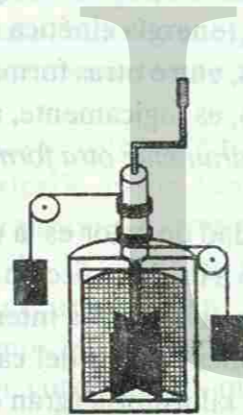


Fig. 1. Aparato de Joule

Luego este excedente de energía puede entonces ser transferida al entorno como calor, en virtud de que las manos están a una temperatura más alta que el entorno (la energía no se crea ni se destruye solo se trasfiere de un sistema a otro)

El calor y el trabajo guardan una condición similar en tanto ambos representan un medio para la transferencia de energía, el trabajo en una forma macroscópica asociado con formas de energía que tienen que ver con el movimiento de los cuerpos y el calor más bien en una forma microscópica asociado con formas de energías que tienen que ver con el movimiento de las partículas que conforman la sustancia.

Así como en tu curso de mecánica se estableció un convenio de signos para el trabajo, ahora se hace necesario elegir una convención de signos para el calor. Eligiémos que  $Q$  sea positivo en tanto el flujo de calor se establezca en la dirección del sistema ( $T_s < T_e$ ) diremos que el calor es absorbido por el sistema es decir su energía inicial aumenta. A la inversa ( $T_s > T_e$ ) el sistema cede calor al entorno y hacemos que  $Q$  para el sistema sea negativo  $Q(-)$  calor perdido por el sistema.

Cuando decimos: hace bastante calor realmente queremos expresar que el entorno tiene una temperatura mayor que la temperatura de nuestro cuerpo, se establece un flujo de calor en la dirección del sistema, el cuerpo humano que es una máquina térmica donde el equilibrio térmico es fundamental para su correcto funcionamiento (temperatura de operación óptima =  $36.5^\circ \text{C}$ ) responde con algunas medidas biológicas que le permitan mantener dicho balance energético.

Algo similar ocurre en nuestro planeta donde es fundamental se mantenga un balance térmico en cuanto al calor absorbido y el calor cedido (el efecto invernadero ayuda a regular la temperatura promedio a lo largo plazo de nuestro planeta).

Cuando escuchamos que alguien lleva una dieta baja en calorías significa que le estamos asociando a los alimentos valores energéticos con la finalidad de no consumir excedentes de dichos alimentos y poder controlar nuestro peso sin afectar el correcto funcionamiento del organismo.

### CAPACIDAD CALORÍFICA ESPECÍFICA

Una experiencia muy común, ocurre cuando colocamos un recipiente con agua sobre el quemador encendido de una estufa, la llama del quemador transfiere energía en forma de calor al sistema  $Q(+)$ , y después de cierto tiempo notamos que el agua se calienta, esto quiere decir que su temperatura aumenta, lo cual puede ser fácilmente corroborado si colocamos un termómetro dentro del agua. Es decir, hay una propiedad del sistema que cambia durante el proceso descrito, que es su TEMPERATURA. El cambio de temperatura  $\Delta T$  que experimenta

el sistema asociado a la cantidad de calor transferida en particular durante el proceso dependerá de las circunstancias bajo las cuales se transfiere el calor. (condición de  $V = \text{cte.}$ ,  $P = \text{cte.}$ , etc.)

"La razón entre la cantidad de calor suministrada al sistema durante cualquier proceso y su correspondiente cambio de temperatura se define como LA CAPACIDAD CALORÍFICA."

$$\text{Capacidad Calorífica} = Q/\Delta T$$

La capacidad calorífica es característica de un objeto en particular, esto se pone de manifiesto fácilmente si repetimos el mismo experimento pero colocando dos ollas con cantidades distintas de agua en quemadores similares de la misma estufa, por ejemplo una de ellas conteniendo 5 kilogramos de agua y la otra 10 kilogramos de agua, obviamente estamos hablando de dos sistemas distintos (aunque estén hechos del mismo material), cuando decimos que los colocamos en quemadores similares nos referimos a que suponemos que ambos transfieren la misma cantidad de calor. Después de cierto tiempo de permanecer expuestas al fuego, notamos que los sistemas responden con diferentes cambios de temperatura a una cantidad igual de calor suministrada, es decir, habrá dos valores numéricos distintos de capacidad calorífica cada uno caracteriza a cada objeto en particular.

Recuerda que el calor no es una propiedad intrínseca del objeto, el término capacidad calorífica es simplemente la energía por cada grado de cambio de temperatura ( $Q/\Delta T$ ).

Si definimos ahora la capacidad calorífica por unidad de masa de un cuerpo, llamada capacidad calorífica específica o calor específico como es más usual, estaremos hablando de una magnitud física que caracteriza el material de que está hecho el cuerpo.

$$c = \frac{\text{Capacidad Calorífica}}{m}$$

$$c = \frac{Q}{m \Delta T} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right]$$

$c$  = calor específico  
 $m$  = masa del cuerpo  
 $\Delta T$  = cambio de temperatura

Esta magnitud física determina la capacidad de absorber (o ceder) energía en forma de calor de un cuerpo en función del material de que está hecho, en el experimento anterior si dividimos los valores de capacidad calorífica (valores diferentes para objetos distintos) entre la masa de dichos objetos (los dos están constituidos del mismo material moléculas de agua), obtendríamos un mismo valor numérico, el calor específico del agua. (modelo simplista, sin considerar el recipiente que la contiene ni pérdidas).

Si repetimos el experimento colocando masas iguales de sustancias diferentes, bajo la acción de quemadores similares durante el mismo tiempo, por ejemplo 1 kilogramo de agua y 1 kilogramo de aluminio durante 10 minutos, al principio las dos sustancias tienen la misma

temperatura, digamos la temperatura ambiente pero al finalizar el intervalo de tiempo notaremos que :

- 1) Las dos sustancias aumentaron su temperatura.
- 2) Los incrementos de temperatura que experimentaron cada una de las sustancias no fueron iguales.

Cada sustancia respondió con un  $\Delta T$  diferente a la misma cantidad de calor (recuerda que estamos suponiendo que los quemadores de la estufa transfieren las mismas cantidades de calor) es decir cada sustancia tiene un calor específico característico.

Si bien las unidades de calor específico se expresan en términos de K, podemos trabajar también con temperaturas en  $^{\circ}\text{C}$  recuerda que un  $\Delta T$  expresado en  $^{\circ}\text{C}$  es igual a la misma diferencia de temperatura en K.

La capacidad calorífica de un cuerpo (de una moneda de plata por ejemplo) y el calor específico de un material (por ejemplo de la plata) dependen de la temperatura (entre otros factores y de un modo similar a lo que ocurre con otras magnitudes físicas como la densidad), sin embargo el porcentaje de la variación de estas magnitudes durante procesos realizados a temperaturas ordinarias y dentro de intervalos de temperatura ordinarios es muy pequeño y prácticamente bajo las condiciones señaladas pueden considerarse como constantes. Además como ya se mencionó anteriormente deben especificarse las condiciones bajo las cuales se transfiere el calor "Q" al material. En este capítulo abordaremos procesos donde la condición común<sup>1</sup>, es que la muestra (sistema) permanezca sometido a una presión atmosférica normal (constante) mientras se transfiere el calor.

$$c_p = \frac{Q}{m \Delta T} \quad \begin{array}{l} c_p = \text{calor específico a presión constante.} \\ Q = \text{Cantidad de Calor Transferida. [J]} \\ m = \text{masa del cuerpo. [kg]} \\ \Delta T = \text{cambio de temperatura. [K.]} \end{array}$$

Esta ecuación nos proporciona un medio para calcular la cantidad de calor que se transfiere (que gana o pierde) a un material si conocemos su calor específico, su masa y el cambio de temperatura que experimenta durante el proceso.

$$Q = mc_p \Delta T \text{ [J.]}$$

La tabla 1 muestra los valores de los calores específicos de algunas sustancias comunes medidas a la temperatura ambiente y presión atmosférica normal.

<sup>1</sup>Existen otras posibilidades que conducen a un valor distinto de "c", tales como el calor específico a volumen constante "c<sub>v</sub>" etc.

Tabla No. 1 Calores específicos de algunas sustancias.

Sustancia	Calor específico (J/kg K)
Oro	129
Plata	236
Latón	380
Cobre	387
Hierro	450
Carbono	502
Vidrio	840
Aluminio	900
Vapor de H <sub>2</sub> O	2 009
Hielo	2 093
Alcohol (etílico)	2 430
Agua de mar	3 900
Agua	4 190

Mientras mayor sea el calor específico de una sustancia, mayor será la energía que se le debe transferir para cambiar la temperatura en "un grado" de una masa unitaria de dicha sustancia. El agua (por ejemplo) tiene un calor específico relativamente grande [4190 J/Kg. K], esto significa que a una cantidad de agua relativamente pequeña se le puede transferir una gran cantidad de calor que se refleja o produce un cambio muy pequeño de temperatura, por ésta razón el agua constituye un agente refrigerante muy útil se usa por ejemplo en los sistemas de enfriamiento de los motores automotrices, torres de enfriamiento de procesos industriales etc.

Es importante aclarar que cuerpos de igual masa, constituidos por diferentes materiales y con diversos calores específicos, al enfriarse un grado también liberan distintas cantidades de calor.

**Ejemplo No. 3**

¿Cuánto calor se transfiere de un motor automotriz a 12 litros de agua contenidos en el sistema de refrigeración del mismo (radiador) si la temperatura del agua se eleva de 15°C a 45°C?

Datos

$$V = 12 \text{ lts}$$

$$T_1 = 15^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 45^\circ\text{C}$$

Solución:

$$V = 12 \text{ lts} \times \frac{1 \text{ dm}^3}{1 \text{ lt}}$$

$$V = 12 \text{ dm}^3 \times \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ dm}^3}$$

$$V = 12000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Si } \rho = \frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = \rho V = \left(\frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3}\right) (12000 \text{ cm}^3)$$

$$m = 12000 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$m = 12 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 45^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 30 \text{ K}$$

$$Q = m c_p \Delta T$$

$$Q = (12 \text{ kg}) \left(4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) (30 \text{ K})$$

$$Q = 1508.4 \text{ kJ (kilojoules)}$$

$$c_{p\text{agua}} = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

**Ejemplo No. 4**

Medio litro de agua a 30°C se enfría al extraerle 2.1 x 10<sup>4</sup> Joules de calor. ¿Cuál es la temperatura final del agua?

Datos

$$V = 0.5 \text{ lts}$$

$$Q = -2.1 \times 10^4 \text{ J}$$

de donde m = 0.5 kg (revisar ejemplo anterior)

(Q cedido por el agua es negativo)

$$c_{p\text{agua}} = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_1 = 30^\circ\text{C}$$

$$T_2 = ?$$

Solución:

$$\Delta T = \frac{Q}{m c_p}$$

De la ecuación  $Q = m c_p \Delta T$ 

$$\Delta T = \frac{-2.1 \times 10^4}{(0.5 \text{ kg}) \left(4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)}$$

$$\Delta T = -10 \text{ K}$$

$$\Delta T = -10^\circ\text{C}$$

ya que  $\Delta T = -10 \text{ K}$ 

$$T_2 = \Delta T + T_1$$

$$T_2 = -10^\circ\text{C} + 30^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 20^\circ\text{C}$$

**Ejemplo No. 5**

Dos bloques de igual masa de aluminio y latón respectivamente, están en equilibrio térmico, digamos a la temperatura ambiente. ¿A cuál de ellos se requiere transferirle una cantidad mayor de calor para elevar su temperatura una cantidad dada y cuantas veces más calor se tendría que agregar que al otro bloque metálico?

Datos

Block aluminio

$$m = m_a$$

$$\Delta T = \Delta T_a$$

$$c_{pa} = 900 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

Block latón

$$m = m_l$$

$$\Delta T = \Delta T_i$$

$$c_{pl} = 380 \text{ J/kg-K}$$

$$m_a = m_i = m \quad \text{Hipótesis}$$

$$\Delta T_a = \Delta T_i = \Delta T \quad \text{Hipótesis}$$

$$Q_a = m_a \times c_p \times \Delta T_a$$

$$Q_a = 900 (m\Delta T) \text{ [J]}$$

$$Q_i = m_i \times c_p \times \Delta T_i$$

$$Q_i = 380 (m\Delta T) \text{ [J]}$$

R<sub>1</sub> = Se requiere agregar mayor cantidad de calor al block de aluminio en virtud del mayor valor de calor específico.

¿Qué tanto más calor sugiere encontrar la relación Q<sub>a</sub>/Q<sub>i</sub>?

$$\frac{Q_a}{Q_i} = \frac{900 (m\Delta T)}{380 (m\Delta T)} = 2.37$$

R<sub>2</sub> = Se requiere agregar 2.37 veces más calor que al block de latón.

### CALORIMETRÍA

El calor específico de una sustancia puede determinarse experimentalmente, realizando en el laboratorio un intercambio calorífico "controlado", colocando en contacto térmico una masa previamente determinada de dicha sustancia y a una temperatura conocida con una cierta cantidad de agua, también de masa conocida y a una temperatura diferente, lo común es que la temperatura del agua sea inferior a la de la sustancia, utilizando para contener la mezcla (sustancia + agua) un recipiente aislado que permita la aproximación al equilibrio térmico de la mezcla con pérdidas de calor mínimas hacia el entorno (lo ideal es que no existan pérdidas). Luego se aplica la ley de la conservación de la energía para calcular el valor del calor específico de la sustancia.

Para "controlar" (hasta cierto punto) las pérdidas durante el intercambio calorífico el contenedor que se utiliza es un dispositivo de laboratorio llamado "CALORÍMETRO" que consiste en un vaso metálico de pared delgada generalmente de aluminio y de masa conocida, sostenido mediante un soporte externo y aislado de él por empaques de hule no conductor, y una tapa aislante usualmente de madera para sellar el contenedor una vez colocada la mezcla y con dos orificios en su parte superior para poder introducir un agitador de aluminio y un termómetro para medir la temperatura de equilibrio alcanzada por la mezcla, éste procedimiento de medición es usualmente conocido como el "método de las mezclas".

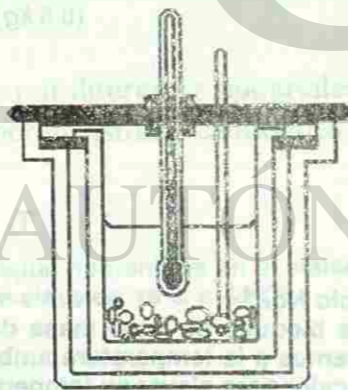


Fig. 2 Calorímetro.

Si consideramos que el sistema (formado por calorímetro y la mezcla) no intercambian calor con el entorno, la ley de la conservación de la energía aplicada al intercambio calorífico que ocurre en el sistema establece:

$$Q_{\text{ganado}} + Q_{\text{perdido}} = 0$$

Q<sub>g</sub> = Q(+) para las sustancias que se calientan.  
 Q<sub>p</sub> = Q(-) para las sustancias que se enfrían.

Los siguientes ejemplos ilustran el método de las mezclas para calcular:

a) el calor específico "c<sub>p</sub>"

Ejemplo No. 6

Los estudiantes de la Prepa. 15 van a determinar experimentalmente el c<sub>p</sub> del hierro. Para ello, calientan un perdigón de hierro de 0.08 kilogramos de masa, hasta que alcanza una temperatura de 95°C. Utilizan un calorímetro de aluminio cuya masa incluyendo el vaso interior y el agitador que es de 0.060 kilogramos, lo llenan parcialmente con 0.15 kilogramos de agua a 18°C, introducen en él, el perdigón caliente y sellan el calorímetro. Después de que el sistema alcanzó el equilibrio térmico, la temperatura final es 22°C. Aplicar la ley de la conservación de la energía para calcular el calor específico del hierro. (Considera que no hubo pérdidas de calor al entorno.

datos:

Perdigón de Hierro	Calorímetro de Aluminio	Agua
m <sub>H</sub> = 0.68 kg	m <sub>c</sub> = 0.06 kg	m <sub>agua</sub> = 0.15 kg
T <sub>i</sub> = 95°C	T <sub>i</sub> = 18°C	T <sub>i</sub> = 18°C
c <sub>p</sub> = ?	c <sub>p</sub> = 900 $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	c <sub>p</sub> = 4 190 $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
T <sub>F</sub> = 22°C	T <sub>F</sub> = 22°C	T <sub>F</sub> = 22°C
ΔT <sub>H</sub> = (22 - 95)K	ΔT = T <sub>F</sub> - T <sub>i</sub> ΔT = (22 - 18) K	ΔT = T <sub>F</sub> - T <sub>i</sub> ΔT = (22 - 18) K
ΔT = -73 K	ΔT = 4 K	ΔT = 4 K

Solución:

$$Q_{\text{perdido}} + Q_{\text{ganado}} = 0$$

$$[Q_{\text{perdigón de hierro}}] + [Q_{\text{calorímetro}} + Q_{\text{agua}}] = 0$$

$$m_H c_{pH} \Delta T_H + m_c c_{pc} \Delta T_c + m_a c_{pa} \Delta T_a = 0$$

$$\frac{m_H c_{pH} \Delta T_H}{m_H \Delta T_H} = - \frac{[m_c c_{pc} \Delta T_c + m_a c_{pa} \Delta T_a]}{m_H \Delta T_H}$$

$$c_{pH} = \frac{- [(0.06 \text{ kg})(900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}})(4 \text{ K}) + (0.15 \text{ kg})(4 190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}})(4 \text{ K})]}{(0.08 \text{ kg})(-73 \text{ K})}$$

a) Considerando que no existen pérdidas, el calor perdido por el perdigón de hierro (se enfría de 95°C a 22°C) es ganado por el calorímetro y por el agua (ambos se calientan de 18°C a 22°C), aplicando la ley de la Conservación de la Energía.



$$c_{pH} = \frac{-[216 J + 2514 J]}{-(5.84 \text{ kg-K})}$$

$$c_{pH} = \frac{2730 J}{5.84 \text{ kg-K}}$$

$$c_{pH} = 467.47 \frac{J}{\text{kg-K}}$$

b) la temperatura de equilibrio de una mezcla "te"

**Ejemplo No. 7**

En otro experimento similar al anterior, los estudiantes calientan ahora, un pedazo de cobre de 0.15 kilogramos de masa, hasta los 100°C y utilizan también el método de las mezclas con el mismo calorímetro de aluminio, pero colocando ahora 0.200 kilogramos de agua a 20°C. Calcular la temperatura de equilibrio de la mezcla, considerando que no hubo pérdidas de calor durante la aproximación al equilibrio térmico.

Datos:

Cobre	Calorímetro (Aluminio)	Agua
m = 0.15 kg	m = 0.06 kg	m = 0.2 kg
T <sub>i</sub> = 100°C = 373 K	T <sub>i</sub> = 20°C = 293 K	T <sub>i</sub> = 20°C = 293 K
c <sub>p</sub> = 387 $\frac{J}{\text{kg-K}}$	c <sub>p</sub> = 900 $\frac{J}{\text{kg-K}}$	c <sub>p</sub> = 4190 $\frac{J}{\text{kg-K}}$
T <sub>F</sub> = T <sub>E</sub> = ?	T <sub>F</sub> = T <sub>E</sub> = ?	T <sub>F</sub> = T <sub>E</sub> = ?

Hipótesis: no hay pérdidas de calor al entorno.

Solución:

$$Q_{\text{perdido}} + Q_{\text{ganado}} = 0$$

$$[Q_{\text{cobre}}] + [Q_{\text{calorímetro}} + Q_{\text{agua}}] = 0$$

El calor perdido por el trozo de cobre, es ganado por el calorímetro y el agua, aplicando la ley de la Conservación de la Energía.

$$m_{\text{Cu}} c_{p\text{Cu}} \Delta T_{\text{Cu}} + m_{\text{Al}} c_{p\text{Al}} \Delta T_{\text{Al}} + m_{\text{agua}} c_{p\text{agua}} \Delta T_{\text{agua}} = 0$$

$$(0.15 \text{ kg})(387 \frac{J}{\text{kg-K}})(T_E - 373) K + (0.06 \text{ kg})(900 \frac{J}{\text{kg-K}})(T_E - 293) K + (0.2 \text{ kg})(4190 \frac{J}{\text{kg-K}})(T_E - 293) K = 0$$

Sustituyendo datos.

$$58.05 J (T_E - 373) K + 54 J (T_E - 293) K + 838 J (T_E - 293) K = 0$$

$$58.05 J (T_E - 373) K + 892 J (T_E - 293) K = 0$$

$$58.05 T_E - 21652.65 + 892 T_E - 261356 = 0$$

$$950.05 T_E = 283008.65$$

$$T_E = \frac{283008.65}{950.05}$$

$$T_E = 297.89 K$$

$$T_E = 24.89^\circ\text{C}$$

c) la masa de una sustancia "m".

**Ejemplo No. 8**

Un pedazo de cobre se calienta a 90°C y luego se coloca en 0.80 kilogramos de agua a 10°C. La temperatura al final de la mezcla es de 18°C. ¿Cuál es la masa del trozo de cobre? Suponer que no hay pérdidas de calor durante el intercambio térmico y éste intercambio sólo ocurre entre el cobre y el agua.

Datos:

Cobre	Agua
T <sub>i</sub> = 90°C = 363 K	T <sub>i</sub> = 10°C = 283 K
T <sub>F</sub> = 18°C = 291 K	T <sub>F</sub> = 18°C = 291 K
ΔT = -72 K	ΔT = 8 K
c <sub>p</sub> = 387 $\frac{J}{\text{kg-K}}$	c <sub>p</sub> = 4190 $\frac{J}{\text{kg-K}}$
m = ?	m = 0.080 kg

Hipótesis: No hay pérdidas al entorno y el intercambio térmico ocurre sólo entre el cobre y el agua.

Solución:

$$Q_{\text{perdido}} + Q_{\text{ganado}} = 0 \quad \text{Ley de la Conservación de la Energía.}$$

$$m_{\text{Cu}} (387 \frac{J}{\text{kg-K}})(-72 K) + m_{\text{Cu}} c_{p\text{Cu}} \Delta T_{\text{Cu}} + m_{\text{agua}} c_{p\text{agua}} \Delta T_{\text{agua}} = 0$$

$$+ (0.080 \text{ kg})(4190 \frac{J}{\text{kg-K}})(8 K) = 0$$

$$m_{\text{Cu}} (-27864 \frac{J}{\text{kg}}) + (2681.6 J) = 0$$

$$m_{\text{Cu}} = \frac{-2681.6 J}{-27864 \frac{J}{\text{kg}}}$$

$$m_{\text{Cu}} = 0.096 \text{ kg}$$

**CALOR LATENTE DE CAMBIO DE FASE.**

No siempre que un cuerpo o sustancia (sistema) absorben calor se incrementa "necesariamente" su temperatura, La cantidad de calor transferida a una sustancia durante un intercambio térmico trae consigo un incremento de su energía, En el capítulo anterior apuntábamos que el estado de agregación de una sustancia, está en dependencia de la energía (La que está asociada a las fuerzas de interacción molecular que tienen que ver con la estructura interna de la sustancia) que posee la sustancia, luego; puede ocurrir que hasta alcanzar un cierto valor característico de la temperatura de la sustancia para esa fase tal que, excedentes de energía sean ahora transferidos al trabajo requerido para modificar la estructura interna molecular (romper los enlaces y aumentar mas la separación de la moléculas), ocurriendo un cambio en el estado de agregación de la sustancia sin que cambie su temperatura. De éste modo, el hielo se funde (hielo y agua coexisten en equilibrio térmico) y el agua hierve, absorbiendo calor en cada caso sin un cambio de temperatura. Una vez que el proceso de cambio de fase se completa,

la adición de mas cantidad de calor ocasiona que la temperatura se eleve. Del mismo modo un cuerpo puede liberar (ceder) calor al entorno a una temperatura constante, cuando cambia de fase en los procesos inversos, (el agua se congela, y el vapor se condensa). La cantidad de calor transferido por unidad de masa, durante un cambio de fase se llama calor de transformación o calor latente ( $L$ ) como es más usual. Para calcular entonces el total transferido durante un cambio de fase tenemos la ecuación:  $Q = Lm$  (J). Donde  $m$  = masa de la muestra que cambia de fase. La cantidad de calor transferido a un cuerpo durante la fusión es numericamente igual a la que libera (cede) dicho cuerpo durante la solidificación (Ley de la conservación de la energía) y se le llama calor latente de fusión símbolo  $L_f$  de igual manera la cantidad de calor transferido durante la ebullición o la condensación se le llama calor latente de vaporización símbolo  $L_v$ . La tabla N 2 proporciona los calores latentes de algunas sustancias.

Tabla No. 2. Calores latentes de cambio de fase.

SUSTANCIA	PUNTO DE FUSIÓN (K)	LATENTE DE FUSIÓN (kJ/kg)	PUNTO DE EBULLICIÓN (K)	LATENTE DE VAPORIZACIÓN (kJ/kg)
Alcohol etílico	156	109	352	878
Mercurio	234	11.3	630	296
Agua	273	333	373	2 256
Plomo	601	24.7	2 013	858
Plata	1 235	105	2 485	2 336
Oro	1 336	63	2 153	1 640
Cobre	1 356	205	2 840	4 730

Si calientas un sólido hasta una temperatura suficiente, se fundirá y se convertirá en líquido, sólidos con estructura molecular de red cristalina<sup>2</sup> se funden a una determinada temperatura que es característica particular de cada uno de ellos, llamada punto de fusión, si calientas el líquido, este se evapora y se convertirá en gas, la ebullición es la formación de vapores en el interior del líquido en que se produce a una temperatura que es característica de la sustancia llamada punto de ebullición.

Otro fenómeno de cambio de fase con el que estamos familiarizados es con la **evaporación**. Si vertemos una cierta cantidad de agua en un vaso graduado, podemos notar y comprobar las cantidades que quedan de ella después de transcurridos varios días. Experimentalmente podemos comprobar que la rapidez de evaporación depende de la magnitud de la superficie así como del movimiento del aire (entre otros factores) y que con el aumento de la temperatura se acelera el proceso de evaporación.

Otra observación importante desde un punto de vista cualitativo es la disminución de la temperatura durante el proceso de evaporación, que se pone de manifiesto, por ejemplo

<sup>2</sup> En sólidos con estructura molecular amorfa es difícil precisar la temperatura a la cual el cuerpo cambia de fase.

cuando salimos de una alberca y nos "secamos" al aire o con la sensación refrigerante que experimenta el cuerpo humano durante la evaporación de la transpiración. Así pues, la evaporación es un proceso de enfriamiento que puede ser más ampliamente explicada en términos de la teoría cinética molecular que estudiaremos más adelante.

La tabla No.2 proporciona también los puntos de fusión y de ebullición de algunas sustancias sometidas a presión atmosférica normal. (Las temperaturas de fusión y ebullición dependen de la presión a la que se somete la sustancia).

A modo de ejemplo, analicemos detenidamente como deben estudiarse los cambios de fase que experimenta una sustancia a la que se le transfiere calor, describiendo los cambios de estado del  $H_2O$ . Es de gran ayuda enfocar la descripción del proceso mediante una gráfica de temperatura (variable dependiente) contra energía transferida en forma de calor (variable independiente) como se ilustra en la gráfica de la figura .

**Ejemplo No. 9**

Calcular la cantidad total de calor que debemos añadir a un trozo de hielo de 1 kilogramo a  $-50^\circ\text{C}$  y convertirlo todo en vapor a  $120^\circ\text{C}$ .

Datos:

Sustancia: Agua

Masa = 1 kg

$$T_i = -50^\circ\text{C} = 223\text{ K}$$

$$F_i = 120^\circ\text{C} = 393\text{ K}$$

$$c_{p\text{ hielo}} = 2\,093 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_{p\text{ agua}} = 4\,190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$c_{p\text{ vapor}} = 2\,009 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$P_f = 273\text{ K}$$

$$P_e = 373\text{ K}$$

$$L_f = 333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$L_e = 2\,256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

De la tabla de calores específicos.

Valores para el agua obtenidos de la tabla de calores latentes.

$$Q_1 = (1\text{ kg})\left(2\,093 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)(273\text{ K} - 223\text{ K}) \quad Q_1 = m c_{p\text{ hielo}} \Delta T_1$$

$$Q_2 = (1\text{ kg})\left(2\,093 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)(50\text{ K})$$

$$Q_2 = 104.65\text{ kJ}$$

$$Q_{LF} = \left(333 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)(1\text{ kg})$$

$$Q_{LF} = 333\text{ kJ}$$

$$Q_{LF} = L_f m$$

$$Q_2 = (1 \text{ kg}) \left( 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (373 \text{ K} - 273 \text{ K}) \quad Q_2 = m c_{p_{\text{agua}}} \Delta T_2$$

$$Q_2 = (1 \text{ kg}) \left( 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (100 \text{ K})$$

$$Q_2 = 419 \text{ kJ}$$

$$Q_{LV} = \left( 2256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) (1 \text{ kg}) \quad Q_{LV} = L_v m$$

$$Q_{LV} = 2256 \text{ kJ}$$

$$Q_3 = (1 \text{ kg}) \left( 2009 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (393 \text{ K} - 373 \text{ K}) \quad Q_3 = m c_{p_{\text{vapor}}} \Delta T_3$$

$$Q_3 = (1 \text{ kg}) \left( 2009 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (20 \text{ K})$$

$$Q_3 = 40.18 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{total}} = (104.65 + 333 + 419 + 2256 + 40.18) \text{ kJ} \quad Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_{LF} + Q_2 + Q_{LV} + Q_3$$

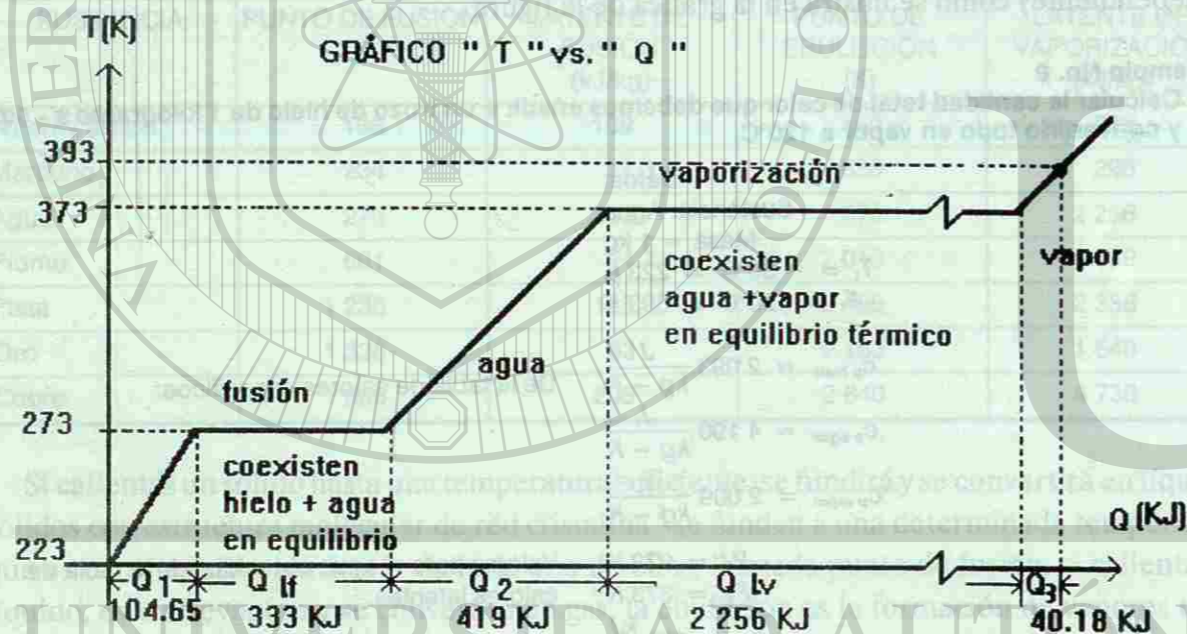


Fig. 3. Gráfica de Temperatura vs Calor transferido.

Observa en la gráfica de T "vs" Q que 104.65 kJ del calor total transferido. Se emplean para incrementar la temperatura del trazo de hielo de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $0^{\circ}\text{C}$  (Punto de fusión del hielo), 333 kJ se requieren para fundir el kilogramo de hielo, para incrementar la temperatura del agua de  $0^{\circ}\text{C}$  hasta  $100^{\circ}\text{C}$  (Punto de ebullición del agua) se transfieren 419 kJ., 2256 kJ se transfieren en el trabajo de vaporizar totalmente 1 kilogramo de agua y por último 40.18 kJ se transfieren al vapor para calentar de  $100^{\circ}\text{C}$  hasta  $120^{\circ}\text{C}$ .

La energía total transferida para llevar el sistema descrito de  $-50^{\circ}\text{C}$  hasta  $120^{\circ}\text{C}$  fué de 3,152.83 kJ.

Observa como el latente de vaporización es cerca de 9 veces el latente de fusión. Esto significa que se necesita mucha más energía para separar las moléculas al pasar de agua a vapor que el trabajo para romper las moléculas al pasar de hielo a agua. (Una característica singular

del agua, es que se expande al congelarse a diferencia de la mayoría de las sustancias y como consecuencia el hielo es menos denso que el agua. La mayoría de las sustancias en su fase sólida se hunden en su líquido, mientras que el hielo flota en el agua. (Cuidado con el agua presente en los sistemas de enfriamiento de los motores automotrices, durante el invierno. Al bajar la temperatura por debajo del punto de congelación la expansión de hielo puede romper el motor). Debes ser cuidadoso al calcular la cantidad de calor transferido a una sustancia con intervalos de temperatura que incluyen cambios de fase. Recuerda que se debe calcular el calor latente en cada cambio de fase.

Recíprocamente, para cambiar el estado de agregación de la sustancia de gas a líquido y luego de líquido a sólido es necesario que la sustancia ceda energía (Libere calor) al entorno, recuerda considerar el convenio de signos para el calor transferido. La temperatura a la cual un gas se condensa y se convierte en líquido es llamada punto de condensación. La temperatura a la cual un líquido se convierte en sólido se le llama punto de solidificación o de congelación. Un cambio de fase menos común ocurre cuando algunos sólidos como la Naftalina y el hielo seco cambian directamente de sólido a gas, el calor latente durante dicha transformación se llama latente de sublimación y se simboliza como  $L_s$ . En la gráfica, también podemos observar que las pendientes para el hielo, el agua y el vapor son diferentes, lo cual indica que los calores específicos de las diversas fases no son siempre iguales. Piensa un poco ¿Qué ocurre si colocamos un trozo de hielo a  $0^{\circ}\text{C}$  en un recipiente con agua también a  $0^{\circ}\text{C}$ ?

Respuesta: La cantidad de hielo permanece constante, es evidente que no puede haber intercambio de cantidades de calor en virtud de que ambos están en equilibrio térmico, Para la fusión del hielo se requiere de cierta cantidad de calor que debiera ser tomada de una sustancia de mayor temperatura y para su formación ceder calor a una sustancia de menor temperatura.

## TRANSFERENCIA DE CALOR

Hemos analizado el calor como una forma de energía en tránsito, que se transfiere de un cuerpo a otro en virtud de una diferencia de temperatura entre ellos, estudiaremos ahora los mecanismos mediante los cuales se transfiere el calor en la aproximación al equilibrio térmico entre dos o más objetos que están en contacto térmico. La aproximación al equilibrio térmico se realiza de tres formas: CONDUCCIÓN, CONVECCIÓN Y RADIACIÓN.

### CONDUCCIÓN

Si sostienes en tu mano un atizador metálico y mantienes el otro extremo en la lumbre, al cabo de un cierto tiempo notarás que está demasiado caliente como para seguirlo sosteniendo. Se ha transferido calor a lo largo de la longitud del atizador de metal desde el extremo expuesto

al fuego (Región de temperatura alta) hasta el extremo donde lo sostienes (Región de menor temperatura) y de ahí a tu mano por "CONDUCCIÓN". Podemos percatarnos que este mecanismo de transferencia de energía tiene un nombre apropiado si analizamos lo que ocurre durante el proceso descrito.

Los átomos del extremo caliente están vibrando con una amplitud grande en virtud de la alta temperatura en ese extremo, las interacciones con átomos adyacentes transfieren estas amplitudes a lo largo del material de átomo en átomo. (Imagínate el movimiento de una cadena de fichas de dominó, una detrás de otra cuando derribas la primera), además vibración forzada de los electrones "Libres" que transfieren energía al interactuar con átomos vecinos y con otros electrones " Libres " presentes en la barra metálica, contribuyen a que la energía se transfiera a lo largo del atizador metálico de una región de temperatura alta hacia tu mano.

¿Qué esperas que ocurra, si tomas ahora un atizador el doble o triple de largo, o si lo expones a la llama de un cerillo en lugar del fuego intenso del quemador de una estufa, o si cambias a un atizador de cobre o de algún otro material?

El mecanismo de conducción de calor fue descrito experimentalmente al analizar la razón de cambio de la cantidad de calor transferida por unidad de tiempo ( $H = Q/t$ ) para una placa de pared delgada, (ver fig. 4) después de repetir el experimento muchas veces para distintos espesores y áreas de la cara de la placa y de diversos materiales, pueden deducirse algunas observaciones generales que nos permiten dar respuesta a las interrogantes planteadas, extrapolando el experimento para una barra de longitud "L" y de área transversal "A".

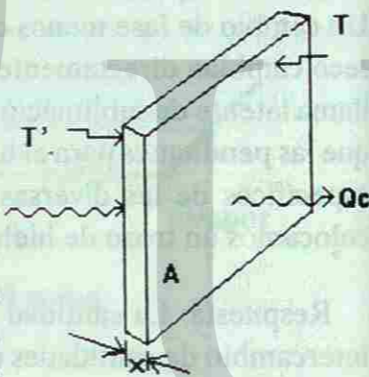


Fig. 4. Conducción.

La ley fundamental de la conducción de calor es el resultado de la generalización de estas observaciones:

1.-  $H \left( \frac{Q_c}{\Delta T} \right)$  es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas ( $\Delta T = t' - t$ )

entre las dos caras o extremos.  $H \propto \Delta T$

2.-  $H \left( \frac{Q_c}{\Delta T} \right)$  es directamente proporcional al área A de la placa o el área transversal de la barra.

$H \propto A$

3.-  $H \left( \frac{Q_c}{\Delta T} \right)$  es inversamente proporcional al espesor "x" de la placa o la longitud "l" de la barra.

$H \propto \frac{1}{x}$

De donde  $H = \frac{KA \Delta T}{x}$

"H" representa la rapidez con la cual se transfiere el calor, y la constante de proporcionalidad "K" es una propiedad del material llamada "conductividad térmica" que es una medida de la capacidad de conducir calor del material.

Si tenemos dos blocks de igual masa uno de ellos de madera [ $K = 0.12 \text{ J/m-s } ^\circ\text{C}$ ] y el otro de aluminio [ $K = 240 \text{ J/m-s } ^\circ\text{C}$ ] en equilibrio térmico a una cierta temperatura (digamos la temp. ambiental) al tomarlos uno en cada mano, nos daran impresiones de temperatura distinta esto se debe a que liberan (o absorben) distintas cantidades de energía durante un contacto térmico en virtud de su diferente conductividad térmica (temperatura aparente).

## CONVECCIÓN

En la aproximación al equilibrio térmico mediante un mecanismo de conducción la energía se desplaza, el material no (o casi no). Otra forma de transferir calor es que la sustancia se desplace, que exista un movimiento relativo real de un medio material que fluye para transferir la energía de una región a otra. Esto ocurre claramente cuando un fluido tal como el aire (o el agua) está en contacto térmico con un cuerpo caliente (con una temperatura muy superior a la de su entorno).

La temperatura del fluido que está en contacto con el objeto caliente aumenta y el fluido se dilata disminuyendo su densidad (entre otras consecuencias que afectan las magnitudes físicas que lo caracterizan), ésta porción del fluido por ser menos denso que el fluido frío circundante más alejado del objeto, se eleva a causa de las fuerzas de flotación (Principio de Arquímedes), entonces el fluido más frío circundante "cae" para tomar el lugar del fluido que se eleva, repitiéndose ciclicamente el proceso para establecer una circulación del fluido llamada corriente de convección. Podemos definir ahora:

*Convección mecanismo mediante el cual se transfiere calor por el movimiento real de un fluido dicho movimiento ocasionado por la diferencia de densidades entre distintas regiones del fluido.*

La convección es en realidad una aplicación del principio de Arquímedes que se estudió en el capítulo de mecánica de fluidos.

La convección atmosférica juega un papel muy importante en la determinación de los patrones climáticos globales y en las variaciones del estado del tiempo. Cuando escuchamos en las noticias al experto en meteorología anunciar la llegada de una onda cálida proveniente del golfo que afectará las condiciones atmosféricas de la cd. de Monterrey y su área metropolitana se refiere expresamente a un fenómeno de transporte de calor por corrientes de convección. En los océanos tienen lugar grandes transferencias de energía por este mecanismo.

**RADIACIÓN:**

Todos sabemos que el sol es una de nuestras fuentes naturales de calor (energía), pero ¿Cómo se transfiere la energía del sol hasta nosotros?. Es evidente que en el espacio vacío (o casi vacío) que separa nuestra atmósfera del sol, los mecanismos previamente estudiados de conducción y convección son imposibles, además prácticamente no se transfiere calor por conducción a través de la atmósfera (o se transfiere muy poco) en virtud de que el aire es uno de los peores conductores térmicos. Tampoco se transfiere por convección, pues ésta solo se inicia una vez que la tierra está caliente. La energía del sol es transportada hasta nosotros mediante ondas electromagnéticas que se transportan libremente incluso en el casi vacío del espacio intermedio entre la tierra y el sol, (las ondas electromagnéticas no requieren de un medio material para transportarse) mediante la "RADIACIÓN".

Todos los objetos emiten energía radiante en virtud de su temperatura, entre mayor sea su temperatura irradiará mayor energía al entorno. Durante la aproximación al equilibrio térmico de un objeto con su entorno, el objeto emite energía radiante al entorno, pero también absorbe energía emitida por el entorno, una vez que se ha alcanzado la temperatura de equilibrio térmico significa que la rapidez con la que el objeto emite calor por radiación es igual a la rapidez con la que lo absorbe del entorno manteniéndose la temperatura constante. La tierra tiene una temperatura promedio cercana a los 300 K, esto significa que : absorbe energía radiante del sol a una rapidez igual de la que lo irradia al espacio.

*La radiación es entonces, un mecanismo de transporte de calor mediante ondas electromagnéticas libres que se emiten en forma continua por un objeto en virtud de su temperatura.*

Experimentalmente se ha encontrado que "la razón de la energía radiante por unidad de tiempo ( $R = Q_r/t$ ) varía directamente con la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo caliente", es decir, si un objeto incrementa su temperatura absoluta al doble de su valor original, entonces la velocidad con la cual emite calor por radiación se incrementará en 16 veces. Para completar el análisis de este proceso debe de considerarse además el material de que está hecho el cuerpo caliente, su forma, color y la naturaleza de su superficie, todos estos factores hacen muy difícil la comprensión de la radiación térmica en términos de ideas físicas sencillas, más adelante en el capítulo de física moderna se analizará con más detalle la radiación térmica de un radiador ideal (radiador de cuerpo negro : aquel que absorbe toda la radiación que incide sobre el, y cuyo espectro de radiación térmica emitida solo depende de su temperatura y no de otros factores) cuyo estudio dió origen a la teoría de la cuantización de la energía. (Ley de la radiación de Plank).

**GAS IDEAL**

Cuando se estudió la dilatación de los sólidos y los líquidos, no se hizo ninguna mención de la influencia de la presión en tal fenómeno. Esto es comprensible, pues solamente grandes cambios de presión pueden influir considerablemente en las dimensiones de sólidos y líquidos. Así pues, en general, en los casos comunes esta influencia de la presión se puede despreciar.

Sin embargo, al estudiar el comportamiento de un gas, se halla que los cambios de presión pueden producir variaciones considerables en su volumen y en su temperatura. Al estudiar experimentalmente el comportamiento de una determinada masa de gas, se encontró que tal comportamiento podía expresarse mediante relaciones matemáticas sencillas entre su presión  $P$ , su volumen  $V$ , y su temperatura  $T$ . Una vez conocidos los valores de estas cantidades (masa, presión, volumen y temperatura), la situación en la cual se encuentra un gas, queda determinada; o en otras palabras, queda definido su estado. Al producir una variación en una de esas magnitudes, se observa que, en general, las demás también se modifican, y estos nuevos valores caracterizan otro estado del gas. Decimos así que el gas sufre una transformación al pasar de un estado a otro.

Las relaciones matemáticas que se encontraron experimentalmente al estudiar el comportamiento de los gases, son válidas sólo aproximadamente para los gases que se encuentran en la naturaleza y que se denominan gases reales ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ , aire, etc.). El gas que se comporta exactamente de acuerdo con tales relaciones se denomina gas ideal. Se observa que los gases reales sometidos a pequeñas presiones y altas temperaturas, se comportan como un gas ideal, y por lo tanto, en esas condiciones el estudio que se hará podrá ser utilizado para describir, con buena aproximación, el comportamiento de los gases reales.

Entre los primeros experimentos detallados sobre el comportamiento de los gases se cuentan los de Robert Boyle (1627- 1691). Boyle efectuó una serie de mediciones sobre "la elasticidad y el peso del aire" y encontró que una fórmula matemática sencilla podía expresar la relación entre la presión y el volumen de una cantidad fija de aire mantenida a temperatura constante. Esa relación, conocida como ley de Boyle, es

$$PV = n \times \text{constante} \quad (1) \quad \text{en donde } n \text{ es el número de moles, } V \text{ es el volumen ocupado por } n \text{ moles y } P \text{ es la presión ejercida por el gas contra las paredes del recipiente.}$$

La ecuación (1) afirma que a la misma temperatura y presión dos moles de aire ocuparán un volumen doble que 1 mol.

Después de algunos años del trabajo de Boyle se comprobó que la ecuación (1) se podía utilizar con cualquier gas bastante diluido (esto es a presiones bajas y a altas temperaturas) a una temperatura superior a la de su condensación y, además, que la constante de ésta ecuación era igual para todos los gases.

Este punto permaneció sin cambio aproximadamente durante un siglo. Entonces, a principios del siglo XIX, Jaques Charles (1746- 1832) y Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) descubrieron independientemente que el volumen de un gas mantenido a presión constante variaba linealmente con la temperatura, como se indica en la gráfica (ver lectura complementaria).

Aunque podemos usar distintos gases y comenzar con distintos volúmenes iniciales, una gráfica de volumen contra temperatura resultaría en una recta para cada uno, y para cada uno el cambio fraccionario en el volumen entre el punto de congelación y el punto de ebullición del agua sería el mismo,  $100/273.16$ . Por consiguiente, si se hiciera una gráfica para estos gases, mantenidos a presiones fijas, el volumen contra la temperatura en la escala Celsius, las rectas individuales intersectarían a la ordenada, en donde se originan distintos valores del volumen a  $0^\circ\text{C}$ , pero cada línea intersectaría la abscisa en el mismo punto, que es  $-273.16^\circ\text{C}$  ( $-273^\circ\text{C}$ ).

Este resultado implica que si un gas ideal se enfriara a  $-273^\circ\text{C}$ , su volumen disminuirá hasta cero, lo que sugiere que  $-273^\circ\text{C}$  podría ser la temperatura más baja alcanzable. Esta temperatura, que es el cero de una escala basada en el comportamiento de un gas ideal, también es el cero absoluto de la escala termodinámica, o escala Kelvin.

Después de esto tenemos dos relaciones que los gases obedecen, que son la ecuación (1) a temperatura constante, y

$$V = \text{constante} \times nT \quad (2)$$

a presión constante, en donde  $T$  es la temperatura absoluta en la escala Kelvin.

La Ley de Boyle y la Ley de Gay-Lussac se pueden combinar en una fórmula única,

$$PV = nRT \quad (3)$$

A la constante  $R$  se le conoce como la constante universal de los gases y tiene el valor, determinado experimentalmente, de

$$R = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

La ecuación (3) es la ecuación de estado de un gas ideal, o sea la ley del gas ideal. A veces se escribe como

$$PV = NkT \quad (4)$$

en donde  $N$  es número total de moléculas de gas en el volumen  $V$  y  $k = R/N_0$  ( $N_0$  es el número de Avogadro) se denomina constante de Boltzmann, y tiene el valor

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Una consecuencia práctica importante de la ley del gas ideal, que el estudiante recordará de la química elemental, es que a una temperatura y presión determinadas el volumen molar es igual para todos los gases ideales. Así, mientras estos gases se aproximen en su comportamiento a los gases ideales, 2 gramos de  $\text{H}_2$ , 20 gramos de  $\text{O}_2$ , 44 gramos de  $\text{CO}_2$  y 211 gramos de  $\text{Rn}$  ocupan cada uno de ellos 22.4 litros a  $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$  y 1 atm de presión, condiciones que generalmente se conocen como TPS, temperatura y presión estándar, o como condiciones normales.

## ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA CINÉTICO MOLECULAR

**Modelo Cinético de un Gas.** Las leyes que hemos estudiado hasta ahora y que describen el comportamiento de los gases, se obtuvieron en forma experimental. Ahora trataremos de relacionar estas leyes con el comportamiento de las partículas que constituyen el gas, es decir, sus átomos o sus moléculas.

Fue principalmente a partir del siglo pasado que los científicos intensificaron sus estudios acerca de la estructura molecular de los gases, basándose en las suposiciones siguientes:

- Un gas está constituido por partículas muy pequeñas: sus átomos o sus moléculas (se sabe ahora que la dimensión general de una molécula de gas es aproximadamente igual a  $10^{-8}$  centímetros).
- El número de moléculas existentes en determinada masa gaseosa es muy grande (como ya se sabe, en 1 mol de gas tenemos casi  $6 \times 10^{23}$  moléculas).
- La distancia media entre las moléculas es mucho mayor que las dimensiones de una molécula (recuérdese que cuando un líquido se evapora, ocupa un volumen muchas veces mayor).
- Las moléculas de un gas están en movimiento constante, y este movimiento es enteramente al azar; es decir, las moléculas se mueven en cualquier dirección, con velocidades que pueden tener valores desde cero hasta números muy grandes.

Al establecer estas hipótesis, los científicos estaban tratando de describir el comportamiento de un gas por medio del movimiento de sus moléculas, es decir, consideraban que las leyes de los gases se podrían obtener aplicando las leyes de la mecánica al movimiento de las moléculas, y tratándolas como si fuesen partículas. De esta manera, los científicos trataban de estructurar un modelo que sirviera para describir el comportamiento de un gas. Este modelo se denomina modelo cinético, en virtud de que se basa en el movimiento de las moléculas de una masa gaseosa.

Varias conclusiones obtenidas a partir de este modelo concordaban con las leyes experimentales ya conocidas, evidenciando así que los supuestos acerca de la constitución molecular de un gas, eran válidos. De este modo, fue posible usar el modelo para obtener nuevas informaciones acerca del comportamiento de los gases.

**Interpretación cinética de la presión.** Ya que el número de moléculas de un gas es muy grande y al estar en constante movimiento, éstas chocan continuamente contra las paredes del recipiente que contiene al gas ejerciendo presión sobre ellas. Como el número de choques es muy grande, el efecto del impacto de cada partícula es imperceptible. Lo que se observa es la frecuente sucesión de choques, que ocasiona la aparición de una fuerza continua, sin fluctuaciones, que actúa contra las paredes del recipiente. Por lo tanto, la presión que un gas ejerce sobre las paredes del recipiente que lo contiene, se debe a los incesantes y continuos choques de las moléculas del gas contra las paredes del recipiente.

Aplicando las leyes de la mecánica a los choques de las moléculas contra las paredes del recipiente, se obtuvo una expresión matemática que relaciona la presión ejercida por un gas, con las cantidades siguientes:

N: número total de moléculas en el recipiente.  
V: volumen del recipiente.  
m: masa de cada molécula.  
 $\bar{v}^2$ : promedio de los cuadrados de las velocidades de las moléculas.

La expresión obtenida fue la siguiente:

$$P = \frac{1}{3} \left( \frac{N}{V} \right) m \bar{v}^2 \quad (5)$$

Si analizamos esta expresión vemos que:

- 1)  $P \propto N$ . Este resultado es intuitivo, ya que cuanto mayor sea el número total de moléculas, tanto mayor será el número de choques contra las paredes, y por lo tanto, tanto mayor será la presión ejercida por el gas.
- 2)  $P \propto 1/V$ . En realidad, cuanto mayor sea el volumen del recipiente, tanto mayor será la distancia que tendrá que recorrer una molécula para chocar contra las paredes, y por consiguiente, más pequeño será el número de choques; es decir, la presión ejercida por el gas será menor.
- 3)  $P \propto m$ . Este resultado era de esperarse, ya que cuanto mayor sea la masa de una molécula, tanto mayor será su cantidad de movimiento, y así, más intensa será la fuerza que ejerce al chocar contra la pared del recipiente.

4)  $P \propto \bar{v}^2$  En realidad, cuanto mayor sea, más rápidamente se estarán moviendo las moléculas. Es fácil observar que en estas condiciones, la fuerza que ejerce cada molécula al chocar contra la pared será mayor, y además, también será más grande el número de choques.

**Interpretación cinética de la temperatura.** Al estudiar la temperatura de un cuerpo se mencionó que se relaciona con la energía de agitación de los átomos y moléculas del mismo. Ahora vamos a demostrar cómo en el siglo pasado se llegó a esta conclusión, basándose en el modelo cinético de un gas.

La expresión, que se había obtenido con base en el modelo cinético, se puede escribir

$$PV = \frac{1}{3} Nm \bar{v}^2 \quad (6)$$

Comparándola con la ecuación de estado de un gas ideal,  $PV = NkT$ , que se había obtenido experimentalmente, se concluye que

$$\frac{1}{3} Nm \bar{v}^2 = NkT \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT \quad (8)$$

realizando operaciones y dividiendo entre 2 ambos miembros de esta igualdad se tiene

$$E_c = \frac{3}{2} kT \quad (9)$$

Observemos que el primer miembro de esta expresión representa la energía cinética media de las moléculas (suma de las energías cinéticas de las mismas, dividida entre el número de ellas). De esta manera, llegamos a la expresión

que indica que la energía cinética media de las moléculas de un gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta, o sea, cuanto mayor sea la energía cinética media de las moléculas, tanto mayor será la temperatura del gas. Este resultado relaciona la teoría cinética con la ecuación de estado de un gas ideal. De manera equivalente, podemos considerar a la ecuación (8) como una conexión entre una propiedad macroscópica, la temperatura, y una propiedad microscópica, la energía cinética de una molécula.

En los años 60's del siglo XIX James Clerck Maxwell partió del supuesto de que las moléculas que componían los gases tenían movimiento aleatorio y mediante agudos análisis matemáticos demostró que el movimiento aleatorio proporcionaba una explicación del comportamiento de los gases.

Además mostró como las partículas de gas moviéndose al azar al chocar con las paredes del recipiente, producían pequeños esfuerzos microscópicos que al unirse se manifiestan como una presión sobre las paredes del mismo.

Y esta presión aumentaba al comprimirse el gas debido a que las interacciones aumentaban por unidad de área al incrementarse la densidad y al dejar que se expandiera ocurre lo contrario.

Por otro lado al aumentar la temperatura del gas, las moléculas se mueven más rápido, ejerciendo una mayor interacción en los choques sobre las paredes del recipiente, traduciéndose en un incremento de presión y al disminuir la temperatura las moléculas se mueven más lento, ocasionando una disminución en la presión.

Maxwell halló una ecuación que encontraba toda una gama de velocidades que deberían tener las moléculas gaseosas a una temperatura dada. Algunas se movían más rápido y otras lento pero la mayoría tendrían una velocidad intermedia. Es decir, de entre todas las velocidades de las moléculas había una que era máximamente probable a una temperatura específica, se dió cuenta que al variar la temperatura variaba esta velocidad más probable en la misma proporción, lo anterior es aplicable tanto a sólidos como líquidos y gases ya que en los sólidos y en los líquidos la velocidad de las moléculas se comportaban como marca la ecuación de Maxwell.

Concluyendo, "La temperatura se puede interpretar como una medida de la energía cinética media de las moléculas.

La transferencia de calor tiene una explicación según la Teoría Cinética y esta ocurre como el resultado del movimiento de las moléculas. Al poner en contacto un cuerpo caliente con uno frío, las moléculas del cuerpo caliente con movimiento más rápido chocaban con las del objeto frío que se movían más lentamente, como consecuencia de ello, las moléculas rápidas perdían velocidad y las lentas se aceleraban, con lo cual fluía calor del cuerpo caliente al frío.

## TERMODINÁMICA

El estudio del calor y su transformación en energía mecánica se denomina termodinámica (término que proviene del griego y significa "movimiento de calor"). La ciencia de la termodinámica fue desarrollada a principios del siglo pasado, antes de que se comprendiera la teoría atómica y molecular de la materia. Mientras que en los puntos anteriores el calor se describió en términos del comportamiento microscópico de átomos y moléculas agitados, en este punto se hace referencia sólo a nociones macroscópicas - tales como trabajo mecánico, presión y temperatura - y a sus funciones en transformaciones de energía. La termodinámica es una ciencia teórica muy poderosa que pasa por alto los detalles moleculares del sistema en

conjunto. Su fundamento es la conservación de la energía, y el hecho de que el calor fluye de lo caliente a lo frío y no en sentido contrario.

En la termodinámica, lo que más se analiza es el comportamiento de una muestra de materia llamada sistema. Un sistema (termodinámico u otro) es una cantidad definida de materia encerrada entre límites, reales o imaginarios. Un sistema puede ser abierto o cerrado. Un sistema abierto es uno en el que la masa puede ser transferida hacia adentro o expulsada hacia afuera. Un sistema cerrado es uno en el que no puede haber transferencia de masa a través de los límites, es decir, un sistema con masa constante. Un sistema típico puede ser las moléculas en un recipiente lleno de gas o en una solución, o incluso un sistema más complejo, como las moléculas de una liga elástica. Es necesario especificar muy bien este sistema para que el análisis termodinámico tenga sentido; sólo así se podrá describirlo sin ambigüedades.

Para describir un sistema se usan cantidades aplicables ya sea al sistema global o a una porción bien definida del mismo. Las cantidades medibles típicas de un sistema son la presión, la temperatura y el volumen. En la termodinámica se usan también cantidades como la energía interna, el calor, el trabajo y una cantidad que se llama entropía que aquí no alcanzaremos a estudiar. Estas cantidades pueden cambiar al variar la condición del sistema. Es importante saber cuáles son las cantidades responsables de representar la condición exacta del sistema.

Cuando un recipiente con  $n$  moles de un gas ideal llega al equilibrio, el gas tiene temperatura, presión y volumen definidos. Si se conocen dos de las tres cantidades,  $T$ ,  $P$  y  $V$ , es posible calcular la tercera con base en la ley de los gases ideales y por consiguiente también se conoce. Esta situación, en la cual el gas (el sistema) tiene valores específicos de  $T$ ,  $P$  y  $V$ , se denomina estado termodinámico del sistema y su estado será el mismo cada vez que el gas regrese a los mismos valores de  $T$ ,  $P$  y  $V$ . Aunque es probable que las moléculas individuales del sistema estén haciendo algo distinto cuando el sistema llega a un estado, el sistema en conjunto tiene las mismas propiedades desde el punto de vista macroscópico.

Puesto de otra manera, ciertas propiedades medibles de un sistema siempre serán las mismas cuando el sistema esté en un estado termodinámico determinado. Las variables que describen estas propiedades se conocen como variables de estado. Por ejemplo,  $P$ ,  $V$  y  $T$  son las variables de estado de un sistema que consiste en un gas. Sin importar cómo llegue el gas a un estado de equilibrio, dicho estado se caracteriza por los mismos valores de estas variables de estado.

Otra cantidad importante que se usa para caracterizar un sistema es su energía interna:

*La energía interna ( $U$ ) de un sistema es la suma de todas las energías cinéticas y potenciales que poseen sus átomos o moléculas.*



Sabemos que hay una cantidad enorme de energía encerrada en todos los materiales; este folleto por ejemplo. Las páginas de este folleto se componen de moléculas que están en movimiento constante. Tienen energía cinética. Debido a interacciones con moléculas cercanas, también tienen energías potenciales. Las páginas pueden quemarse con facilidad, por lo que se sabe que almacenan energía química, la cual es en realidad energía potencial eléctrica a nivel molecular. Se sabe que hay enormes cantidades de energía asociada con los núcleos atómicos. La energía dentro de una sustancia se encuentra en estas y otras formas, las cuales cuando se consideran juntas, se denomina energía interna. La energía interna, aun en la sustancia más simple, puede ser muy compleja. Pero en este estudio de cambios de calor y flujo de calor, sólo vamos a tratar los cambios en la energía interna de una sustancia. Los cambios en temperatura indicarán cambios en energía interna.

La energía interna es un ejemplo de una propiedad física llamada función de estado, y es una propiedad física que puede definirse por completo en términos de las variables de estado. De este enunciado se desprende que el valor de una función de estado, como la energía interna, no depende de los procesos con los cuales un sistema llegó a un estado en particular.

A diferencia de la energía interna, el calor y el trabajo no son funciones de estado porque las cantidades de calor añadido o trabajo aplicado a un sistema para cambiar su estado en cierta cantidad sí dependen del proceso empleado. Por ejemplo, no tiene sentido preguntar cuánto calor contiene un sistema, pues los sistemas no "contienen" calor ni trabajo. Estos conceptos representan procesos de transferencia de energía de o hacia el sistema. El calor representa una transferencia de energía térmica que puede cambiar la energía interna del sistema. Sin embargo, esta transferencia es sólo una forma de cambiar la energía interna; el trabajo mecánico aplicado al sistema, como la fricción o la compresión, sería otra.

## PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Las primeras personas que trabajaron en el campo de la termodinámica desarrollaron la idea de que la energía se conserva. Se convencieron de que el calor es una forma de energía y por ello debe tenerse en cuenta al considerar las ganancias y pérdidas de energía. De esta manera llegaron a una relación fundamental entre el calor, el trabajo y la energía interna. Veamos cuál es esta relación.

Un sistema en un estado determinado tiene cierta cantidad de energía interna. Veamos que le sucede al sistema cuando fluye a él cierta cantidad de calor. Esta energía adicional puede usarse de dos maneras: 1) puede ocasionar un aumento en la energía interna del sistema o 2) puede suministrar al sistema la energía que requiere para realizar un trabajo  $W$  sobre su entorno. Por ejemplo, nuestro sistema puede ser el gas en el cilindro de la figura 1. La adición de calor a este sistema puede ocasionar dos cambios 1) elevar la temperatura del gas y por lo

tanto incrementar su energía interna y 2) hacer que el gas se expanda levantando el pistón y permitiendo que el gas realice trabajo sobre el pistón.

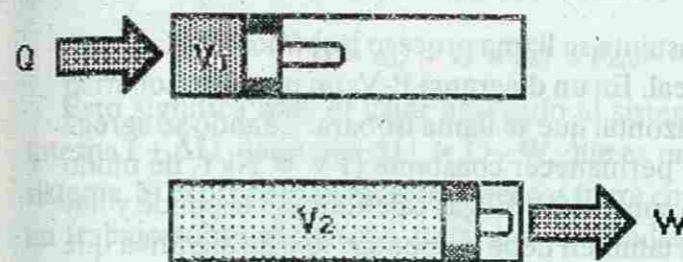


Fig. 5.

Al añadir calor al gas del recipiente, el gas puede ganar energía interna y realizar trabajo al expandir su volumen contra la fuerza externa que ejerce el pistón.

Si examinamos cualquier otro sistema, veremos que la adición de calor al sistema produce una situación similar. Concluimos entonces que, para un sistema,

$$\left( \begin{array}{c} \text{Calor añadido} \\ \text{al sistema} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{aumento de la energía} \\ \text{interna de l sistema} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{trabajo externo} \\ \text{realizado por sistema} \end{array} \right)$$

Este enunciado se conoce como primera ley de la Termodinámica. En forma de ecuación,

$$Q = \Delta U + W \quad (10)$$

Observemos que la primera ley de la Termodinámica es un enunciado de la ley de la conservación de la energía que incluye la energía interna.

Hay que tener cuidado con los signos al usar la primera ley de la Termodinámica. La cantidad  $Q$  siempre es el calor que fluye al sistema;  $Q$  será negativa si fluye calor del sistema. La cantidad  $\Delta U$  es el incremento en la energía interna del sistema y  $W$  es el trabajo efectuado por el sistema. Si el gas de la figura 1 levanta el pistón, el gas efectúa un trabajo externo y  $W$  es positivo. Si el pistón es empujado hacia abajo por una fuerza externa,  $W$  será negativo porque el gas realiza un trabajo negativo. Para comprender esta última afirmación, recordemos que trabajo = fuerza  $\times$  desplazamiento  $\times$   $\cos \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre el vector de fuerza y el vector de desplazamiento. En la figura 5, la fuerza hacia la derecha que el gas ejerce sobre el pistón es igual a  $F$  (si suponemos que el pistón se empuja con velocidad constante). Cuando el pistón se desplaza una distancia  $\Delta x$ , el trabajo realizado por el gas es

$$W = F \Delta x \cos 180^\circ = -F \Delta x$$

por lo tanto, al comprimir un gas, el trabajo que realiza es negativo.

Ya vimos que el calor y el trabajo dependen de la forma en que cambia el estado del gas. Para usar la primera ley de la termodinámica es necesario investigar la manera de calcular  $Q$  y  $W$  para diversos procesos.

La primera ley se puede aplicar a varios procesos para un sistema cerrado de un gas ideal en el que una de las variables termodinámicas se conserva constante. Estos procesos tienen nombres que empiezan con *iso* (del griego *isos*, que significa "igual").

**Proceso isobárico.** Un proceso a presión constante se llama proceso isobárico. En la figura 6, se ilustra un proceso isobárico para un gas ideal. En un diagrama P-V, un proceso isobárico sigue una trayectoria a lo largo de una línea horizontal que se llama isobara. Cuando se agrega calor al gas en el cilindro, la relación  $V/T$  debe permanecer constante ( $PV = NkT$ , de modo que  $V/T = Nk/P =$  una constante cuando  $P$  es constante). El gas calentado se expande y hay un incremento en su volumen. La temperatura también debe aumentar, lo cual significa que la energía interna del gas se incrementa. (Recordemos que la teoría cinética dice que la energía interna de un gas es directamente proporcional a su temperatura absoluta).

El trabajo es hecho por el gas al expandirse, mover el pistón, y

$$W = F \Delta x$$

En términos de la presión ( $P = \frac{F}{A}$ ), la fuerza se puede escribir  $F = PA$ , en donde  $A$  es el área del pistón. Entonces,

$$W = PA\Delta x$$

Pero  $A\Delta x$  es simplemente el cambio en el volumen del gas,  $A\Delta x = \Delta V = V_2 - V_1$ . Así,

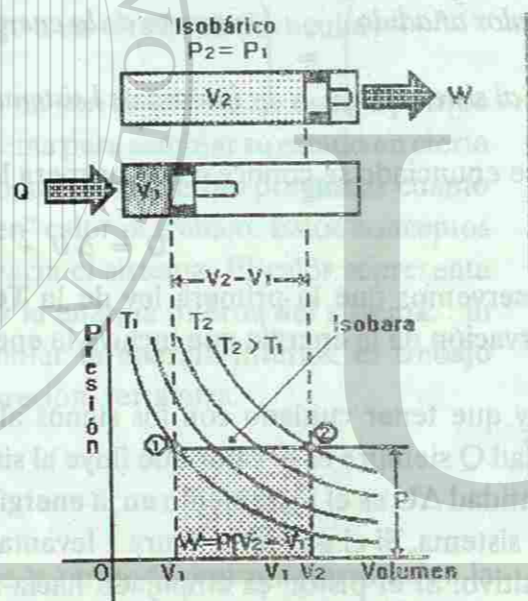
$$W = P\Delta V = P(V_2 - V_1) \quad (P = \text{cte.}) \quad (11)$$

En la figura 6, podemos ver que  $P\Delta V$  es el área bajo la isobara en el diagrama de P-V. Para un proceso no isobárico (uno en el cual la presión no cambia), el trabajo también es igual al área bajo la línea que muestra la trayectoria del proceso. De esta forma, el trabajo depende de la trayectoria del proceso, así como de los estados inicial y final (habrá diferentes áreas bajo diferentes trayectorias).

Por otro lado, dado que la energía interna de una cantidad de un gas ideal depende sólo de su temperatura (absoluta), un cambio en su energía interna es independiente de la trayectoria del proceso, y depende sólo de los estados inicial y final, o de la temperatura de estos estados ( $\Delta U = U_2 - U_1 \propto T_2 - T_1$ ).

Fig. 6.

Proceso isobárico (Presión constante). El valor agregado al gas pasa a la energía interna que se incrementa y va a realizar un trabajo (el gas en expansión mueve al pistón):  $Q = W + \Delta U$ . El trabajo es igual al área bajo la trayectoria del proceso (Aquí del estado 1 al estado 2) sobre el diagrama P-V.



Como  $V_2$  es mayor que  $V_1$  para un gas en expansión, el trabajo es realizado por el sistema ( $+W$ ). En términos de la primera ley, entonces

$$Q = \Delta U + W = \Delta U + P\Delta V \quad (12)$$

Esto significa que, el calor agregado al sistema se dirige tanto a incrementar la energía interna ( $+\Delta U$ , dado que  $\Delta U = Q - W$ , que es mayor que cero) como al trabajo hecho por el sistema. Si el proceso se invirtiera y el gas fuera comprimido por una fuerza externa que realiza un trabajo sobre el sistema, todas las cantidades serían negativas. El calor saldría fuera del sistema ( $-Q$ ) y la energía interna, o la temperatura del gas decrecería ( $-\Delta U$ ).

**Proceso isocórico.** Un proceso isocórico es un proceso con volumen constante, de ahí que también se le denomine isovolumétrico. Como se ilustra en la figura 7, la trayectoria del proceso en un diagrama P-V sigue una línea vertical llamada comúnmente isocora.

No se realiza trabajo alguno ( $W = P\Delta V = 0$ , dado que  $\Delta V = 0$ ) de modo que todo el calor agregado se dirige a incrementar la energía interna y, por consiguiente, la temperatura del gas. De acuerdo con la primera ley,

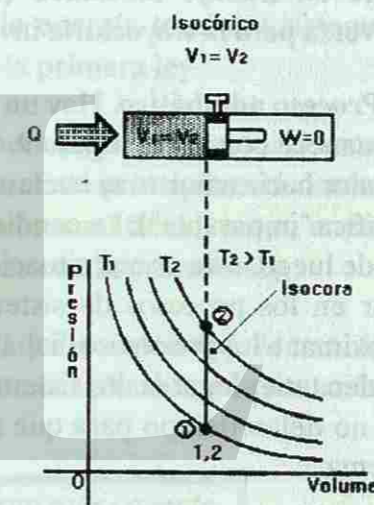
$$Q = \Delta U + W = \Delta U + 0$$

y

$$Q = \Delta U \quad (V = \text{cte.}) \quad (13)$$

Fig. 7.

Proceso Isocórico. (Isovolumétrico, volumen constante). Todo el calor agregado al gas va a incrementar la energía interna cuando el volumen se mantiene constante:  $A = \Delta U$ . Esto causa un incremento en la temperatura.



**Proceso isotérmico.** Un proceso isotérmico es un proceso con temperatura constante. Como se ilustra en la figura 8. En este caso, la trayectoria del proceso sigue una isoterma, o una línea de temperatura constante. Dado que  $P = (NkT)/V = (\text{constante})/V$  para un proceso isotérmico, una isoterma es una hipérbola en un diagrama P-V (la forma general de la ecuación de la hipérbola es  $y = a/x$ ).

Al ir del estado 1 al estado 2 en la figura 8, se agrega calor al sistema y tanto la presión como el volumen cambian a fin de conservar constante la temperatura (la presión decrece y el volumen se incrementa). El trabajo realizado por el sistema en expansión ( $+W$ ) es de nuevo igual al área bajo la trayectoria del proceso.

Para un proceso isotérmico, la energía interna del gas ideal permanece constante ( $\Delta U = 0$ ), dado que la temperatura es constante. De acuerdo con la primera ley,

$$Q = \Delta U + W = 0 + W$$

y

$$Q = W \quad (T = \text{cte.}) \quad (14)$$

Así, para un gas ideal, un proceso isotérmico es uno en el cual la energía calorífica se convierte en trabajo mecánico (o viceversa para la trayectoria inversa).

**Proceso adiabático.** Hay un tipo más de proceso en el cual una condición termodinámica permanece constante, figura 9. Un proceso adiabático es uno en el cual no hay transferencia de calor hacia adentro ni hacia afuera del sistema; es decir,  $Q = 0$  (la palabra griega *adiabatos* significa "impasable"). La condición  $Q = 0$  es satisfecha por un sistema aislado térmicamente. Desde luego, ésta es una situación ideal o teórica, dado que siempre hay una transferencia de calor en los procesos de sistemas reales. Bajo las condiciones reales, sólo nos podemos aproximar a los procesos adiabáticos. Por ejemplo, los procesos aproximadamente adiabáticos pueden tener lugar en los sistemas que no estén térmicamente aislados, se efectúan tan rápido que no dejan tiempo para que se transfiera mucha energía hacia adentro o hacia afuera del sistema.

A medida que el sistema sigue la trayectoria del proceso, una curva que se llama *adiabática*, las tres coordenadas termodinámicas cambian. Por ejemplo, supongamos una cantidad de gas ideal que se comprime en un cilindro de pistón aislado térmicamente. Si el pistón se libera súbitamente, el gas se podría expandir (es decir, podrían cambiar  $P$  y  $V$ ). Se realizaría un trabajo a expensas de la energía interna del gas, de modo que su temperatura cambiaría. De acuerdo con la primera ley,

Fig. 8.

Proceso Isotérmico (Temperatura constante). Todo el calor que se agrega al gas pasa hacia adentro como trabajo (el gas en expansión mueve el pistón):  $Q = W$ . El trabajo es igual al área bajo la trayectoria del proceso en el diagrama  $P$ - $V$ .

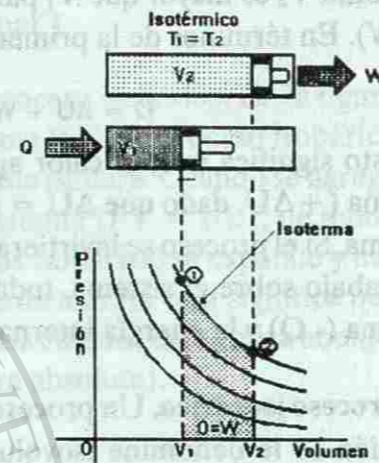
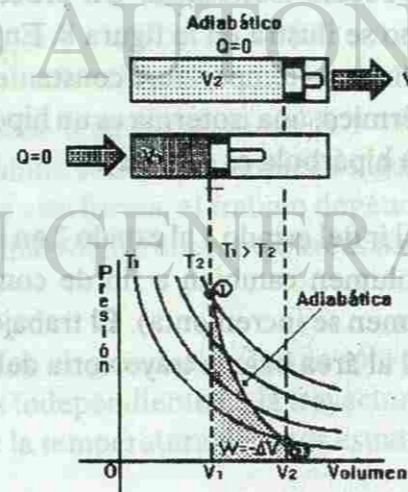


Fig. 9.

Proceso adiabático (no hay transferencia de calor). En un proceso adiabático no se agrega ni se extrae calor del sistema:  $Q = 0$ . El trabajo se hace a expensas de la energía interna:  $W = -\Delta U$ . La presión, el volumen y la temperatura cambian en el proceso.



$$Q = 0 = \Delta U + W$$

$$W = -\Delta U \quad (\text{expansión adiabática}) \quad (15)$$

Así, en una expansión adiabática, el trabajo (área bajo la trayectoria del proceso) es realizado por el sistema, con un decrecimiento correspondiente en su energía interna. El decrecimiento en la energía interna es evidenciada por una disminución en la temperatura al pasar del estado 1 al estado 2.

## LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

Supongamos que un trozo de metal calentado se coloca en un recipiente aislado y con agua fría. El calor será transferido del metal al agua y los dos llegarán a un equilibrio térmico a alguna temperatura intermedia. Para un sistema térmicamente aislado, la energía total permanece constante, de acuerdo con la primera ley de la termodinámica. ¿Podría haber un proceso inverso en el cual el calor fuera transferido del agua fría al metal caliente? Sabemos que esto no podría pasar en forma natural. Pero si así fuera, la energía total del sistema permanecería constante y la transferencia de energía no violaría la primera ley.

Es claro que, debe haber otro principio no expresado en la primera ley de la termodinámica, que especifica la dirección en la cual puede efectuarse un proceso. Este principio está dentro de la segunda ley de la termodinámica, que dice que ciertos procesos no tienen lugar, o que hasta ahora nunca se han observado, aun cuando sean consistentes con la primera ley.

Existen muchas definiciones equivalentes de la segunda ley, que pueden expresarse de formas diferentes de acuerdo con su aplicación. Una de éstas, que es aplicable a la situación anterior, es

**El calor no fluye espontáneamente de un cuerpo frío a un cuerpo más caliente.**

Otra definición común de la segunda ley es ésta:

**La energía calorífica no puede ser transformada completamente en trabajo mecánico o viceversa.**

Esta definición se aplica a las máquinas de calor que se explicarán más adelante.

En general, la segunda ley se aplica a todas las formas de energía. Se considera que es cierta porque nunca se ha encontrado una excepción a ella (al menos en la forma de esta definición). Si no fuera válida, se podría construir una máquina de movimiento perpetuo. Tal máquina podría transformar completamente el calor de un depósito en trabajo y movimiento (energía mecánica) sin pérdida de energía. La energía mecánica se podría transformar de nuevo en

calor y utilizarse para volver a calentar el depósito (de nuevo sin pérdida). Dado que el proceso se podría repetir indefinidamente, la máquina podría funcionar en forma perpetua. Toda la energía sería eficaz, por lo que no estaría violando la primera ley. Sin embargo, es obvio que las máquinas verdaderas siempre tienen una eficiencia menor que el 100%, o sea que el trabajo producido siempre es menor que la energía consumida. Otra definición de la segunda ley es, por lo tanto:

**Es imposible construir una máquina de operación de movimiento perpetuo.**

Se han hecho muchos intentos para construir máquinas de movimiento perpetuo, pero no se ha tenido ningún éxito.

Es conveniente tener alguna forma de expresar la dirección de un proceso en términos de las propiedades termodinámicas de un sistema. Una propiedad tal es la temperatura. Al analizar un proceso conductivo de transferencia de calor, necesitamos conocer las temperaturas del sistema y el ambiente que lo rodea. El conocimiento de la diferencia de temperaturas nos permite establecer la dirección en la cual la transferencia de calor se efectuará espontáneamente hacia adentro o hacia afuera (indicada por  $+Q$  o  $-Q$ , respectivamente).

## MÁQUINAS DE CALOR.

El desarrollo de la termodinámica comenzó en la época de la Revolución Industrial. Fue entonces cuando la invención de la máquina de vapor inició un cambio monumental en nuestra civilización. Las primeras máquinas de vapor eran dispositivos primitivos que operaban con poca eficiencia, así que los científicos de la época fueron convocados para examinar las leyes físicas que regían a estas máquinas. Este llamado fue lo que impulsó las primeras actividades en el campo de la termodinámica y los resultados de estas investigaciones tuvieron consecuencias perdurables que aún influyen en las ciencias físicas y biológicas.

Una máquina de vapor es un ejemplo de una máquina térmica, definida como cualquier dispositivo que convierte energía térmica en energía mecánica. La máquina de vapor se ajusta a esta descripción, lo mismo que el motor de gasolina, que emplea la energía térmica generada por la combustión de la gasolina. Otras máquinas más exóticas, que emplean el calor del Sol o de reactores nucleares, también son máquinas de calor. Veamos ahora las leyes que obedecen estas máquinas.

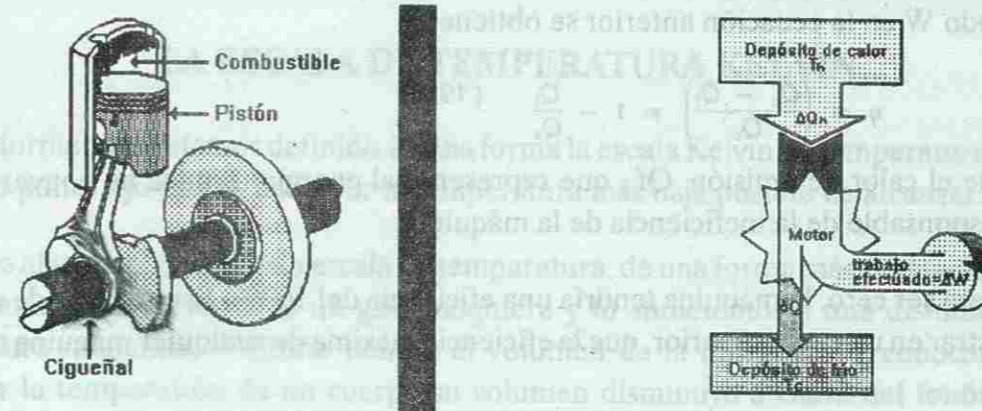


Fig. 10.

En una máquina térmica, la energía de entrada  $Q_c$  debe ser igual a la suma de la energía de emisión  $Q_f$  y el trabajo de salida  $W$ .

En la figura 10a se representa el diagrama de una sencilla máquina térmica. El combustible al quemarse crea gas a alta presión que empuja el pistón hacia abajo. Este movimiento lineal cambia a rotacional por medio del cigüeñal y la máquina repite el ciclo de movimiento una y otra vez. Por supuesto, no se ilustran varios detalles, como las válvulas y las bujías. Sin embargo, la característica esencial es que la energía térmica se convierte en energía mecánica.

En la figura 10b aparece una representación más general de una máquina térmica. El calor  $Q_c$  fluye de un depósito de alta temperatura (caliente) a la máquina; ésta es la energía de entrada para la máquina. Una parte de la energía de entrada se aplica a la realización de trabajo y el resto,  $Q_f$ , es el calor de emisión, fluye a un depósito de baja temperatura (frío). El depósito de baja temperatura por lo general no es más que la atmósfera, como en el caso de un automóvil que emite por el tubo de escape el combustible usado.

La máquina debe obedecer a la ley de la conservación de la energía; entonces, la primera ley de la termodinámica aplicada a la máquina es, para un ciclo de movimiento,

$$Q_{\text{neto}} = Q_c - Q_f = W + \Delta U \quad (16)$$

donde  $W$  es el trabajo de salida de la máquina en un ciclo. Sin embargo, cada vez que la máquina pasa por un ciclo termodinámico no hay ningún cambio neto en su energía interna. Entonces,  $\Delta U = 0$  para un ciclo completo y la ecuación anterior se convierte en

$$W = Q_c - Q_f \quad (17)$$

Usaremos esta relación para calcular la eficiencia de la máquina. Como sucede con cualquier máquina, la eficiencia ( $\eta$ ) se define como la relación entre el trabajo de salida y la energía de entrada. En este caso,

$$\eta = \frac{W}{Q_c} \quad (18)$$

Sustituyendo  $W$  en la ecuación anterior se obtiene

$$\eta = \left( \frac{Q_c - Q_f}{Q_c} \right) = 1 - \frac{Q_f}{Q_c} \quad (19)$$

Vemos que el calor de emisión,  $Q_f$ , que representa al energía térmica no convertida en trabajo, es responsable de la ineficiencia de la máquina.

Si  $Q_f$  pudiera ser cero, la máquina tendría una eficiencia del 100%. Esto no sucede así, y se puede demostrar en un curso superior, que la eficiencia máxima de cualquier máquina térmica es,

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (20)$$

De esta manera llegamos a un resultado sorprendente: incluso la máquina mejor diseñada tiene una eficiencia límite, restringida por los extremos de la temperatura de operación. En la ecuación (20) se observa que la eficiencia límite puede aumentarse obteniendo  $Q_c$  de una temperatura muy alta o emitiendo  $Q_f$  a una temperatura muy baja. Notemos que la única forma en que una máquina pudiera operar al 100% de eficiencia sería emitiendo  $Q_f$  a 0 K, convirtiendo todo el calor de entrada en trabajo. Puesto que incluso el espacio vacío del Universo tiene una temperatura de aproximadamente 3 K, esta máquina es algo imposible. Este resultado es una consecuencia directa de la segunda ley de la termodinámica y con frecuencia se presenta como un enunciado alternativo de esta ley:

*Un dispositivo que convierte el 100% del calor de entrada en trabajo mecánico es una imposibilidad física.*

## LECTURA COMPLEMENTARIA

### LA ESCALA DE TEMPERATURA KELVIN

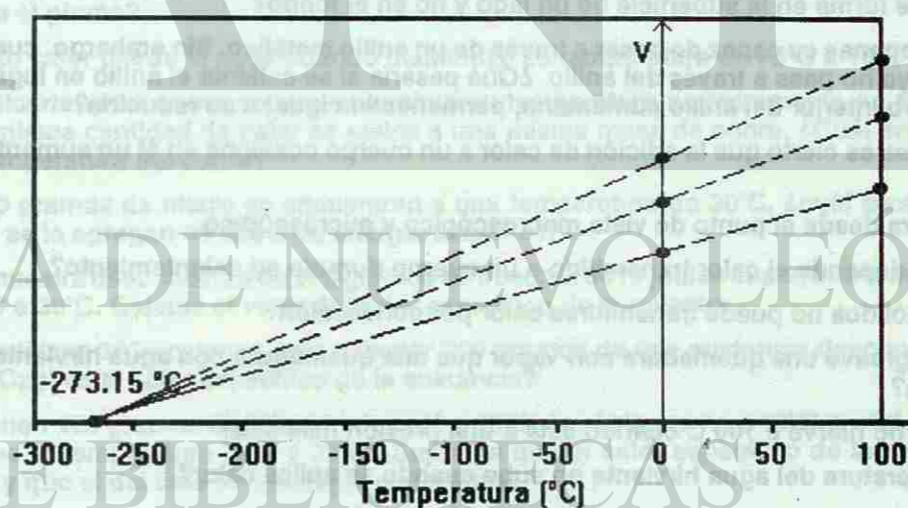
Anteriormente habíamos definido de una forma la escala Kelvin de temperatura, partiendo de que su punto fijo estaba dado por la temperatura más baja posible de alcanzar.

Vamos ahora a redefinir esta escala de temperatura, de una forma más exacta. Supongamos que tomamos una muestra de un gas cualquiera y lo sometemos a una disminución de la temperatura midiendo al mismo tiempo el volumen de la muestra. Ya conocemos que al disminuir la temperatura de un cuerpo su volumen disminuye a causa del fenómeno de la contracción térmica. Por lo tanto, el volumen de la muestra de gas irá disminuyendo con la disminución de la temperatura. El gráfico del volumen en función de la temperatura será una línea recta.

Si tomamos una muestra de un gas diferente y lo sometemos al mismo proceso, también disminuye su volumen, pero lo hace siguiendo una recta diferente, ya que conocemos que el coeficiente de dilatación volumétrica depende de la sustancia de que se trate.

En la figura se muestra el gráfico de volumen en función de la temperatura para tres muestras de gases diferentes. Cada recta mostrada representa un gas en cuestión.

GRAFICO DE VOLUMEN DEL GAS vs. TEMPERATURA



Una característica importante que podemos observar, en el gráfico, es que si las rectas, para diferentes gases se extrapolan a valores negativos de temperatura, todas tienden a un punto de temperatura común igual a  $-273.15^{\circ}\text{C}$ , para lo cual parecería como si todos los gases tuvieran un volumen igual a cero! Esto, por supuesto, no es así, en la realidad, pues el gas se convierte

en líquido e incluso a sólido antes de llegar a esa temperatura, pero las gráficas muestran este comportamiento para todos los gases.

Precisamente esta temperatura fué la escogida como punto fijo de la escala Kelvin y se le asignó un valor de cero (0 K). El intervalo unitario de la escala Kelvin fué tomado igual al de la escala Celsius y por ello el punto de congelamiento del agua (0°C) quedó en la escala Kelvin, igual a 273.15 K.

El hecho de que todos los gases tengan propiedades similares, para muy bajas temperaturas y volúmenes esta relacionado con un modelo del comportamiento de los gases, llamado "Gas Ideal".

Ahora ya tenemos una idea más exacta de la definición de la escala Kelvin de temperaturas, también llamada "Escala Absoluta o Escala de Temperatura Absoluta".

## PREGUNTAS

- 1.- ¿Cómo se consideraba el calor en el siglo XVIII?
- 2.- ¿Cuál era la idea de Benjamin Thompson con respecto al calor?
- 3.- Indica la diferencia que existe entre calor y temperatura.
- 4.- Indica la diferencia entre calor y energía interna.
- 5.- ¿Qué se calienta más rápido cuando se aplica calor, el hierro o la plata?
- 6.- ¿Una sustancia que se calienta más rápido tiene un alto o un bajo calor específico?
- 7.- ¿Por qué el hielo se forma en la superficie de un lago y no en el fondo?
- 8.- Una bola metálica apenas es capaz de pasar a través de un anillo metálico. Sin embargo, cuando la bola se calienta, ya no pasa a través del anillo. ¿Qué pasaría si se calienta el anillo en lugar de la bola? ¿El diámetro interior del anillo aumentaría, permanecería igual o se reduciría?
- 9.- ¿En qué condiciones es cierto que la adición de calor a un cuerpo ocasiona en él un aumento de temperatura?
- 10.- Define temperatura desde el punto de vista macroscópico y microscópico.
- 11.- ¿De qué factores depende el calor transmitido a un cuerpo durante su calentamiento?
- 12.- ¿Por qué en los sólidos no puede transmitirse calor por convección?
- 13.- ¿Por qué es más grave una quemadura con vapor que una quemadura con agua hirviendo a la misma temperatura?
- 14.- ¿Por qué el agua no hierve a 100 C cuando está a una presión más alta?
- 15.- ¿Por qué la temperatura del agua hirviendo no sube cuando se aplica calor?
- 16.- Menciona dos procedimientos para variar la energía interna de un cuerpo.
- 17.- Has una lista de los supuestos que intervienen en la construcción del modelo de un gas para la teoría cinética
- 18.- ¿Pueden dos cuerpos tener la misma temperatura y al mismo tiempo diferente energía interna?
- 19.- Explica porque un gas ejerce presión contra las paredes del recipiente que lo contiene.

- 20.- ¿En qué sentido son similares el calor y el trabajo?
- 21.- Define transmisión de calor en función de la energía interna y da varios ejemplos.
- 22.- ¿Qué diferencia existe entre un sistema abierto y un sistema cerrado?
- 23.- ¿Qué estudia la Termodinámica?
- 24.- Enuncia la Primera Ley de la Termodinámica.
- 25.- Enuncia de tres maneras diferentes la Segunda ley de la Termodinámica.
- 26.- Explica porque no pueden existir máquinas con movimiento perpetuo. Argumenta la respuesta.

## PROBLEMAS

- 1.- Calcular el incremento de longitud de un alambre de cobre que mide 25 metros de longitud cuando cambia la temperatura de 7°C a 40°C.  $\alpha_{Cu} = 1.7 \times 10^{-5} / ^\circ C$ .
- 2.- Una barra de 5 metros de longitud se expande 0.102 centímetros cuando su temperatura se incrementa en 40°C. ¿Cuál es el valor de  $\alpha$  para el material de que está hecha la barra?
- 3.- Una varilla de aluminio tiene una longitud de 1.65 metros a 25°C. ¿Cuál será su longitud, si se calienta a 465°C?  $\alpha_{Al} = 25 \times 10^{-6} / ^\circ C$ .
- 4.- Una varilla de acero ( $\alpha_{Fe} = 10.5 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ) tiene una longitud de 11.5 metros a 22°C. ¿Cuál será la longitud de la varilla de acero a 1221°C?
- 5.- Un puente de acero de 110 metros de largo a 5°C. ¿Cuál será su longitud, al aumentar su temperatura a 25°C?
- 6.- Encuentra el incremento en volumen de 120 cm<sup>3</sup> de mercurio, cuando su temperatura cambia de 9°C a 39°C.  $\beta_{Hg} = 0.00018 / ^\circ C$ .
- 7.- ¿Cuál es el incremento en volumen de 16 litros de alcohol cuando se calienta de 20°C a 50°C, si el coeficiente de dilatación volumétrica es de  $11 \times 10^{-4} / ^\circ C$ ?
- 8.- Si 38 kilogramos de plomo se calientan desde -30°C hasta 180°C, ¿cuánta cantidad de energía absorbe el plomo?
- 9.- ¿Cuánto calor pierde el agua cuando disminuye su temperatura de 75°C a 10°C?
- 10.- Al aplicarle calor a una masa de aluminio su temperatura se incrementa en 69°C. Supóngase que la misma cantidad de calor se aplica a una misma masa de cobre. ¿Cuál será el incremento en la temperatura del cobre?
- 11.- Si 200 gramos de hierro se encuentran a una temperatura de 30°C, ¿cuál será su temperatura final, si se le agregan 41 250 J de energía calorífica?
- 12.- Una muestra desconocida de 500 gramos se absorbe 5016 joules cuando su temperatura cambia de 20°C a 30°C. Calcule el valor del calor específico de la muestra.
- 13.- Si se utilizan 3055 calorías para calentar 700 gramos de una sustancia desconocida, de 14°C a 45°C. ¿Cuál es el calor específico de la sustancia?
- 14.- Se tienen 150 gramos de infusión de café a 90°C, ¿cuánta crema a 10°C tendrá que agregársele para que la temperatura baje a 26°C? Suponga que el calor específico de la crema es de 4.102 J/Kg C y que el del café es igual que el del agua.
- 15.- Una pieza de metal de 75 gramos a 97°C, se deposita dentro de 300 gramos de agua a 15°C y su temperatura se incrementa hasta 18.9°C. ¿Cuál es el calor específico del metal?
- 16.- Un estudiante durante una excursión calienta 10 litros de agua al punto de ebullición para tomar un baño. ¿Cuánta agua fría a 15°C debe agregar para tener un baño con agua a 25°C? (Despreciar cualquier pérdida de calor durante el intercambio térmico.

17.- Una vasija de hierro de 5 kilogramos, contiene 6 kilogramos de agua, ambos se encuentran a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ . Si se deja caer en el agua un trozo de plomo de 5 kilogramos a  $95^{\circ}\text{C}$ . ¿Cuál será la temperatura final de la mezcla?

18.- Una masa de 25 gramos de agua a  $0^{\circ}\text{C}$  se mezcla con 45 gramos de agua a  $35^{\circ}\text{C}$ , ¿cuál es la temperatura final de los 70 gramos de agua?

19.- En un calorímetro de aluminio de 100 gramos de masa, se vierten 1000 gramos de agua; ambos llegan a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ . Si se agregan 400 gramos de plomo a una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ , ¿cuál será la temperatura final del sistema?

20.- Un pedazo de hielo de 0.3 kilogramos a  $0^{\circ}\text{C}$ , se coloca en un recipiente aislado que contiene un litro de agua a  $20^{\circ}\text{C}$ . Suponiendo que el intercambio calorífico sólo ocurre entre el hielo y el agua y que no existen pérdidas. ¿Cuál será la temperatura final agua?

\*21.- ¿Qué cantidad de calor debe suministrarse para elevar la temperatura de 2 kilogramos de agua desde  $30^{\circ}\text{C}$  hasta  $350^{\circ}\text{C}$ ?

\*22.- ¿Qué cantidad de calor se requiere para cambiar 25 gramos de hielo a  $0^{\circ}\text{C}$  a vapor con una temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ ?

\*23.- ¿Qué cantidad de calor se debe suministrar para transformar un bloque de 5 kilogramos de hielo a  $-5^{\circ}\text{C}$  en agua a  $35^{\circ}\text{C}$ ?

\*24.- ¿Qué cantidad de calor se necesita extraer de 200 gramos de vapor de agua a  $130^{\circ}\text{C}$  para llevarlo a hielo a  $-15^{\circ}\text{C}$ ?

\*Se recomienda realizar la gráfica de Q vs T.

Nota: Los valores de las constantes que se requieren para la solución de los problemas y que no están incluidos en el texto, se pueden encontrar en los libros de Física de la biblioteca de tu escuela.

## ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

### III. ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

#### OBJETIVOS:

Al término de la unidad, el alumno:

- Comprenderá las características de las cargas eléctricas en reposo y en movimiento.
- Calculará el campo eléctrico y el campo magnético, para algunos casos típicos.
- Aplicará estos principios en la comprensión del funcionamiento y construcción de motores y generadores eléctricos.
- Explicará el funcionamiento y aplicación de los transformadores eléctricos.
- Comprenderá el comportamiento de los campos electromagnéticos.

#### METAS:

- Comprender la importancia del estudio de la electricidad.
- Explicar la existencia de las dos clases de cargas eléctricas.
- Explicar la interacción de las cargas eléctricas, mediante la Ley General de las Cargas.
- Comprender las diferencias entre los materiales conductores, aislantes y los semiconductores.
- Explicar los procesos para cargar eléctricamente un cuerpo.
  - 1) Por frotamiento.
  - 2) Por inducción
  - 3) Por contacto
- Explicar la cuantización de la carga eléctrica.
- Establecer la Ley de Coulomb
- Resolver un mínimo de seis problemas en donde se aplique la Ley de Coulomb.
- Explicar el campo eléctrico, representando gráficamente las líneas de campo, para una y dos cargas puntuales.
- Relacionar el campo eléctrico con la fuerza eléctrica.
- Resolver como mínimo cuatro problemas en donde se calcule el campo eléctrico para una o más cargas puntuales.
- Explicar el potencial eléctrico.
- Explicar la diferencia de potencial eléctrico.

- Analizar el campo eléctrico uniforme entre dos placas paralelas y relacionarlo con la diferencia de potencial.
- Resolver cuatro problemas como en el mínimo donde se aplique la diferencia de potencial.
- Explicar cómo se produce y se conduce la corriente eléctrica.
- Caracterizar la resistencia eléctrica de los materiales.
- Resolver un mínimo de dos problemas en donde se calcule la resistencia eléctrica.
- Explicar la Ley de Ohm.
- Relacionar la corriente eléctrica con la potencia eléctrica en un circuito de CC.
- Resolver un mínimo de tres problemas en donde se calcule la potencia eléctrica.
- Explicar las Leyes de Kirchhoff, para mallas y nodos.
- Resolver un mínimo de tres problemas de circuitos eléctricos en serie, en donde se calcule:
  - a) Resistencia equivalente,
  - b) La corriente eléctrica generada por la fuente,
  - c) El voltaje y la corriente eléctrica en cada resistencia,
  - d) La potencia en cada resistencia.
- Resolver un mínimo de tres problemas de circuitos eléctricos en paralelo; en donde se calcule:
  - a) La resistencia equivalente,
  - b) La corriente eléctrica generada por la fuente,
  - c) El voltaje y la corriente eléctrica en cada resistencia,
  - d) La potencia en cada resistencia.
- Resolver un mínimo de cuatro problemas de circuitos serie- paralelo, en donde se calcule:
  - a) La resistencia equivalente,
  - b) La corriente eléctrica generada por la fuente,
  - c) El voltaje y la corriente eléctrica en cada resistencia,
  - d) La potencia en cada resistencia.
- Comprender las propiedades magnéticas de los imanes.
- Visualizar el campo magnético que rodea a un imán, utilizando las líneas del flujo magnético.
- Explicar la interacción entre los polos magnéticos.
- Describir el comportamiento del campo magnético alrededor de un alambre conductor por el cual fluye una corriente eléctrica.
- Describir el campo magnético alrededor de una bobina.
- Caracterizar los materiales magnéticos, utilizando para ello los dominios magnéticos.

- Describir la fuerza sobre un material conductor, por el cual circula una corriente eléctrica, en el interior de un campo magnético.
- Resolver un mínimo de tres problemas en donde se calcule la fuerza sobre un alambre conductor en el interior de un campo magnético.
- Explicar el funcionamiento de un galvanómetro.
- Explicar el funcionamiento de un motor eléctrico.
- Describir el comportamiento de una partícula cargada en el interior de un campo magnético.
- Resolver un mínimo de tres problemas en donde se calcule la fuerza sobre una partícula cargada en el interior de un campo magnético.
- Explicar como se induce una corriente eléctrica en un alambre conductor, el cual es parte de un circuito, al moverse en el interior de un campo magnético.
- Establecer la relación entre la fuerza electromotriz inducida y el campo magnético que la produce.
- Resolver cuatro problemas en donde se calcule la fuerza electromotriz inducida por un campo magnético.
- Explicar el funcionamiento de un generador eléctrico.
- Resolver como mínimo cuatro problemas en donde se calcule la corriente y el voltaje efectivos.
- Establecer la diferencia fundamental entre los motores y los generadores.
- Describir el funcionamiento del transformador eléctrico ideal.
- Resolver como mínimo cuatro problemas en donde se involucren los transformadores eléctricos ideal.
- Caracterizar los campos electromagnéticos al propagarse en el espacio.

## CONTENIDO

### A. Electricidad

- Introducción
- Antecedentes históricos de la electricidad
- La carga eléctrica
- Materiales conductores, aislantes y semiconductores
- La electrización de un cuerpo
- La cuantización de la carga eléctrica
- Ley de Coulomb



- El campo eléctrico
- Campo eléctrico de una carga puntual
- Energía potencial eléctrica
- Diferencia de potencial
- Diferencia de potencial entre dos placas paralelas
- La corriente eléctrica
- Intensidad de la corriente eléctrica
- Resistencia eléctrica
- Ley de Ohm
- Potencia eléctrica
- Leyes de Kirchhoff.

## B. Magnetismo

- El campo magnético
- Las propiedades generales de los imanes
- Los campos magnéticos que están alrededor de los imanes permanentes
- Electromagnetismo
- El campo magnético que está alrededor de una bobina
- Los materiales magnéticos
- La fuerza producida por un campo magnético
- La medición de la fuerza sobre un alambre
- El galvanómetro
- El motor eléctrico
- La fuerza sobre una partícula cargada
- La inducción electromagnética
- El descubrimiento de Faraday
- La fuerza electromotriz inducida
- Los generadores de electricidad
- El generador de corriente alterna
- Los generadores y los motores
- Los transformadores
- Los campos eléctricos y los magnéticos en el espacio.

# ELECTRICIDAD

## 1. INTRODUCCIÓN

Es innegable la importancia que ha tenido la electricidad en el desarrollo de la humanidad, ya que la electrificación de los pueblos y ciudades ha traído consigo un considerable aumento en la producción y bienestar de la población. En la actualidad nos encontramos rodeados de aparatos eléctricos de todas clases, desde lámparas, motores, relojes, aparatos de sonido estereofónico, computadoras y muchos más, de ahí la necesidad de comprender la electricidad y sus aplicaciones. En este siglo se ha estudiado intensamente la electricidad, ya que se ha comprobado sus ventajas sobre otras clases de energía, por ejemplo: puede transformarse con facilidad en otras formas de energía (luz, calor, sonido), se transporta de manera sencilla y a grandes distancias a través de líneas aéreas no contaminantes. En los países desarrollados, la energía eléctrica se produce por diferentes medios: centrales hidroeléctricas, termoeléctricas y nucleoelectricas. En la naturaleza, la electricidad se pone de manifiesto al caer un rayo. Para comprender mejor la electricidad, se analizará primero la electrostática, la cual estudia la carga eléctrica en reposo (aunque intervienen fuerzas). La electrostática constituye el punto de partida indispensable para el conocimiento de la corriente eléctrica y de los fenómenos que se relacionan con ella.

Las interacciones eléctricas de la materia se deben a la carga eléctrica, que al igual que la masa es una cantidad fundamental, la cual no puede describirse en función de conceptos más básicos y simples. La carga eléctrica la conocemos más por lo que hace que por lo que es. Para formalizar el estudio de la electricidad, utilizaremos algunos de los conceptos empleados en Mecánica, como por ejemplo, los conceptos de fuerza, campo, trabajo y energía.

- El campo eléctrico
- Campo eléctrico de una carga puntual
- Energía potencial eléctrica
- Diferencia de potencial
- Diferencia de potencial entre dos placas paralelas
- La corriente eléctrica
- Intensidad de la corriente eléctrica
- Resistencia eléctrica
- Ley de Ohm
- Potencia eléctrica
- Leyes de Kirchhoff.

## B. Magnetismo

- El campo magnético
- Las propiedades generales de los imanes
- Los campos magnéticos que están alrededor de los imanes permanentes
- Electromagnetismo
- El campo magnético que está alrededor de una bobina
- Los materiales magnéticos
- La fuerza producida por un campo magnético
- La medición de la fuerza sobre un alambre
- El galvanómetro
- El motor eléctrico
- La fuerza sobre una partícula cargada
- La inducción electromagnética
- El descubrimiento de Faraday
- La fuerza electromotriz inducida
- Los generadores de electricidad
- El generador de corriente alterna
- Los generadores y los motores
- Los transformadores
- Los campos eléctricos y los magnéticos en el espacio.

# ELECTRICIDAD

## 1. INTRODUCCIÓN

Es innegable la importancia que ha tenido la electricidad en el desarrollo de la humanidad, ya que la electrificación de los pueblos y ciudades ha traído consigo un considerable aumento en la producción y bienestar de la población. En la actualidad nos encontramos rodeados de aparatos eléctricos de todas clases, desde lámparas, motores, relojes, aparatos de sonido estereofónico, computadoras y muchos más, de ahí la necesidad de comprender la electricidad y sus aplicaciones. En este siglo se ha estudiado intensamente la electricidad, ya que se ha comprobado sus ventajas sobre otras clases de energía, por ejemplo: puede transformarse con facilidad en otras formas de energía (luz, calor, sonido), se transporta de manera sencilla y a grandes distancias a través de líneas aéreas no contaminantes. En los países desarrollados, la energía eléctrica se produce por diferentes medios: centrales hidroeléctricas, termoeléctricas y nucleoelectricas. En la naturaleza, la electricidad se pone de manifiesto al caer un rayo. Para comprender mejor la electricidad, se analizará primero la electrostática, la cual estudia la carga eléctrica en reposo (aunque intervienen fuerzas). La electrostática constituye el punto de partida indispensable para el conocimiento de la corriente eléctrica y de los fenómenos que se relacionan con ella.

Las interacciones eléctricas de la materia se deben a la carga eléctrica, que al igual que la masa es una cantidad fundamental, la cual no puede describirse en función de conceptos más básicos y simples. La carga eléctrica la conocemos más por lo que hace que por lo que es. Para formalizar el estudio de la electricidad, utilizaremos algunos de los conceptos empleados en Mecánica, como por ejemplo, los conceptos de fuerza, campo, trabajo y energía.

## 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA ELECTRICIDAD

Los primeros fenómenos eléctricos fueron descritos por el filósofo griego Tales de Mileto (640-547 a.c.). Él observó que al frotar el ámbar (resina fósil transparente de color amarillo) con una tela de lana, aquél podía atraer algunos cuerpos ligeros como cabellos, paja o pedacitos de papel. Sir William Gilbert (1544-1603) encontró que la propiedad de adquirir cargas por frotamiento no era exclusiva del ámbar, sino que muchas otras sustancias la tenían. Decir que los cuerpos se electrizan es debido a que la palabra griega elektron significa ámbar. El estadounidense Benjamín Franklin (1706-1790) descubrió la existencia de cargas eléctricas en las nubes de una tormenta. Dedujo que el rayo era una chispa que salta entre las nubes y el suelo. Descubrió que cuando un conductor eléctrico termina en punta, las cargas eléctricas se acumulan en esa punta. Aplicando esta propiedad, construyó el pararrayos, el cual consiste en una larga barra metálica terminada en punta, que se coloca en la parte más alta de las construcciones y por medio de un cable de cobre se conecta a una placa metálica enterrada en el suelo húmedo.

Charles Coulomb (1736-1806) científico francés estudió las leyes de atracción y repulsión eléctrica, midiendo las fuerzas de interacción entre las cargas puntuales.

El físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) construyó la primera pila eléctrica del mundo, combinando dos metales distintos, con un líquido que servía de conductor.

George Ohm (1789-1854) físico alemán, descubrió la resistencia eléctrica de un conductor, y en 1827 enunció, la Ley Fundamental de las Corrientes Eléctricas, que lleva su nombre, la cual establece la relación entre la resistencia de un conductor, la diferencia de potencial y la intensidad de la corriente eléctrica.

Por su parte, Michael Faraday (1791-1867), físico y químico inglés, inventó el generador eléctrico al descubrir cómo podía usarse un imán para generar una corriente eléctrica en una espira de hierro.

El físico inglés James Joule (1818-1889) estudió la relación que existe entre la corriente eléctrica y el calor desprendido en los circuitos eléctricos.

Como se podrá observar, el desarrollo de la electricidad ha sido la contribución de éstos y otros investigadores quienes vieron en su aplicación un beneficio para la humanidad.

## 3. LA CARGA ELÉCTRICA

Toda la materia se compone de átomos y éstos de partículas elementales como los electrones, protones y neutrones. Los electrones y protones poseen una propiedad llamada carga eléctrica. Los neutrones son eléctricamente neutros porque carecen de carga eléctrica. A los electrones se les asigna una carga negativa, mientras que los protones una carga positiva.

La carga eléctrica de un electrón es igual que la del protón, pero de signo contrario. El átomo está constituido por un núcleo en el cual se encuentran los protones y los neutrones, y a su alrededor giran los electrones. Un átomo normal es neutro, ya que posee el mismo número de electrones o carga negativa que de protones o carga positiva. Sin embargo, un átomo puede perder electrones y quedar con carga positiva, ya que posee más protones que electrones o ganar electrones y quedar con carga negativa. La carga de un electrón neutraliza la carga de un protón. En la electrización de un cuerpo, el electrón es el que se desplaza, ya que su masa es mucho más pequeña que la del protón (la masa del protón es 1840 veces la masa del electrón) y además, los electrones se encuentran en la periferia del átomo, facilitándose su desprendimiento, en cambio, el protón se encuentra en el núcleo, requiriéndose procesos más complicados para removerlo. El frotamiento es una forma sencilla de cargar un cuerpo eléctricamente. Por ejemplo: cuando el cabello seco y limpio se peina con vigor pierde algunos electrones, adquiriendo carga positiva y el peine gana electrones, quedando con carga negativa, ver figura 1. Por otra parte, al frotar una barra de vidrio con una tela de seda, el vidrio pierde electrones, quedando con carga positiva, los cuales gana la seda, adquiriendo carga negativa.

Benjamín Franklin pensó que todos los cuerpos poseían un fluido eléctrico, de tal forma que cuando dos cuerpos se frotan entre sí, uno acumulaba el exceso de fluido y se cargaba positivamente en tanto que el otro perdía fluido y se cargaba negativamente. En la actualidad se sabe que lo que las sustancias transfieren son electrones.

Al frotar un cuerpo con otro, uno gana y el otro pierde electrones, de tal forma que la carga eléctrica que adquiere uno de ellos la pierde el otro. Esto nos conduce a que la carga eléctrica ni se crea ni se destruye, solamente se transfiere de un cuerpo a otro. En general, éste es el Principio Fundamental de la Conservación de la Carga Eléctrica, el cual establece que en un sistema aislado se conserva constante la cantidad de carga eléctrica.

Hasta ahora, se ha encontrado que la carga eléctrica sólo existe en múltiplos enteros de una cantidad básica, la carga del electrón, tanto si es positiva como negativa, la carga está cuantizada, siendo ésta un múltiplo de la carga del electrón.

Si se frotan dos trozos de vidrio con seda, se observa que se repelen entre sí, ver figura 2a.



Fig. No. 1.

Los electrones que gana el peine, los pierde el cabello.



Fig. No. 2

FIGURA 2. Interacción entre cuerpos cargados. Cargas iguales se rechazan.

Si se frota con piel de conejo, también se repelen, ver figura 2b. Por otro lado, (ver figura 3) si se frota uno con piel y el otro con la seda, entonces se atraen mutuamente. Como ya lo hemos visto, al frotar los trozos de vidrio con la seda pierden electrones, quedando con carga positiva. Al acercarse se repelen entre sí. Si una barra se frota con seda y otra con piel de conejo, una adquiere carga positiva y la otra carga negativa, al acercarse se observa que se atraen entre sí (ver figura 3).

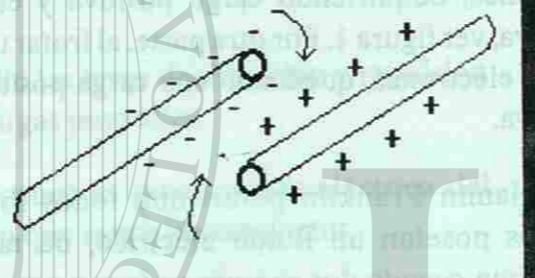


Fig. No. 3.

FIGURA 3. Interacción entre cuerpos cargados. Cargas opuestas se atraen. Mediante este experimento y muchos otros se ha demostrado lo que con frecuencia se acostumbra denotar como la Ley General de las Cargas: las cargas iguales se repelen y las cargas opuestas se atraen.

Un péndulo eléctrico consiste en una pequeña esfera ligera revestida de pintura metálica o recubierta de papel de estaño, la cual se suspende de un soporte mediante un hilo delgado de seda. Al acercarse un cuerpo cargado se observa que la esferita es atraída, ver figura 4.

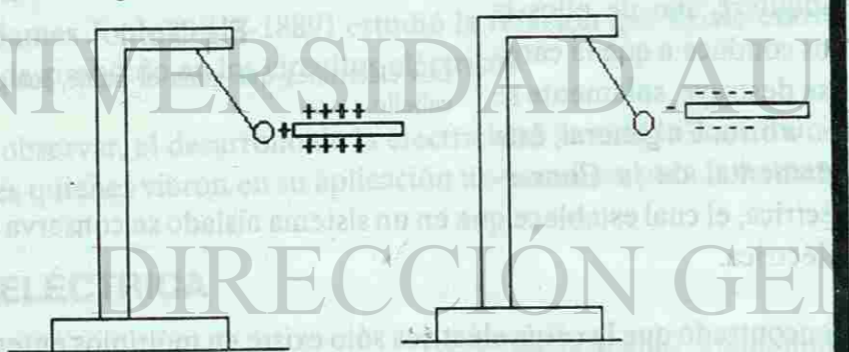


Fig. No. 4.

FIGURA 4. El péndulo eléctrico es atraído por un cuerpo cargado.

Si se toca con el cuerpo cargado la esfera, al acercarse nuevamente el cuerpo la esfera se aleja, ver figura 5.

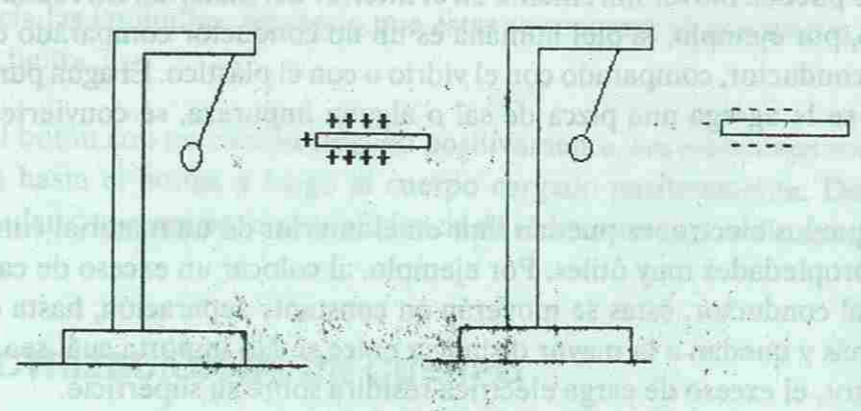


Fig. No. 5.

Después de tocar la esferita, el cuerpo cargado la rechaza.

Esto se debe a que al tocar la esfera, si la barra de vidrio tenía cargas negativas, le cede parte del exceso de electrones, quedando la esfera con carga negativa y al acercarse nuevamente la barra de vidrio, éstas (esfera y barra de vidrio) se repelen entre sí, puesto que tienen la misma carga eléctrica. Si la barra tiene carga positiva, es decir, deficiencia de electrones, entonces al tocar la esferita le extrae electrones, quedando la esferita con carga positiva. Al acercarse nuevamente la barra a la esferita, se observa que se rechazan entre sí. En este experimento se verifica la Ley General de las Cargas y se observa que un cuerpo neutro se puede cargar al ponerlo en contacto con un cuerpo cargado.

#### 4. MATERIALES CONDUCTORES, AISLANTES Y SEMICONDUCTORES

Los materiales se dividen en aislantes, conductores y semiconductores, según sea el movimiento de la carga eléctrica en ellos. Un material es aislante si al colocar en él una carga eléctrica, ésta permanece en el lugar en el que se colocó. Por ejemplo, si frotamos el extremo de un peine de plástico con una tela de algodón, únicamente se carga este extremo, ya que si acercamos su otro extremo al péndulo eléctrico no se aprecia ninguna interacción eléctrica. Otros materiales aislantes, en los cuales la carga eléctrica no se mueve son: la madera, las telas, el vidrio, el papel, la mica, el cuero y el aire. Los conductores son aquellos materiales en los cuales sí se añaden electrones, éstos se distribuyen a través del material. Los metales son materiales en los cuales los electrones pueden moverse a través de ellos con facilidad. Los electrones llevan o conducen carga eléctrica a través del material. Los metales como el oro, la plata, el cobre, el acero, el estaño y el bronce están entre los mejores conductores de electricidad.

En cuanto a su estructura, la diferencia entre un material conductor y un aislante es que en los conductores hay electrones móviles en su interior. Por ejemplo, los metales tienen una gran cantidad de electrones libres. En cambio, en los materiales no conductores o aislantes no hay electrones que se puedan mover libremente en el interior del material. En realidad no hay un aislante perfecto, por ejemplo, la piel humana es un no conductor comparado con el cobre, pero es un buen conductor, comparado con el vidrio o con el plástico. El agua pura es un buen aislante, pero si se le agrega una pizca de sal o alguna impureza, se convierte en un buen conductor.

El hecho de que los electrones puedan fluir en el interior de un material conductor, es la causa de varias propiedades muy útiles. Por ejemplo, al colocar un exceso de carga eléctrica sobre un material conductor, éstas se moverán en constante separación, hasta que ya no se pueden mover más y quedan a la mayor distancia entre sí. No importa cuál sea la forma del material conductor, el exceso de carga eléctrica residirá sobre su superficie.

Los semiconductores son materiales que como el silicio y el germanio, cuya capacidad para conducir electricidad es intermedia entre los conductores y los aislantes. En estos materiales hay sólo una cantidad pequeña de electrones con libertad para moverse. El número de electrones libres en un semiconductor puede aumentarse grandemente añadiendo cantidades pequeñas de otros elementos. De esta forma, se puede crear un semiconductor con una conductividad deseada.

Para determinar si un material está cargado y de qué tipo es la carga que posee, se utiliza el electroscopio (ver figura 6), el cual está formado por un par de laminillas de oro o estaño unidas a una barra conductora. Tanto la barra como las laminillas están protegidas de las corrientes de aire.

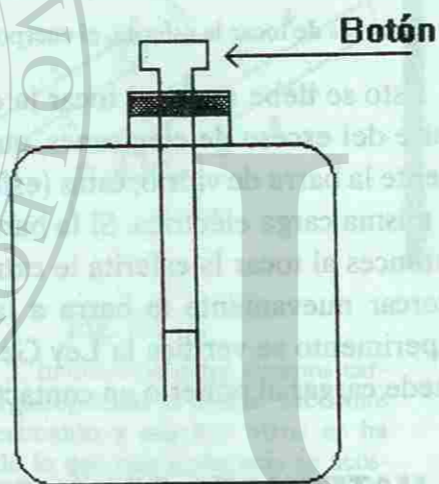


Fig. No. 6. Electroscopio.

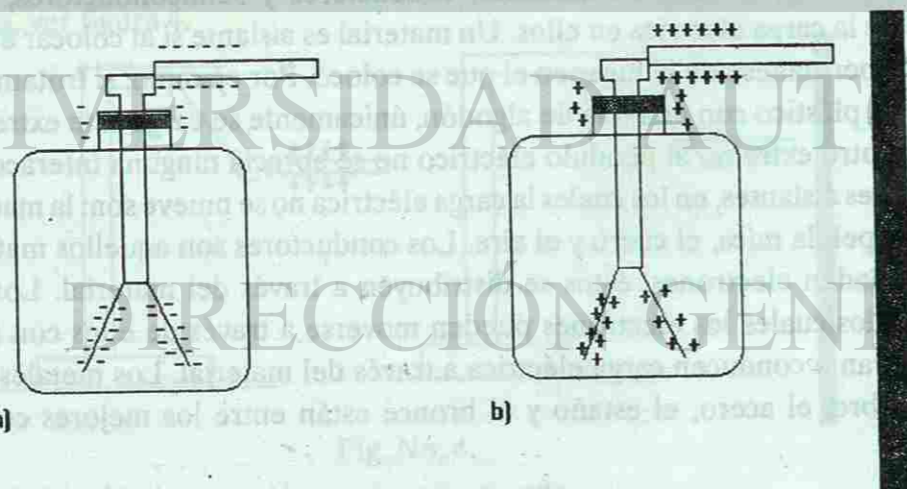


Fig. No. 7. Funcionamiento de un electroscopio.

Cuando se toca el botón con un cuerpo cargado negativamente, los electrones fluyen por la barra y hacia las laminillas, haciendo que éstas se separen, ya que ambas adquieren carga negativa, ver figura 7a.

Al tocar el botón con un cuerpo cargado positivamente, los electrones son atraídos desde las laminillas hasta el botón, y luego al cuerpo cargado positivamente. De esta forma, las laminillas quedan con carga positiva (deficiencia de electrones) y por ello se separan, ver figura 7b.

## 5. LA ELECTRIZACIÓN DE UN CUERPO

Como ya lo hemos dicho, un cuerpo se electriza al perder o ganar electrones. Los cuerpos se electrizan por fricción, por contacto o por inducción.

Un cuerpo se electriza por fricción con otro cuerpo. La energía que se produce de la fricción de un objeto con otro, puede ser suficiente como para remover electrones de un átomo. Al remover un electrón de un átomo neutro, éste queda con mayor carga positiva que negativa. A un átomo también se le puede añadir electrones. En la fricción entre dos materiales, los electrones que pierde uno los gana el otro cuerpo. Para tener una idea más clara acerca de la electrización de dos cuerpos por fricción, consideremos la lista que aparece en seguida. En ella, al seleccionar dos materiales, el que se encuentre por encima es el que pierde electrones, por ello queda con carga positiva, mientras que el que se encuentra por debajo gana electrones, de tal forma que su carga es negativa. Por ejemplo, si frotamos cuarzo con una tela de algodón, el cuarzo pierde electrones, quedando con una carga neta positiva, en tanto, la tela de algodón los gana, quedando con una carga neta negativa.

El frotamiento entre cualesquiera dos sustancias de la columna hace que la que aparece por encima quede con carga positiva, y con carga negativa la que esté por debajo.

Un cuerpo se electriza por contacto, al tocarlo con otro cuerpo cargado. Si un cuerpo con deficiencia de electrones, es decir con carga positiva, se pone en contacto con un material conductor, atraerá parte de los electrones de dicho cuerpo. Los electrones del material conductor son atraídos por el cuerpo cargado, como se muestra en la figura 8. Después de separarlos, la esfera metálica queda con carga positiva.

Asbesto
Piel (conejo)
Vidrio
Mica
Lana
Cuarzo
Piel (gato)
Plomo
Seda
Piel (Humana)
Aluminio
Algodón
Madera
Ambar
Cobre, bronce
Caucho
Azufre
Celuloide
Goma

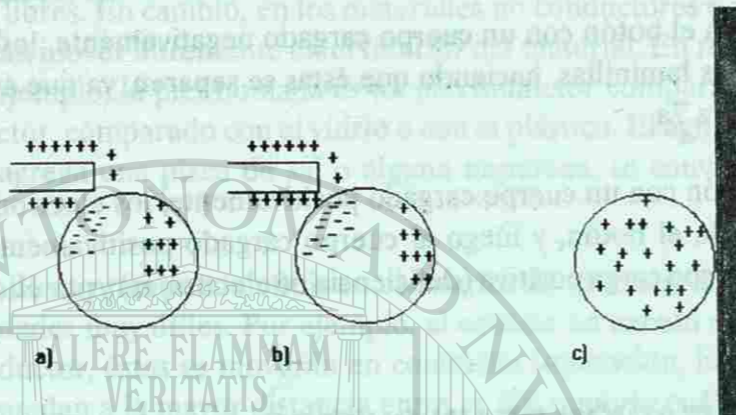


Fig. No. 8.

- a) El cuerpo cargado se acerca al material conductor b) Los electrones son atraídos por el cuerpo cargado  
c) Después de separarse los dos cuerpos, la esfera queda con carga positiva. Los electrones que pierde la esfera son los que gana el otro cuerpo.

Un cuerpo se carga por inducción al acercarle otro ya electrizado. Por ejemplo, si una barra de plástico cargada negativamente se acerca a un trozo de papel en estado neutro o descargado; a medida que la barra se aproxima repele los electrones del papel hasta el lado más alejado del átomo. Así pues, la capa superficial del papel más próxima a la barra cargada, tiene el lado positivo de los átomos, mientras la superficie más alejada tiene el lado negativo. Como la superficie positiva del papel está más cerca a la barra que la superficie negativa, la fuerza de repulsión es menor a la de atracción y la barra cargada atrae el pedazo de papel. Cuando la barra electrizada se aleja, la carga inducida desaparece, ver figura 9.

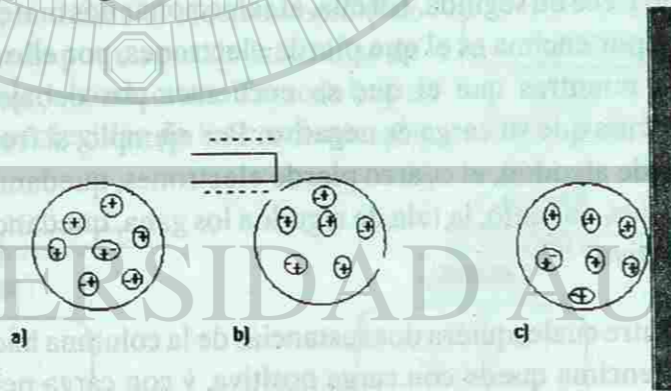


Fig. No. 9.

FIGURA 9. a) Cuerpo neutro b) Carga inducida por la presencia de un cuerpo cargado. Los cuerpos se atraen c) Si se retira el cuerpo cargado el trozo de papel vuelve a ser neutro.

## 6. LA CUANTIZACIÓN DE LA CARGA ELÉCTRICA

El estudio de las fuerzas electrostáticas se hizo antes de saber que los átomos de los cuerpos contienen electrones y que éstos eran los causantes de la carga eléctrica de los cuerpos. La medición de la carga eléctrica (cantidad de electricidad) se efectuó a partir de las fuerzas y las distancias entre los cuerpos electrizados. Además, como la carga elemental del electrón es muy pequeña para ser tomada como unidad práctica, en vez de ella se ha adoptado para medir

las cargas eléctricas la unidad antigua, el coulomb (C). Esta unidad es una carga tal que si se pudiera colocar a un metro de distancia de otra carga igual, actuaría entre ellas una fuerza de nueve mil millones de newtons ( $9 \times 10^9$  N).

Posteriormente se encontró que  $1 \text{ C} = 6.24 \times 10^{18}$  veces la carga del electrón, o bien carga del electrón =  $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$

Por otra parte, como el coulomb es una unidad de carga eléctrica demasiado grande, es conveniente la utilización de los submúltiplos:

el milicoulomb (mC):  $1 \text{ mC} = 10^{-3} \text{ C}$

el microcoulomb ( $\mu\text{C}$ ):  $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$

El coulomb (C) es la unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional (SI) y en el cgs es la unidad electrostática de carga (ues) o estatcoulomb, de donde:

1 estatcoulomb = 1 ues =  $2.08 \times 10^9$  veces la carga del electrón

## 7. LEY DE COULOMB

Charles Coulomb estudió las leyes que rigen la atracción y repulsión de las cargas eléctricas puntuales en reposo. Se entiende por una carga puntual la que tiene distribuida un cuerpo electrizado, cuyo tamaño es pequeño, comparado con la distancia que la separa del otro cuerpo cargado. Cuantificó la fuerza de atracción o repulsión entre cargas eléctricas puntuales, llegando a establecer:

1. La fuerza (F) de atracción o de repulsión entre dos cargas puntuales, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r) que las separa

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

es decir, si la distancia entre las cargas eléctricas se aumenta al doble ( $2r$ ), la fuerza entre las cargas disminuye a  $1/4$  de la fuerza inicial ( $1/4F$ ); si la distancia se aumenta al triple ( $3r$ ), la fuerza disminuye a  $1/9$  de la fuerza inicial ( $1/9F$ ), etc.

2. La fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas, lo cual se representa como

$$F \propto q_1 q_2$$

es decir, si la carga de uno se aumenta al doble digamos  $2q_1$  y la otra ( $q_2$ ) se incrementa al triple ( $3q_2$ ), entonces F se incrementa a seis veces su valor inicial ( $6F$ ). Si cada una de las cargas

se incrementa al doble ( $2q_1$  y  $2q_2$ ) entonces la fuerza se incrementa a cuatro veces su valor inicial ( $4F$ ), etc.

De los resultados anteriores se tiene que

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Para transformar esta relación en una igualdad, se cambia el signo de proporcionalidad (a) por un signo de igualdad incluyendo una constante de proporcionalidad, o sea

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

esta ecuación da tanto la magnitud de la fuerza que ejerce  $q_1$  sobre  $q_2$  como la fuerza que ejerce  $q_2$  sobre  $q_1$  siendo

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

en donde  $\epsilon_0$  (letra griega épsilon) es la constante de permitividad en el vacío y cuyo valor es igual a  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$  de tal forma que

$$k = \frac{1}{4(3.1416)(8.854 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2})}$$

El valor de la constante  $k$  en el Sistema Internacional (SI):

$$k = 9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

y en el cgs

$$k = 1 \frac{\text{dina cm}^2}{\text{ues}^2}$$

finalmente, la Ley de Coulomb queda enunciada en los siguientes términos:

*La magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.*

Las fuerzas eléctricas pueden ser de atracción o de repulsión. Cuando las cargas son de signos iguales, la fuerza es de repulsión mutua, en cambio, cuando las cargas son de signos opuestos, la fuerza es de atracción. La fuerza está en la dirección que sigue la recta que une

las cargas y su sentido depende si la fuerza es de atracción o de repulsión. La magnitud de la fuerza sobre una carga es igual a la magnitud de la fuerza sobre la otra carga, pero de sentido contrario, como lo establece la Tercera Ley de Newton.

Como se podrá observar, se ha hecho referencia a la Ley de Coulomb y su aplicación a dos cargas eléctricas puntuales que se encuentran en el vacío. Esta ecuación es aplicable, con una muy buena aproximación a la interacción de las cargas puntuales en el aire. Al estar en algún otro medio, el valor de la constante  $k$  cambia. Para los fines de este curso analizaremos la fuerza entre las partículas cargadas, en el aire o en el vacío, en donde la constante.

Cuando hay más de dos cargas eléctricas, para calcular la fuerza resultante sobre una de ellas se aplican los métodos ya utilizados para calcular dicha fuerza. Veamos algunos ejemplos

#### Ejemplo 1.

Una carga positiva de  $6 \times 10^{-6}C$  se encuentra a  $0.030 m$  de una segunda carga positiva de  $3 \times 10^{-6}C$ .

- a) Calcular la fuerza entre las cargas.  
b) ¿Cuál será la fuerza, si la segunda carga fuese negativa?

datos:

$$q_1 = 6 \times 10^{-6}C$$

$$q_2 = 3 \times 10^{-6}C$$

$$r = 0.030 m = 3 \times 10^{-2}m$$

$$a) F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = (9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}) \frac{(6 \times 10^{-6})(3 \times 10^{-6}C)}{(3 \times 10^{-2}m)^2}$$

$$F = 18 \times 10^1 N = 180 N$$

como el signo es positivo, la fuerza es de repulsión, ya que las cargas son de signos iguales.

- b).- Si la segunda carga fuese negativa, la fuerza tendría la misma magnitud, pero sería de atracción, ya que las cargas serían de signos opuestos.

#### Ejemplo 2.

Una carga  $q_1 = 2 \times 10^{-6}C$  se encuentra a una distancia de  $20 cm$  de otra carga  $q_3 = 8 \times 10^{-6}C$ , como se ve en la figura. Determinar el valor de la fuerza resultante y su sentido, sobre una carga

$q_2 = -4 \times 10^{-6}C$  al ser colocada en medio de las otras dos cargas.

$$q_1 = 2 \times 10^{-6}C$$

$$q_2 = -4 \times 10^{-6}C$$

$$q_3 = 8 \times 10^{-6}C$$

$$r_1 = r_2 = 10cm = 0.1m = 1 \times 10^{-1}m$$



para calcular la fuerza resultante que actúa sobre la carga  $q_2$ , observamos que sobre ella actúan dos fuerzas:  $F_{12}$  (la fuerza que ejerce la carga  $q_1$  sobre la carga  $q_2$ ) y  $F_{32}$  (la fuerza que ejerce la carga  $q_3$  sobre la carga  $q_2$ ). Para  $F_{12}$  se tiene que

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_{12} = (9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}) \frac{(2 \times 10^{-6}C)(-4 \times 10^{-6}C)}{(1 \times 10^{-1}m)^2}$$

$$F_{12} = -72 \times 10^{-1} N = -7.2 N$$

esta fuerza es de atracción, hacia la izquierda.

Para calcular  $F_{32}$  se tiene que

$$F_{32} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_{32} = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(8 \times 10^{-6} \text{ C})(-4 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1 \times 10^{-1} \text{ m})^2}$$

$$F_{32} = -288 \times 10^{-1} \text{ N} = -28.8 \text{ N}$$

esta fuerza es de atracción, hacia la derecha.

**Nota:** recuerda que el signo negativo de la fuerza solamente nos indica que es de atracción.

Como estas dos fuerzas actúan en la misma línea de acción pero en sentidos contrarios, entonces, la magnitud de la fuerza resultante será la diferencia de las dos fuerzas, y el sentido, el que tenga la fuerza de mayor magnitud,

$$F_R = F_{32} - F_{12}$$

$$F_R = 28.8 \text{ N} - 7.2 \text{ N}$$

$$F_R = 21.6 \text{ N hacia la derecha.}$$

### Ejemplo 3.

Una carga  $q_1 = -3 \mu\text{C}$  recibe una fuerza de atracción debido a cada una de las cargas:  $q_2 = 8 \mu\text{C}$  y  $q_3 = 7 \mu\text{C}$ , que se encuentran colocadas como se muestra en la figura. Determinar la fuerza eléctrica resultante que actúa sobre  $q_1$ , así como el ángulo que forma respecto al eje horizontal.

$$q_1 = -3 \mu\text{C} = -3 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$q_2 = 8 \mu\text{C} = 8 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$q_3 = 7 \mu\text{C} = 7 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$r_1 = r_2 = 50 \text{ cm} = 0.5 \text{ m} = 5 \times 10^{-1} \text{ m}$$

la carga  $q_1$  se encuentra bajo la acción de dos fuerzas  $F_{21}$  (la fuerza que ejerce la carga  $q_2$  sobre la carga  $q_1$ ) y  $F_{31}$  (la fuerza que ejerce la carga  $q_3$  sobre la carga  $q_1$ ), como se muestra en la figura. Calcular cada una de ellas.

$$F_{21} = k \frac{q_2 q_1}{r^2}$$

$$F_{21} = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(8 \times 10^{-6} \text{ C})(-3 \times 10^{-6} \text{ C})}{(5 \times 10^{-1} \text{ m})^2}$$

$$F_{21} = -8.64 \times 10^{-1} \text{ N}$$

esta fuerza ( $F_{21}$ ) es de atracción y la ejerce la carga  $q_2$  sobre la carga  $q_1$  y se encuentra horizontal hacia la derecha.

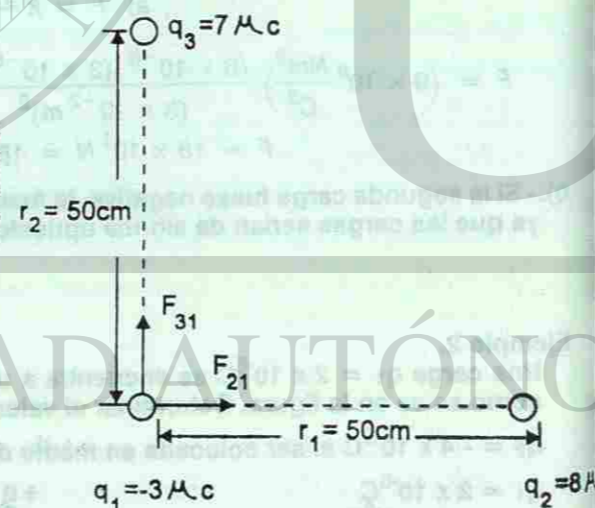
$$F_{31} = k \frac{q_3 q_1}{r^2}$$

$$F_{31} = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(7 \times 10^{-6} \text{ C})(-3 \times 10^{-6} \text{ C})}{(5 \times 10^{-1} \text{ m})^2}$$

$$F_{31} = -7.56 \times 10^{-1} \text{ N}$$

esta fuerza ( $F_{31}$ ) es de atracción y la ejerce la carga  $q_3$  sobre la carga  $q_1$  y se encuentra vertical hacia arriba. El signo menos sólo indica que la fuerza es de atracción, por ello se puede omitir en el cálculo.

Graficando estas dos fuerzas eléctricas sobre  $q_1$



Para calcular la fuerza resultante ( $F_R$ ) se tiene que:

$$\text{Magnitud } (F_R)^2 = (F_{21})^2 + (F_{31})^2$$

$$(F_R)^2 = (8.64 \times 10^{-1} \text{ N})^2 + (7.56 \times 10^{-1} \text{ N})^2$$

$$(F_R)^2 = 74.64 \times 10^{-2} \text{ N}^2 + 57.15 \times 10^{-2} \text{ N}^2$$

$$(F_R)^2 = 131.79 \times 10^{-2} \text{ N}^2$$

entonces

$$F_R = 11.47 \times 10^{-1} \text{ N}$$

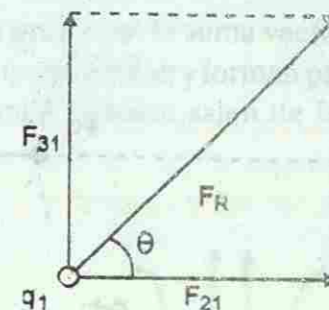
$$F_R = 1.147 \text{ N}$$

Dirección:

$$\tan \theta = \frac{F_{31}}{F_{21}} = \frac{7.56 \times 10^{-1} \text{ N}}{8.64 \times 10^{-1} \text{ N}}$$

$$\tan \theta = 0.875$$

$$\theta = \tan^{-1}(0.875) = 41.2^\circ$$



## 8. EL CAMPO ELÉCTRICO

Las fuerzas eléctricas, como las gravitacionales, actúan entre cuerpos que no se encuentran en contacto entre sí y entre aquéllos que lo están. Una manera de describir estas fuerzas implica el uso del concepto de campo de fuerza. Como ya se ha visto, a una masa le rodea un campo gravitacional, de tal forma que otra masa que se introduzca en esta región experimentará una fuerza sobre ella. La "alteración del espacio" provocada por una masa es su campo gravitacional. De manera análoga, una carga eléctrica produce un campo eléctrico alrededor de ella, el cual interactúa con cualquier otra carga que esté presente. Un campo eléctrico existe en una región del espacio en la que una carga eléctrica experimenta una fuerza eléctrica. Basta con el hecho de colocar una carga eléctrica en un punto y si sobre ella actúa una fuerza eléctrica, en ese punto existe un campo eléctrico. Un campo eléctrico tiene tanto magnitud como dirección y sentido.

La magnitud del campo eléctrico ( $E$ ) en cualquier punto, en términos de la fuerza ( $F$ ) experimentada por una carga positiva pequeña  $+q$  cuando se coloca en dicho punto, equivale a la fuerza por unidad de carga, es decir

$$E = \frac{F}{q}$$

$E$  = magnitud del campo eléctrico en N/C o dinas/ues.

$F$  = fuerza que recibe la carga de prueba en newtons (N) o dinas.

$q$  = valor de la carga de prueba en coulomb (C) o ues.

Esta carga positiva pequeña  $+q$ , llamada carga de prueba, produce efectos despreciables sobre las cargas cercanas (ver figura 10). En esta expresión se aprecia que si la carga de prueba es positiva, el campo eléctrico tiene la misma dirección que la fuerza eléctrica que actúa sobre la carga.



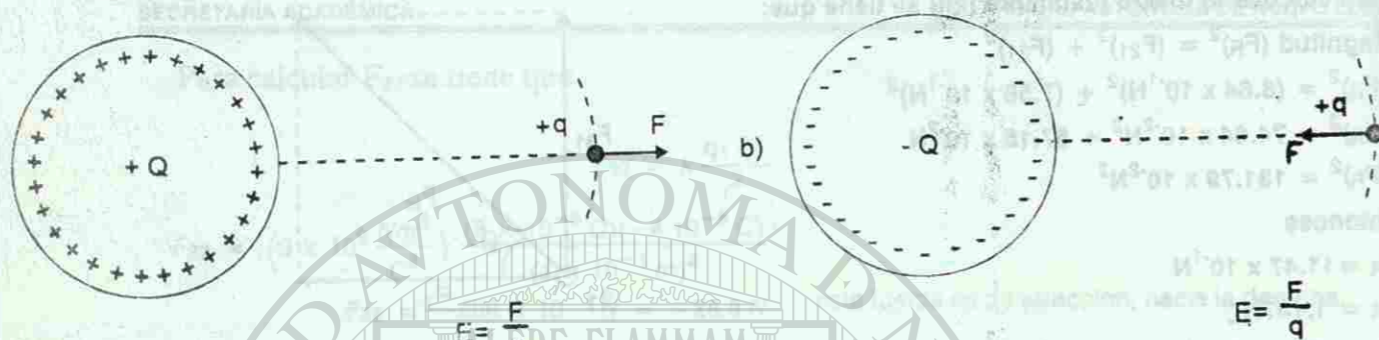


Fig. No. 10.

La magnitud del campo eléctrico es la fuerza por unidad de carga ( $F/q$ ) y su dirección en un punto es la misma que corresponde a la dirección del movimiento de una carga positiva cuando se coloca en dicho punto.

La dirección del campo eléctrico en un punto es la misma que corresponde a la dirección del movimiento de la carga positiva de prueba, si se soltase en dicho punto. Por ejemplo, supóngase que una carga positiva de prueba se pone en el punto A de la figura 11 (a). Esta carga es atraída radialmente hacia adentro, como lo indica la flecha A. La fuerza sobre la carga positiva de prueba está dirigida radialmente hacia el interior, sin importar en que punto se encuentre de la vecindad de la carga negativa central. En consecuencia, el campo eléctrico está dirigido como lo indican las flechas: el campo eléctrico cerca de una carga negativa tiene una dirección radial y hacia la carga.

Para obtener la dirección del campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva, se sigue el mismo procedimiento (ver figura 11b). La carga positiva de prueba es repelida radialmente hacia afuera por la carga positiva central. Por tanto, la dirección del campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva es en dirección radial y hacia afuera de la carga.

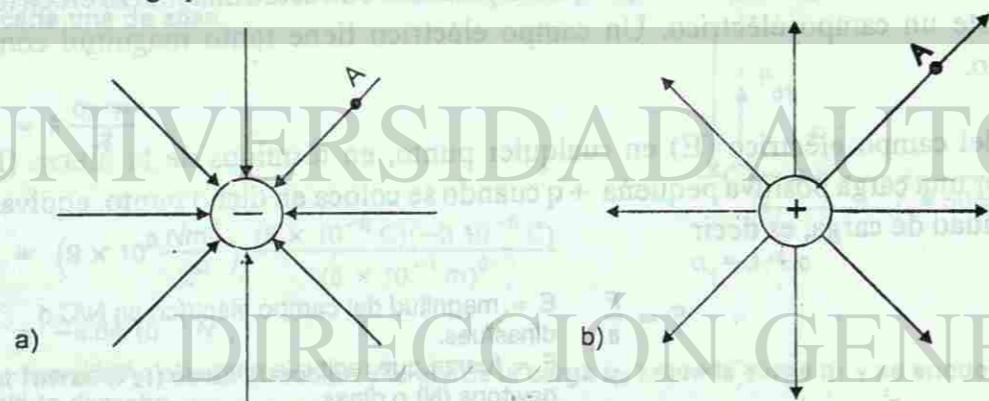
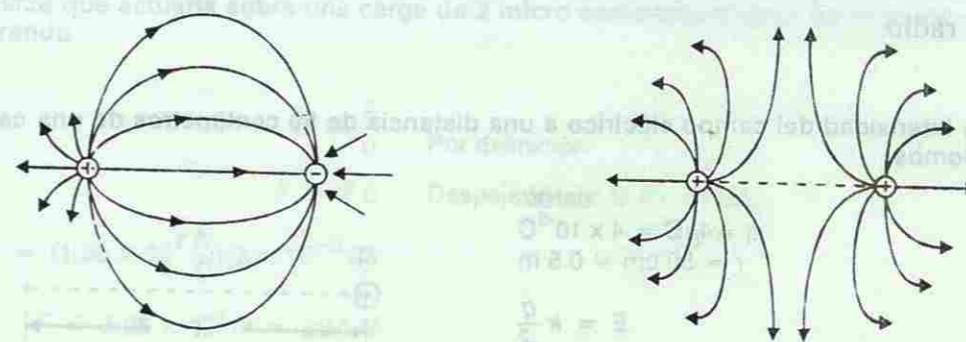


Fig. No. 11.

Líneas de campo eléctrico. a) Para una carga puntual negativa. b) Para una carga puntual positiva.

A las líneas dirigidas que se han trazado para señalar la dirección del campo eléctrico son llamadas líneas de campo eléctrico o líneas de fuerza. Las líneas de fuerza estarán más juntas entre sí cuando el campo eléctrico sea intenso y más separadas al disminuir su intensidad.

Cuando hay dos o más cargas, la fuerza sobre una carga de prueba es la suma vectorial de las fuerzas que produce cada carga individual. Las líneas de campo se doblan y forman patrones complejos, como se ilustra en la figura 12. Las líneas de campo siempre salen de la carga positiva y entran en una carga negativa.



a) Líneas de campo entre cargas opuestas.

b) Líneas de campo entre cargas de igual signo.

Fig. No. 12.

### 8.1 CAMPO ELÉCTRICO DE UNA CARGA PUNTUAL

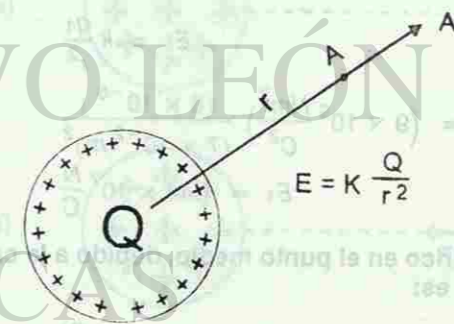
Experimentalmente se puede demostrar que la magnitud del campo eléctrico que rodea a un cuerpo eléctrico es directamente proporcional a la cantidad de carga en el cuerpo. Además se puede ver que a medida que una carga de prueba  $q_0$  se aleja de una carga  $Q$ , experimentará cada vez fuerzas menores. Lo anterior se deriva a partir de la Ley de Coulomb

$$F = k \frac{Q q_0}{r^2}$$

$$E = \frac{F}{q_0}$$

$$E = \frac{k Q q_0}{r^2 q_0}$$

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$



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

El sentido del campo es hacia fuera de  $Q$ , si  $Q$  es positiva y hacia  $Q$ , si  $Q$  es negativa. Con esta expresión se puede calcular la magnitud del campo eléctrico en un punto determinado, si se conoce la carga eléctrica puntual que lo produce. Cuando más de una carga contribuye al

campo, la resultante se obtiene como la suma vectorial de los campos producidos por cada una de las cargas eléctricas.

Si se desea calcular el campo eléctrico producido por una esfera uniformemente cargada, en un punto muy alejado de ésta, se considerará que toda su carga se encuentra colocada en su centro. Entendiendo por un punto muy alejado, aquél cuya distancia a la esfera es mucho mayor que su radio.

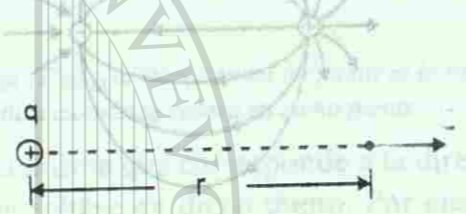
**Ejemplo 4.** Calcular la intensidad del campo eléctrico a una distancia de 50 centímetros de una carga de 4 micro coulombs.

datos:  
 $q = 4 \mu\text{C} = 4 \times 10^{-6} \text{C}$   
 $r = 50 \text{ cm} = 0.5 \text{ m}$

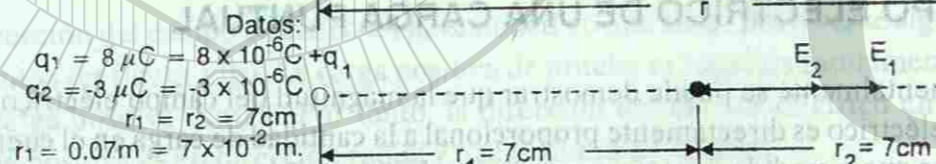
$$E = k \frac{q}{r^2}$$

$$E = (9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}) \frac{(4 \times 10^{-6})}{(0.5 \text{ m})^2}$$

$$E = 144 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1.44 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$



**Ejemplo 5.** Determinar la intensidad del campo eléctrico en el punto medio entre dos cargas puntuales  $q_1 = 8$  micro coulombs y  $q_2 = -3$  micro Coulombs separadas por una distancia de 14 centímetros. Calcular también la fuerza que actuaría sobre una carga de 2mC si se colocara en ese punto.



El campo eléctrico en el punto medio, debido a la carga  $q_1$  está dirigido hacia la derecha y su magnitud es:

$$E_1 = k \frac{q_1}{r^2}$$

$$E_1 = (9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}) \frac{(8 \times 10^{-6})}{(7 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$E_1 = 1.44 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

El campo eléctrico en el punto medio, debido a la carga  $q_2$  también está dirigido hacia la derecha y su magnitud es:

$$E_2 = k \frac{q_2}{r^2}$$

$$E_2 = (9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}) \frac{(-3 \times 10^{-6})}{(7 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$E_2 = -0.54 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}} = -5.4 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

El signo menos indica que el campo eléctrico se debe a una carga negativa.

En la gráfica se observa que  $E_1$  y  $E_2$  están en la misma dirección y en el mismo sentido, de tal forma que el campo eléctrico resultante ( $E_R$ ) tiene una magnitud

$$E_R = E_1 + E_2$$

$$E_R = 1.44 \times 10^7 \text{ N/C} + 0.54 \times 10^7 \text{ N/C};$$

$$E_R = 1.98 \times 10^7 \text{ N/C} \text{ hacia la derecha de la gráfica.}$$

Cálculo de la fuerza que actuaría sobre una carga de 2 micro coulombs situada en el punto que se está considerando  
 $q = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$

$$E = \frac{F}{q} \text{ Por definición.}$$

$$F = E q \text{ Despejando en la Ec. anterior.}$$

$$F = (1.98 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}})(2 \times 10^{-6} \text{ C})$$

$$F = 3.96 \times 10^1 \text{ N} = 39.6 \text{ N}$$

### 9. ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

Cuando se estudió la energía mecánica, se vió que un objeto puede tener energía potencial gravitacional debido a su ubicación en un campo gravitacional. De manera similar, un objeto cargado puede tener energía potencial en virtud de su posición en un campo eléctrico. Así como se requiere trabajo para levantar un objeto contra el campo gravitacional de la Tierra, también se requiere realizar un trabajo para empujar una partícula cargada contra el campo eléctrico de un cuerpo cargado. Este trabajo incrementa la energía potencial eléctrica de esa partícula. Considérese una pequeña carga positiva ubicada a cierta distancia de una esfera con carga positiva, como se ve en la figura 13. Si se desea acercar la pequeña carga a la esfera, se consumirá energía con el fin de vencer la repulsión eléctrica, es decir, se realizará trabajo al empujar la carga contra el campo eléctrico de la esfera. Este trabajo realizado al mover la pequeña carga hasta su nueva ubicación en el campo, lo gana esa carga. Esa energía que ahora posee la carga en virtud de su posición en el campo eléctrico, se denomina energía potencial eléctrica. Si se libera la carga, se acelerará en una dirección que la aleja de la esfera, su energía potencial eléctrica se transforma en energía cinética.

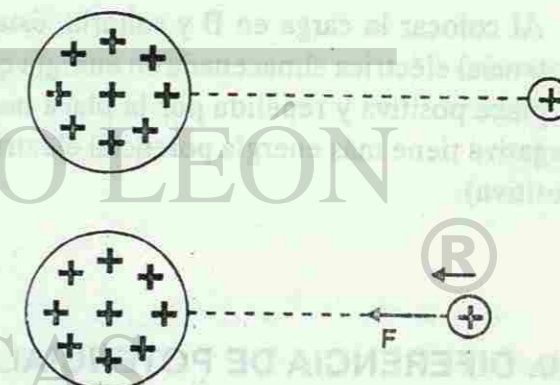


Fig. No. 13.

Consideremos el campo eléctrico uniforme entre las dos placas paralelas de cargas opuestas, como se muestra en la figura 14.

La carga pequeña tiene más energía potencial en (b) que en (a), debido al trabajo que se realizó para llevarla hasta la ubicación más cercana.

El campo eléctrico es constante y está dirigido como se muestra en la figura 14, si se coloca una carga positiva  $q +$  en el interior de las placas, sobre ésta actuará una fuerza  $Eq$  dirigida hacia la derecha. Supóngase que la carga está inicialmente en el punto A de la figura. Si se quiere llevar al punto B, hay que aplicar una fuerza,  $F = -Eq$  durante todo el recorrido, por consiguiente, se realiza un trabajo al llevar la carga de A a B. En consecuencia, se almacena energía en la carga: energía potencial eléctrica. Al colocar la carga en el punto B, podemos soltarla y recuperar la energía potencial en forma de energía cinética. La carga en B será atraída hacia A por la fuerza  $Eq$  que actúa sobre ella. Así pues, cuando soltamos la partícula en B, adquirirá una aceleración en dirección de A.

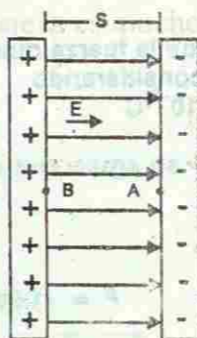


Fig. No. 14.

Placas paralelas con cargas opuestas.

Del mismo modo que se almacena energía potencial gravitacional en un objeto al levantarlo contra la acción de la gravedad, también se almacena energía potencial eléctrica en un objeto cargado al tirarlo de él, en contra del campo eléctrico que actúa sobre el objeto. La energía potencial gravitacional de un objeto en el punto B, en relación con el punto A, es el trabajo que debe realizarse contra la gravedad para moverlo de A a B. De manera análoga, en electricidad se define la energía potencial eléctrica de un objeto cargado en el punto B en relación con otro punto A:

La energía potencial eléctrica de una carga en el punto B en relación con el punto A es igual al trabajo efectuado contra las fuerzas eléctricas que se necesita para llevar la carga de A a B.

Al colocar la carga en B y soltarla, ésta se mueve hacia A, transformándose su energía potencial eléctrica almacenada en energía cinética. Si la carga fuera negativa, sería atraída por la placa positiva y repelida por la placa negativa. De tal forma que una partícula con carga negativa tiene más energía potencial eléctrica en A (placa negativa) que en el punto B (placa positiva).

## 10. DIFERENCIA DE POTENCIAL

Supongamos que llevamos una carga positiva  $q$  del punto A al punto B, en la figura 14. Para esto se requiere efectuar un trabajo. Definimos la diferencia de potencial (o voltaje) entre A y B como ese trabajo dividido entre la carga  $q$ . En otras palabras, la diferencia de potencial entre dos puntos es el trabajo que hay que hacer para mover una carga de prueba de  $+1C$  de un punto a otro.

La diferencia de potencial entre el punto A y el punto B es el trabajo necesario para llevar una carga positiva de prueba de A a B, es decir, es el trabajo por unidad de carga positiva.

La unidad de diferencia de potencial (o voltaje) es la unidad de trabajo dividida entre la unidad de carga, que es joule entre coulomb, a esta unidad la llamamos volt (V).

$$1 \text{ volt (V)} = \frac{1 \text{ joule (J)}}{1 \text{ coulomb (C)}}$$

Se acostumbra a representar con  $V_{AB}$  a la diferencia de potencial entre los puntos A y B.

Vamos a calcular la diferencia de potencial entre los puntos A y B en la figura 14. Para mover la carga  $q$  positiva de A a B, hay que aplicar una fuerza constante  $F$  de magnitud  $Eq$ . Por lo tanto, el trabajo necesario para llevar la carga  $q$  de A a B es

Trabajo para mover  $q = \text{fuerza} \times \text{distancia} = (Eq) s$

La diferencia de potencial entre A y B es el trabajo por unidad de carga, de tal forma que

$$V_{AB} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{carga}}$$

$$V_{AB} = \frac{Eqs}{q}$$

$$V = Es \quad \text{En donde E es constante.}$$

En general, se tiene que

$V_{AB}$  es el trabajo que debe efectuarse para llevar una unidad de carga positiva de A a B.

Si se conoce la diferencia de potencial o voltaje entre los puntos A y B, se requiere un trabajo para mover la carga  $q$  de A a B, el cual viene dado por

$$\text{Trabajo} = q V_{AB}$$

### 10.1 DIFERENCIA DE POTENCIAL ENTRE DOS PLACAS PARALELAS

Consideremos el campo eléctrico entre dos placas metálicas paralelas, con cargas opuestas, separadas una distancia fija, como se muestra en la figura 15. Una placa se carga positivamente, mientras que la otra se carga negativamente. El campo eléctrico que hay entre las placas es uniforme, excepto en los bordes de las placas, ver figura 15.

En un campo eléctrico uniforme, el trabajo necesario para mover una carga en una distancia  $s$  está dado por

$$W = Fs$$

el potencial, que es el trabajo por unidad de carga, está dado por

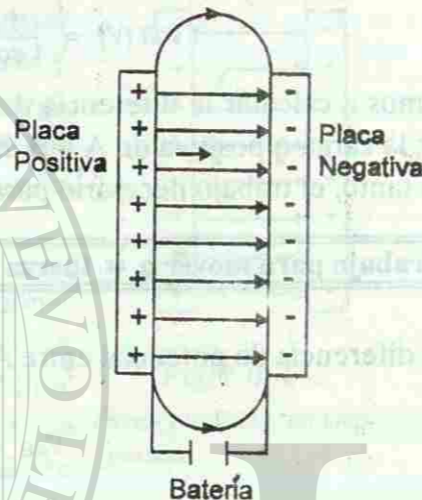
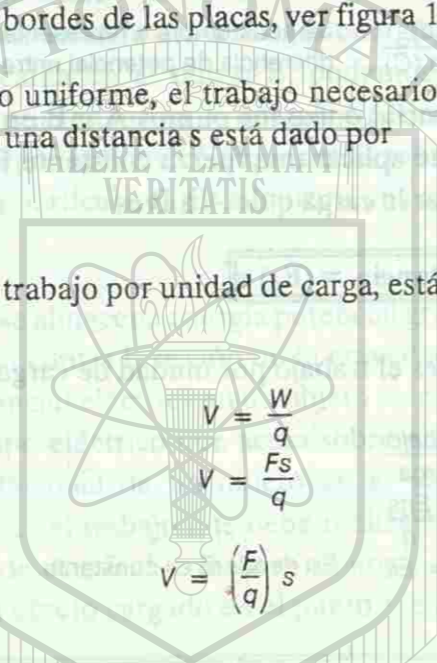


Fig. No. 15.  
Campo eléctrico entre dos placas paralelas.

como  $E = \frac{F}{q}$  es la intensidad del campo eléctrico, entonces:

$$V = Es$$

el campo eléctrico entre dos placas paralelas con cargas iguales y de signos opuestos, es prácticamente uniforme.

**Ejemplo 6.**

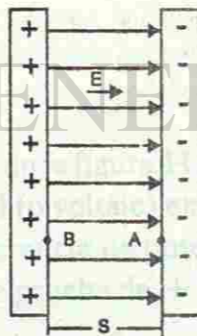
Si un protón se libera en el punto B de la figura, ¿Cuál es su rapidez con la que choca contra la placa A? Supóngase que el voltaje  $V_{AB} = 45V$

- Datos:  
 $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  masa del protón  
 $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$  carga del protón  
 $V_{AB} = 45V$

como el protón tiene carga positiva, entonces, el punto B se encuentra a un mayor potencial que el punto A. Si el protón se suelta en B, éste se acelera hacia A, de tal forma que la energía potencial eléctrica del protón se transforma en energía cinética.

Como la energía potencial eléctrica en B es el trabajo hecho para mover la carga desde A, se tiene que: el cambio en su energía cinética = al trabajo hecho para mover la carga de A a B.

$$E_k - E_{k0} = W_{AB}$$



como el protón inicia su movimiento desde el reposo, entonces, la energía cinética inicial  $E_{k0} = 0$ , de tal forma que

$$E_k = V_{AB} q$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = V_{AB} q$$

$$v^2 = \frac{2 V_{AB} q}{m}$$

$$v^2 = \frac{2(45V)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$v = 9.28 \frac{m}{s}$$

### 11. LA CORRIENTE ELÉCTRICA

Ahora se va a estudiar la electricidad en movimiento dentro de un material conductor. La parte de la Física encargada de estudiar la carga eléctrica en movimiento dentro de un conductor, se llama electrodinámica.

Como los protones están fuertemente unidos al núcleo del átomo, son los electrones los que en realidad tienen la libertad para moverse. Por ello, se puede decir que la corriente eléctrica se origina, por el movimiento o flujo de electrones a través de un conductor, el cual se produce debido a que existe una diferencia de potencial y los electrones circulan de una terminal negativa a una positiva. De manera convencional se dice que el sentido de la corriente es del polo positivo al negativo.

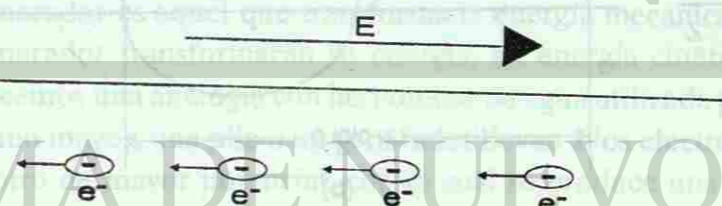


Fig. No. 16.

Flujo de electrones en sentido contrario al campo eléctrico.

Quando dos cuerpos cargados con diferente potencial se conectan mediante un alambre conductor, las cargas se mueven de un punto de potencial eléctrico más alto al más bajo, lo cual genera una corriente eléctrica, que cesará cuando el voltaje sea igual en todos los puntos. Si se lograra mantener en forma constante la diferencia de potencial entre los cuerpos electrificados, el flujo de electrones sería continuo.

La corriente eléctrica se transmite por los conductores a una velocidad próxima a la de la luz: 300,000 Km/s. Sin embargo, los electrones no se desplazan a esta velocidad, en general, su velocidad promedio es de 10 cm/s. Esto se debe a que cada electrón obliga al siguiente a moverse en forma instantánea, a través del material conductor.

El flujo de electrones se presenta en los metales, en los líquidos llamados electrolitos y en los gases. En el primer caso se debe a la facilidad que tienen los electrones más alejados del núcleo de separarse de sus órbitas cuando se les somete a la influencia de campos eléctricos, con los cuales se convierten en electrones libres, dando origen a un flujo continuo de electrones de átomo en átomo. Los electrolitos son soluciones capaces de conducir la corriente eléctrica. Tal es el caso de las bases, ácidos y sales que al ser diluidos en agua, se disocian en sus iones correspondientes. La mayoría de los gases conducen la electricidad cuando por algún medio se les ioniza.

Existen dos clases de corriente eléctrica: la continua (cc) y la alterna (ca). La corriente continua o directa se genera cuando el campo eléctrico permanece constante, esto provoca que los electrones se muevan siempre en el mismo sentido, es decir, de negativo a positivo. La corriente alterna se origina cuando el campo eléctrico cambia alternadamente de sentido, por lo que los electrones oscilan a uno y otro lado del conductor, así, el polo positivo cambia negativo y viceversa. Cuando el electrón cambia de sentido, efectúa un cambio de signo en la corriente eléctrica (ver figura 17). Dos cambios consecutivos de signo constituyen un ciclo. El número de ciclos por segundo, conocida como frecuencia, es en general de 60 ciclos/segundo.

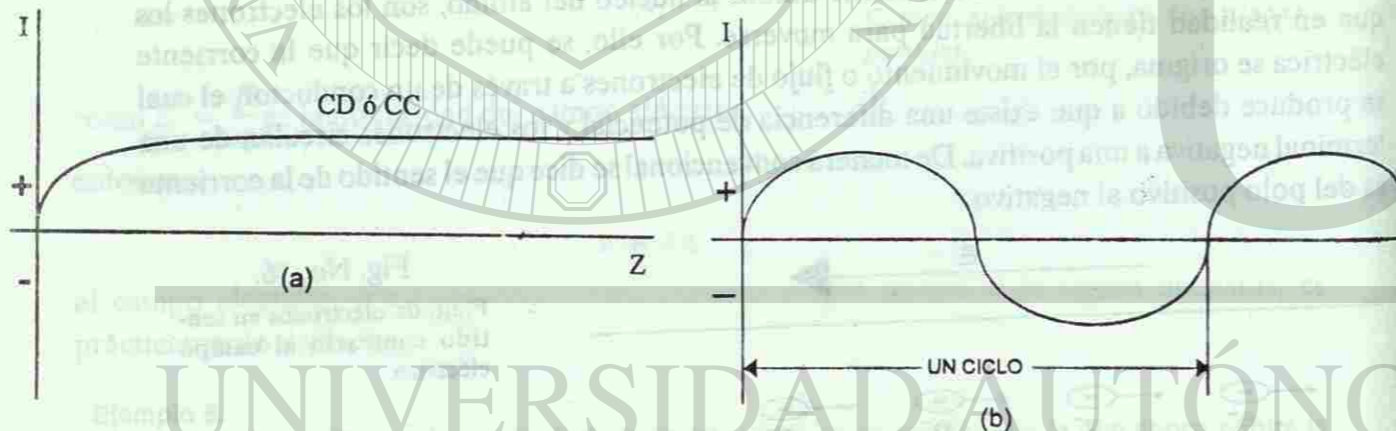


Fig. No. 17.

Representación gráfica de la corriente eléctrica (I) a) corriente continua o directa; b) corriente alterna

### 11.1 INTENSIDAD DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA

La intensidad de la corriente eléctrica es la cantidad de carga eléctrica que pasa por una sección transversal determinada de un material conductor en un segundo, es decir

$$I = \frac{q}{t}$$

I: Intensidad de la corriente eléctrica en C/s  
q: carga eléctrica que pasa por una sección determinada en un conductor, dada en coulomb (C) ∴ tiempo que tarda en pasar la carga eléctrica q en segundos (s)

La unidad de corriente eléctrica usada en el Sistema Internacional (S.I.) para medir la corriente eléctrica es el ampere (A), el cual equivale al paso de una carga de 1 coulomb (C) a través de una sección de un conductor en un segundo.

$$1 \text{ ampere} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ segundo}}$$

$$1 \text{ A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}} \quad \text{Se acostumbra a utilizar el millampere} = 10^{-3} \text{ A} \text{ ya que el ampere es una unidad muy grande.}$$

#### Ejemplo 7.

Determinar la intensidad de la corriente eléctrica en un conductor cuando circulan 86 coulomb por una sección del mismo en 1 hora. De el resultado en amperes y en miliamperes.

Datos:

$$q = 86 \text{ C}$$

$$t = 1 \text{ h} = 3,600 \text{ s}$$

$$I = \frac{q}{t}$$

$$I = \frac{86 \text{ C}}{3,600 \text{ s}}$$

$$I = 0.0238 \text{ A} = 23.8 \text{ mA}$$

Como ya lo señalamos, la corriente eléctrica se origina por el movimiento o flujo de electrones a través de un conductor, debido a la existencia de una diferencia de potencial. Si se desea que una corriente eléctrica fluya continuamente por un conductor, debe existir un suministro constante de electrones.

Para obtener un suministro continuo de electrones se utilizan las pilas y los generadores eléctricos. Una pila es un dispositivo que transforma la energía química en eléctrica, y un generador es aquél que transforma la energía mecánica en eléctrica, es decir, una pila o un generador transformarán su energía, en energía cinética o potencial de los electrones. Si hacemos una analogía con las bombas de agua utilizada para elevar el agua de un nivel menor a uno mayor, una pila o un generador llevan a los electrones de un punto de menor potencial a otro de mayor potencial, con lo cual se produce una diferencia de potencial permanente entre los electrones que se encuentran en cada extremo de sus terminales. Esta diferencia de potencial impulsa la corriente eléctrica a través del conductor.

Un dispositivo con la capacidad de mantener una diferencia de potencial o voltaje entre dos puntos se llama fuente de fuerza electromotriz (fem). Una fuente de fem es un dispositivo que convierte la energía química, mecánica u otras formas de energía en la energía eléctrica necesaria para mantener un flujo continuo de carga eléctrica. Por tanto la fuerza electromotriz aplicada en un circuito eléctrico es igual a la energía suministrada para que la unidad de carga recorra el circuito completo.

$$fem = \frac{W}{q}$$

Donde fem nos representa la fuerza electromotriz en volts y W el trabajo en joules, realizado para que la carga  $q$  recorra todo el circuito. La fuerza electromotriz representa un voltaje o diferencia de potencial y no una fuerza. Por ejemplo, un acumulador de 12 V realiza un trabajo de 12 J para mover una carga eléctrica de 1 C del extremo del circuito de menor potencial al de mayor potencial. Una corriente sostenida requiere de un circuito completo y de una fuente de voltaje. Mediante alambres conductores se completa un circuito eléctrico, ver figura 18.

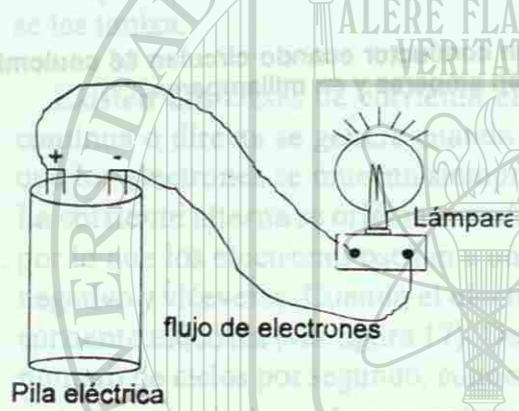


Fig. No. 18.

Circuito eléctrico formado por una fuente de voltaje, un alambre conductor y una lámpara.

Una batería es un agrupamiento de dos o más pilas unidas en serie o en paralelo. Por ejemplo, tres pilas secas de 1.5 V se pueden agrupar en serie, en donde se une el polo positivo de una con el polo negativo de la otra y así sucesivamente, de acuerdo con el voltaje que se desea obtener, ver figura 19

La conexión de pilas en paralelo se obtiene al unir, por una parte, todos los polos positivos y por el otro, todos los polos negativos, ver figura 20

En las figuras anteriores se observa que para medir una corriente eléctrica se utiliza el amperímetro, el cual se conecta en serie y para medir el voltaje se utiliza el voltímetro, el cual se conecta en paralelo.

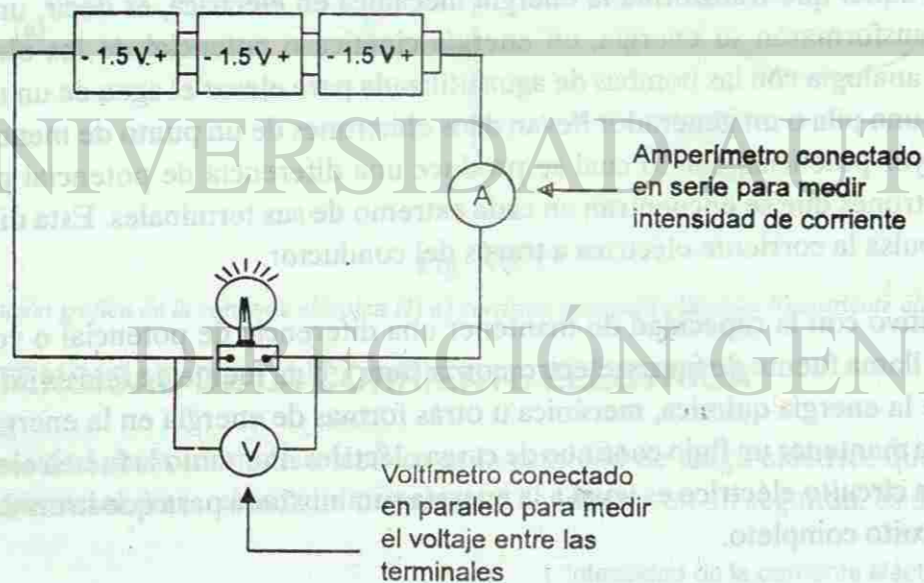


Fig. No. 19.

FIGURA 19 Conexiones de pilas en serie:  $V_T = V_1 + V_2 + V_3 = 4.5V$

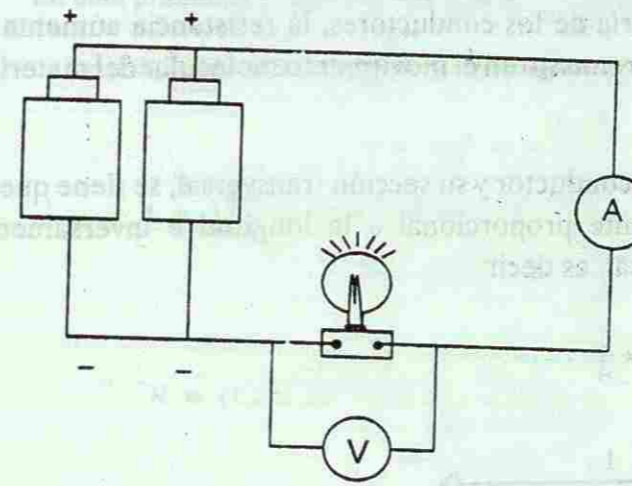


Fig. No. 20.

Conexiones de pilas en paralelo. El voltaje total es igual a 1.5 V, como si fuera una sola pila, pero aumenta el valor de la intensidad de la corriente a medida que se conectan más pilas.

## 12. RESISTENCIA ELÉCTRICA

Todos los materiales presentan cierta oposición al flujo de electrones o corriente eléctrica, aunque unos obstruyen la circulación más que otros. De tal forma que la resistencia eléctrica es la oposición que presenta un conductor al paso de la corriente eléctrica.

Como ya se dejó en claro, la corriente circula con relativa facilidad en los metales, por ello se utilizan en la construcción de circuitos y en la conducción de la energía eléctrica. Los alambres conductores que forman parte de los circuitos están forrados por un aislante, como el hule o algún recubrimiento plástico, a fin de evitar algún contacto accidental con otro conductor y que la corriente pase de un alambre a otro.

Los factores que influyen en la resistencia eléctrica de un material conductor son:

**La naturaleza del conductor.** Si tomamos alambres de la misma longitud y sección transversal, como por ejemplo, plata, cobre, aluminio y hierro, se puede verificar que la plata tiene una menor resistencia y que el hierro tiene una mayor resistencia.

**La longitud del material.** A mayor longitud mayor resistencia. Si se duplica su longitud, su resistencia también se duplica. Si la longitud disminuye, la resistencia también disminuye.

**Su sección o área transversal.** Si la sección o área transversal del material conductor se duplica, la resistencia del material se reduce a la mitad. Si la sección transversal disminuye, la resistencia del material aumenta.

**La temperatura.** En el caso de la mayoría de los conductores, la resistencia aumenta al elevar la temperatura. Esto se debe a un incremento en el movimiento molecular del material, lo cual dificulta el flujo de electrones.

Considerando la longitud de un alambre conductor y su sección transversal, se tiene que la resistencia (R) del material es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área de su sección transversal, es decir

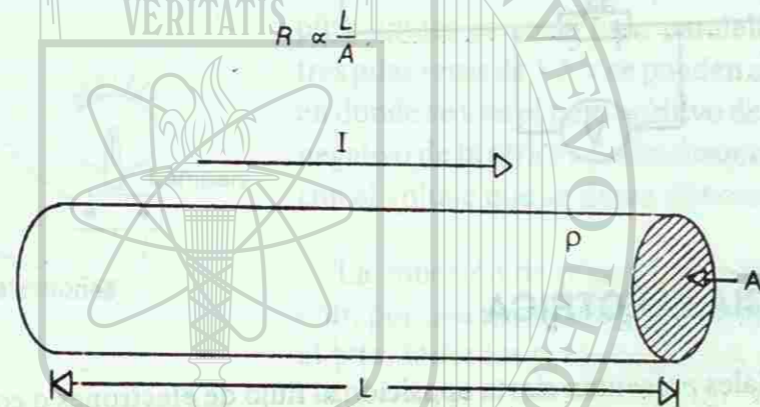


Fig. No. 21.

FIGURA 21.- Los materiales conductores presentan resistencia a la corriente eléctrica.

Por otra parte, se tiene que los materiales ofrecen una resistencia variable a las corrientes eléctricas a consecuencia de su composición. La dependencia de la resistencia respecto a su material y a su temperatura se caracteriza por la resistividad  $\rho$ , de tal forma que

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

La unidad empleada para medir la resistencia eléctrica es el ohm ( $\Omega$ ) en honor al físico alemán George Simon Ohm, la cual se define como la resistencia opuesta a una corriente continua de electrones por una columna de mercurio a  $0^\circ\text{C}$  de  $1\text{ mm}^2$  de sección transversal y 106.3 centímetros de largo.

Las unidades de la resistividad, según la ecuación anterior son:

$$\rho = \frac{R [\Omega] A [\text{m}^2]}{L [\text{m}]}$$

En la siguiente tabla se dan algunos valores del coeficiente de resistividad, a la temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

Material	Resistividad $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) $\times 10^{-8}$
Aluminio	2.8
Cobre	1.7
Oro	2.4
Hierro	10
Níquel	7.8
Platino	10
Plata	1.6
Tungsteno	5.6

**Ejemplo 8.**

Un alambre de cobre tiene una longitud de 10 m y una sección transversal cuyo diámetro es de 0.25 cm. ¿Cuál será su resistencia?

En este problema consideramos que la resistividad del cobre, a su temperatura ambiente ( $20^\circ\text{C}$ ), es  $\rho = 1.7 \times 10^{-8}\text{ m}$ .

como  $d = 0.25\text{ cm} = 0.0025\text{ m} = 2.5 \times 10^{-3}\text{ m}$ , el área de la sección transversal es:

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$A = \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) = \frac{(3.14)(2.5 \times 10^{-3}\text{ m})^2}{4}$$

$$A = 4.90 \times 10^{-6}\text{ m}^2$$

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$R = (1.7 \times 10^{-8}\text{ }\Omega\text{m}) \frac{(10\text{ m})}{4.90 \times 10^{-6}\text{ m}^2}$$

$$R = 3.46 \times 10^{-2}\text{ }\Omega$$

$$R = 0.0346\text{ }\Omega$$

**13. LEY DE OHM**

George S. Ohm observó que si se aumenta la diferencia de potencial o voltaje en un circuito, aumenta la intensidad de la corriente eléctrica; también comprobó que al aumentar la resistencia del conductor, disminuye la intensidad de la corriente eléctrica. Con base en estas observaciones enunció la ley que lleva su nombre (Ley de Ohm): la intensidad de la corriente eléctrica que pasa por un conductor en un circuito es directamente proporcional a la diferencia de potencial o voltaje aplicado a sus extremos e inversamente proporcional a la resistencia del conductor. Matemáticamente esta ley se expresa de la siguiente manera:

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{o} \quad V = IR$$

Si se despeja la resistencia R, se tiene que

$$R = \frac{V}{I}$$

con base en esta ecuación, se puede definir la resistencia eléctrica de la siguiente manera: la resistencia de un conductor es de 1 ohm ( $\Omega$ ) si existe una corriente de 1 ampere, cuando se mantiene un voltaje de 1 volt, a través de la resistencia, es decir

$$1\text{ ohm } [\Omega] = \frac{1\text{ volt } [V]}{1\text{ ampere } [A]}$$

Un circuito eléctrico es un sistema en el cual la corriente fluye por conductor en una trayectoria completa, debido a una diferencia de potencial o voltaje, ver figura 22.



Fig. No. 22.

Representación gráfica de un circuito eléctrico. El símbolo representa a la fuente de voltaje y la resistencia del circuito.

El flujo real de la carga en un circuito eléctrico se encuentra en la dirección del movimiento neto de los electrones, es decir, del polo negativo hacia el polo positivo, a través del alambre o material conductor. Sin embargo, por convención, se supone que la dirección de la corriente eléctrica en un circuito de corriente directa es en la cual se desplazarían los portadores de carga positiva. Así pues, la dirección de la corriente convencional es opuesta al flujo real de los electrones, es decir, se aleja de la terminal positiva de la fuente, ver figura 22.

La corriente convencional se basa en razones históricas. Según hemos visto, antiguamente se pensaba que la electricidad se debía a un "fluido" eléctrico, de tal forma que cuando un objeto acumulaba un exceso de fluido, se cargaba "positivamente", de modo que la "corriente" se concebía en términos del flujo del de mayor (+) al de menor (-) fluido.

Un foco conectado a una pila es un ejemplo de circuito simple, ver figura 23.

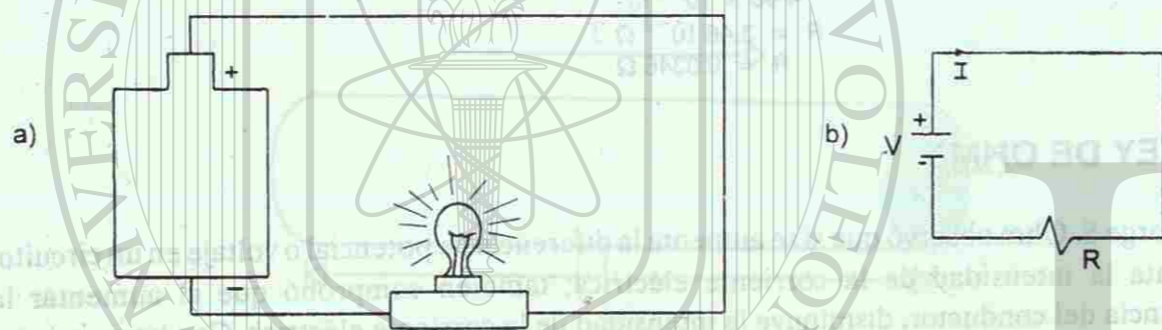


Fig. No. 23.

FIGURA 23 a) Circuito eléctrico simple que consta de una diferencia de potencial o voltaje, corriente eléctrica y una resistencia. b) Representación simbólica del voltaje, (V) la corriente eléctrica (I) y la resistencia (R).

En cualquier circuito eléctrico por donde se desplazan los electrones a través de una trayectoria cerrada, existe un voltaje (V), una corriente (I) y una resistencia (R). El circuito está cerrado cuando la corriente eléctrica circula en todo el sistema y abierto, cuando no circula por él.

Cualquier componente de un circuito de corriente directa que no sea una fuente de voltaje puede representarse como una resistencia. Incluso los alambres de conexión de un circuito tienen resistencias, pero éstas suelen considerarse despreciables.

#### Ejemplo 9.

Determinar la intensidad de la corriente eléctrica a través de una resistencia de 30 ohm al aplicarle una diferencia de potencial de 90 volts.

Datos:

$$R = 30 \Omega$$

$$V = 90 \text{ V}$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{90 \text{ V}}{30 \Omega} = 3 \text{ A}$$

#### Ejemplo 10.

Calcular la diferencia de potencial aplicada a una resistencia de 10 ohm, si por ella fluyen 5 ampere.

Datos:

$$R = 10 \text{ ohm}$$

$$I = 5 \text{ A}$$

$$I = \frac{V}{R}$$

$$V = IR$$

$$V = (5 \text{ A})(10 \Omega)$$

$$V = 50 \text{ V}$$

Los circuitos eléctricos pueden estar conectados en serie, en paralelo o en forma combinada. Un circuito está en serie cuando los elementos conductores están unidos uno a continuación de otro; es por ello que toda la corriente eléctrica debe circular por cada uno de los elementos del circuito, de forma tal que si se abre el circuito en cualquier parte, se interrumpe totalmente la corriente, ver figura 24.

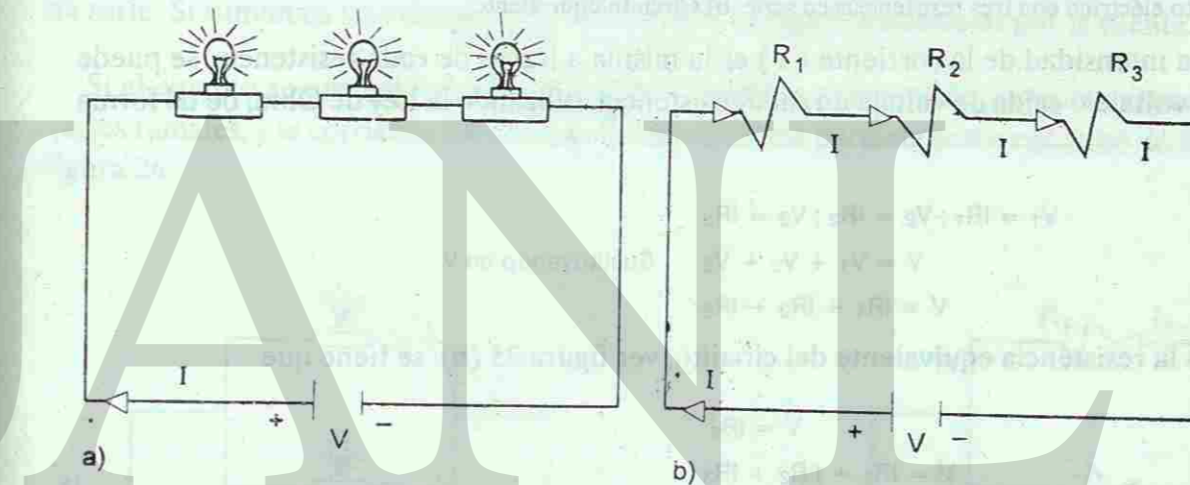


Fig. No. 24.

a) Circuito con todos sus elementos en serie. b) Diagrama del circuito.

Cuando las resistencias están conectadas en serie, se unen por sus extremos una a continuación de la otra, de tal forma que la corriente que pasa por una será la misma en las demás. Al conectar dos o más resistencias en serie, se puede calcular la resistencia equivalente ( $R_e$ ), la cual presenta la misma oposición al paso de la corriente.

El voltaje (V) aplicado a un circuito en serie, ver figura 25 (a), formado por tres resistencias en serie  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ , se divide entre los dispositivos eléctricos individuales en el circuito, de modo que la suma de las "caídas de voltaje" a través de cada una, es igual al voltaje total suministrado por la fuente. Esto se deduce del hecho de que el trabajo realizado para mover cada unidad de carga a través del circuito completo es igual a la suma de los trabajos realizados para mover cada unidad de carga a través de cada dispositivo eléctrico en sucesión. Es decir:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$



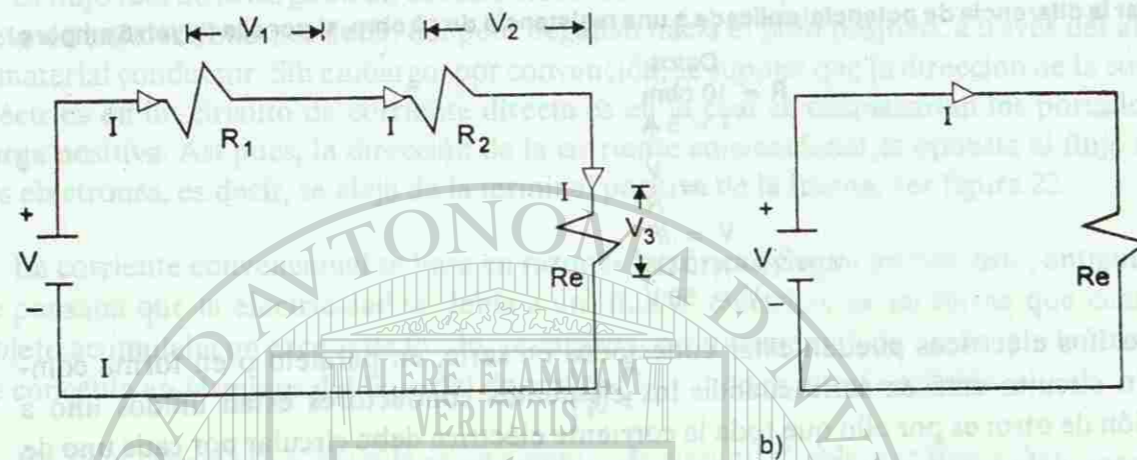


Fig. No. 25.

a) Circuito eléctrico con tres resistencias en serie. b) Circuito equivalente

Como la intensidad de la corriente ( $I$ ) es la misma a través de cada resistencia, se puede calcular el voltaje o caída de voltaje en cada resistencia utilizando la Ley de Ohm, de tal forma que

$$V_1 = IR_1; V_2 = IR_2; V_3 = IR_3$$

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad \text{Sustituyendo en V.}$$

$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

Si  $R_e$  es la resistencia equivalente del circuito, ver figura 25 (b), se tiene que

$$V = IR_e$$

$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

$$IR_e = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 \quad R_e \text{ representa la resistencia equivalente de las tres resistencias en serie.}$$

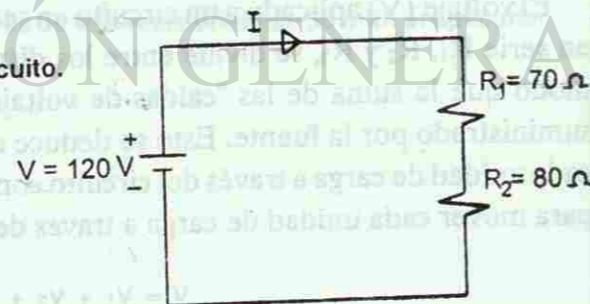
Después de calcular la resistencia equivalente se puede calcular la corriente que circula por el circuito o el voltaje aplicado por la fuente de energía. Veamos algunos ejemplos.

**Ejemplo 11.**

Los focos uno de 70 ohm y otro de 80 ohm, se conectan en serie con una diferencia de potencial de 120V, como se muestra en el siguiente diagrama.

- a) Calcular la resistencia equivalente ( $R_e$ )
- b) Calcular la corriente eléctrica que circula por el circuito.
- c) Determinar la caída de voltaje en cada resistencia.

Datos:  
 $V = 120 \text{ V}$   
 $R_1 = 70 \text{ ohm}$   
 $R_2 = 80 \text{ ohm}$   
 $R_e = R_1 + R_2$



$$R_e = 70 \Omega + 80 \Omega$$

$$R_e = 150 \Omega$$

$$I = \frac{V}{R_e}$$

$$I = \frac{120 \text{ V}}{150 \Omega}$$

$$I = 0.8 \text{ A}$$

$$V_1 = IR_1$$

$$V_1 = (0.8 \text{ A})(70 \Omega)$$

$$V_1 = 56 \text{ V}$$

$$V_2 = IR_2$$

$$V_2 = (0.8 \text{ A})(80 \Omega)$$

$$V_2 = 64 \text{ V}$$

En el cálculo de  $V_1$  y de  $V_2$  se utiliza la misma corriente ( $I$ ), puesto que las resistencias están en serie. Si sumamos los voltajes  $V_1$  y  $V_2$  nos da el voltaje suministrado por la fuente.

Si el circuito se encuentra en paralelo, los elementos conductores se hallan separados en varios ramales, y la corriente eléctrica se divide en forma paralela entre cada uno de ellos, ver figura 26

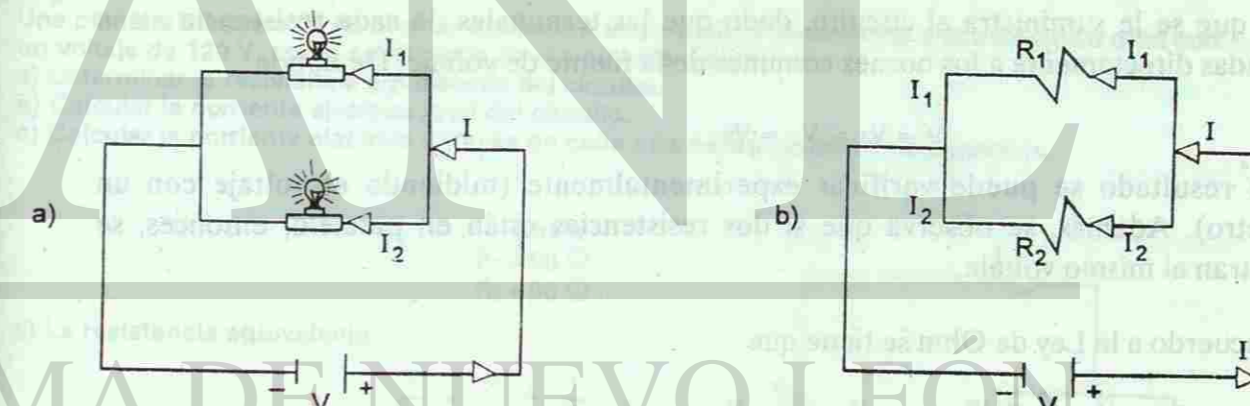


Fig. No. 26.

a) Conexiones de resistencias en paralelo. b) Diagrama del circuito con resistencias en paralelo.

Cuando las resistencias se encuentran en paralelo sus terminales se unen en dos bornes comunes que se enlazan a la fuente de energía o voltaje.

En esta conexión la corriente eléctrica se divide en cada uno de los ramales, como se muestra en la figura 27.

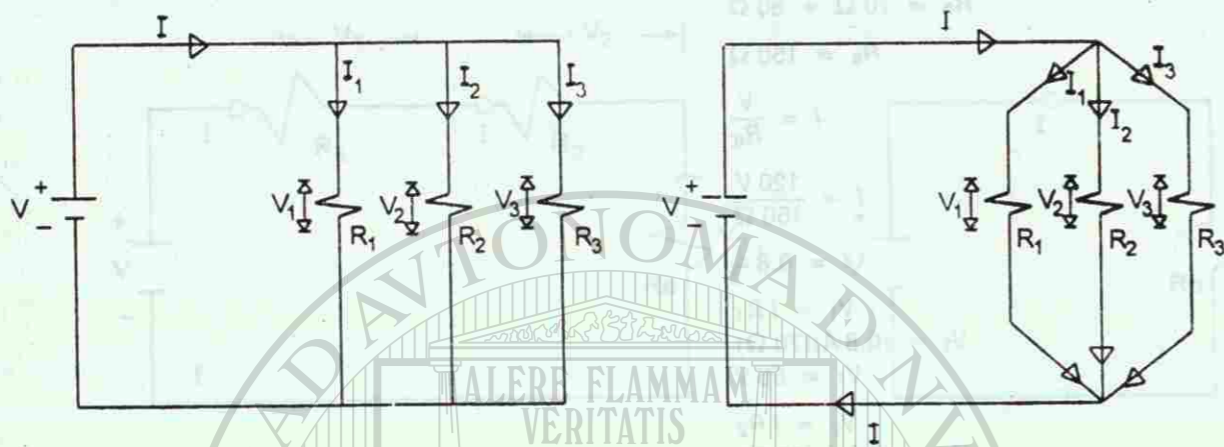


Fig. No. 27.

Resistencias conectadas en paralelo con la fuente de voltaje.

En la figura 27 tenemos tres resistencias  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  conectadas en paralelo con las terminales de una fuente de energía. Si estas resistencias permiten que por ellas circulen las corrientes  $I_1$ ,  $I_2$ , e  $I_3$ , respectivamente, el valor de la intensidad de la corriente total será

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

respecto al voltaje aplicado a cada resistencia, su valor es igual para cada una de ellas y es el mismo que se le suministra al circuito, dado que las terminales de cada resistencia están conectadas directamente a los bornes comunes de la fuente de voltaje. De donde

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

Este resultado se puede verificar experimentalmente (midiendo el voltaje con un voltímetro). Además, se observa que si dos resistencias están en paralelo, entonces, se encuentran al mismo voltaje.

De acuerdo a la Ley de Ohm se tiene que

$$I = \frac{V}{R_e}; I_1 = \frac{V}{R_1}; I_2 = \frac{V}{R_2}; I_3 = \frac{V}{R_3}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$\frac{V}{R_e} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

es decir, el recíproco de la resistencia equivalente del circuito ( $1/R_e$ ) es igual a la suma de los recíprocos de las resistencias componentes. Calculada la resistencia equivalente, podemos calcular el valor de la corriente eléctrica que circula en el circuito, aplicando la Ley de Ohm. Veamos algunos ejemplos.

Ejemplo 12.

Calcular la resistencia equivalente de cuatro resistencias cuyos valores son:  $R_1 = 10 \text{ ohm}$ ,  $R_2 = 20 \text{ ohm}$ ,  $R_3 = 25 \text{ ohm}$ ,  $R_4 = 50 \text{ ohm}$  conectadas en: a) serie y b) paralelo

Datos:

- $R_1 = 10 \Omega$
- $R_2 = 20 \Omega$
- $R_3 = 25 \Omega$
- $R_4 = 50 \Omega$

a) En serie:  $R_e = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$

$$R_e = 10 \Omega + 20 \Omega + 25 \Omega + 50 \Omega$$

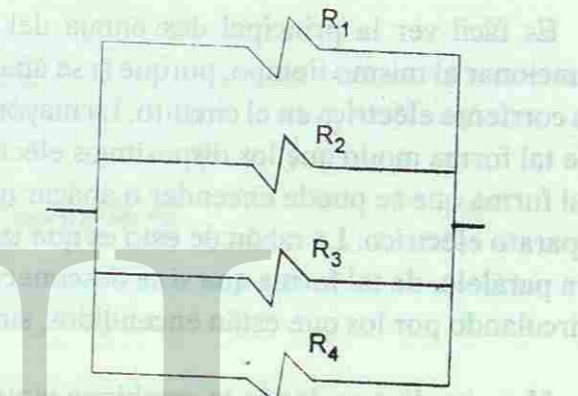
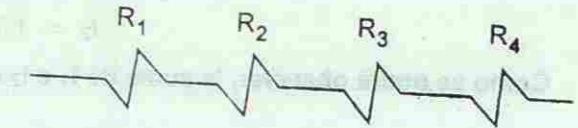
$$R_e = 105 \text{ ohm}$$

b) En paralelo:  $\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{10 \Omega} + \frac{1}{20 \Omega} + \frac{1}{25 \Omega} + \frac{1}{50 \Omega}$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{0.21}{\Omega}$$

$$R_e = 4.76 \Omega$$



Ejemplo 13.

Una plancha eléctrica de 60 ohm se encuentra en paralelo a un tostador eléctrico de 90 ohm con un voltaje de 120 V, como se muestra en el siguiente diagram a.

- a) Determinar la resistencia equivalente del circuito.
- b) Calcular la corriente eléctrica total del circuito.
- c) Calcular la corriente eléctrica a través de cada una de las resistencias eléctricas.

Datos:

- $R_1 = 60 \Omega$
- $R_2 = 90 \Omega$

a) La resistencia equivalente

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{60 \Omega} + \frac{1}{90 \Omega}$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{0.028}{\Omega}$$

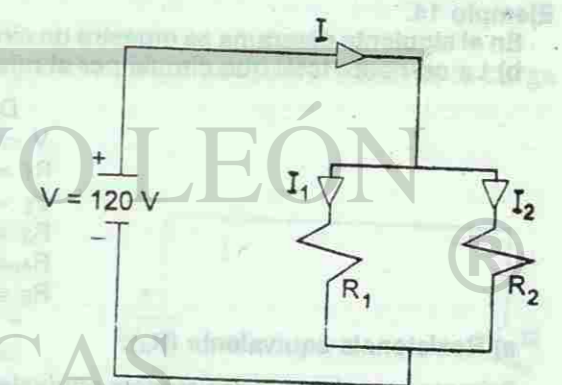
$$R_e = 35.71 \Omega$$

b) La corriente total del circuito

$$I = \frac{V}{R_e}$$

$$I = \frac{120 \text{ V}}{35.71 \Omega}$$

$$I = 3.3 \text{ A}$$



c) La corriente eléctrica que circula por cada resistencia.

$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{120 \text{ V}}{60 \Omega}$$

$$I_1 = 2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{120 \text{ V}}{90 \Omega}$$

$$I_2 = 1.3 \text{ A}$$

Como se podrá observar, la suma de  $I_1$  e  $I_2$  es igual a la corriente eléctrica total del circuito.

Es fácil ver la principal desventaja del circuito en serie; todos los aparatos deben de funcionar al mismo tiempo, porque si se apaga cualquiera de ellos, habrá una interrupción de la corriente eléctrica en el circuito. La mayor parte de los circuitos eléctricos están conectados de tal forma modo que los dispositivos eléctricos puedan funcionar independientemente. De tal forma que se puede encender o apagar una lámpara sin afectar el funcionamiento de otro aparato eléctrico. La razón de esto es que tales dispositivos no están conectados en serie sino en paralelo, de tal forma que si se desconecta o apaga un aparato, la corriente eléctrica sigue circulando por los que están encendidos, sin interrupción.

Hay circuitos en donde se combinan tanto resistencias en serie como en paralelo. La forma de resolver matemáticamente estos circuitos es calculando parte por parte, las resistencias equivalentes de cada conexión, ya sea en serie o en paralelo, de tal manera que se simplifique el circuito, hasta encontrar la resistencia equivalente de todo el sistema eléctrico. Veamos un ejemplo de resistencias combinadas.

#### Ejemplo 14.

En el siguiente diagrama se muestra un circuito. Calcular: a) La resistencia equivalente del circuito  
b) La corriente total que circula por el mismo.

Datos:

$$V = 40 \text{ V}$$

$$R_1 = 5 \Omega$$

$$R_2 = 4 \Omega$$

$$R_3 = 6 \Omega$$

$$R_4 = 2 \Omega$$

$$R_5 = 3 \Omega$$

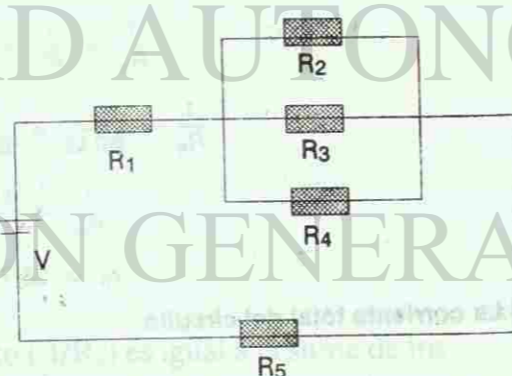
a) Resistencia equivalente ( $R_e$ ):

Primero se calcula la resistencia equivalente ( $R_{e1}$ ) de las resistencia  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ , las cuales se encuentran en paralelo.

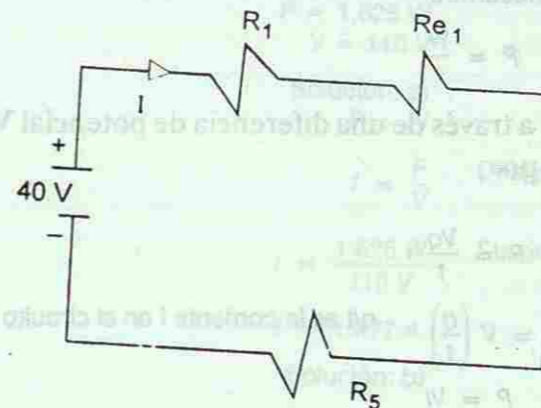
$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{1}{4\Omega} + \frac{1}{6\Omega} + \frac{1}{2\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{0.916}{\Omega}$$

$$R_{e1} = 1.09 \Omega$$



Al encontrar la resistencia equivalente ( $R_{e1}$ ) de las resistencias en paralelo nuestro circuito se ha reducido a uno más simple con tres resistencias en serie:



en donde la resistencia total del circuito, representada por  $R_e$  es

$$R_e = R_1 + R_{e1} + R_5$$

$$R_e = 5 \text{ ohm} + 1.09 \text{ ohm} + 3 \text{ ohm}$$

$$R_e = 9.09 \text{ ohm}$$

b) La corriente total del circuito

$$I = \frac{V}{R_e} = \frac{40 \text{ V}}{9.09 \Omega}$$

$$I = 4.4 \text{ A}$$

## 14. POTENCIA ELÉCTRICA

Al analizar el circuito de la figura 27, se observa que el trabajo hecho para mover la carga eléctrica viene dado por

$$\text{Trabajo} = Vq$$

en donde se recordará que  $V$  nos representa el voltaje o diferencia de potencial, el cual equivale al trabajo por unidad de carga. La carga  $q$  recibe una energía  $Vq$  al llevarla del extremo de menor al de mayor potencial eléctrico. La carga pierde esta energía al generar calor mientras fluye por el circuito.

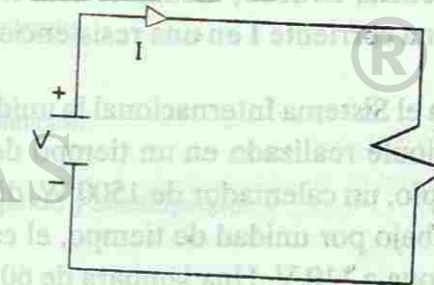


Fig. No. 28.

Potencia eléctrica.

La potencia de una batería cuando produce una corriente eléctrica ( $I$ ) viene dada por

$$\text{Potencia} \equiv \frac{\text{Trabajo realizado}}{\text{tiempo transcurrido}}$$

$$P = \frac{W}{t}$$

como la batería transporta una carga  $q$  a través de una diferencia de potencial  $V$ , en un tiempo  $t$ , se tiene que la potencia viene dada por

$$P = \frac{Vq}{t}$$

$$P = V \left( \frac{q}{t} \right)$$

$$P = VI$$

$q/t$  es la corriente  $I$  en el circuito, por lo cual

Esta expresión determina la potencia generada por una fuente de voltaje  $V$  al producir una corriente eléctrica  $I$ . Utilizando la Ley de Ohm, se tiene que

$$V = IR$$

$$P = VI = (IR)I$$

$$P = I^2 R$$

Además

$$I = \frac{V}{R}$$

$$P = VI = V \left( \frac{V}{R} \right)$$

$$P = \frac{V^2}{R}$$

A medida que la carga pasa por la resistencia cae de un potencial mayor a otro menor. De tal forma que la expresión anterior también nos da la potencia eléctrica disipada en la resistencia, es decir, mediante esta expresión se puede calcular la potencia eléctrica perdida por una corriente  $I$  en una resistencia  $R$ .

En el Sistema Internacional la unidad de potencia es el watt (W), el cual equivale al trabajo de 1 joule realizado en un tiempo de 1s. Esta unidad es muy utilizada en electricidad. Por ejemplo, un calentador de 1500 W, diseñado para un consumo de 110 V; como la potencia es el trabajo por unidad de tiempo, el calentador genera 1500 J. de calor cada segundo cuando funciona a 110 V. Una lámpara de 60 W, usa o disipa 60 J. de energía eléctrica cada segundo.

## Ejemplo 15.

Una cafetera eléctrica tiene 1,625 W a 110 V. a) ¿Cuánta corriente consume la cafetera? b) ¿Cuál es su resistencia?

Datos:

$$P = 1,625 \text{ W}$$

$$V = 110 \text{ V}$$

Solución: a)

$$P = IV$$

$$I = \frac{P}{V}$$

Despejando.

$$I = \frac{1,625 \text{ W}}{110 \text{ V}}$$

Sustituyendo.

$$I = 14.77 \text{ A.}$$

Solución: b)

$$R = \frac{V^2}{P}$$

Despejando.

$$R = \frac{(110 \text{ V})^2}{1,625 \text{ W}}$$

Sustituyendo.

$$R = 7.44 \Omega$$

Si en lugar de esta expresión de potencia, usamos la Ley de Ohm, nos resulta

$$V = IR$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{110 \text{ V}}{14.77 \text{ A}}$$

$$R = 7.44 \Omega$$

## Ejemplo 16.

Calcular la potencia eléctrica de un foco que recibe una diferencia de potencial de 120 V, si por su filamento circula una corriente de 0.5 A. ¿Cuál es el valor de la resistencia del foco?

Datos:

$$V = 120 \text{ V}$$

$$I = 0.5 \text{ A}$$

$$a) P = IV$$

Por definición.

$$P = (0.5 \text{ A})(120 \text{ V})$$

Sustituyendo.

$$P = 60 \text{ W}$$

$$b) I = \frac{V}{R}$$

Por definición.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{120 \text{ V}}{0.5 \text{ A}}$$

Despejando y sustituyendo.

$$R = 240 \Omega$$

## Ejemplo 17.

Dado el siguiente circuito :

- a) ¿Cuál es la corriente eléctrica que fluye por cada una de las resistencias del circuito?  
b) ¿Cuánta potencia consume cada una?

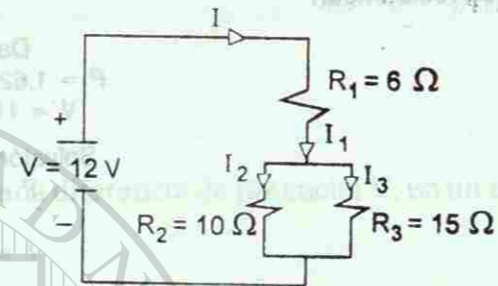
Datos:

$$V = 12V$$

$$R_1 = 6 \Omega$$

$$R_2 = 10 \Omega$$

$$R_3 = 15 \Omega$$



- a) Vamos a calcular la resistencia equivalente del circuito, para luego calcular la corriente de la fuente y analizar cómo se distribuye en  $R_2$  y  $R_3$

Sea  $R_{e1}$  la resistencia equivalente de  $R_2$  y  $R_3$  en paralelo, entonces

$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

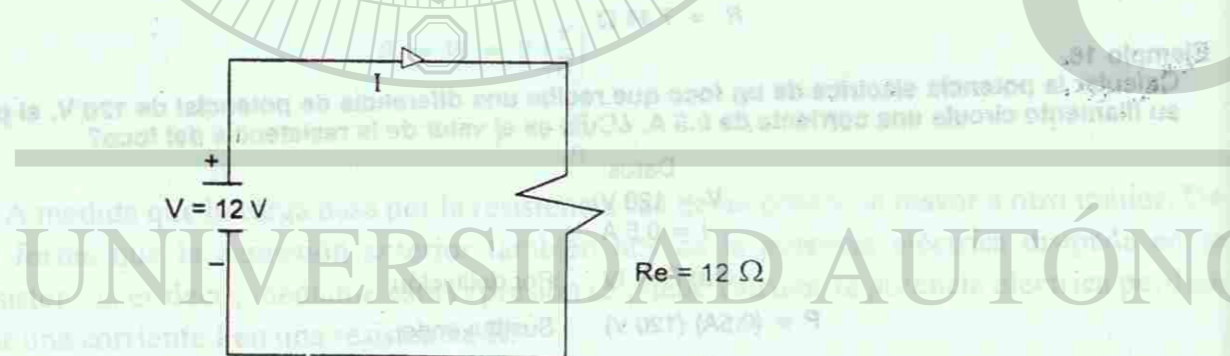
$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{1}{10 \Omega} + \frac{1}{15 \Omega}$$

$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{0.1}{\Omega} + \frac{0.066}{\Omega}$$

$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{0.166}{\Omega}$$

$$R_{e1} = 6 \Omega$$

Si sustituimos  $R_{e1}$  en lugar de  $R_2$  y  $R_3$  se tiene que



de este circuito se puede calcular la resistencia equivalente ( $R_e$ ) del circuito, considerando a  $R_1$  y a  $R_{e1}$ , en serie, de tal forma que

$$R_e = R_1 + R_{e1}$$

$$R_e = 6 \Omega + 6 \Omega$$

$$R_e = 12 \Omega$$

Al sustituir esta resistencia en lugar de  $R_1$  y de  $R_{e1}$ , nos resulta el circuito

De donde, la corriente del circuito será

$$I = \frac{V}{R_e} = \frac{12V}{12 \Omega}$$

$$I = 1A$$

Como se puede observar, por la resistencia  $R_1$  pasa una corriente de 1A.

Los circuitos anteriores son equivalentes. Tomando el segundo circuito se tiene que la corriente  $I = 1A$  pasa por  $R_1$  y  $R_{e1}$ , de tal forma que

$$V_1 = IR_1 = (1A)(6 \Omega) = 6V$$

$$V_{e1} = IR_{e1} = (1A)(6 \Omega) = 6V$$

Nótese que se satisface el hecho de que el voltaje aplicado por la fuente es igual a la suma de las caídas de voltaje, es decir

$$V = V_1 + V_{e1}$$

$$V = 6V + 6V$$

$$V = 12V$$

Las resistencias  $R_2$  y  $R_3$  se encuentran al mismo voltaje  $V_{e1}$ , por estar en paralelo, de tal forma que

$$I_2 = \frac{V_{e1}}{R_2} = \frac{6V}{10 \Omega}$$

$$I_2 = 0.6A$$

$$I_3 = \frac{V_{e1}}{R_3} = \frac{6V}{15 \Omega}$$

$$I_3 = 0.4A$$

De estos resultados se puede ver que  $I = I_1 + I_2 + I_3$

b) La potencia que consume cada una de las resistencias viene dada por

$$P = I^2 R$$

$$P_1 = I_1^2 R_1 = (1A)^2 (6 \Omega) = 6W$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 = (0.6A)^2 (10 \Omega) = 3.6W$$

$$P_3 = I_3^2 R_3 = (0.4A)^2 (15 \Omega) = 2.4W$$

## 15. LEYES DE KIRCHHOFF

A partir del análisis que se ha hecho de los diferentes circuitos eléctricos, se pueden enunciar las dos Leyes de Kirchhoff, una en relación a la corriente eléctrica y la otra con el voltaje.

La Ley de las corrientes (o de los nodos) establece:

**La corriente que entra a una unión o nodo es igual a la que sale de él.**

Una unión o nodo es el punto donde se unen tres o más alambres de conexión. Esta ley es en sí una formulación de la Ley de la Conservación de la Energía. Por ejemplo, en el nodo de la figura 29, se tiene que:

Las corrientes que entran = las corrientes que salen del nodo.

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3$$

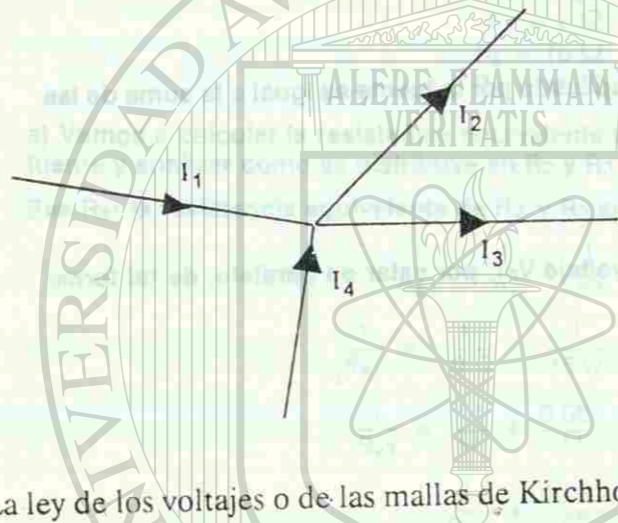


Fig. No. 29.

Representación de un nodo. Las corrientes eléctricas que llegan son iguales a las que salen de él.

La ley de los voltajes o de las mallas de Kirchhoff, afirma que:

En una malla, la suma de las caídas de voltaje es igual al voltaje que se aplica a dicha malla.

Una malla es un circuito o una parte de él que está formada por una trayectoria cerrada. En la figura 30 vemos dos circuitos en donde se ilustra esta ley.

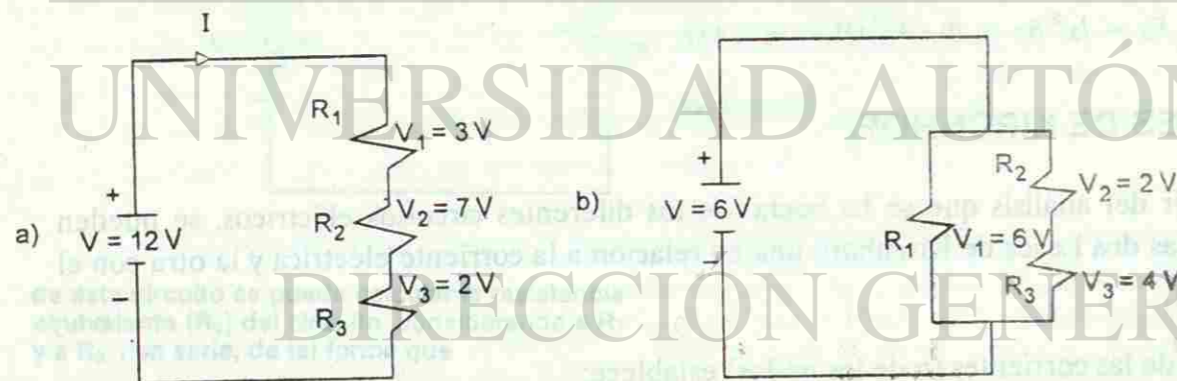


Fig. No. 30.

a) En este circuito la suma de las caídas de voltaje es igual al voltaje suministrado por la fuente:  $V = V_1 + V_2 + V_3$ ; b) Como este circuito está en paralelo,  $R_1$  tiene una caída de 6V, igual que la suma de los voltajes de  $R_2$  y  $R_3$ , es decir,  $V = V_1 = V_2 + V_3$

De la figura 30 (a) tenemos que:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

es decir

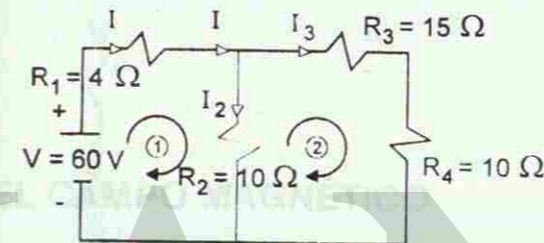
$$12V = 3V + 7V + 2V$$

Para la figura (b), con el circuito en paralelo, se tiene que

$$V = V_1 \\ V = V_2 + V_3$$

## Ejemplo 18.

En el siguiente circuito, encuentre la corriente eléctrica a través de cada resistencia, utilizando las leyes de Kirchhoff.



Al aplicar las leyes de Kirchhoff, se tiene: Ley de las corrientes eléctricas

$$(1) I = I_2 + I_3$$

Ley de los voltajes

Considérese el recorrido de las mallas en el sentido de las manecillas del reloj, como se muestra en la figura. De tal forma que:

malla 1:

$$(2) V = IR_1 + I_2 R_2$$

malla 2

$$(3) 0 = I_3 R_3 + I_3 R_4 - I_2 R_2$$

Esta ecuación (3) es igual a cero porque no hay ninguna fuente en esta malla y el voltaje en  $R_2$  es negativo porque la corriente eléctrica que pasa por ella  $I_2$ , está en sentido contrario al recorrido.

Sustituyendo valores en las ecuaciones (2) y (3),

en (2)

$$60V = I(4\Omega) + I_2(10\Omega)$$

$$60V = 4I + 10I_2$$

en (3)

$$0 = I_3(15) + I_3(10) - I_2(10)$$

$$0 = 15I_3 + 10I_3 - 10I_2$$

$$(a) 0 = 25I_3 - 10I_2$$

$$I = I_2 + I_3$$

Sustituyendo en la ecuación (2),

$$60 = 4(I_2 + I_3) + 10I_2$$

$$60 = 4I_2 + 4I_3 + 10I_2$$

$$b) 60 = 14I_2 + 4I_3$$

Resolviendo el sistema formado por las ecuaciones (a) y (b). Despejamos  $I_3$  de (a) y la sustituimos en (b).

$$25I_3 - 10I_2 = 0$$

$$25 I_3 = 10 I_2$$

$$14 I_2 + 4 I_3 = 60$$

$$70 I_2 + 8 I_3 = 300$$

$$78 I_2 = 300$$

$$I_2 = \frac{300}{78}$$

$$I_2 = 3.84 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{2}{5} I_2$$

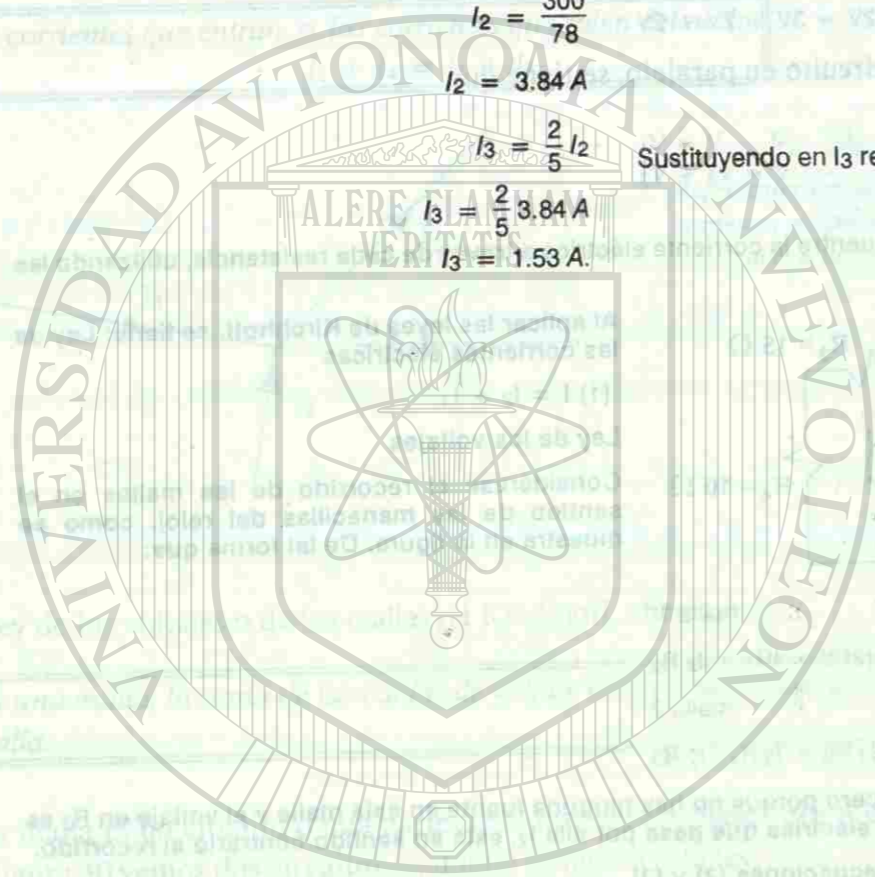
$$I_3 = \frac{2}{5} \cdot 3.84 \text{ A}$$

$$I_3 = 1.53 \text{ A}$$

Sustituyendo  $I_3$  en la ecuación (b)

multiplicando toda la ecuación por 5

Sustituyendo en  $I_3$  resulta



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL

## MAGNETISMO

### 1. EL CAMPO MAGNÉTICO

El estudio de la electricidad no se puede completar si no se considera el tema del magnetismo. El área de la electricidad y la del magnetismo no pueden separarse. Siempre que los electrones se mueven, aparecen efectos magnéticos. Nuestro estudio del magnetismo comenzará con un repaso de las propiedades de los imanes. Seguidamente, consideraremos el campo magnético que produce un imán. Finalmente, estudiaremos las fuerzas que ejercen los campos magnéticos sobre las corrientes eléctricas. Como se verá, la operación de muchos dispositivos, tales como los motores, televisores y grabadoras, depende de los efectos de los campos magnéticos sobre las corrientes eléctricas.

#### 1.1 LAS PROPIEDADES GENERALES DE LOS IMANES

Las propiedades magnéticas de ciertas rocas, llamadas magnetitas, se conocen desde hace más de 2000 años. La primera investigación minuciosa fue realizada por William Gilbert en 1600. Las propiedades de los imanes naturales y artificiales se resumen a continuación.

- 1.- Un imán tiene polos. El polo norte de un imán que está suspendido de una cuerda apunta hacia el norte. El polo sur del imán apunta hacia el sur. Los polos, aunque distintos, no pueden ser separados.
- 2.- Los polos iguales se repelen, mientras que los opuestos se atraen.

$$25 I_3 = 10 I_2$$

$$14 I_2 + 4 I_3 = 60$$

$$70 I_2 + 8 I_3 = 300$$

$$78 I_2 = 300$$

$$I_2 = \frac{300}{78}$$

$$I_2 = 3.84 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{2}{5} I_2$$

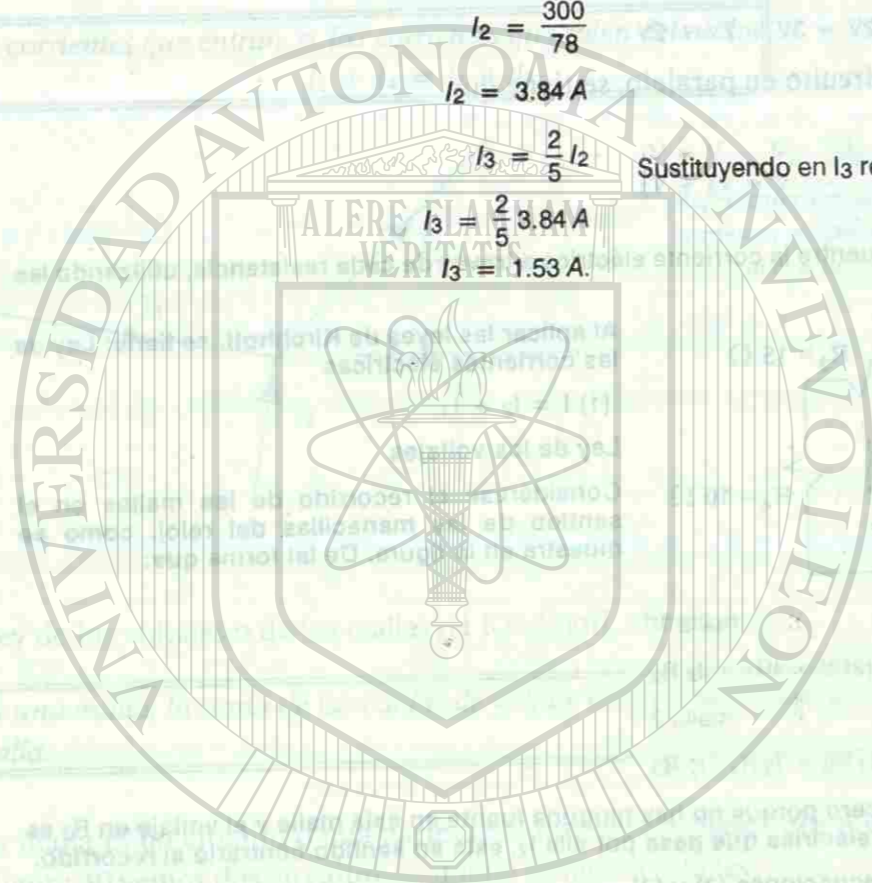
$$I_3 = \frac{2}{5} \cdot 3.84 \text{ A}$$

$$I_3 = 1.53 \text{ A}$$

Sustituyendo  $I_3$  en la ecuación (b)

multiplicando toda la ecuación por 5

Sustituyendo en  $I_3$  resulta



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL

## MAGNETISMO

### 1. EL CAMPO MAGNÉTICO

El estudio de la electricidad no se puede completar si no se considera el tema del magnetismo. El área de la electricidad y la del magnetismo no pueden separarse. Siempre que los electrones se mueven, aparecen efectos magnéticos. Nuestro estudio del magnetismo comenzará con un repaso de las propiedades de los imanes. Seguidamente, consideraremos el campo magnético que produce un imán. Finalmente, estudiaremos las fuerzas que ejercen los campos magnéticos sobre las corrientes eléctricas. Como se verá, la operación de muchos dispositivos, tales como los motores, televisores y grabadoras, depende de los efectos de los campos magnéticos sobre las corrientes eléctricas.

#### 1.1 LAS PROPIEDADES GENERALES DE LOS IMANES

Las propiedades magnéticas de ciertas rocas, llamadas magnetitas, se conocen desde hace más de 2000 años. La primera investigación minuciosa fue realizada por William Gilbert en 1600. Las propiedades de los imanes naturales y artificiales se resumen a continuación.

- 1.- Un imán tiene polos. El polo norte de un imán que está suspendido de una cuerda apunta hacia el norte. El polo sur del imán apunta hacia el sur. Los polos, aunque distintos, no pueden ser separados.
- 2.- Los polos iguales se repelen, mientras que los opuestos se atraen.



- 3.- Una brújula es un imán pequeño, en forma de aguja, balanceado sobre la punta de un alambre fino. El polo norte de la brújula apunta hacia el sur magnético de la Tierra. El norte geográfico y el magnético no están localizados en el mismo lugar.
- 4.- El cobalto y el níquel son sustancias magnéticas importantes. Los imanes permanentes se fabrican con aleaciones de estos metales. La mayor parte de los imanes permanentes comerciales se fabrican de **ALNICO**, una aleación de aluminio, níquel y cobalto.
- 5.- El hierro, el cobalto y el níquel pueden magnetizarse por inducción. Por ejemplo, cuando un pedazo de hierro se pone en contacto con un imán permanente, se convierte a su vez en un imán. El hierro es un imán temporal; tan pronto se separa del imán permanente, deja de ser un imán.

## 1.2 LOS CAMPOS MAGNÉTICOS QUE ESTÁN ALREDEDOR DE LOS IMANES PERMANENTES.

Todos los imanes, permanentes o temporales ejercen fuerzas sobre otros imanes que se encuentren a cierta distancia. Estas fuerzas se pueden explicar por medio de los **campos magnéticos** que existen alrededor de los imanes. La presencia de un campo magnético alrededor de un imán se puede demostrar cubriendo el imán con un pedazo de papel y rociándole limaduras de hierro. Las limaduras son pedazos de hierro. Son largas y delgadas y cada una de ellas se convierte en un imán por inducción. Las limaduras se alinean solas y forman unas líneas que van de un polo a otro, según se ilustra en la figura 31. Estas líneas ayudan a visualizar el campo magnético. Obsérvese que las líneas de campo magnético son imaginarias. Sin embargo, pueden utilizarse para imaginarse lo que ocurre al colocar un imán cerca de otro. El número de líneas de campo magnético en una región dada se llama el **flujo magnético**, el flujo por unidad de área indica la magnitud del campo magnético, como se ilustra en la figura 31 (b). Las limaduras de hierro se concentran más donde el flujo por unidad de área (el campo magnético) es mayor en los polos.

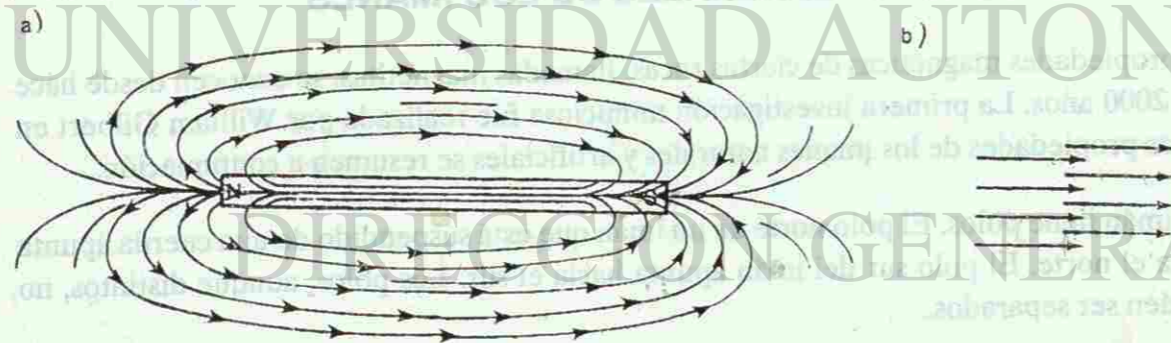


Fig. No. 31.

Las líneas de flujo magnético se extienden desde el polo norte hasta el polo sur en el exterior de un imán y desde el polo sur hasta el polo norte en el interior.

Cuando una brújula se coloca en un campo magnético, apunta en la dirección de las líneas de ese campo magnético. En el exterior del imán, las líneas corren desde el polo norte hacia el polo sur. Dentro del imán, las líneas corren desde el polo sur hacia el polo norte. Las líneas de campo magnético siempre forman trayectorias cerradas.

Las líneas de campo eléctrico comienzan y terminan en una carga eléctrica. Si los polos magnéticos se pudieran separar y aislar, las líneas de campo magnético empezarían y terminarían en cada polo aislado. Sin embargo, los polos magnéticos siempre aparecen en pares; nunca se ha descubierto uno aislado (el monopolio).

El comportamiento de los campos magnéticos, debido a parejas de polos magnéticos iguales, se puede observar poniendo un papel sobre los polos (N y N o S y S) de dos imanes colocados cerca uno del otro. Es posible observar el patrón del campo magnético, si el papel se rocía con limaduras de hierro. En la figura 32 (a) se muestra el patrón que forman dos polos iguales. En contraste, dos polos desiguales (N y S), colocados cerca uno del otro, forman un patrón distinto. Las limaduras muestran que las líneas de campo magnético corren de un imán al otro, ver figura 32 (b).

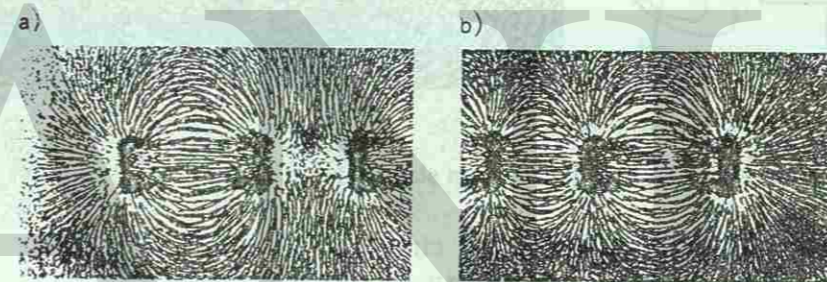


Fig. No. 32.

Las líneas de campo entre dos polos iguales (a) y entre dos polos distintos (b).

La fuerza que ejerce un campo magnético sobre el polo norte de un imán actúa en la dirección de las líneas de campo. Por lo tanto, un polo norte experimentará una fuerza que lo aleja del polo norte de otro imán y que lo atrae hacia el polo sur. La fuerza ejercida sobre el polo sur actúa en la dirección opuesta a la de las líneas de campo. El polo sur experimentará una fuerza que lo atrae hacia el polo norte de otro imán y lo repele del polo sur. En resumen, los polos iguales se repelen, mientras que los polos distintos se atraen.

## 2. EL ELECTROMAGNETISMO

En 1820, el físico danés Hans Christian Oersted (1777--1851) realizó un descubrimiento importante acerca del magnetismo. Al experimentar con las corrientes eléctricas en los alambres, Oersted colocó uno de sus alambres sobre una brújula pequeña. Observó que cada vez que hacía pasar una corriente por el alambre, la aguja de la brújula se movía. Oersted sabía que un campo magnético podía ejercer una fuerza sobre un imán. Por lo tanto, la corriente

eléctrica hacía, de alguna forma, que apareciera un campo magnético alrededor del alambre. Los estudios posteriores que hizo Oersted le permitieron demostrar que cualquier alambre, por el cual pasa una corriente eléctrica, tiene un campo magnético a su alrededor, es decir, las corrientes eléctricas producen campos magnéticos.

Se puede estudiar el campo magnético que está alrededor de un alambre por el cual pasa una corriente eléctrica, atravesando verticalmente un cartón con el alambre. Al rociar el cartón con limaduras de hierro, se puede observar el patrón del campo magnético. Este patrón consiste de círculos concéntricos alrededor del alambre, véase la figura 33.

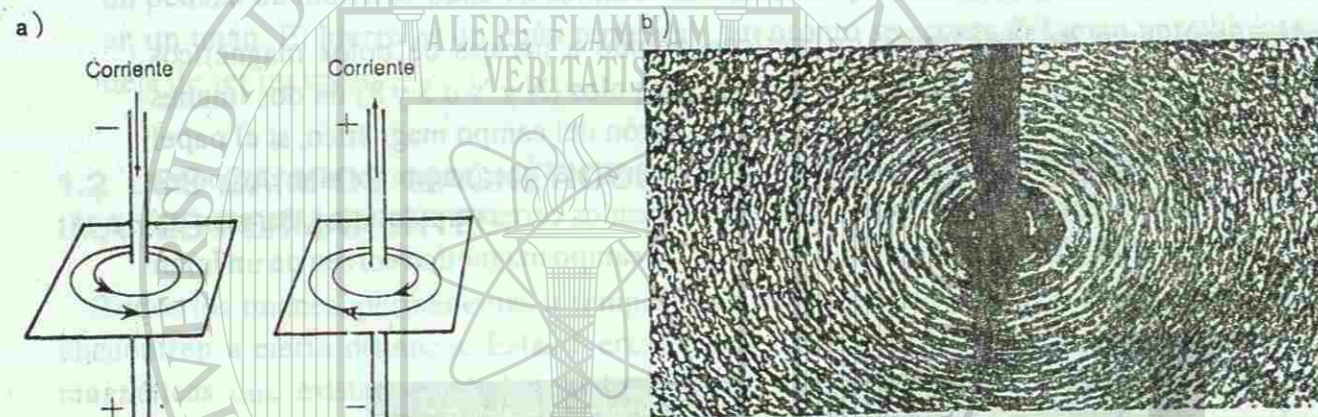


Fig. No. 33.

El campo magnético que produce una corriente que fluye por un alambre recto.

La gráfica indica que el campo magnético forma círculos cerrados. La magnitud del campo magnético que está alrededor del alambre varía directamente con la magnitud de la corriente que fluye por él. La magnitud del campo magnético varía inversamente con la distancia desde el alambre.

La regla de la mano izquierda se utiliza para determinar la dirección del campo magnético que está alrededor de un alambre recto. Para esto, se toma el alambre con la mano izquierda y permitiendo que el dedo pulgar apunte en la dirección en que se mueven los electrones, las puntas de los dedos de la mano, que se cierran formando un círculo, indican la dirección del campo magnético, ver figura 34.



Fig. No. 34.

Figura 33.- La regla de la mano izquierda aplicada a un alambre por el cual fluye una corriente eléctrica.

## 2.1 EL CAMPO MAGNÉTICO QUE ESTA ALREDEDOR DE UNA BOBINA

Cuando la corriente pasa por un alambre que forma una espira, se produce un campo magnético. Si se aplica la regla de la mano izquierda en cualquier parte del alambre, se puede observar que la dirección del campo magnético dentro de la espira siempre es la misma, véase la figura 35.

En el ejemplo mostrado en el diagrama, la dirección es hacia afuera de la página en la parte interior de la espira, y en el exterior la dirección del campo magnético siempre es hacia adentro de la página.

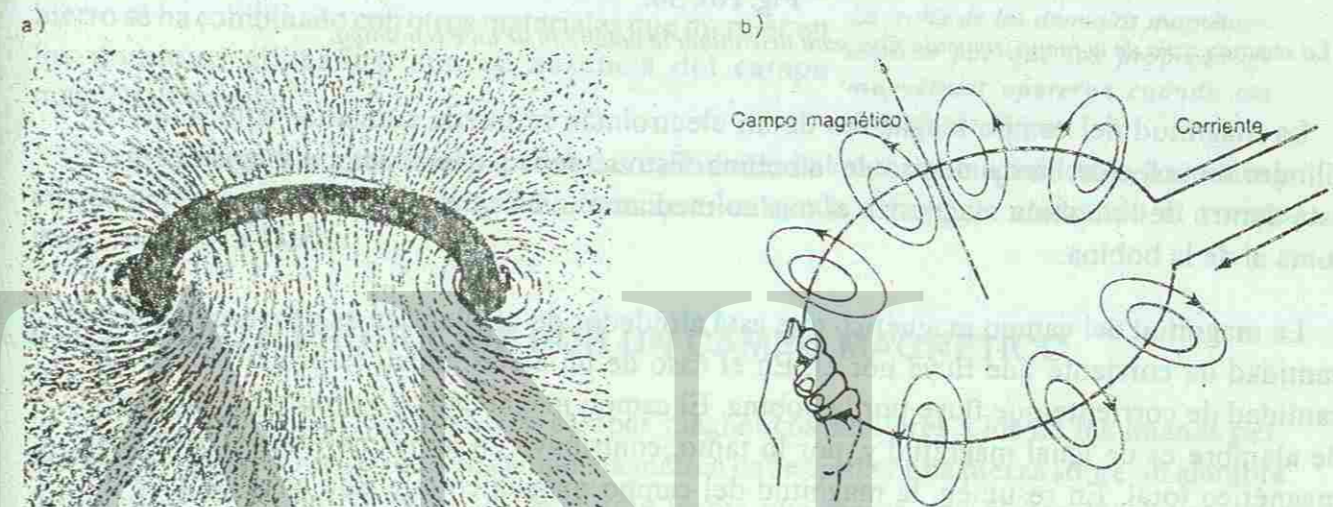


Fig. No. 35.

El campo magnético que está alrededor de un alambre doblado en forma circular por el cual fluye una corriente

Imagínese que un alambre se dobla en varias espiras de igual tamaño, formando una bobina. Cuando la corriente pasa por la bobina, el campo magnético alrededor de las espiras tendrá la misma dirección. Dentro de la bobina habrá un campo magnético continuo que apunta en una sola dirección. El campo que está en el exterior de la bobina tendrá la dirección opuesta.

Cuando una corriente fluye por una bobina, ésta se comporta como un imán permanente. Al acercar la bobina a un imán permanente, uno de sus extremos será repelido por el polo norte del imán y el otro será atraído. Por lo tanto, la bobina tiene un polo norte y un polo sur, como cualquier imán. Este tipo de imán se llama electroimán.

La dirección del campo producido por un electroimán se puede determinar utilizando la segunda regla de la mano izquierda. Para esto, se toma la bobina con la mano izquierda, con los dedos curvados en la dirección en que los electrones fluyen por el alambre. El dedo pulgar, que está sobre la bobina, apuntará hacia el polo norte del electroimán, ver figura 36.

Para esta regla se considera la dirección que sigue el flujo de los electrones, es decir, la corriente eléctrica real.

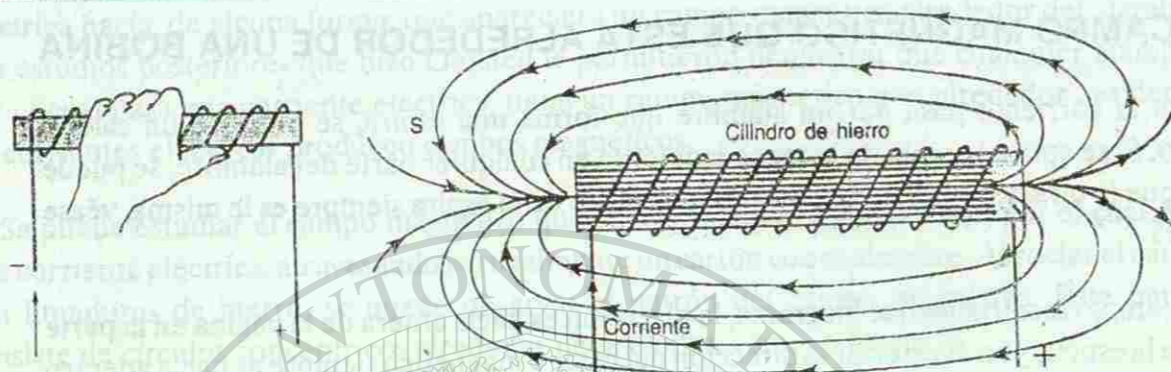


Fig. No. 36.

La segunda regla de la mano izquierda sirve para determinar la polaridad de un electroimán.

La magnitud del campo magnético de un electroimán se puede aumentar colocando un cilindro o núcleo de hierro dentro de la bobina. Esto se debe a que el campo magnético que está dentro de la bobina magnetiza el núcleo mediante inducción y su campo magnético se suma al de la bobina.

La magnitud del campo magnético que está alrededor de un alambre es proporcional a la cantidad de corriente que fluye por él. En el caso de un electroimán, es proporcional a la cantidad de corriente que fluye por la bobina. El campo magnético que produce cada espira de alambre es de igual magnitud y, por lo tanto, contribuye en la misma medida al campo magnético total. En resumen, la magnitud del campo magnético que está alrededor de un electroimán depende de la corriente que fluye por la bobina, del número de vueltas que tiene el alambre y del tipo de material del que está hecho el núcleo.

### 3. LOS MATERIALES MAGNÉTICOS

El comportamiento de un electroimán es similar al de un imán permanente en la forma de barra. A comienzos del Siglo XIX, Andre Ampere (1775-1836) propuso una teoría para explicar este comportamiento. Ampere sabía que los efectos magnéticos de un electroimán aparecían por la presencia de una corriente eléctrica en la bobina. De forma análoga, Ampere razonó que el magnetismo en un imán permanente se debía a "anillos" de corriente, muy pequeños, dentro del imán. En esencia, este razonamiento estaba correcto.

En un átomo, cada electrón actúa en forma similar a un electroimán pequeño. Los campos magnéticos de un grupo de átomos cercanos se pueden juntar, formando un grupo que se conoce como **dominio**. Aunque los dominios son mucho más grandes que los átomos individuales, son sumamente pequeños. Así que, aún un pedazo pequeño de hierro, contiene un gran número de dominios.

En un pedazo cualquiera de hierro, los dominios tienen campos magnéticos que apuntan en todas direcciones y cancelan su efecto individual. Cuando el hierro se coloca dentro de un campo magnético, los dominios tienden a alinearse en la dirección del campo magnético externo, como se ilustra en la figura 37. En un imán temporal, los dominios vuelven a su posición desorganizada al retirar el campo magnético externo. En los imanes permanentes, el hierro se ha combinado con otros materiales que mantienen los dominios alineados, aún en ausencia del campo magnético externo.

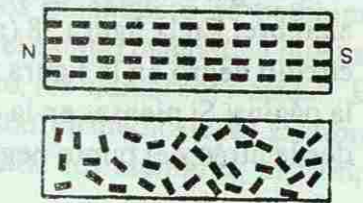


Fig. No. 37.

La teoría de los dominios magnéticos explica por qué las propiedades magnéticas aparecen cuando los dominios se alinean.

Los científicos han descubierto pequeñas cantidades de material magnético en bacterias y en los cerebros de algunas aves. Se piensa que les ayuda a navegar utilizando el campo magnético de la Tierra.

### 4. LA FUERZA PRODUCIDA POR UN CAMPO MAGNÉTICO

Las corrientes eléctricas producen campos magnéticos similares a los de los imanes permanentes. Ampere razonó que un campo magnético debe ejercer una fuerza sobre un alambre por el cual fluye una corriente, de la misma forma que ejerce una fuerza sobre un imán permanente.

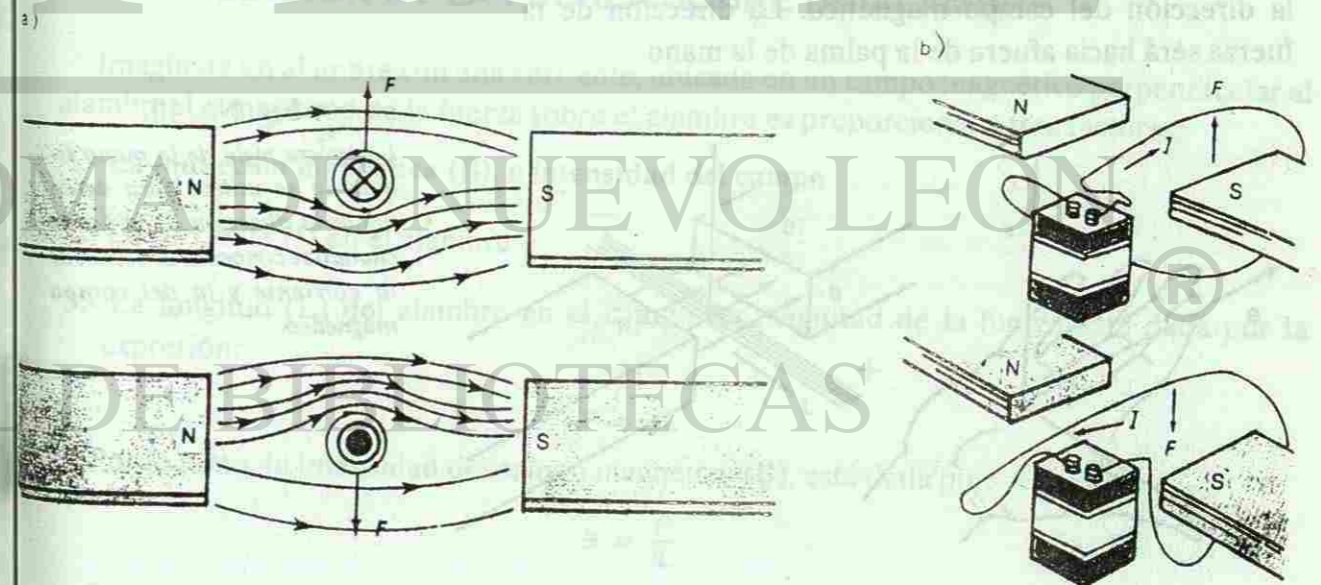


Fig. No. 38.

Figura 37.- Una representación de las fuerzas sobre una corriente en un campo magnético.

La figura 38 sirve para demostrar la fuerza que ejerce un campo magnético sobre un alambre. En la figura 38 (a), la cruz indica que la corriente fluye hacia dentro de la página. El círculo negro en la figura 38 (b) indica que la corriente fluye en la dirección hacia afuera de la página. Si piensas en la corriente como si fuera una flecha, la cruz representa la flecha vista desde atrás y el punto negro representa la flecha vista de frente.

La intensidad o magnitud del campo magnético se llama la **inducción magnética** y se representa por **B**. La inducción magnética es una cantidad vectorial, por lo que se puede representar por una flecha. Algunos de estos vectores se ilustran en la figura 39, los vectores que apuntan hacia adentro o hacia afuera de la página se representan de la misma manera que el flujo de corriente eléctrica.

Michael Faraday (1791-1867) encontró que la fuerza sobre un alambre por el que fluye una corriente tiene una dirección perpendicular a la dirección del campo magnético y a la de la corriente eléctrica. La dirección de la fuerza se puede determinar por medio de la **tercera regla de la mano izquierda**, como se ilustra en la figura 40. Con la mano abierta, coloca el dedo pulgar en la dirección del flujo de electrones y los dedos restantes en la dirección del campo magnético. La dirección de la fuerza será hacia afuera de la palma de la mano.

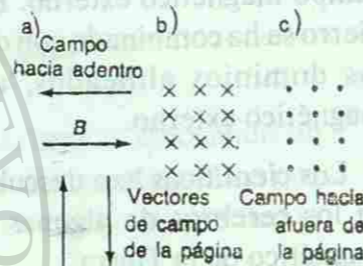


Fig. No. 39.

La dirección de un campo magnético se indica mediante flechas (a) cuando el campo es paralelo a la página, mediante cruces (b) cuando es hacia adentro de la página y mediante puntos (c) cuando es hacia afuera de la página.

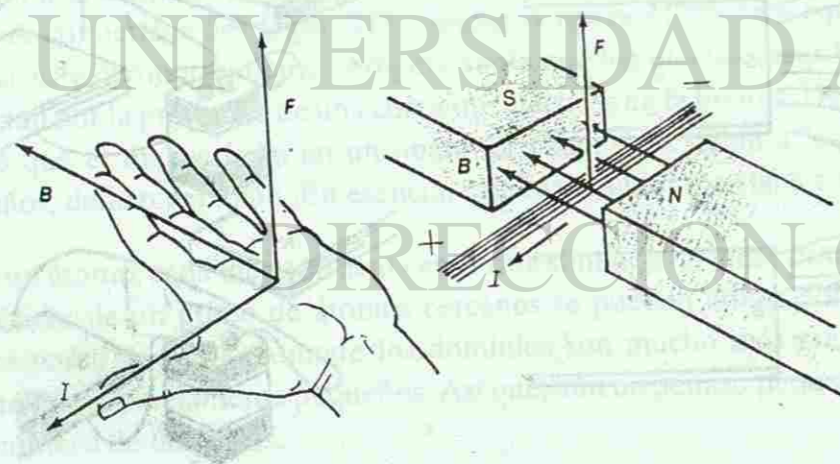


Fig. No. 40.

La tercera regla de la mano izquierda se utiliza para determinar la dirección de la fuerza cuando se conoce la dirección de la corriente y la del campo magnético.

En la figura 41 se muestra que la dirección del campo magnético alrededor de los alambres sigue la regla de la mano izquierda. En la figura 41(a) vemos que los campos magnéticos que

están en medio de los alambres se oponen. Como los campos magnéticos se combinan vectorialmente, la resultante es un campo magnético débil, pero el campo magnético que está fuera de los alambres mantiene su intensidad normal. Por lo tanto, los alambres se atraen. En la figura 41(b), se presenta la situación opuesta: los campos que están en medio de los alambres tienen la misma dirección, por lo que se suman. Hacia afuera de los alambres, el campo magnético tiene su intensidad normal, por lo tanto, se repelen.

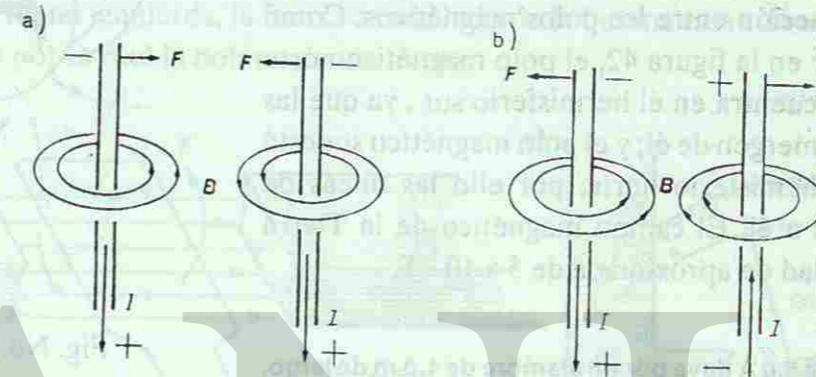


Fig. No. 41.

Dos alambres paralelos (a) se atraen cuando la corriente en ellos fluye en la misma dirección y (b) se repelen cuando las corrientes fluyen en direcciones opuestas.

#### 4.1 LA MEDICIÓN DE LA FUERZA SOBRE UN ALAMBRE

Imagínate un alambre con una corriente, ubicado en un campo magnético perpendicular al alambre. La magnitud de la fuerza sobre el alambre es proporcional a tres factores:

- 1.- La inducción magnética (**B**), o intensidad del campo
- 2.- La corriente (**I**) en el alambre
- 3.- La longitud (**L**) del alambre en el campo. La magnitud de la fuerza está dada por la expresión:

$$F = BIL$$

Por lo tanto, la intensidad del campo magnético (**B**), está dada por:

$$B = \frac{F}{IL}$$

La unidad en el Sistema Internacional para la intensidad, o inducción de un campo magnético es el tesla (**T**). Un tesla equivale a un newton entre amper por metro,  $N/A \cdot m$ . La intensidad del campo magnético se mide en términos de la fuerza sobre un alambre de un metro de largo por el cual pasa una corriente de un amper.

Un campo magnético de 1 tesla (T) ( $1\text{N/A}\cdot\text{m}$ ) es un campo magnético muy fuerte, generado solo por electroimanes muy poderosos. Los campos magnéticos que encontramos en los laboratorios son mucho más pequeños que un tesla.

La Tierra se puede considerar como un enorme imán rodeado por un campo magnético, de ahí que un imán suspendido o una brújula, se orienten conforme a lo que establece la interacción entre los polos magnéticos. Como se puede observar en la figura 42, el polo magnético norte de la Tierra se encuentra en el hemisferio sur, ya que las líneas de campo emergen de él; y el polo magnético sur está localizado en el hemisferio norte, por ello las líneas de campo convergen a él. El campo magnético de la Tierra tiene una intensidad de aproximada de  $5 \times 10^{-5}\text{ T}$ .

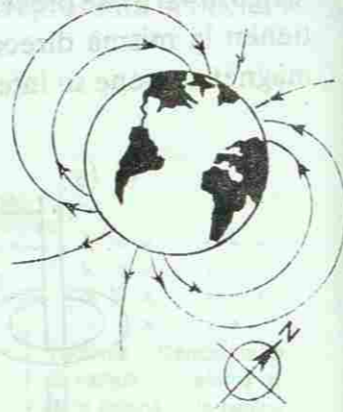


Fig. No. 42.

**Ejemplo 19.**

Una corriente de 5.0 A fluye por un alambre de 1.0 m de largo. El alambre está colocado perpendicularmente a un campo magnético uniforme. La fuerza sobre el alambre es de 0.2 N. ¿Cuál es la magnitud de la intensidad del campo magnético?

Datos:  
 $F = 0.2\text{ N}$   
 $I = 5.0\text{ A}$   
 $L = 1.0\text{ m}$

Solución:

$$B = \frac{F}{IL} = \frac{0.2\text{ N}}{(5\text{ A})(1\text{ m})}$$

$$B = 0.04 \frac{\text{N}}{\text{Am}} = 0.04\text{ T}$$

**Ejemplo 20.**

Un alambre de 10 centímetros de largo se coloca perpendicularmente a un campo magnético uniforme. El campo tiene una inducción de 0.060 teslas. La corriente en el alambre es de 4.0 amperes. Determina la magnitud de la fuerza.

Datos:  
 $L = 1.0 \times 10^{-1}\text{ m}$   
 $B = 6.0 \times 10^{-2}\text{ T}$   
 $I = 4.0\text{ A}$   
 $F = BIL$

$$F = (6.0 \times 10^{-2}\text{ T})(4.0\text{ A})(1.0 \times 10^{-1}\text{ m})$$

$$F = 2.4 \times 10^{-2}\text{ N}$$

Figura 41.-Representación de las líneas del campo magnético de la Tierra.

**5. EL GALVANÓMETRO**

El galvanómetro es un dispositivo que se utiliza para medir corrientes eléctricas pequeñas y es la base de los voltímetros y amperímetros.

Un galvanómetro consiste de una bobina pequeña colocada en un campo magnético intenso, producido por un imán permanente. La corriente que pasa por la bobina tiene direcciones opuestas a cada lado de la bobina (véase la figura 43). De acuerdo con la tercera regla de la mano izquierda, la fuerza a cada lado de la bobina tiene direcciones opuestas. Esta es la razón por la cual la bobina tiende a rotar.

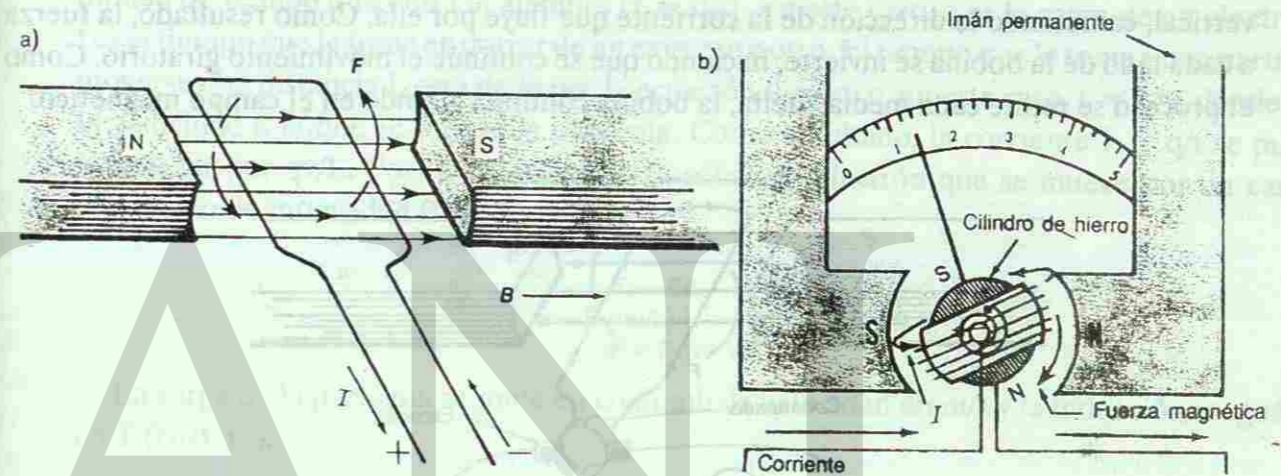


Fig. No. 43.

Si una vuelta de alambre se coloca en un campo magnético, tenderá a girar cuando fluye corriente por él.

La magnitud de la fuerza sobre la bobina depende de la corriente que pasa por ella. La figura 43 b muestra cómo se puede utilizar para medir la corriente.

La fuerza sobre la bobina es proporcional a la magnitud de la corriente. La bobina gira en contra de la acción restauradora de un pequeño resorte. La escala se calibra determinando cuánto gira la bobina cuando unas corrientes conocidas pasan por ella. La escala calibrada sirve para medir corrientes desconocidas.

**6. EL MOTOR ELÉCTRICO**

La bobina de un galvanómetro no puede girar más de  $180^\circ$ . En la figura 43, la fuerza que actúa sobre el lado derecho de la bobina la empuja hacia arriba. A la misma vez, la fuerza que actúa sobre el lado izquierdo empuja la bobina hacia abajo. La bobina gira hasta que alcanza una posición vertical; no girará más, ya que la fuerza que actúa sobre el lado derecho todavía empuja hacia arriba. La bobina no se puede mover hacia abajo, a través del campo. De igual

forma, la fuerza que actúa sobre el lado izquierdo sigue siendo hacia abajo, impidiendo que se mueva.

Para que una bobina pueda girar  $360^\circ$  en un campo magnético, la corriente que pasa por ella debe cambiar de dirección tan pronto llegue a su posición vertical. El cambio en la dirección de la corriente, mantiene girando a la bobina, ver figura 44. Para invertir la dirección de la corriente, se requiere un conmutador en forma de anillo partido en mitades. La corriente se pasa a la bobina a través de unos contactos de grafito, llamados escobillas que se deslizan sobre el conmutador. La forma del conmutador es tal que, al rotar, se hace contacto alternadamente con las dos escobillas. El contacto se cambia cada vez que la bobina llega a su posición vertical, cambiando la dirección de la corriente que fluye por ella. Como resultado, la fuerza a cada lado de la bobina se invierte, haciendo que se continúe el movimiento giratorio. Como el proceso se repite cada media vuelta, la bobina continúa girando en el campo magnético.

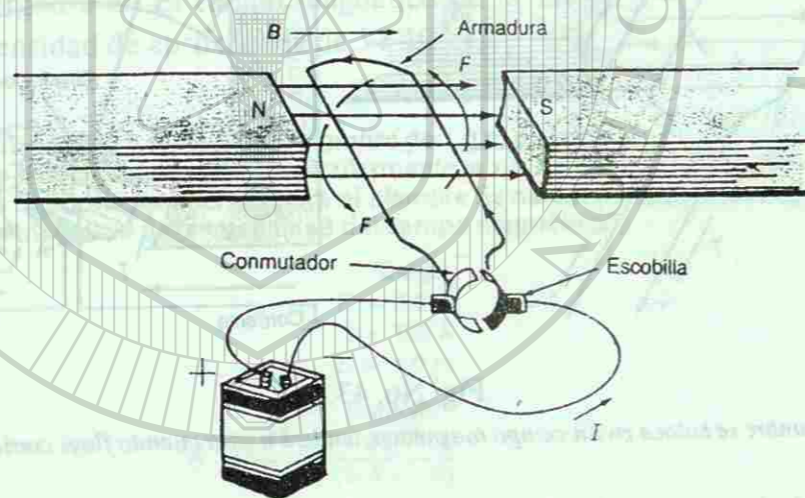


Fig. No. 44.

En un motor eléctrico, el conmutador en forma de anillo partido en dos permite que el alambre gire  $360^\circ$ .

En la práctica, los motores eléctricos tienen varias bobinas giratorias. Ellas forman lo que se conoce como la armadura del motor. La fuerza total que actúa en la armadura es proporcional a  $nBIL$ , donde  $n$  es el número total de vueltas del alambre en la armadura y  $L$  es el largo del alambre, en una vuelta de la bobina que se cruza perpendicularmente al campo magnético. El campo magnético se puede producir por un imán permanente o por un electroimán llamado bobina de campo. La fuerza sobre la armadura y, por lo tanto, la rapidez con que gira el motor, se controla variando la corriente que pasa por él.

## 7. LA FUERZA SOBRE UNA PARTÍCULA CARGADA

La fuerza que ejerce un campo magnético sobre un alambre por el cual fluye corriente es el resultado de las fuerzas individuales ejercidas sobre los electrones que componen la corriente. Los electrones no tienen que estar confinados por un alambre, sino que pueden moverse en el espacio siempre y cuando se haya removido el aire, evitando las colisiones entre los electrones y las moléculas que están en el aire.

La fuerza producida por el campo magnético sobre un electrón se puede calcular comenzando con la fuerza sobre un alambre por el cual fluye una corriente ( $F = BIL$ ). Considere un solo electrón que se mueve por un alambre de largo  $L$ . La corriente es igual a la carga por unidad de tiempo que entra al alambre ( $I = q/t$ ). En este caso,  $q$  es la carga de un electrón y  $t$  es el tiempo que le toma en cruzar de un extremo a otro. El tiempo que le toma a una partícula moverse una distancia  $L$  está dado por la ecuación  $d = vt$ , o, en este caso,  $t = L/v$ , donde  $v$  es la velocidad a la que se mueve la partícula. Como resultado, la corriente  $I = q/t$  se puede reemplazar por  $qv/L$ . Por lo tanto, la fuerza sobre un electrón que se mueve por un campo magnético de intensidad  $B$  es:

$$\begin{aligned} F &= BIL \\ F &= B(qv/L)L \\ F &= Bqv \end{aligned}$$

La carga de la partícula se mide en coulomb, la velocidad en m/s y la inducción magnética en T (N/A·m).

La dirección de la fuerza está dada por la tercera regla de la mano izquierda, con el pulgar apuntando en la dirección en que se mueve la partícula. La trayectoria de una partícula en un campo magnético es circular, ya que la fuerza siempre es perpendicular a su velocidad. El movimiento circular permite que las partículas cargadas puedan atraparse y mantenerse dentro de un campo magnético.

El tubo de un televisor, o tubo de rayos catódicos, utiliza un haz de electrones que se desvía por medio de campos magnéticos, para formar las

imágenes. Dentro del tubo, los electrones se liberan de los átomos en el electrodo negativo o cátodo, por la acción de un campo eléctrico. Otros campos eléctricos aceleran los electrones, los enfocan y forman un haz estrecho. Los campos magnéticos se utilizan para desviar el haz de electrones de izquierda a derecha y de arriba abajo, en la pantalla del tubo. La pantalla está recubierta con fósforo, que tiene la propiedad de brillar cada vez que los electrones lo impactan. Así se forma la imagen.

## Ejemplo 21.

Un haz de electrones viaja a  $3.0 \times 10^6$  m/s, a través de un campo magnético uniforme. La inducción del campo magnético es de  $4.0 \times 10^{-2}$  T.

El haz se dirige perpendicularmente hacia el campo magnético. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza sobre cada electrón en el haz?

Datos:

$$v = 3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$$

$$B = 4.0 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Solución:

$$F = Bqv$$

$$F = (4.0 \times 10^{-2} \text{ T})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(3.0 \times 10^6 \text{ m/s})$$

$$F = 1.9 \times 10^{-14} \text{ N}$$

## 8. LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Oersted descubrió que una corriente eléctrica produce un campo magnético. Michael Faraday estaba convencido de que un campo magnético produce una corriente eléctrica. Durante diez años, trató infructuosamente de producir una corriente eléctrica por medio de un campo magnético constante.

Sin embargo, en 1831 encontró que un campo magnético variable podía generar una corriente eléctrica. Un maestro norteamericano, Joseph Henry, hizo el mismo descubrimiento casi a la misma vez. Las aplicaciones de este descubrimiento incluyen los generadores eléctricos y los transformadores, que permiten el uso generalizado de la electricidad en nuestra sociedad.

### 8.1 EL DESCUBRIMIENTO DE FARADAY

Faraday hizo experimentos en los cuales movía un alambre por un campo magnético. Encontró que cuando un alambre se mueve a través de un campo magnético, se induce una corriente en el alambre. La figura 44 ilustra uno de los experimentos de Faraday. Un alambre que forma parte de un circuito cerrado se coloca en un campo magnético. Cuando el alambre se mueve a través del campo, el medidor indica que hay una corriente en el alambre. Si el alambre se mueve hacia arriba, la corriente tiene una dirección. Si se mueve hacia abajo, la corriente tiene la dirección opuesta. Si el alambre se deja quieto o si se mueve paralelo al campo, no se induce la corriente en el alambre. La corriente eléctrica se induce en el alambre sólo si éste se mueve cortando las líneas de campo.

Para que se produzca una corriente, un conductor se debe mover a través de un campo magnético o debe moverse el campo alrededor del conductor. En ambos casos, el movimiento relativo entre el alambre y el campo magnético es responsable de que se genere la corriente. Este proceso de generación de corriente se llama **inducción electromagnética**.

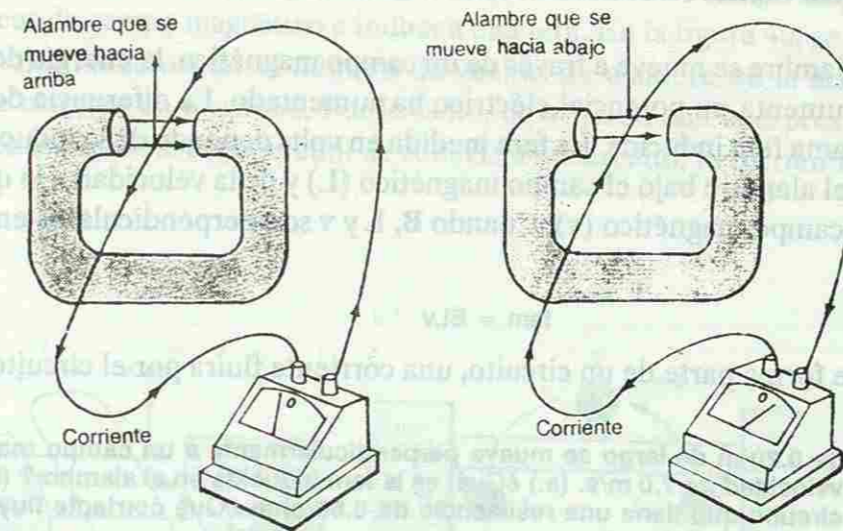


Fig. No. 45.

Cuando un alambre se mueve por un campo magnético, una corriente eléctrica fluye por el alambre, pero sólo cuando el alambre se mantiene en movimiento. La dirección de la corriente de electrones depende de la dirección en que el alambre se mueve por el campo.

Si un alambre se mueve por un campo magnético, a un ángulo distinto de  $90^\circ$  con respecto al campo, sólo la componente de la velocidad perpendicular al campo generará corriente.

La fuerza que actúa sobre los electrones libres en el alambre, mientras el alambre se mueve por un campo magnético, es perpendicular a la dirección en que se mueve el alambre y la dirección del campo. Para determinar la dirección de la corriente de electrones en un conductor, se utiliza la regla de la mano izquierda descrita anteriormente. Coloca la mano de forma que el dedo pulgar apunte en la dirección en que se mueve el alambre y los demás dedos en la dirección del campo magnético. La palma de la mano apuntará en la dirección de la fuerza que actúa sobre los electrones, ver figura 46.

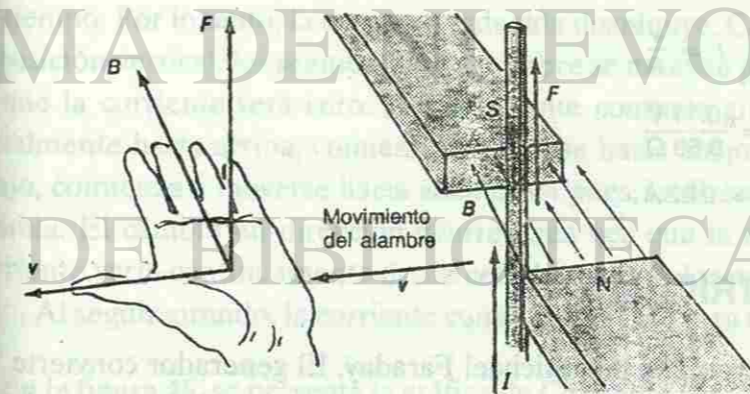


Fig. No. 46.

La regla de la mano izquierda se puede utilizar para determinar la dirección de la corriente inducida en un conductor.

## 8.2 LA FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA

Cuando un alambre se mueve a través de un campo magnético, la energía de los electrones en el alambre aumenta, su potencial eléctrico ha aumentado. La diferencia de potencial que se produce se llama fem inducida. La fem medida en volts depende de la inducción magnética ( $B$ ), del largo del alambre bajo el campo magnético ( $L$ ) y de la velocidad a la que se mueve el alambre por el campo magnético ( $v$ ). Cuando  $B$ ,  $L$  y  $v$  son perpendiculares entre sí, tenemos que

$$fem = BLv$$

Si el alambre forma parte de un circuito, una corriente fluirá por el circuito.

### Ejemplo 22.

Un alambre de 0.20 m de largo se mueve perpendicularmente a un campo magnético de  $8.0 \times 10^{-2} \text{ T}$ , a una velocidad de 7.0 m/s. (a.) ¿Cuál es la fem inducida en el alambre? (b.) El alambre es parte de un circuito que tiene una resistencia de 0.50 ohm ¿Qué corriente fluye en el circuito? (Recuerda que  $1 \text{ T} = 1 \text{ N/A} \cdot \text{m}$ .)

Datos:

$$L = 0.20 \text{ m}$$

$$B = 8.0 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$v = 7.0 \text{ m/s}$$

$$R = 0.50 \Omega$$

a) La fem viene dada por

$$fem = BLv$$

$$fem = (8.0 \times 10^{-2} \text{ T})(0.20 \text{ m})(7.0 \text{ m/s})$$

$$fem = (8.0 \times 10^{-2} \text{ N/A} \cdot \text{m})(0.20 \text{ m})(7.0 \text{ m/s})$$

$$fem = 0.11 \frac{(\text{N})(\text{m})(\text{m})}{\frac{\text{C} \cdot \text{m}}{\text{s}}(\text{s})}$$

$$fem = 0.11 \frac{\text{Nm}}{\text{C}} = 0.11 \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

$$fem = 0.11 \text{ V}$$

b)

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = \frac{0.11 \text{ V}}{0.50 \Omega}$$

$$I = 0.22 \text{ A}$$

## 9. EL GENERADOR DE ELECTRICIDAD

El generador de electricidad fue inventado por Michael Faraday. El generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica. En esencia, un generador de electricidad consiste de una serie de bobinas colocadas en un campo magnético fuerte. Todas las bobinas forman una armadura, similar a la de un motor eléctrico.

Las bobinas se colocan de forma que puedan girar libremente en el campo magnético. Al girar, cruzan las líneas de campo magnético e inducen una fem. En la figura 46, se ilustra una sola vuelta de alambre. Al aumentar el número de vueltas de alambre en la armadura, se aumenta el largo de alambre en el campo. Por lo tanto, de acuerdo con la expresión  $fem = BLv$ , la fem aumenta también. Si el generador se conecta a un circuito, la corriente fluirá por él.

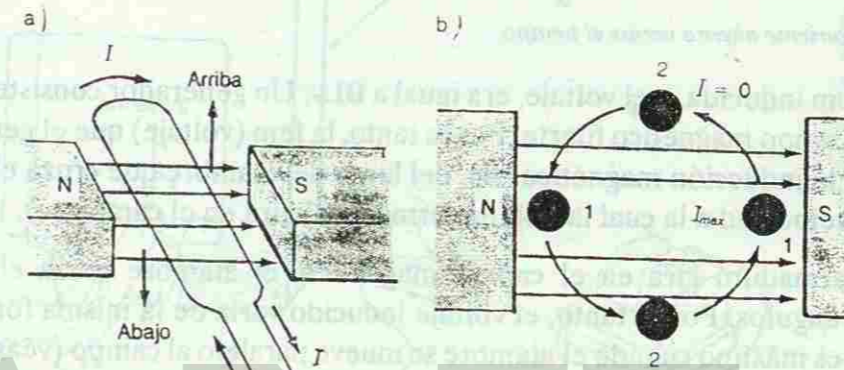


Fig. No. 47.

La corriente eléctrica se genera en el alambre mientras éste gira (a). La sección transversal (b) muestra la posición del alambre cuando la corriente inducida es máxima (1) y cuando es cero (2).

En la figura 47, observa que, de acuerdo con la regla de la mano izquierda, la corriente inducida en los dos lados de la vuelta del alambre, tiene direcciones opuestas. De esta forma, hay una corriente inducida en toda la vuelta del alambre. Cuando el alambre está en la posición horizontal, los dos segmentos cruzan el campo perpendicular al alambre. En esta posición la corriente inducida será la máxima. A medida que la vuelta del alambre se mueve desde la posición horizontal hasta la vertical, cruza menos líneas de campo magnético en una unidad de tiempo. Por lo tanto, la corriente inducida disminuye. Cuando la vuelta de alambre está en la posición vertical, los segmentos del alambre se mueven paralelos a las líneas de campo, por lo que la corriente será cero. A medida que continúa girando, el segmento que se movía inicialmente hacia arriba, comienza a moverse hacia abajo. El segmento que se movía hacia abajo, comienza a moverse hacia arriba. Así pues, la dirección de la corriente en el alambre cambia. El cambio en dirección ocurre cada vez que la espira de alambre gira a  $180^\circ$ . La corriente varía continuamente desde cero hasta un valor máximo, para luego disminuir hasta cero. Al seguir girando, la corriente comenzará a fluir otra vez, pero en la dirección contraria.

En la figura 48, se presenta la gráfica de Corriente versus Tiempo, que tiene la forma de la función seno.





Fig. No. 48.

Figura 47.- Gráfica de la corriente alterna versus el tiempo.

Como ya se vió, la fem inducida, o el voltaje, era igual a  $BLv$ . Un generador consiste de una bobina que gira en un campo magnético fuerte. Por lo tanto, la fem (voltaje) que el generador desarrolla depende de la inducción magnética ( $B$ ), del largo del alambre que cruza el campo magnético ( $L$ ) y de la velocidad a la cual la bobina (armadura) gira en el campo ( $v$ ).

A medida que la armadura gira en el campo magnético, el alambre cruza el campo magnético, a distintos ángulos. Por lo tanto, el voltaje inducido varía de la misma forma que la corriente. El voltaje es máximo cuando el alambre se mueve paralelo al campo (véase figura 49).



Fig. No. 49.

Gráfica de la variación del voltaje inducido versus el tiempo.

## 9.1 EL GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

Para que un generador opere, hace falta una fuente externa que haga que la armadura gire una cantidad de veces en un segundo en el campo magnético. Normalmente, la frecuencia a la que se hace girar la armadura es de 60 Hz. La corriente cambia de dirección, o alterna, 120 veces en un segundo.

En la figura 50, una corriente alterna se transmite desde la armadura hasta un circuito. Las escobillas que se deslizan sobre los contactos en forma de anillo permiten que la armadura gire libremente y que la corriente pase al circuito. A medida que la armadura gira, la corriente alterna varía entre un valor máximo y cero. Como la variación en la corriente ocurre rápidamente, la intensidad de la luz que genera la bombilla aparenta ser constante.

La potencia que produce un generador es el producto de la corriente y el voltaje. La potencia es siempre positiva, ya que  $I$  y  $V$  son ambos positivos o negativos, simultáneamente. Sin embargo, como  $I$  y  $V$  pueden ser cero, la potencia producida por una corriente alterna es menor que la producida por una corriente directa con la misma  $I_{\max}$  y  $V_{\max}$ . De hecho,  $P_{CA} = (1/2) P_{CD}$ .

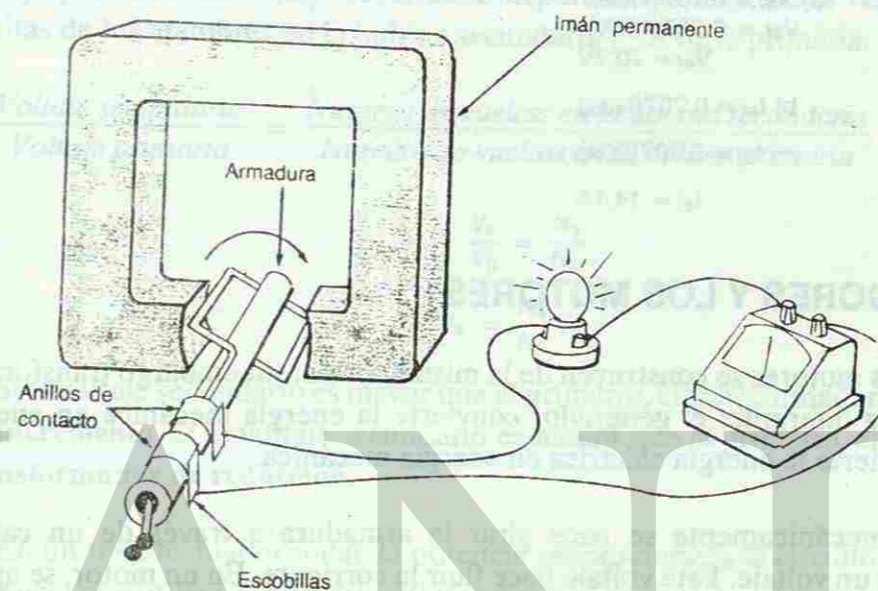


Fig. No. 50.

Un generador de corriente alterna transmite la corriente a un circuito externo por medio de unas escobillas y unos contactos forma de anillo.

Como las corrientes y los voltajes alternos cambian al pasar el tiempo, comúnmente se describen sus variables asociadas en términos de la corriente y el voltaje efectivo. Recuerde que  $P = I^2 R$ . Por lo tanto, la potencia se puede expresar en términos de la corriente efectiva:  $P_{CA} = I_{ef}^2 R$ .

$$P_{CA} = \frac{1}{2} P_{CD}$$

$$I_{ef}^2 R = \frac{1}{2} (I_{\max}^2 R)$$

De igual forma,

$$I_{ef} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right) (I_{\max}^2 R)}$$

$$I_{ef} = 0.707 I_{\max}$$

El voltaje de 110 V que tenemos disponible en las casas, es el valor del voltaje efectivo y no del voltaje máximo.

Ejemplo 23.

Un generador de corriente alterna desarrolla un voltaje máximo de  $1.00 \times 10^2$  V y suministra a un

circuito una corriente máxima de 20.0 A. (a) ¿Cuál es el voltaje efectivo del generador? (b) ¿Cuál es la corriente efectiva suministrada al circuito? ¿Cuál es la resistencia del circuito?

Datos:

$$V_{\text{máx}} = 1.00 \times 10^2 \text{ V}$$

$$I_{\text{máx}} = 20.0 \text{ A}$$

a)  $V_{\text{ef}} = 0.707(V_{\text{máx}})$

$$V_{\text{ef}} = 0.707(100\text{V})$$

$$V_{\text{ef}} = 70.7\text{V}$$

b)  $I_{\text{ef}} = 0.707(I_{\text{máx}})$

$$I_{\text{ef}} = 0.707(20\text{A})$$

$$I_{\text{ef}} = 14.1\text{A}$$

## 9.2 LOS GENERADORES Y LOS MOTORES

Los generadores y los motores se construyen de la misma forma; sin embargo transforman la energía en una forma diferente: el generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica; el motor convierte la energía eléctrica en energía mecánica.

En un generador, mecánicamente se hace girar la armadura a través de un campo magnético, para inducir un voltaje. Este voltaje hace fluir la corriente. En un motor, se aplica un voltaje a través de una armadura que se encuentra en un campo magnético. El voltaje hace fluir la corriente por la bobina y girar la armadura.

Recientemente, se han desarrollado los automóviles y camiones eléctricos para reducir nuestra dependencia de la gasolina. Estos vehículos utilizan la energía eléctrica que está almacenada en las baterías. Cuando se oprime el acelerador, la energía eléctrica pasa al motor, cambiándola el automóvil en energía cinética. Las baterías actuales tienen poca capacidad de almacenamiento, lo que limita el rango de operación de los vehículos eléctricos.

Cuando la corriente de un motor se interrumpe, como el apagarlo, el cambio súbito en voltaje puede generar una fem de retroceso lo suficientemente grande como para que salte una chispa por el interruptor o entre el enchufe y la pared.

## 10. LOS TRANSFORMADORES

Un transformador es un dispositivo que se utiliza para aumentar o disminuir los voltajes de las corrientes alternas. Los transformadores se utilizan con mucha frecuencia, ya que cambian el voltaje con muy poca pérdida de energía. Un transformador es una aplicación de la inducción electromagnética.

Un transformador tiene dos bobinas, aisladas eléctricamente una de la otra y enrolladas alrededor de un núcleo de hierro: la bobina primaria y la bobina secundaria. Cuando la

bobina primaria se conecta a una fuente de corriente alterna, el cambio en el flujo de corriente produce un campo magnético variable. El flujo magnético se transmite a la bobina secundaria a través del núcleo de hierro. El flujo variable induce una fem en la bobina secundaria. Este efecto se conoce como inductancia mutua.

La fem producida en la bobina secundaria, llamada voltaje secundario, es proporcional al voltaje primario. El voltaje secundario depende, también, de la razón entre el número de vueltas de los alambres en la bobina secundaria y los de la primaria.

$$\frac{\text{Voltaje secundario}}{\text{Voltaje primario}} = \frac{\text{Número de vueltas en la bobina secundaria}}{\text{Número de vueltas en la bobina primaria}}$$

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p$$

Si el voltaje secundario es mayor que el primario, el transformador se llama transformador de incremento. Si el voltaje secundario es menor que el primario, el transformador se llama transformador de reducción.

En un transformador ideal, la potencia proporcionada al circuito secundario es igual a la potencia que utiliza el primario. El transformador ideal no consume potencia. Como  $P = IV$ , entonces:

$$V_p I_p = V_s I_s$$

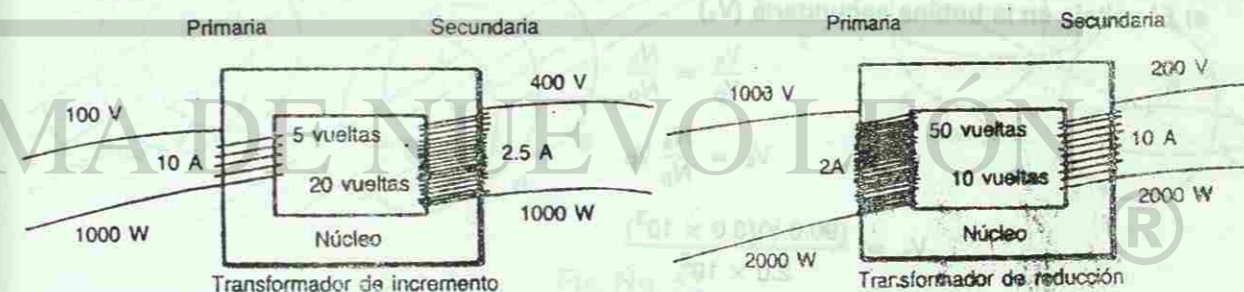


Fig. No. 51.

En un transformador, la razón entre el voltaje de entrada y el de salida depende de la razón entre el número de vueltas de la bobina primaria y el número de vueltas de la bobina secundaria.

La corriente que fluye en el circuito primario depende de cuánta corriente se requiere en el secundario. Un transformador de incremento aumenta el voltaje, por lo que la corriente en

el circuito primario será mayor que en el secundario. En un transformador de reducción, la corriente en el circuito secundario es mayor que en el primario.

La transmisión de energía eléctrica a través de grandes distancias es económica sólo si se utilizan voltajes altos y corrientes pequeñas. Los transformadores de incremento se utilizan en las fuentes de energía para desarrollar voltajes de hasta 240,000 V. Estos voltajes reducen la cantidad de corriente requerida en las líneas de transmisión, manteniendo bajas las pérdidas de energía ( $I^2R$ ). Cuando la energía llega al consumidor, los transformadores de reducción proveen el voltaje apropiado para su consumo.

Hay muchos otros usos importantes de los transformadores. Los tubos de televisión requieren voltajes de hasta  $2.0 \times 10^4$  V, los cuales se logran mediante un transformador dentro del equipo. La bobina de ignición de un automóvil es un transformador diseñado para elevar los 12 voltios de la batería hasta los miles de voltios. Los platinos en la ignición interrumpen la corriente directa de la batería para producir el campo magnético variable requerido para inducir una fem en la bobina secundaria. Los soldadores eléctricos requieren corrientes cercanas a  $10^4$  A. Grandes transformadores de reducción proveen estas corrientes, las cuales pueden calentar los metales hasta  $3,000^\circ\text{C}$  o más.

#### Ejemplo 24

Un transformador de incremento tiene  $2.00 \times 10^2$  vueltas de alambre en su bobina primaria y  $3.00 \times 10^3$  vueltas en su bobina secundaria. (a) La bobina primaria se conecta a una fuente de corriente alterna de 90.0 V. ¿Cuál es el voltaje en el circuito secundario? (b) La corriente que fluye por el circuito secundario es de 2.00 A. ¿Qué corriente fluye por el circuito primario? (c) ¿Cuál es la potencia en el circuito primario? ¿Y en el secundario?

Datos:

$$N_p = 2.00 \times 10^2$$

$$N_s = 3.00 \times 10^3$$

$$V_p = 90.0$$

$$I_s = 2.00 \text{ A}$$

a) El voltaje en la bobina secundaria ( $V_s$ )

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p$$

$$V_s = \frac{(90.0 \text{ V})(3.0 \times 10^3)}{2.0 \times 10^2}$$

$$V_s = 1350 \text{ V}$$

b) La corriente en el circuito primario ( $I_p$ )

$$V_p I_p = V_s I_s$$

$$I_p = \frac{V_s I_s}{V_p}$$

$$I_p = \frac{(1350 \text{ V})(2.0 \text{ A})}{90.0 \text{ V}}$$

$$I_p = 30.0 \text{ A}$$

c) Las potencias vienen dadas por

$$V_p I_p = (90.0 \text{ V})(30.0 \text{ A})$$

$$V_p I_p = 2.70 \times 10^3 \text{ W}$$

$$V_s I_s = (1350 \text{ V})(2.0 \text{ A})$$

$$V_s I_s = 2.70 \times 10^3 \text{ W}$$

## 11. LOS CAMPOS ELÉCTRICOS Y LOS MAGNÉTICOS EN EL ESPACIO

Las investigaciones de Faraday mostraron que un campo magnético variable induce una corriente eléctrica en un alambre. Antes, él había demostrado que la corriente eléctrica se debe a la fuerza que produce un campo eléctrico y que actúa sobre los electrones en el conductor. Estas observaciones hicieron que Faraday llegara a la conclusión de que, aún en la ausencia de un conductor, un campo magnético variable induce un campo eléctrico (ver figura 52) las líneas del campo eléctrico inducido deben cerrarse sobre sí mismas, ya que, en ausencia de un conductor, no hay cargas de las cuales las líneas puedan partir o terminar.

Maxwell demostró que lo contrario debe ser cierto también. Un campo eléctrico variable

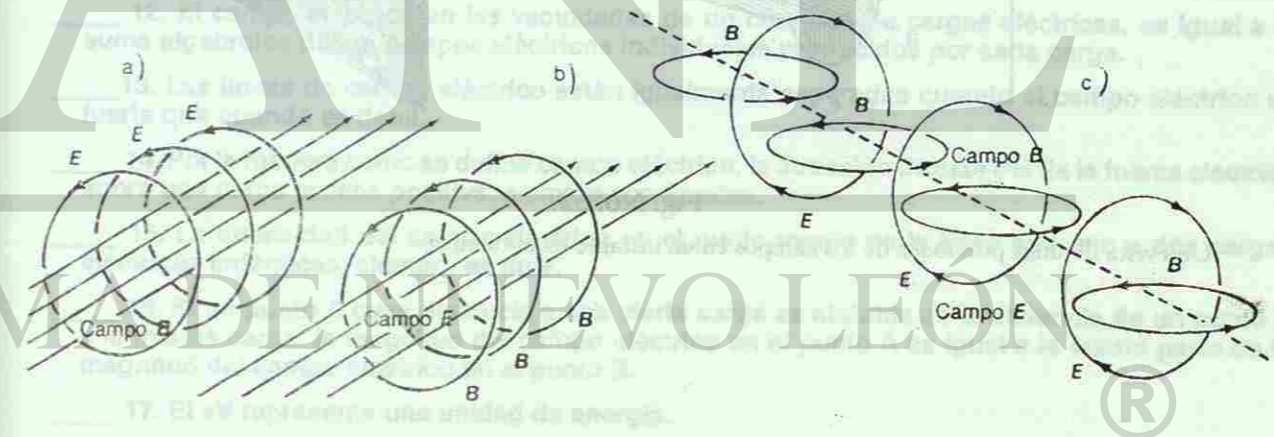


Fig. No. 52.

a) Representación de un campo eléctrico inducido, b) un campo magnético y c) ambos campos.

produce un campo magnético en el espacio, ver figura 51 (b). Por ejemplo, un electrón en un alambre produce un campo eléctrico alrededor del alambre. Si el electrón se pone en movimiento, el campo eléctrico varía. El campo eléctrico variable genera, entonces, un campo magnético en el espacio.

Estos dos descubrimientos implican que un campo eléctrico variable genera un campo magnético variable, que a su vez genera un campo eléctrico variable, y así sucesivamente, como se ilustra en la figura 51 (c). Los campos, al propagarse, se alejan de la fuente que los origina, que en el diagrama es un campo eléctrico. Los campos generados continúan propagándose por el espacio, aun cuando la fuente que los originó deje de existir.

Los campos eléctricos y los magnéticos se mueven por el espacio en forma de una onda transversal (ver la figura 52). Los campos son perpendiculares entre sí y también con respecto a la dirección de propagación. Maxwell demostró que la onda combinada, llamada **onda electromagnética**, se mueve a la rapidez de la luz en el vacío ( $3.00 \times 10^8$  m/s). Este resultado sugirió que la luz no es un fenómeno especial, sino un tipo de onda electromagnética, generada por campos eléctricos y magnéticos.

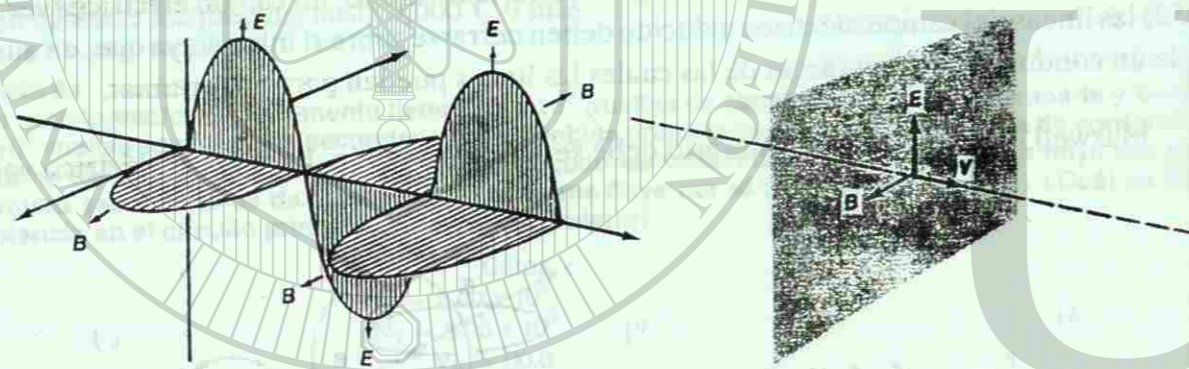


Fig. No. 53.

Una vista de unas porciones de los campos en un instante en el tiempo

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## AUTOEVALUACIÓN

AL TERMINAR LA UNIDAD CONTESTA LO SIGUIENTE

I.- Anota en el espacio del lado izquierdo una "F" si el enunciado es falso o un "V" si es verdadero.

- \_\_\_ 1. La carga eléctrica del electrón es igual a la carga eléctrica del protón, pero de signo contrario.
- \_\_\_ 2. Un cuerpo adquiere carga positiva si gana electrones.
- \_\_\_ 3. Al frotarse dos cuerpos, el más grande gana electrones y el más pequeño pierde electrones.
- \_\_\_ 4. En un material conductor, los electrones pueden moverse a través de él.
- \_\_\_ 5. La fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es inversamente proporcional a la distancia entre ellas.
- \_\_\_ 6. Un cuerpo se carga eléctricamente al aumentar su temperatura.
- \_\_\_ 7. En un átomo neutro, el número de protones que posee es igual al número de electrones.
- \_\_\_ 8. Cuando una carga negativa es movida de un punto de menor potencial a un punto de mayor potencial, la energía potencial aumenta.
- \_\_\_ 9. Para que exista un campo eléctrico en un cierto punto es necesario que se encuentre una carga eléctrica en dicho punto.
- \_\_\_ 10. Las líneas de campo eléctrico nunca se intersectan.
- \_\_\_ 11. La dirección del campo eléctrico en un punto situado en la vecindad de una carga eléctrica positiva depende del signo de la carga.
- \_\_\_ 12. El campo eléctrico en las vecindades de un conjunto de cargas eléctricas, es igual a la suma algebraica de los campos eléctricos individuales producidos por cada carga.
- \_\_\_ 13. Las líneas de campo eléctrico están igualmente separadas cuando el campo eléctrico es fuerte que cuando es débil.
- \_\_\_ 14. Por la manera como se define campo eléctrico, la dirección de éste y la de la fuerza eléctrica sobre una carga prueba positiva, siempre son iguales.
- \_\_\_ 15. La intensidad del campo eléctrico en el punto medio de la línea que une a dos cargas eléctricas idénticas, siempre es nula.
- \_\_\_ 16. Si un punto A cuya distancia a una cierta carga es el doble de la distancia de un punto B a la misma carga, la magnitud del campo eléctrico en el punto A es igual a la cuarta parte de la magnitud del campo eléctrico en el punto B.
- \_\_\_ 17. El eV representa una unidad de energía.
- \_\_\_ 18. El Joule/Coulomb es una unidad de voltaje.
- \_\_\_ 19. La fuerza electromotriz es una fuerza ejercida sobre una carga eléctrica para mantenerla en movimiento.
- \_\_\_ 20. La dirección convencional de la corriente en un conductor es opuesta a la dirección del flujo de electrones.
- \_\_\_ 21. La corriente eléctrica en un circuito es inversamente proporcional al voltaje aplicado.
- \_\_\_ 22. La resistividad de un material depende de la longitud del material.
- \_\_\_ 23. El newton es una unidad de fuerza electromotriz (fem).
- \_\_\_ 24. La resistencia eléctrica de un alambre conductor depende de la corriente eléctrica que fluye por él.

25. En un circuito, en donde sus resistencias están en serie, la caída de voltaje en cada una de ellas es el mismo.

26. Si varios aparatos eléctricos están conectados en serie, al apagar uno de ellos, se interrumpe la corriente eléctrica.

27. En una malla, el voltaje aplicado es igual a la suma de las caídas de voltaje.

28. Las líneas del campo magnético salen del polo norte magnético y convergen al polo sur magnético.

29. El polo norte geográfico de la Tierra coincide con su polo norte magnético.

30. Polos magnéticos iguales se atraen y polos opuestos se rechazan entre sí.

31. Las líneas de campo magnético que rodea a una corriente eléctrica que fluye por un material conductor, forma líneas paralelas al material.

32. Un campo magnético produce una fuerza sobre un alambre conductor, por el cual fluye una corriente eléctrica.

33. Cuando un alambre conductor, conectado a un circuito eléctrico, se mueve en un campo magnético, se produce una corriente eléctrica a través de él.

34. El generador y el motor se utilizan para producir una corriente eléctrica.

35. En un transformador ideal, la potencia aumenta.

36. Los campos eléctricos y magnéticos, en una onda electromagnética, se mueven paralelos entre sí.

## II. ESCRIBE EN EL PARENTESIS DE LA IZQUIERDA LA LETRA CORRESPONDIENTE A LA RESPUESTA CORRECTA.

( ) 1. La fuerza eléctrica producida por dos cargas eléctricas en el punto medio de la línea que las une, es nula.

- a) Si las cargas tienen la misma magnitud pero signos contrarios
- b) Si las cargas tienen la misma magnitud y el mismo signo.
- c) Si las cargas tienen la diferente magnitud pero el mismo signo
- d) Si las cargas tienen diferente magnitud y signos contrarios.

( ) 2. La dirección del campo eléctrico en un punto del espacio depende de

- a) Las coordenadas del punto.
- b) La carga prueba que se considere en el punto.
- c) La dirección en la que se mueve la carga.
- d) La dirección de la fuerza eléctrica.

( ) 3. La magnitud del campo eléctrico en un punto del espacio depende de

- a) El signo de la carga que se considere en el punto.
- b) Solamente de la magnitud de la carga que se considere en el punto.
- c) Tanto de la magnitud de la fuerza eléctrica como de la magnitud de la carga que se considere en el punto.
- d) Solamente de la magnitud de la fuerza eléctrica.

( ) 4. La ebonita atrase cuerpos pequeños después de frotarla con tela de lana porque

- a) Se calienta
- b) Se enfría
- c) Se electriza
- d) Se dilata.

( ) 5. Para cargar por inducción un cuerpo

- a) Se acerca a un cuerpo sin carga
- b) Se acerca a un cuerpo cargado
- c) Se frota con un cuerpo sin carga
- d) Se frota con otro cuerpo cargado.

( ) 6. En condiciones estáticas, en un conductor

- a) No puede haber cargas eléctricas
- b) La carga se encuentra sobre su superficie
- c) Las cargas se acumulan en su centro
- d) La carga se encuentra en todo su volumen.

( ) 7. Es un buen conductor de electricidad

- a) El papel
- b) El vidrio
- c) La porcelana
- d) El cobre.

( ) 8.- La intensidad de la corriente se determina dividiendo la carga que pasa por el conductor entre

- a) La resistencia del conductor
- b) La diferencia de potencial
- c) La longitud del conductor
- d) El tiempo que tarda en pasar.

( ) 9. Para medir la intensidad de la corriente, en el sistema internacional, se debe usar

- a) El voltio
- b) El amper
- c) El coulomb
- d) El ohm

( ) 10. De acuerdo con la Ley de Ohm la intensidad de la corriente es directamente proporcional a

- a) La resistencia
- b) La diferencia de potencial
- c) La longitud del conductor
- d) El tiempo.

( ) 11. Si la longitud de un conductor aumenta al doble, su resistencia

- a) Disminuye a la mitad
- b) Aumenta al doble
- c) Aumenta al cuádruple
- d) Disminuye a la cuarta parte.

( ) 12. El trabajo realizado para producir una corriente es igual a la carga movida, multiplicada por

- a) El tiempo que dura la corriente
- b) La diferencia de potencial
- c) La potencia eléctrica
- d) La intensidad de la corriente.

( ) 13. Multiplicando la diferencia de potencial por la intensidad de la corriente se obtiene

- a) La energía consumida
- b) La carga móvil
- c) La potencia
- d) La resistencia eléctrica.

( ) 14. El watt es la unidad que se usa para medir

- a) La energía consumida
- b) La diferencia de potencial
- c) La potencia
- d) La intensidad de la corriente.

( ) 15. La Ley de Kirchhoff para los nodos establece que

- a) La corriente eléctrica se disipa al salir del nodo
- b) La corriente eléctrica aumenta al salir del nodo
- c) La corriente que llega al nodo es igual a la que sale de él
- d) La corriente que llega al nodo es mayor a la que sale de él.

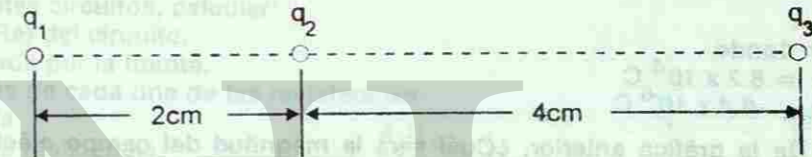
( ) 16. La resistencia de un conductor es

- a) Directamente proporcional al área de su sección transversal
- b) Inversamente proporcional al área de su sección transversal
- c) Inversamente proporcional a su longitud
- d) Inversamente proporcional al cuadrado de su longitud.

- ( ) 17. La resistividad de los materiales se mide en
- Ohm
  - Ohm-m
  - Ohm/m.
  - Volts
- ( ) 18. Tres resistencias, de 8 ohm, 6 ohm y otra de 24 ohm se conectan en paralelo, ¿Cuál es la resistencia equivalente?
- 1 ohm
  - 3 ohm
  - 6 ohm
  - 9 ohm.
- ( ) 19. ¿Cuál es el valor de la resistencia, si cuando se conecta a una diferencia de potencial de 6 V, pasa por ella una corriente de 5 A?
- 12 ohm
  - 300 ohm
  - 6 ohm
  - 30 ohm.
- ( ) 20. Cuando una partícula cargada, se encuentra en reposo, dentro de un campo magnético
- No se ejerce ninguna fuerza sobre ella
  - Se ejerce una fuerza eléctrica sobre ella
  - Se ejerce una fuerza magnética sobre ella
  - Se ejerce una fuerza electromagnética sobre ella.
- ( ) 21. Una tesla equivale a
- 1N/A-m
  - 1N/C-m
  - 1C/A-m
  - 1N/s-m
- ( ) 22. ¿Cuál es la fuerza que se ejerce sobre un protón, que se mueve perpendicularmente a un campo magnético de 0.1T con una velocidad de 1m/s?
- $1.6 \times 10^{-19}$  N
  - $1.6 \times 10^{-20}$  N
  - $1.6 \times 10^{-18}$  N
  - $1.6 \times 10^{-17}$  N
- ( ) 23. El campo magnético producido por un electro imán depende
- Solamente de la corriente a través de la bobina
  - Solamente del número de espiras en la bobina
  - Del material magnético del núcleo
  - De la corriente, el número de espiras y del material del núcleo
- ( ) 24. Dos alambres conductores paralelos, en los cuales fluye una corriente eléctrica por cada uno de ellos, se atraen entre si
- Cuando las corrientes en ellos fluyen en la misma dirección
  - Cuando las corrientes en ellos fluyen en direcciones opuestas
  - Cuando son de materiales diferentes
  - Cuando son del mismo material

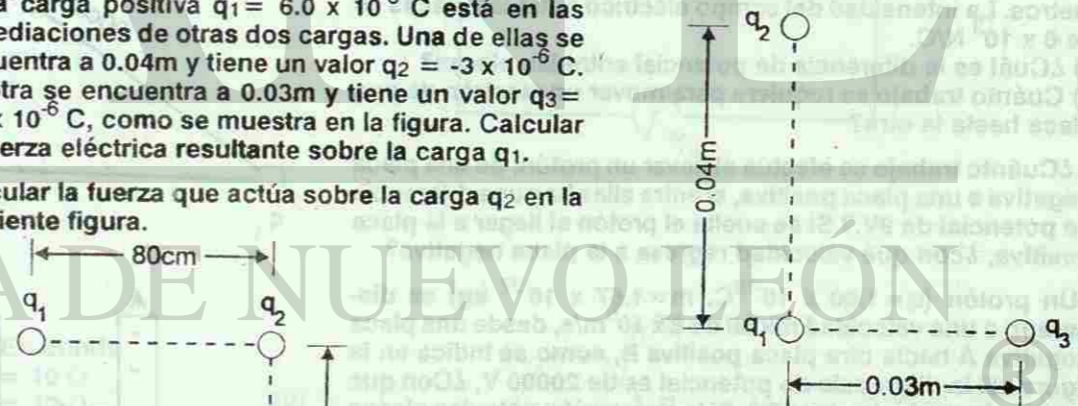
## PROBLEMAS PROPUESTOS

- Calcular la fuerza eléctrica entre dos cargas cuyos valores son:  $q_1 = 3 \mu\text{C}$ ,  $q_2 = -5 \mu\text{C}$  al estar separadas en el vacío por una distancia de 15 centímetros. Determinar si la fuerza es de atracción o de repulsión.
- Una carga  $q_1 = 6 \mu\text{C}$  se encuentra en el aire a 20 centímetros de otra carga  $q_2 = 8 \mu\text{C}$ . Calcular:
  - La fuerza que ejerce la carga  $q_1$  sobre la carga  $q_2$
  - La fuerza que ejerce la carga  $q_2$  sobre la carga  $q_1$
  - ¿Cómo son estas fuerzas?
- En un átomo de hidrógeno, un electrón gira alrededor de un protón en una órbita de radio igual a  $5.3 \times 10^{-11}$  metros. ¿Con qué fuerza eléctrica se atraen el protón y el electrón?
- Una carga  $q_1 = 6 \mu\text{C}$  se encuentra a una distancia de 12 centímetros de una carga  $q_3 = 9 \mu\text{C}$ . Calcular la magnitud y dirección de la fuerza resultante que actúa sobre una carga  $q_2 = 4 \mu\text{C}$ , colocada en el punto medio entre las dos cargas.
- Se tienen tres cargas:  $q_1 = 4 \times 10^{-6}$  C,  $q_2 = -6 \times 10^{-6}$  C y  $q_3 = 8 \times 10^{-6}$  C, colocadas de acuerdo a la siguiente figura.



Calcular:

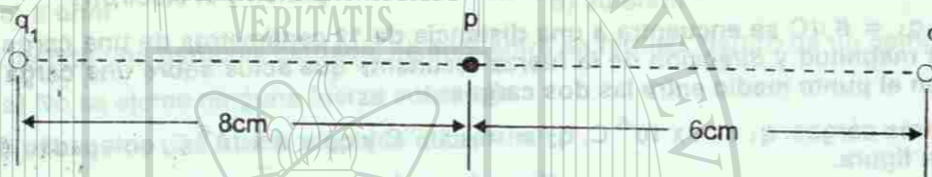
- La magnitud y la dirección de la fuerza resultante que actúa sobre la carga  $q_2$ .
  - La magnitud y la dirección de la fuerza resultante sobre la carga  $q_3$ .
- Una carga positiva  $q_1 = 6.0 \times 10^{-6}$  C está en las inmediaciones de otras dos cargas. Una de ellas se encuentra a 0.04m y tiene un valor  $q_2 = -3 \times 10^{-6}$  C. La otra se encuentra a 0.03m y tiene un valor  $q_3 = 1.5 \times 10^{-6}$  C, como se muestra en la figura. Calcular la fuerza eléctrica resultante sobre la carga  $q_1$ .
  - Calcular la fuerza que actúa sobre la carga  $q_2$  en la siguiente figura.



En donde  
 $q_1 = 10 \mu\text{C}$   
 $q_2 = 8 \mu\text{C}$   
 $q_3 = 20 \mu\text{C}$

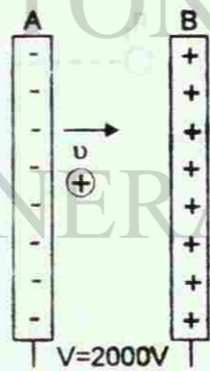
- De la figura anterior, calcular la fuerza resultante sobre la carga  $q_3$ .

- 9.- Una carga de prueba de  $5 \times 10^{-4} \text{ C}$  se coloca en un campo eléctrico que ejerce una fuerza de  $2.5 \times 10^{-4} \text{ N}$  sobre ella. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico en el lugar en que se encuentra la carga de prueba?
- 10.- La intensidad del campo eléctrico producido por una carga de  $3 \text{ C}$  en un punto determinado es de  $6 \times 10^6 \text{ N/C}$ . ¿A que distancia del punto considerado se encuentra la carga?
- 11.- Determinar la magnitud del campo eléctrico en el punto medio entre dos cargas puntuales iguales a  $7 \mu\text{C}$  cada una, separadas  $16 \text{ centímetros}$ .
- 12.- Determinar la magnitud y la dirección del campo eléctrico en el punto (p) que se indica en la siguiente figura.

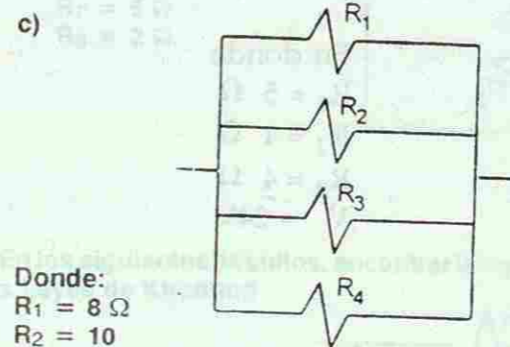
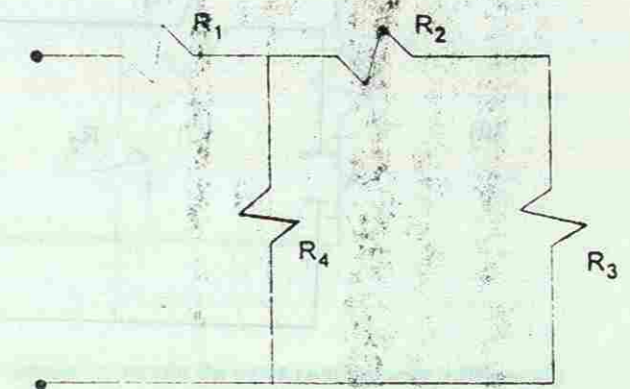
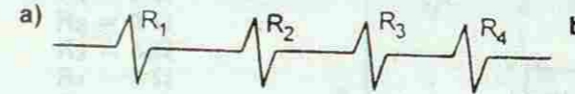


En donde  
 $q_1 = 8.2 \times 10^{-6} \text{ C}$   
 $q_2 = -6.4 \times 10^{-6} \text{ C}$

- 13.- De la gráfica anterior, ¿Cuál será la magnitud del campo eléctrico resultante en un punto colocado a  $4 \text{ centímetros}$  hacia la derecha de  $q_2$ ? ¿Cuál será su dirección?
- 14.- Determinar la intensidad del campo eléctrico en el punto P, originado por dos cargas puntuales  $q_1 = 9 \mu\text{C}$  y  $q_2 = -2 \mu\text{C}$  colocadas según la gráfica del triángulo.
- 15.- Dos placas paralelas están separadas una distancia de  $0.50 \text{ metros}$ . La intensidad del campo eléctrico entre las placas es de  $6 \times 10^3 \text{ N/C}$ .  
 a) ¿Cuál es la diferencia de potencial entre las placas?  
 b) Cuánto trabajo se requiere para mover un electrón de una placa hasta la otra?
- 16.- ¿Cuánto trabajo se efectúa al llevar un protón, de una placa negativa a una placa positiva, si entre ellas hay una diferencia de potencial de  $9 \text{ V}$ ? Si se suelta el protón al llegar a la placa positiva, ¿con qué velocidad regresa a la placa negativa?
- 17.- Un protón ( $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,  $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) es disparado a una velocidad inicial de  $8 \times 10^6 \text{ m/s}$ , desde una placa negativa A hacia otra placa positiva B, como se indica en la figura. Si la diferencia de potencial es de  $20000 \text{ V}$ , ¿Con qué rapidez llegará a la placa B? Si la separación entre las placas es de  $5 \text{ cm}$ , ¿Cuánto tiempo tardará el protón en ir de una placa a la otra? Observe que el trabajo realizado por la fuerza eléctrica es negativo, debido a que dicha fuerza está en sentido contrario al desplazamiento.
- 18.- Si el cobre de gran pureza tiene una resistividad de  $1.6 \times 10^{-8} \text{ -m}$  a temperatura ambiente. ¿Cuál es la resistencia de un alambre de cobre de  $20 \text{ metros}$  de largo y  $1.0 \text{ milímetros}$  de diámetro de sección transversal?
- 19.- Un alambre de hierro cuya resistividad es de  $10 \times 10^{-8} \text{ -m}$ , tiene una longitud de  $4 \text{ m}$ . ¿Cuál es su resistencia si su sección transversal es un círculo de radio igual a  $4 \text{ milímetros}$ ?



- 20.- Encuentra la resistencia equivalente ( $R_e$ ) para los siguientes casos:

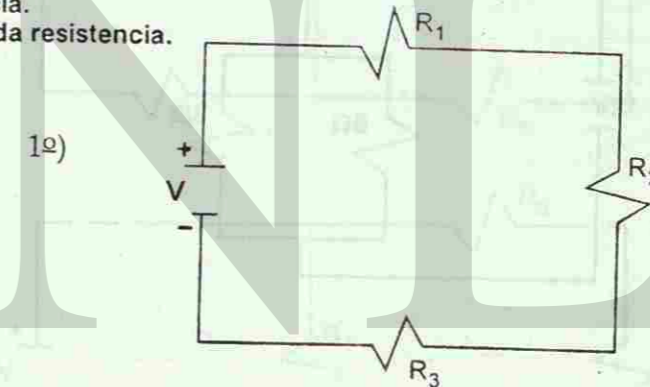


Donde:  
 $R_1 = 8 \Omega$   
 $R_2 = 10$   
 $R_3 = 5 \Omega$   
 $R_4 = 20 \Omega$

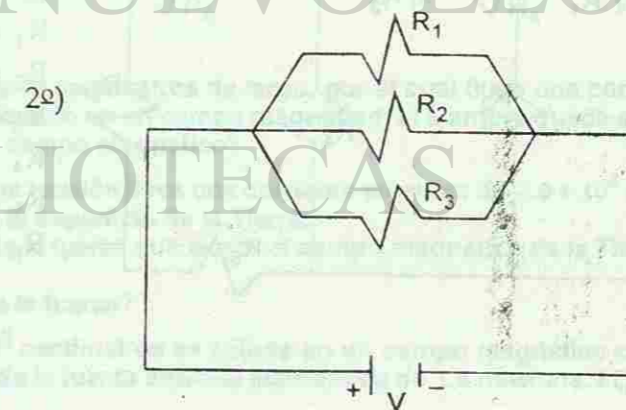
- 21.- Para cada uno de los siguientes circuitos, calcular:

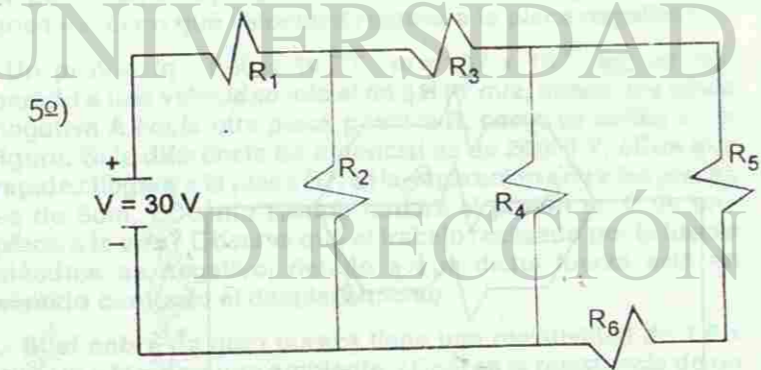
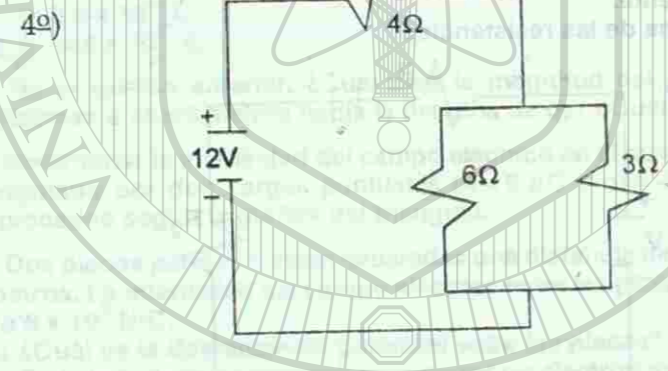
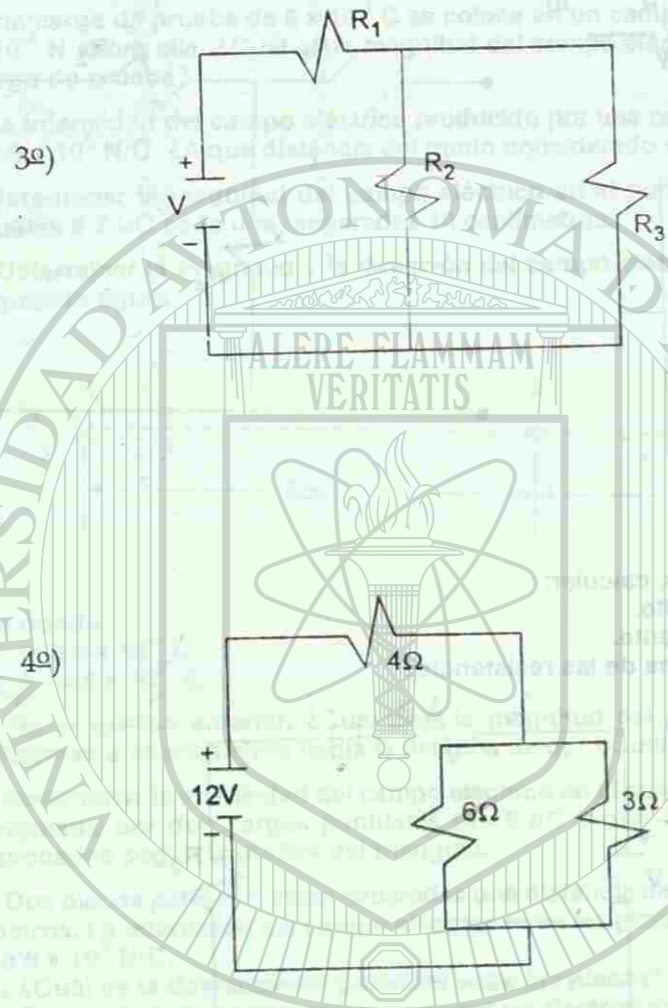
- a) La resistencia equivalente ( $R_e$ ) del circuito.  
 b) La corriente eléctrica generada por la fuente.  
 c) La corriente eléctrica a través de cada una de las resistencias  
 d) El voltaje en cada resistencia.  
 e) La potencia disipada en cada resistencia.

1º) En donde:  
 $R_1 = 8 \Omega$   
 $R_2 = 12 \Omega$   
 $R_3 = 6 \Omega$   
 $R_4 = 4 \Omega$   
 $V = 90 \text{ V}$



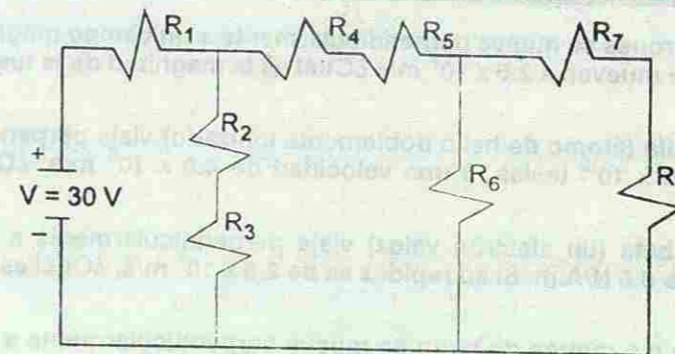
2º) En donde:  
 $R_1 = 10 \Omega$   
 $R_2 = 12 \Omega$   
 $R_3 = 16 \Omega$   
 $R_4 = 24 \Omega$   
 $V = 60 \text{ V}$





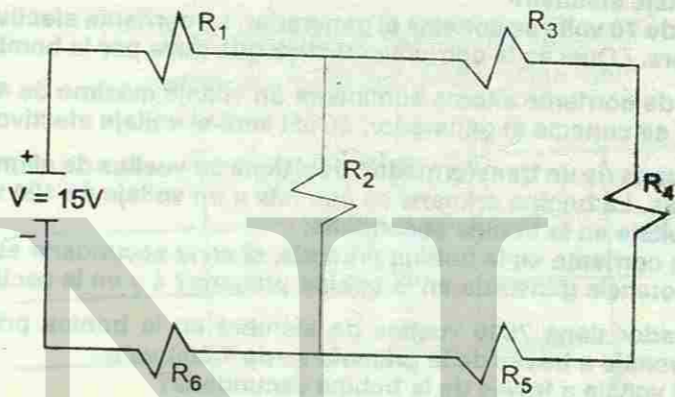
- En donde  
 $R_1 = 2 \Omega$   
 $R_2 = 4 \Omega$   
 $R_3 = 10 \Omega$   
 $R_4 = 8 \Omega$   
 $R_5 = 19 \Omega$   
 $R_6 = 5 \Omega$

- 6) En donde  
 $R_1 = 2 \Omega$   
 $R_2 = 3 \Omega$   
 $R_3 = 5 \Omega$   
 $R_4 = 1 \Omega$   
 $R_5 = 2 \Omega$   
 $R_6 = 4 \Omega$   
 $R_7 = 5 \Omega$   
 $R_8 = 2 \Omega$

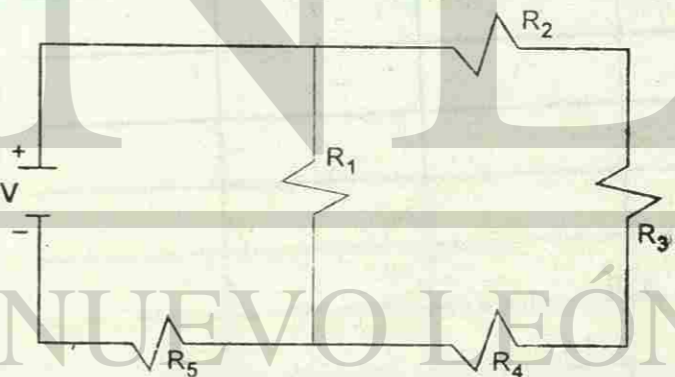


22.- En los siguientes circuitos, encontrar la corriente eléctrica a través de cada resistencia, utilizando las Leyes de Kirchoff

- 1) En donde  
 $R_1 = 6 \Omega$   
 $R_2 = 4 \Omega$   
 $R_3 = 6 \Omega$   
 $R_4 = 4 \Omega$   
 $R_5 = 4 \Omega$   
 $R_6 = 4 \Omega$



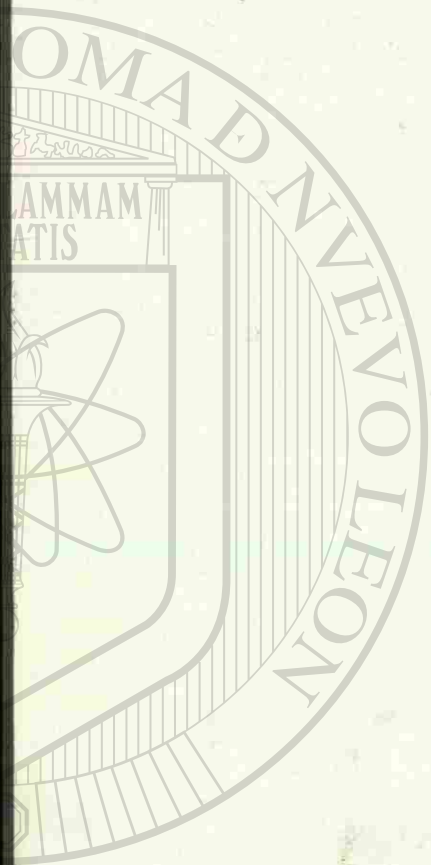
- 2) En donde  
 $R_1 = 10 \Omega$   
 $R_2 = 8 \Omega$   
 $R_3 = 10 \Omega$   
 $R_4 = 7 \Omega$   
 $R_5 = 16 \Omega$   
 $V = 60V$



- 23.- Un alambre de cobre de 40 centímetros de largo, por el cual fluye una corriente de 6.0 amperes, pesa 0.35 newtons. Al colocarlo en un campo magnético, el alambre queda suspendido en el aire. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético?
- 24.- Un cable eléctrico de alta tensión lleva una corriente eléctrica de  $2.0 \times 10^2$  amperes desde el este hacia el oeste, paralelo a la superficie de la Tierra.  
 a) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza que ejerce el campo magnético de la Tierra sobre cada metro de cable?  
 b) ¿Cuál es la dirección de la fuerza?
- 25.- Un alambre de  $6.0 \times 10^2$  centímetros se coloca en un campo magnético cuya intensidad es de 0.40 teslas. La magnitud de la fuerza sobre el alambre es de 1.8 newtons. ¿Cuál es la corriente en el alambre?







U A N

SIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO

CCIÓN GENERAL DE BIBLIOTE