

SECRETARÍA ACADÉMICA DEL NIVEL MEDIO SUPERIOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
Secretaría Académica

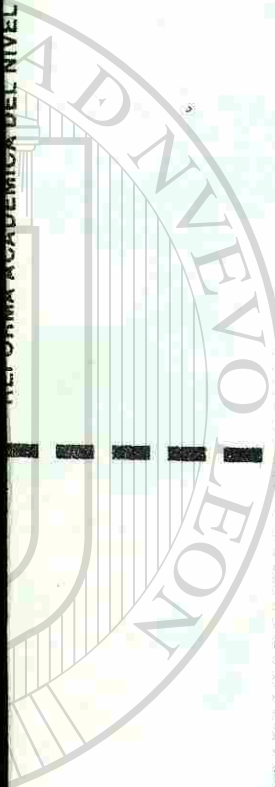
**M8**

*Texto*

FISICA, PRIMERA EDICION 1995

**f**

**Física**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
SECRETARÍA ACADÉMICA DEL NIVEL MEDIO SUPERIOR  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECA

QC27

U530

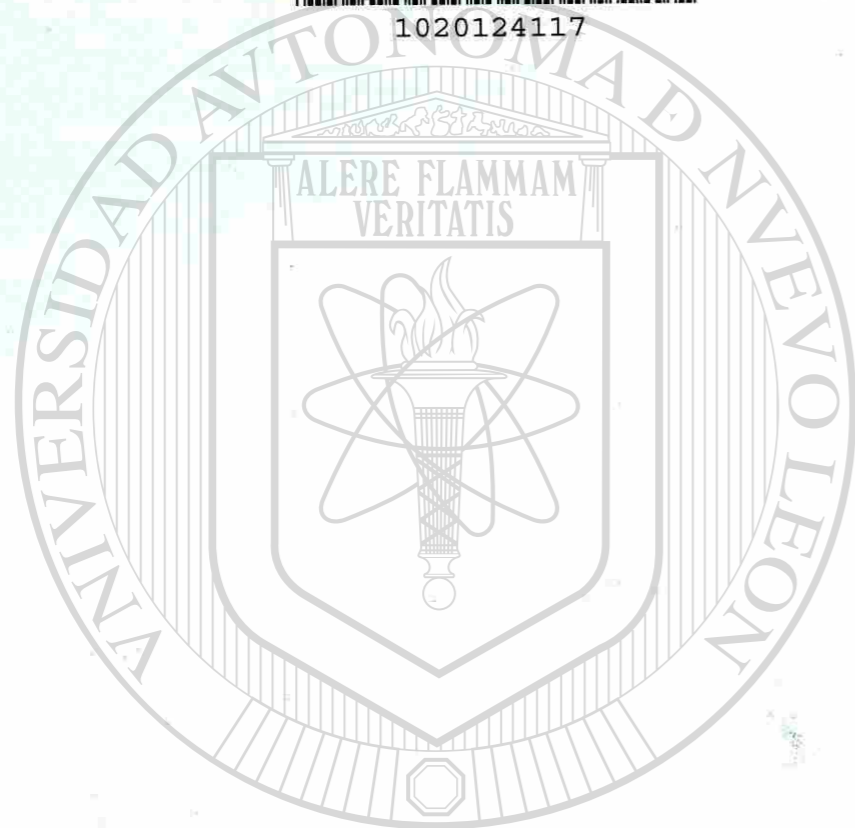
1995

v.8

pte.



1020124117



# UANL

**FÍSICA**

**MÓDULO VIII**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

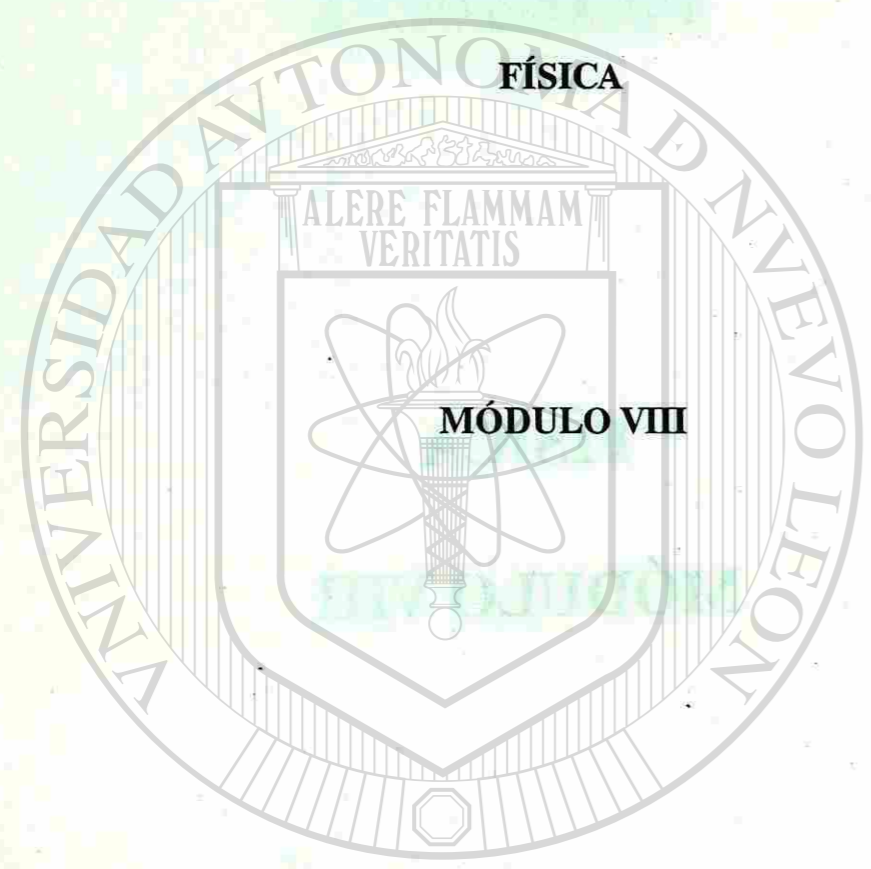
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



QC21  
U530  
1995  
v.8  
pte.1

0120-21160

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
SECRETARÍA ACADÉMICA



MÓDULO VIII

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



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

SECRETARÍA ACADÉMICA

# 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.

## CONTENIDO

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>

# U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS



**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.

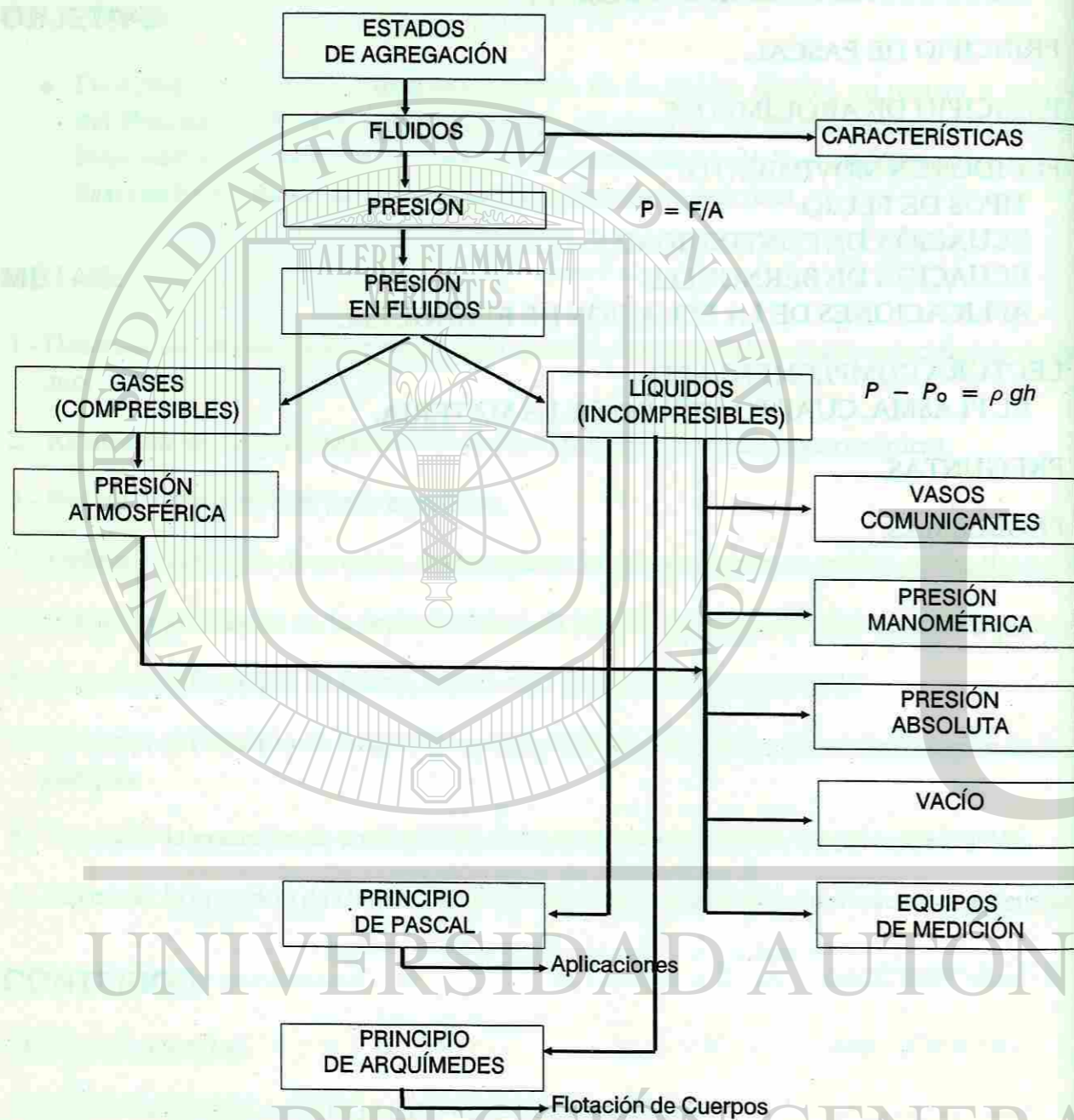
LECTURA COMPLEMENTARIA.

EL PLASMA, CUARTO ESTADO DE LA MATERIA.

PREGUNTAS.

PROBLEMAS.

**MAPA CONCEPTUAL PARA EL DESARROLLO DE LA UNIDAD: FLUIDOS**



**LOS ESTADOS DE AGREGACIÓN DE LA MATERIA**

La materia puede encontrarse en tres estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso. En el estado sólido, las partículas están muy juntas y solo vibran en su posición. En el estado líquido, las partículas están más separadas y pueden moverse libremente. En el estado gaseoso, las partículas están muy separadas y se mueven rápidamente en todas direcciones.

Los cambios de estado de agregación de la materia ocurren cuando se le suministra o se le quita energía. Por ejemplo, al calentar un sólido, este puede convertirse en líquido (fusión) o en gas (evaporación). Al enfriar un líquido, este puede convertirse en sólido (solidificación) o en gas (condensación).

El punto de fusión y el punto de ebullición son propiedades características de cada sustancia. El punto de fusión es la temperatura a la que un sólido se convierte en líquido, y el punto de ebullición es la temperatura a la que un líquido se convierte en gas.

## LOS ESTADOS DE AGREGACIÓN DE LA MATERIA

### 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.

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:  $kg/m^3$  pero a menudo se utilizan las unidades  $g/cm^3$ .

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	$\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$
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.

$$\gamma = \frac{w}{V} \left[ \frac{N}{m^3} \right] \quad \begin{array}{l} \gamma = \text{peso específico} \\ w = \text{peso} \\ V = \text{volumen} \end{array}$$

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.

$$\rho_r = \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad \begin{array}{l} \rho_r = \text{densidad relativa} \\ \rho_s = \text{densidad de la sustancia} \\ \rho_a = \text{densidad del agua} \end{array}$$

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.

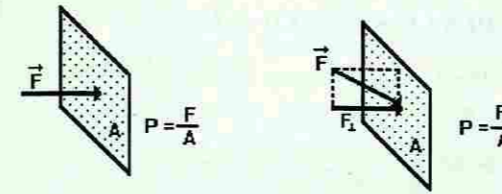


Figura No. 1

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:

$$\begin{aligned} 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} = 14.50 \text{ psi} \\ 1 \text{ atm} &= 760 \text{ mm de Hg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ atm} &= 1.013 \text{ bar} = 1013 \text{ mbar (milibar)} \end{aligned}$$

**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:**

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

**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:**

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

**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.**

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.

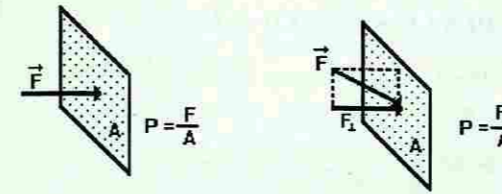


Figura No. 1

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:

$$\begin{aligned} 1 \text{ bar} &= 10^5 \text{ Pa} = 14.50 \text{ psi} \\ 1 \text{ atm} &= 760 \text{ mm de Hg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ atm} &= 1.013 \text{ bar} = 1013 \text{ mbar (milibar)} \end{aligned}$$

**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:**

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

**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:**

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

**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 cm<sup>2</sup>.

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

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 esquís, de 1.5 metros de largo y 10 centímetros de ancho, ¿cuál sería la presión que ejerce sobre la nieve?

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

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

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

**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 m<sup>2</sup>. ¿Qué presión ejerce el tractor sobre la calle?

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

Solución:

$$\text{Peso: } W = mg$$

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

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

$$\text{Presión: } P = \frac{W}{A}$$

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

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

**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 mm<sup>2</sup>?

Datos:

$$F = 50 \text{ N}$$

$$A = 0.1 \text{ mm}^2 = 0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Solución:

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

$$P = \frac{50 \text{ N}}{0.0000001 \text{ m}^2}$$

$$P = 500\,000\,000 \text{ Pa} = 500\,000 \text{ kPa}$$

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.

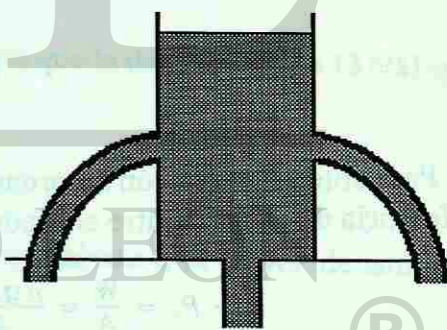


Figura No. 2

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.

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.*

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:

$$\begin{aligned} W &= mg \\ W &= \rho V g \\ W &= \rho g A h \end{aligned}$$

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:

$$P - P_0 = \frac{W}{A} = \frac{\rho g A h}{A} = \rho g h$$

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

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

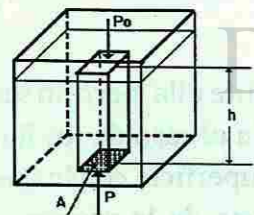


Figura No. 5

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.

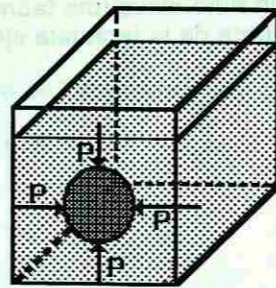


Figura No. 3

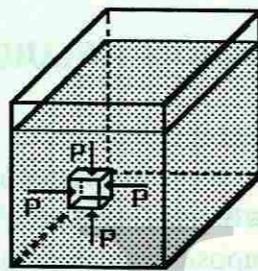


Figura No. 4

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:

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

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:

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

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 " $\rho g h$ " 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:

$$P_{\text{hidrost}} = \rho g h$$

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

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

**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  $1\,030\text{ kg/m}^3$ ?

Datos:

$$h = 10\,900\text{ m}$$

$$\rho = 1\,030\text{ kg/m}^3$$

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

Solución:

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

$$P = 1\,030\text{ kg/m}^3 \times 9.8\text{ m/s}^2 \times 10\,900\text{ m}$$

$$P = 110\,024\,600\text{ Pa}$$

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:

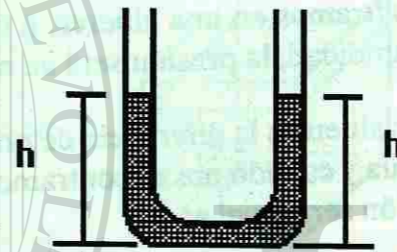


Figura No. 6

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.

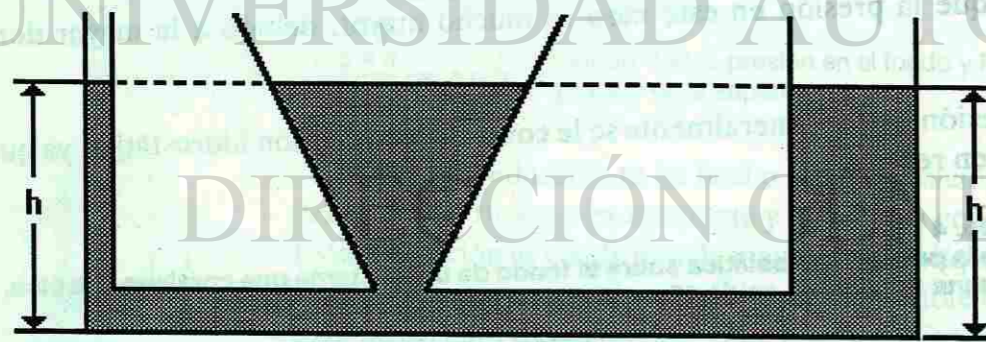


Figura No. 7

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.

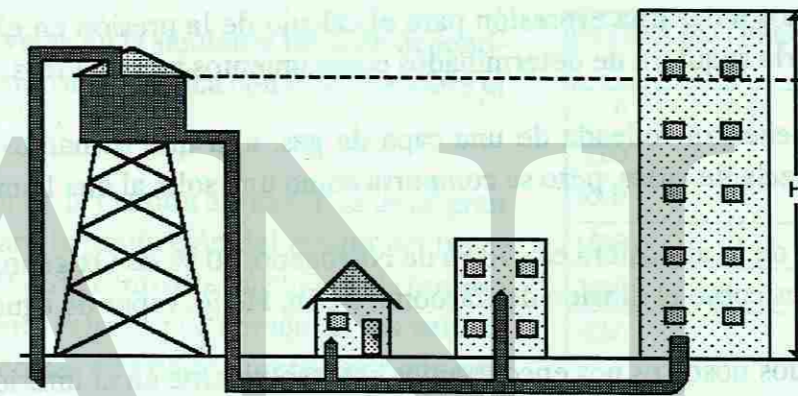


Figura No. 8

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.

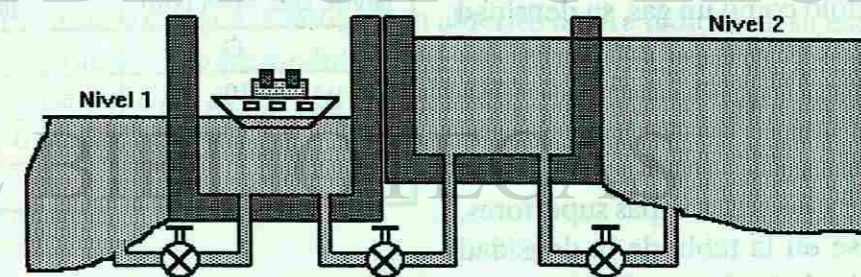


Figura No. 9

## 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.

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

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:

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.

Tabla No. 3. Altura-Presión atmosférica

ALTURA (m)	PRESIÓN ATMOSFÉRICA (mm de Hg)
0	760
500	717
1000	676
1500	638
2000	602
3000	536

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?

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

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

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

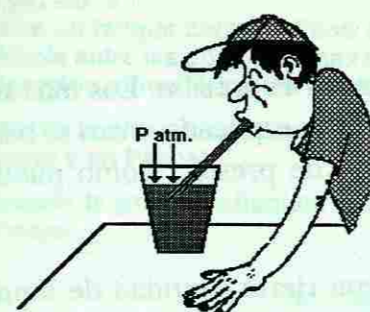


Figura No. 10

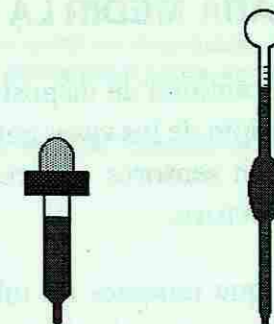


Figura No. 11

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:

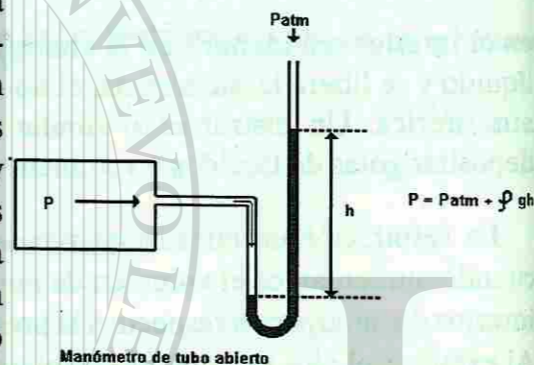


Figura No. 12

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

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. Exprese el resultado en mm de mercurio y en Pascal.

b) Calcule la presión absoluta del oxígeno dentro del tanque.

Datos:

$$h = 250\text{ mm de Hg}$$

$$P_{atm} = 760\text{ mm de Hg}$$

$$1\text{ mm de Hg} = 133.29\text{ Pa}$$

Solución:

$$a) P_{man} = 250\text{ mm de Hg}$$

$$P_{man} = 250\text{ mm de Hg} \times 133.29\text{ Pa/mm de Hg}$$

$$P_{man} = 33\,322.5\text{ Pa}$$

$$b) P_{abs} = P_{atm} + P_{man}$$

$$P_{abs} = 760\text{ mm de Hg} + 250\text{ mm de Hg}$$

$$P_{abs} = 1\,010\text{ mm de Hg}$$

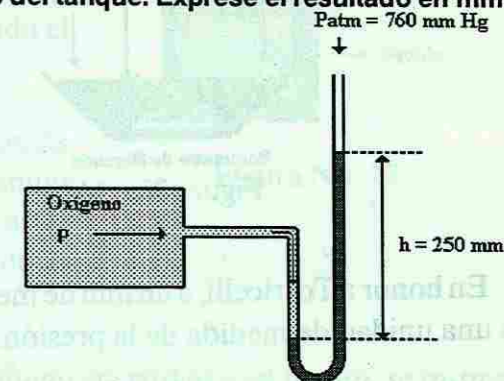


Figura No. 13

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.

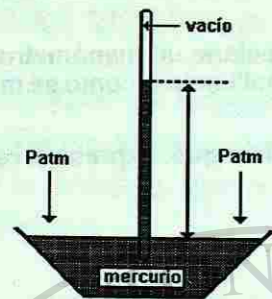
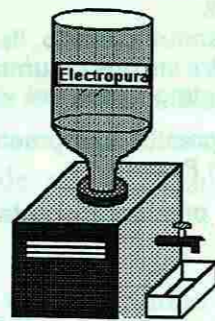
Barómetro de Mercurio  
Figura No. 14

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, solo 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.

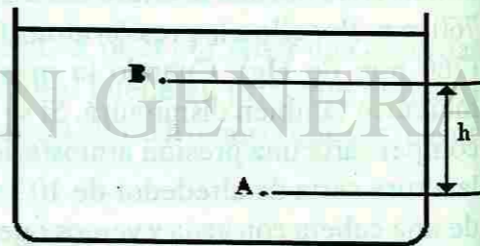


Figura No. 16

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).

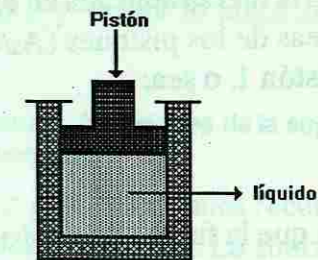


Figura No. 17

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:

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

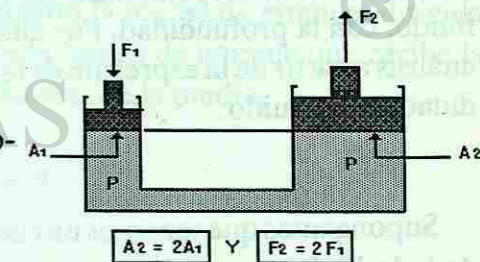


Figura No. 18

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

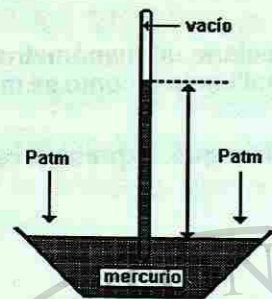
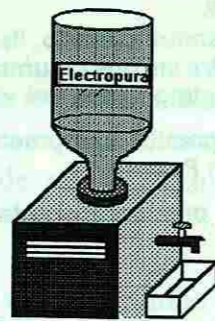
Barómetro de Mercurio  
Figura No. 14

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, solo 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.

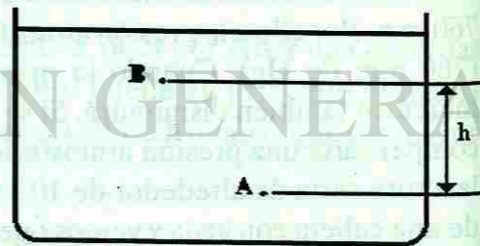


Figura No. 16

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).

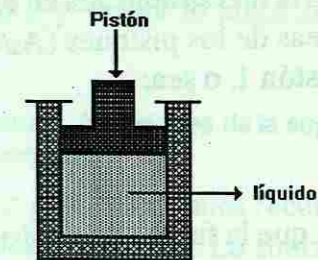


Figura No. 17

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:

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

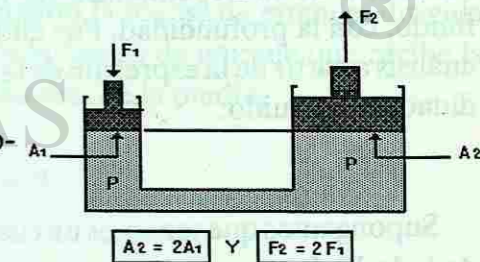


Figura No. 18

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

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:

$$F_2 = 2 F_1$$

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.

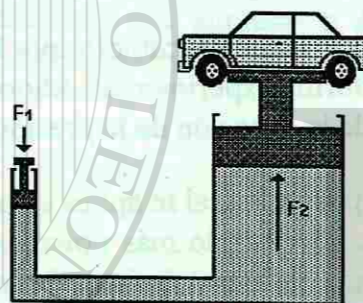


Figura No. 19

## 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.

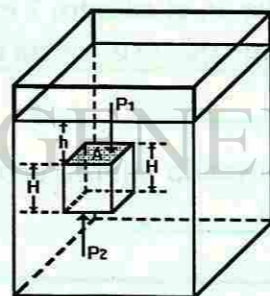


Figura No. 20

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:  
 $E = g \rho V$

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

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.

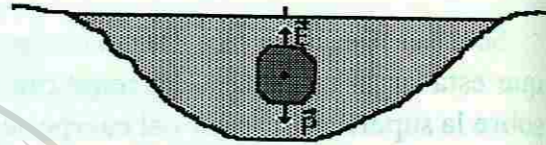


Figura No. 21

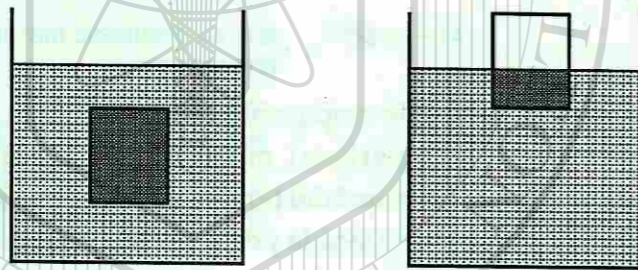


Figura No. 22

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  $2800 \text{ kg/m}^3$ , ¿podría flotar la piedra en la alberca?

Datos:  
 $V = 1.6 \text{ m}^3$   
 $\rho_c = 2800 \text{ kg/m}^3$   
 $G = 9.8 \text{ m/s}^2$   
 $E = 15680 \text{ N}$

Solución:

$$W = mg$$

$$W = \rho V g$$

$$W = 2800 \text{ kg/m}^3 \times 1.6 \text{ m}^3 \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 43904 \text{ N}$$

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

$$W > E$$

$$43904 \text{ N} > 15680 \text{ N}$$

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:

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

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

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

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

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

$$P = mg$$

Peso del tronco.

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

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

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

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

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

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

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

Sustituyendo en la fórmula.

$$P = 1173.18 \text{ N}$$

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

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

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

$$E = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 3.14 \times (0.25 \text{ m})^2 \times 4 \text{ m} \times 9.8 \text{ m/s}^2 / 4$$

$$E = 1923.25 \text{ N}$$

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:

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

$$V_{\text{sumergido}} = 610 \text{ kg/m}^3 \times 0.1962 \text{ m}^3 / 1000 \text{ kg/m}^3$$

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

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.

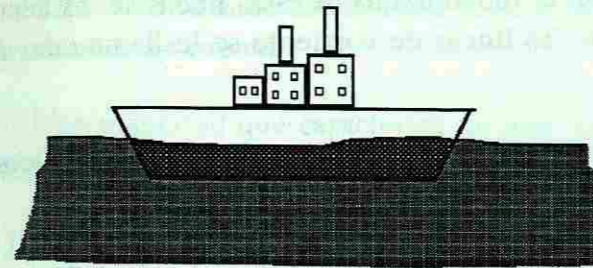


Figura No. 23

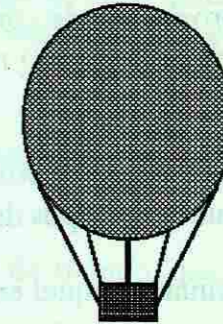


Figura No. 24

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

**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:

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

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

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

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

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

$$P = mg$$

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

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

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

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

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

$$P = 1173.18 \text{ N}$$

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:

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

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

$$E = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 3.14 \times (0.25 \text{ m})^2 \times 4 \text{ m} \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$E = 1923.25 \text{ N}$$

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:

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

$$V_{\text{sumergido}} = 610 \text{ kg/m}^3 \times 0.1962 \text{ m}^3 / 1000 \text{ kg/m}^3$$

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

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.

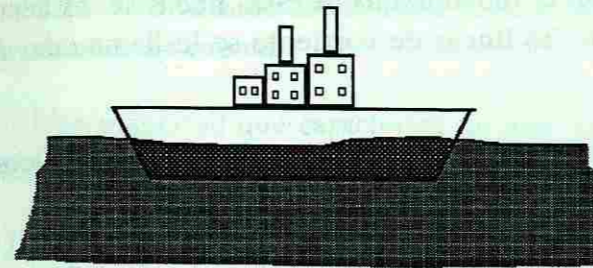


Figura No. 23

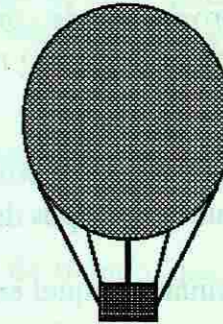


Figura No. 24

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

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.

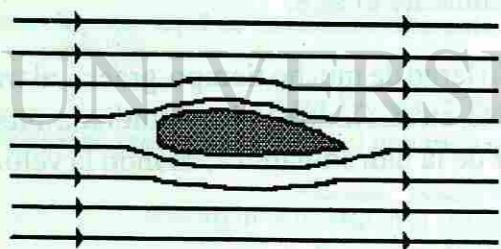


Figura 25. Líneas de corriente para un flujo laminar.

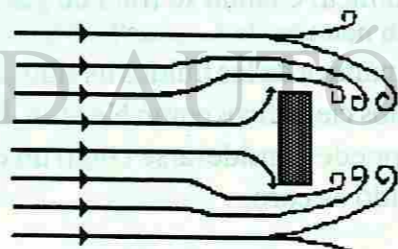


Figura 26. Líneas de corriente para un flujo turbulento.

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  $m^3/s$ , en el Sistema Internacional de Unidades, aunque en ocasiones se utilizan otras unidades como litros por segundo o galones por segundo.

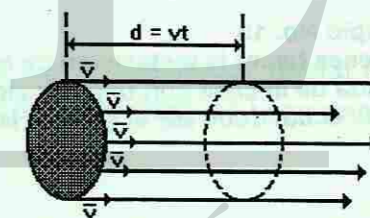


Figura No. 27



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  $\text{m}^3/\text{s}$  y la densidad de  $\text{kg}/\text{m}^3$  por lo que las unidades del gasto másico son  $\text{kg}/\text{s}$ , 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  $0.5 \text{ m}^2$ . Si la velocidad del flujo de agua es de  $2 \text{ m/s}$ , calcule el gasto volumétrico de agua que suministra la tubería.

Datos:  
 $A = 0.5 \text{ m}^2$   
 $v = 2 \text{ m/s}$

Solución:  
 $G = Av$   
 $G = 0.5 \text{ m}^2 \times 2 \text{ m/s}$   
 $G = 1 \text{ m}^3/\text{s}$

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

Teniendo en cuenta que  $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litros}$  el gasto volumétrico, en litros por segundo.

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

Datos:  
 $G = 1 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

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

**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  $1.5 \text{ m/s}$  y el gasto de los habitantes de la casa será de  $1 \text{ litro}/\text{s}$ , ¿cuál debe ser el área de la sección transversal de la tubería que se coloque?

Datos:  
 $G = 1 \text{ litro}/\text{s}$   
 $v = 1.5 \text{ m/s}$   
 $1000 \text{ litros} = 1 \text{ m}^3$

Solución:  
 $G = Av$

$A = G/v$   
 $A = 1 \text{ litro}/\text{s} / 1.5 \text{ m/s}$   
 $A = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} / 1.5 \text{ m/s}$   
 $A = 0.00077 \text{ m}^2$

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

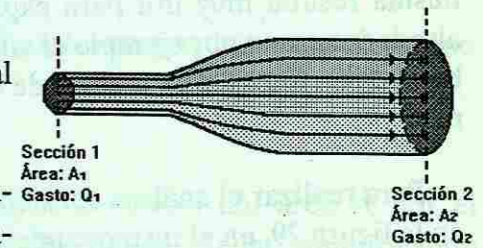
**ECUACIÓN DE CONTINUIDAD**

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  $2 \text{ kg}/\text{s}$ . ¿Cuál será el gasto en la sección 2 del tubo? La respuesta la podemos hallar si pensamos que si al tubo entran  $2 \text{ kg}$  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:

$$Q_1 = Q_2$$

$$A_1 v_1 \rho_1 = A_2 v_2 \rho_2$$

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.

Figura No. 28

Esta ecuación puede escribirse:

$$Q = Av\rho = \text{constante}$$

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:

$$G = Av = \text{Constante}$$

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.

## 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:

$$W_2 = -P_2 A_2 d_2$$

(2) 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:

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

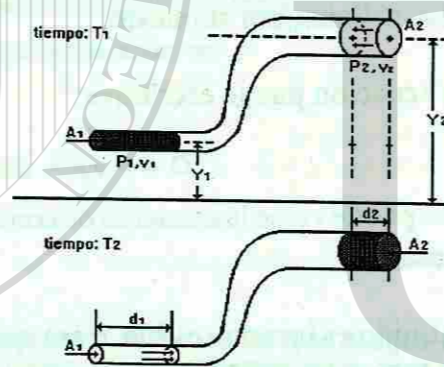


Figura No. 29

- 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:

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

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

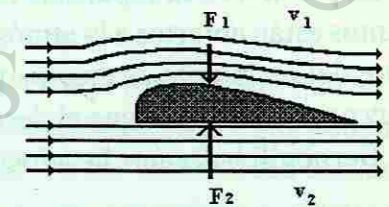


Figura No. 30

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.

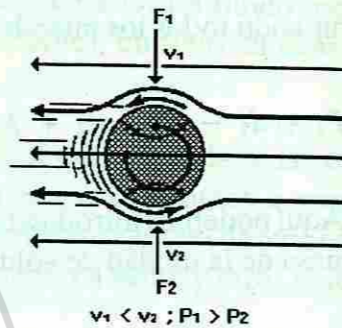


Figura No. 31

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 hallamos la velocidad de salida del líquido, por el orificio:

$$P_2 + \rho g Y_2 = P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g Y_1$$

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

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

$$v_1 = \sqrt{2 g h}$$

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:

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

$$G = A \sqrt{2 g h}$$

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 ( $P_2$ ) deberá 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.

## 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 y iones positivos. En el segundo además de electrones y 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.

## 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

- El concreto es alrededor de tres veces más denso que el agua. La gravedad específica del concreto es de 3.0:
  - ¿Cuál es la masa de  $1\ 000\text{ cm}^3$  de concreto?
  - ¿Cuánto volumen ocupa 1 kilogramo de concreto?
  - ¿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?
- La densidad relativa del agua de mar es casi igual a 1.025. Esto significa que su densidad es de  $1.025\text{ g/cm}^3$ .
  - ¿Cuánto pesa un litro de agua de mar?
  - ¿Cuántos litros de agua de mar pesan 1 kilogramo?
- La densidad relativa de una balsa de madera es de 0.15. Cuando la balsa flota, ¿qué fracción de ella está sumergida?
- 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?
- Determina la masa de un cubo de aluminio que tiene 5 centímetros por lado. La densidad del aluminio es de  $2\ 700\text{ kg/m}^3$ .
- 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?
- ¿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  $(4/3)\pi r^3$ .
- ¿Qué volumen ocupa un sólido si tiene una masa de 2 kilogramos y una densidad de  $6\ 000\text{ kg/m}^3$ .

- ¿Qué volumen ocuparán 3 kilogramos de mercurio? y ¿Cuál será el peso de éste volumen?
- Calcula la masa de un cubo de aluminio que mide 10 centímetros por lado. La densidad relativa del aluminio es de 2.7.
- ¿A qué profundidad está nadando una persona dentro de una alberca si la presión absoluta sobre ésta es de 156 kPa.
- ¿Cuál será la presión absoluta a 1.5 metros de profundidad en una cisterna llena de agua?
- Encuentra la presión hidrostática a 5.6 metros de profundidad en un tanque lleno aceite abierto a la atmósfera, si su densidad es de  $700\text{ Kg/m}^3$ .
- Encuentra la presión en kilopascales debido a una columna de mercurio de 45 centímetros de altura.
- 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,
  - ¿cuál es la fuerza resultante que se ejerce sobre el pistón grande?
  - ¿Cuál es el incremento de presión debajo del pistón pequeño?
  - ¿Cuál es el incremento de presión debajo del pistón grande?
- 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?
- 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?
- 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?
- 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?
- Una pieza de aleación pesa 10 newtons en el aire y 4 newtons cuando está sumergida en agua. Calcular su volumen y densidad.
- 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.
- ¿Qué porcentaje de un témpano de hielo permanecerá por debajo del nivel del agua de mar? La densidad del agua de mar es  $1024\text{ kg/m}^3$ .
- 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  $\text{m}^3/\text{minuto}$ ?
- 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?
- 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?
- 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.
- ¿Cuál será la presión si el tubo cambia de tamaño y provoca que la velocidad se incremente a 24 m/s?
- 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 una 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

## 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

## CALOR

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°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°C) corresponde a 273 K y la temperatura de ebullición del agua (100°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 ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 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  $2\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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	$^{\circ}\text{C}$	K	$^{\circ}\text{F}$
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 pbtenida 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.

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 ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 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  $2\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 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	$^{\circ}\text{C}$	K	$^{\circ}\text{F}$
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 pbtendida 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 desprejarse 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 ( $27^\circ C$ ), 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 ( $127^\circ C$ )?

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:

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

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

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

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

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

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:

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

donde  $\beta$  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 $4^\circ C$ )	$210 \times 10^{-6}$
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:

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

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

similar a la utilizada para la dilatación lineal.

#### 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:

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

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

$$\beta = 1.080 \times 10^{-6} \text{ 1/K (De la tabla)}$$

Solución:

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

$$\Delta V = 1.080 \times 10^{-6} \text{ 1/K (40 litros)} 35^\circ\text{C}$$

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

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

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 utilizaríamos 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:

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

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

$$\Delta V = 79.800 \times 10^{-6} \text{ litros}$$

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

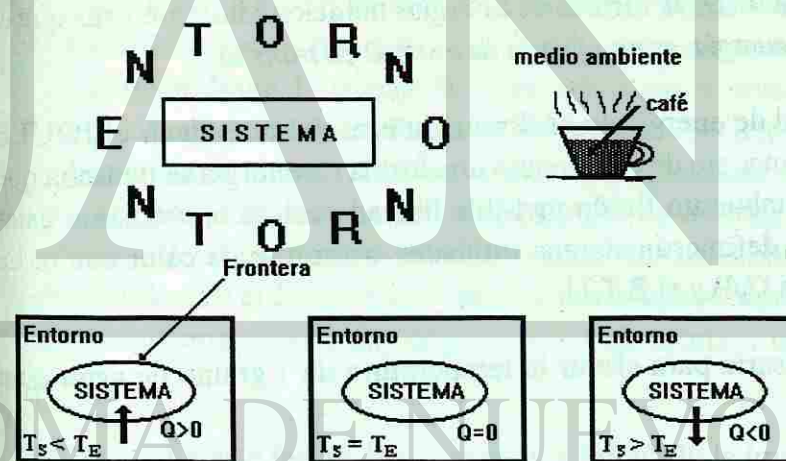
que como se observa es mucho menor que la dilatación de la gasolina y por ello es posible despreciarla. Si se requiere una mayor exactitud del cálculo entonces debe tenerse en cuenta esta dilatación también.

## 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.



La taza de café (sistema bajo estudio) cede calor (energía que se transfiere) al entorno en virtud de la diferencia de temperaturas; en los fenómenos térmicos éste flujo de calor constituye la medida de la interacción entre un sistema y su entorno o entre dos sistemas pues se colocan en contacto térmico.

*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) concideremos 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 cafe 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 erroneamente que la humeante taza de café a la que hacemos referencia posee calor, y lo cede al entorno mediante algun 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 mas adelante en éste 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 logicamente, 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 trasferencia 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,  $1 \text{ cal} \approx 4.19 \text{ J}$ .

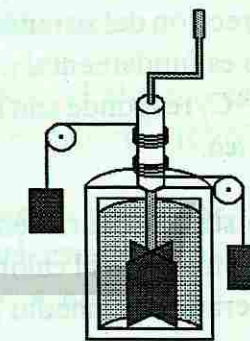


Fig. 1. Aparato de Joule

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.

Para simplificar el análisis energético (ley de la conservación de la energía) concideremos 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 cafe 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 erroneamente que la humeante taza de café a la que hacemos referencia posee calor, y lo cede al entorno mediante algun 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 mas adelante en éste 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 logicamente, 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

$$1 \text{ cal.} = 4.186 \text{ J.}$$

$$1 \text{ kilocaloría} = 1000 \text{ cal.} = 4,186 \text{ J.}$$

$$1 \text{ BTU} = 1055 \text{ J.}$$

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

- 1) Mediante un proceso de transporte de calor (los mecanismos de trasferencia 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,  $1 \text{ cal} \approx 4.19 \text{ J}$ .

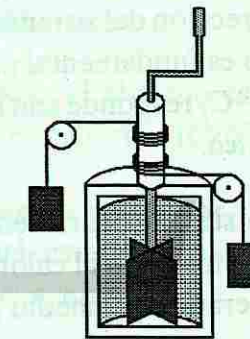


Fig. 1. Aparato de Joule

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.



Luego este excedente de energía puede entonces ser trasferida 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 trasferencia 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. Eligiéremos 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 éste 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.

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

$c_p$  = calor específico a presión constante.  
 $Q$  = Cantidad de Calor Transferida. [J]  
 $m$  = masa del cuerpo. [kg]  
 $\Delta T$  = cambio de temperatura. [K.]

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  $15^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ ?

Datos

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

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

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

Solución:

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

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

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

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

$$m = \rho V = \left(\frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3}\right) (12\,000 \text{ cm}^3)$$

$$m = 12\,000 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kg}}{1\,000 \text{ g}}$$

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

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

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

$$Q = m c_p \Delta T$$

$$Q = (12 \text{ kg}) \left(4\,190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) (30 \text{ K})$$

$$Q = 1\,508.4 \text{ kJ (kilojoules)}$$

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

**Ejemplo No. 4**  
Medio litro de agua a 30°C se enfría al extraerle  $2.1 \times 10^4$  Joules de calor. ¿Cuál es la temperatura final del agua?

Datos

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

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

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

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

$$T_2 = ?$$

de donde  $m = 0.5 \text{ kg}$  (revisar ejemplo anterior)  
(Q cedido por el agua es negativo)

Solución:

De la ecuación  $Q = m c_p \Delta T$

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

$$\Delta T = \frac{-2.1 \times 10^4 \text{ J}}{(0.5 \text{ kg}) \left(4\,190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)}$$

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

$$\Delta T = -10^\circ\text{C} \quad \text{ya que } \Delta T = -10 \text{ K}$$

$$T_2 = \Delta T + T_1$$

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

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

**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

$$m = m_a$$

$$\Delta T = \Delta T_a$$

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

Block latón

$$m = m_i$$

$$\Delta T = \Delta T_i$$

$$c_{pi} = 380 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

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

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

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

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

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

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

**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  $Q_a/Q_i$ ?

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

**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".

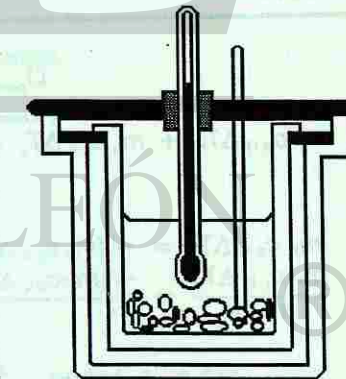


Fig. 2 Calorímetro.

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

$$m = \rho V = \left(\frac{1 \text{ g}}{\text{cm}^3}\right) (12\,000 \text{ cm}^3)$$

$$m = 12\,000 \text{ g} \times \frac{1 \text{ kg}}{1\,000 \text{ g}}$$

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

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

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

$$Q = m c_p \Delta T$$

$$Q = (12 \text{ kg}) \left(4\,190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) (30 \text{ K})$$

$$Q = 1\,508.4 \text{ kJ (kilojoules)}$$

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

**Ejemplo No. 4**  
Medio litro de agua a 30°C se enfría al extraerle  $2.1 \times 10^4$  Joules de calor. ¿Cuál es la temperatura final del agua?

Datos

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

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

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

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

$$T_2 = ?$$

de donde  $m = 0.5 \text{ kg}$  (revisar ejemplo anterior)  
(Q cedido por el agua es negativo)

Solución:

De la ecuación  $Q = m c_p \Delta T$

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

$$\Delta T = \frac{-2.1 \times 10^4 \text{ J}}{(0.5 \text{ kg}) \left(4\,190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)}$$

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

$$\Delta T = -10^\circ\text{C} \quad \text{ya que } \Delta T = -10 \text{ K}$$

$$T_2 = \Delta T + T_1$$

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

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

**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

$$\text{Block}_{\text{aluminio}}$$

$$m = m_a$$

$$\Delta T = \Delta T_a$$

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

Block latón

$$m = m_i$$

$$\Delta T = \Delta T_i$$

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

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

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

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

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

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

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

**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  $Q_a/Q_i$ ?

$$\frac{Q_a}{Q_i} = \frac{900 (m \Delta T)}{380 (m \Delta T)} = 2.37 \quad \text{R}_2 = \text{Se requiere agregar 2.37 veces más calor que al block de latón.}$$

### 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".

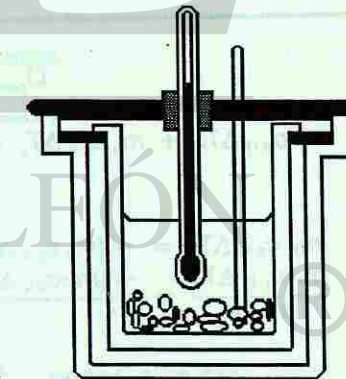


Fig. 2 Calorímetro.

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:

$$Q_{\text{ganado}} + Q_{\text{perdido}} = 0 \quad \begin{aligned} Q_g &= Q(+) \text{ para las sustancias que se calientan.} \\ Q_p &= Q(-) \text{ para las sustancias que se enfrían.} \end{aligned}$$

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 pedigón 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 pedigón 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
$m_H = 0.68 \text{ kg}$	$m_c = 0.06 \text{ kg}$	$m_{\text{agua}} = 0.15 \text{ kg}$
$T_1 = 95^\circ\text{C}$	$T_1 = 18^\circ\text{C}$	$T_1 = 18^\circ\text{C}$
$c_p = ?$	$c_p = 900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$c_p = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$T_F = 22^\circ\text{C}$	$T_F = 22^\circ\text{C}$	$T_F = 22^\circ\text{C}$
$\Delta T_H = (22 - 95) \text{K}$	$\Delta T = T_F - T_1$ $\Delta T = (22 - 18) \text{K}$	$\Delta T = T_F - T_1$ $\Delta T = (22 - 18) \text{K}$
$\Delta T = -73 \text{ K}$	$\Delta T = 4 \text{ K}$	$\Delta T = 4 \text{ K}$

Solución:

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

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

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

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

$$c_p = \frac{-[(0.06 \text{ kg})(900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}})(4 \text{ K}) + (0.15 \text{ kg})(4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}})(4 \text{ K})]}{(0.08 \text{ kg})(-73 \text{ K})}$$

a) Considerando que no existen pérdidas, el calor perdido por el pedigón 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.

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

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

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

b) la temperatura de equilibrio de una mezcla "t<sub>e</sub>"

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
$m = 0.15 \text{ kg}$	$m = 0.06 \text{ kg}$	$m = 0.2 \text{ kg}$
$T_1 = 100^\circ\text{C} = 373 \text{ K}$	$T_1 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$	$T_1 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$
$c_p = 387 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$c_p = 900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$c_p = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$T_F = T_E = ?$	$T_F = T_E = ?$	$T_F = T_E = ?$

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.

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

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

Sustituyendo datos.

$$+ (0.2 \text{ kg})(4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}) \text{ K} = 0$$

$$58.05 \text{ J} (T_E - 373) \text{ K} + 54 \text{ J} (T_E - 293) \text{ K} + 838 \text{ J} (T_E - 293) \text{ K} = 0$$

$$58.05 \text{ J} (T_E - 373) \text{ K} + 892 \text{ J} (T_E - 293) \text{ K} = 0$$

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

$$950.05 T_E = 283008.65$$

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

$$T_E = 297.89 \text{ K}$$

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

c) la masa de una sustancia "m".

### Ejemplo No. 8

Un pedazo de cobre se calienta a  $90^{\circ}\text{C}$  y luego se coloca en 0.80 kilogramos de agua a  $10^{\circ}\text{C}$ . La temperatura al final de la mezcla es de  $18^{\circ}\text{C}$ . ¿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
$T_i = 90^{\circ}\text{C} = 363\text{ K}$	$T_i = 10^{\circ}\text{C} = 283\text{ K}$
$T_f = 18^{\circ}\text{C} = 291\text{ K}$	$T_f = 18^{\circ}\text{C} = 291\text{ K}$
$\Delta T = -72\text{ K}$	$\Delta T = 8\text{ K}$
$c_p = 387 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$c_p = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$m = ?$	$m = 0.080\text{ kg}$

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

Solución:

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

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

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

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

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

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

## 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 tranferido 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	2256
Plomo	601	24.7	2013	858
Plata	1235	105	2485	2336
Oro	1336	63	2153	1640
Cobre	1356	205	2840	4730

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.

c) la masa de una sustancia "m".

### Ejemplo No. 8

Un pedazo de cobre se calienta a  $90^{\circ}\text{C}$  y luego se coloca en 0.80 kilogramos de agua a  $10^{\circ}\text{C}$ . La temperatura al final de la mezcla es de  $18^{\circ}\text{C}$ . ¿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
$T_i = 90^{\circ}\text{C} = 363\text{ K}$	$T_i = 10^{\circ}\text{C} = 283\text{ K}$
$T_f = 18^{\circ}\text{C} = 291\text{ K}$	$T_f = 18^{\circ}\text{C} = 291\text{ K}$
$\Delta T = -72\text{ K}$	$\Delta T = 8\text{ K}$
$c_p = 387 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$c_p = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
$m = ?$	$m = 0.080\text{ kg}$

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

Solución:

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

$$m_{\text{Cu}} \left( 387 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) (-72\text{ K}) + m_{\text{Cu}} c_{p_{\text{Cu}}} \Delta T_{\text{Cu}} + m_{\text{agua}} c_{p_{\text{agua}}} \Delta t_{\text{agua}} = 0$$

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

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

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

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

## 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 tranferido 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	2256
Plomo	601	24.7	2013	858
Plata	1235	105	2485	2336
Oro	1336	63	2153	1640
Cobre	1356	205	2840	4730

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<sub>2</sub>O. 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°C y convertirlo todo en vapor a 120°C.

Datos:  
Sustancia: Agua  
Masa = 1 kg  
T<sub>i</sub> = - 50°C = 223 K  
T<sub>f</sub> = 120°C = 393 K

C<sub>p</sub> hielo = 2 093  $\frac{J}{kg - K}$   
C<sub>p</sub> agua = 4 190  $\frac{J}{kg - K}$   
C<sub>p</sub> vapor = 2 009  $\frac{J}{kg - K}$

De la tabla de calores específicos.

P<sub>F</sub> = 273 K  
P<sub>E</sub> = 373 K  
Valores para el agua obtenidos de la tabla de calores latentes.

L<sub>F</sub> = 333  $\frac{kJ}{kg}$   
L<sub>E</sub> = 2 256  $\frac{kJ}{kg}$

$$Q_1 = (1 \text{ kg})(2 093 \frac{J}{kg - K})(273 \text{ K} - 223 \text{ K})$$

$$Q_1 = m c_{p\text{hielo}} \Delta T_1$$

$$Q_1 = (1 \text{ kg})(2 093 \frac{J}{kg - K})(50 \text{ K})$$

$$Q_1 = 104.65 \text{ kJ}$$

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

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

$$Q_{LF} = L_F m$$

$$Q_2 = (1 \text{ kg})(4 190 \frac{J}{kg - K})(373 \text{ K} - 273 \text{ K})$$

$$Q_2 = m c_{p\text{agua}} \Delta T_2$$

$$Q_2 = (1 \text{ kg})(4 190 \frac{J}{kg - K})(100 \text{ K})$$

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

$$Q_{LV} = (2 256 \frac{kJ}{kg})(1 \text{ kg})$$

$$Q_{LV} = L_V m$$

$$Q_{LV} = 2 256 \text{ kJ}$$

$$Q_3 = (1 \text{ kg})(2 009 \frac{J}{kg - K})(393 \text{ K} - 373 \text{ K})$$

$$Q_3 = m c_{p\text{vapor}} \Delta T_3$$

$$Q_3 = (1 \text{ kg})(2 009 \frac{J}{kg - K})(20 \text{ K})$$

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

$$Q_{\text{total}} = (104.65 + 333 + 419 + 2 256 + 40.18) \text{ kJ} \quad Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_{LF} + Q_2 + Q_{LV} + Q_3$$

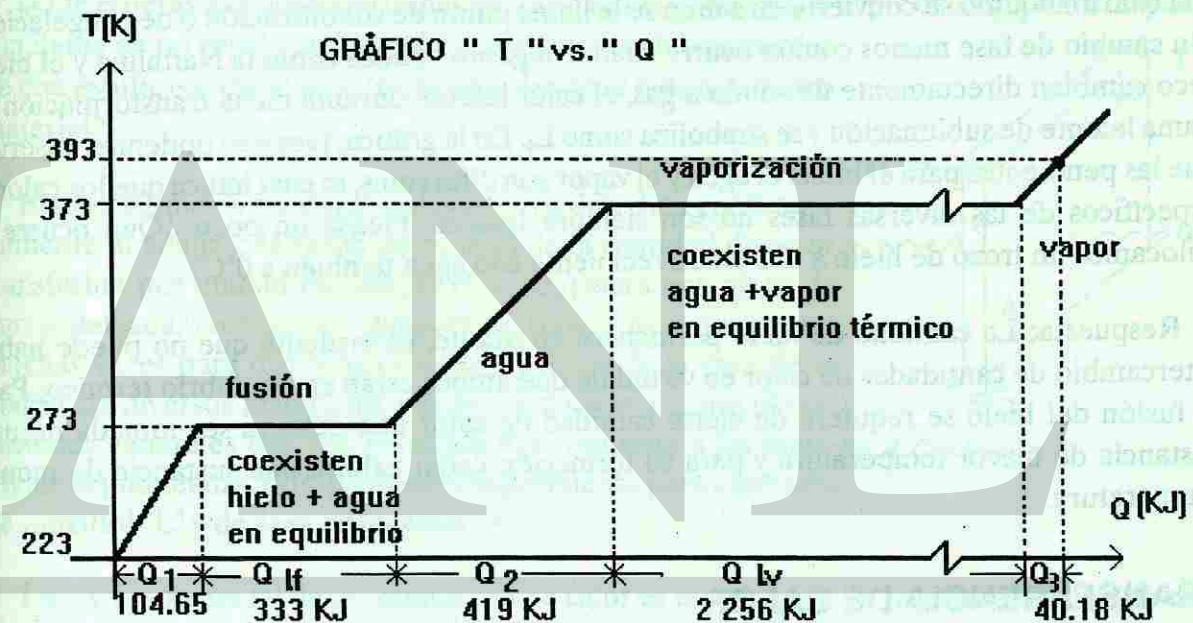


Fig. 3. Gráfica de Temperatura vs Calor transferido.

Observa en la gráfica de T "vs" Q que 104.65 kJ del calor total transferido. Se emplean para incrementar la temperatura del trozo de hielo de - 50°C a 0°C (Punto de fusión del hielo), 333 kJ se requieren para fundir el kilogramo de hielo, para incrementar la temperatura del agua de 0°C hasta 100°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°C hasta 120°C.

La energía total transferida para llevar el sistema descrito de - 50°C hasta 120°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 ( $H = Q_c/t$ ) 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".

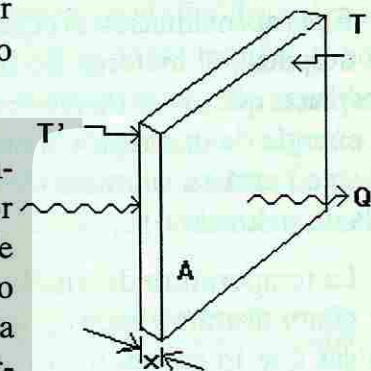


Fig. 4. Conducción.

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

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

"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 incrementara 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).

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

"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 incrementara 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

$$PV = n \times \text{constante} \quad (1)$$

en donde  $n$  es el número de moles,  $V$  es el volumen ocupado por  $n$  moles y  $P$  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  $0C$ , pero cada línea intersectaría la abscisa en el mismo punto, que es  $-273.16F128EC$  ( $-273^{\circ}C$ ).

Este resultado implica que si un gas ideal se enfriara a  $-273^{\circ}C$ , su volumen disminuirá hasta cero, lo que sugiere que  $-273^{\circ}C$  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

$$R = 8.31 \frac{J}{mol - K}$$

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

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

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  $H_2$ , 20 gramos de  $En$ , 44 gramos de  $CO_2$  y 211 gramos de  $Rn$  ocupan cada uno de ellos 22.4 litros a  $0^\circ C = 273 K$  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:

- $P \propto N$ . 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.
- $P \propto 1/V$ . 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.
- $P \propto m$ . 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, traducándose 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 maximamente 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

- 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 maximamente 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.

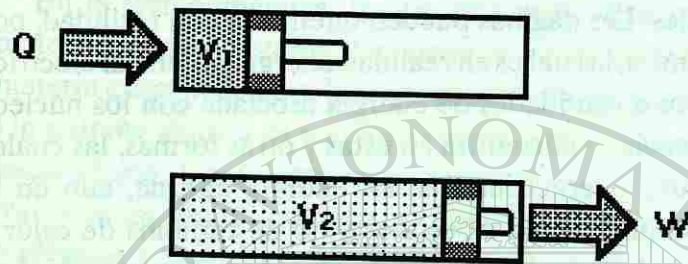


Fig. 5.

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 x desplazamiento x  $\cos \theta$ , 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

$$W = F \Delta x$$

Fig. 6.

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,

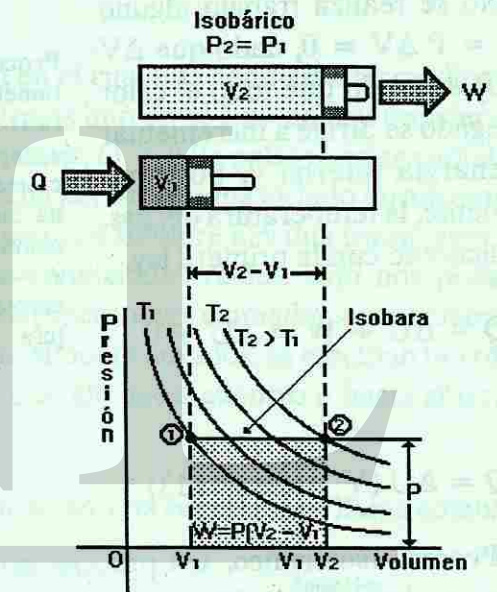
$$W = P \Delta x$$

Pero  $A \Delta x$  es simplemente el cambio en el volumen del gas,  $\Delta V = V_2 - V_1$ . 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 ( $\Delta U = U_2 - U_1 \propto T_2 - T_1$ ).



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,

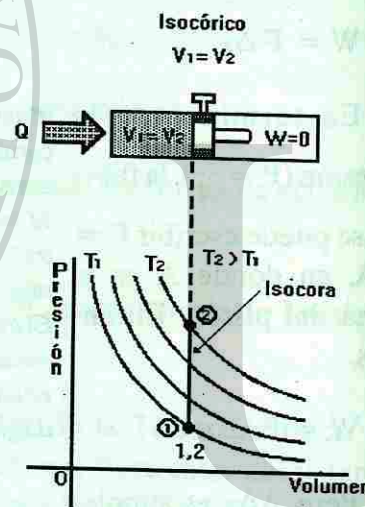
$$Q = \Delta U + W = \Delta U + 0$$

y

$$Q = \Delta U \quad (V = \text{cte.}) \quad (13)$$

Proceso Isocórico. (Isovolúmetrico, 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.

Fig. 7.



**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 un 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

$$Q = W \quad (T = \text{cte.}) \quad (14)$$

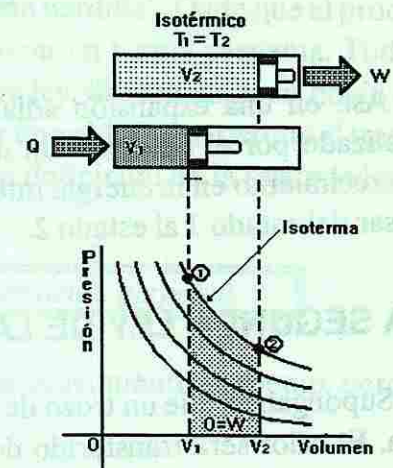
Así, para un gas ideal, un proceso isotérmico es uno en el cual la energía calorífica se convierte en trabajo mecánico (o viceversa para la trayectoria inversa).

**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,

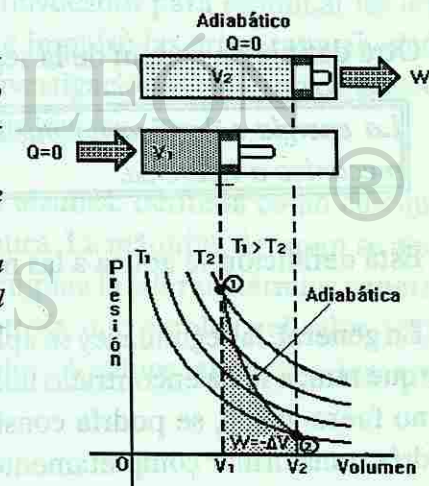
Fig. 8.

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.



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.

Fig. 9.



$$Q = 0 = \Delta U + W$$

$$W = -\Delta U \quad (\text{expansión adiabática}) \quad (15)$$

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 evidenciado 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.

$$Q = 0 = \Delta U + W$$

$$W = -\Delta U \quad (\text{expansión adiabática}) \quad (15)$$

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 evidenciado 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.

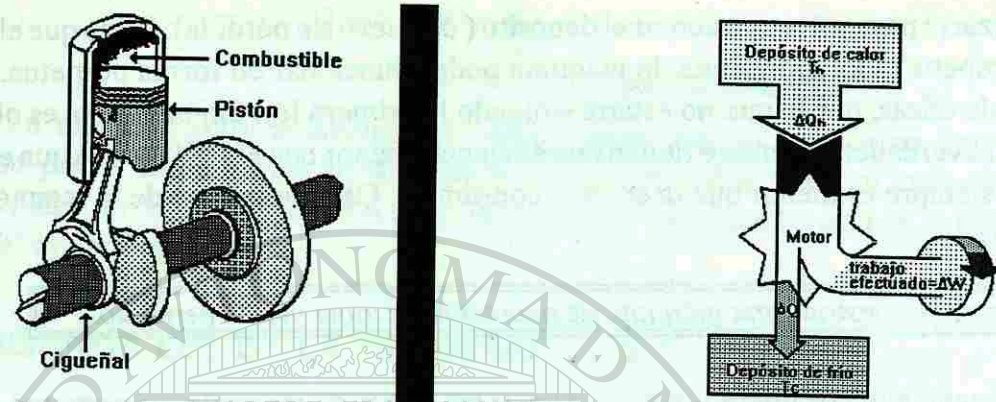


Fig. 10.

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,

$$\eta_{\text{máx}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (20)$$

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

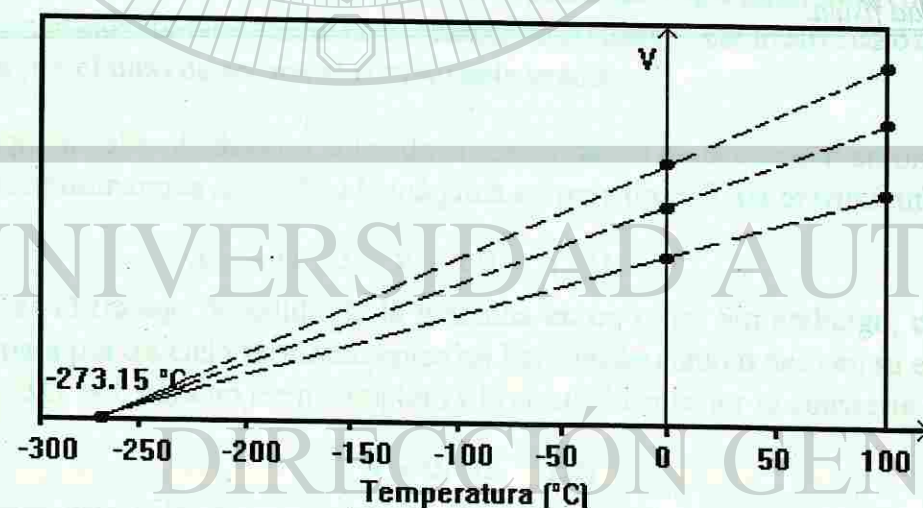
Anteriormente habíamos definido de una forma la escala Kelvin de temperatura, partiendo de que su punto fijo estaba dado por la temperatura más baja posible de alcanzar.

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 tuvierán 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 ( $0^{\circ}\text{C}$ ) 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  $100^{\circ}\text{C}$  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.

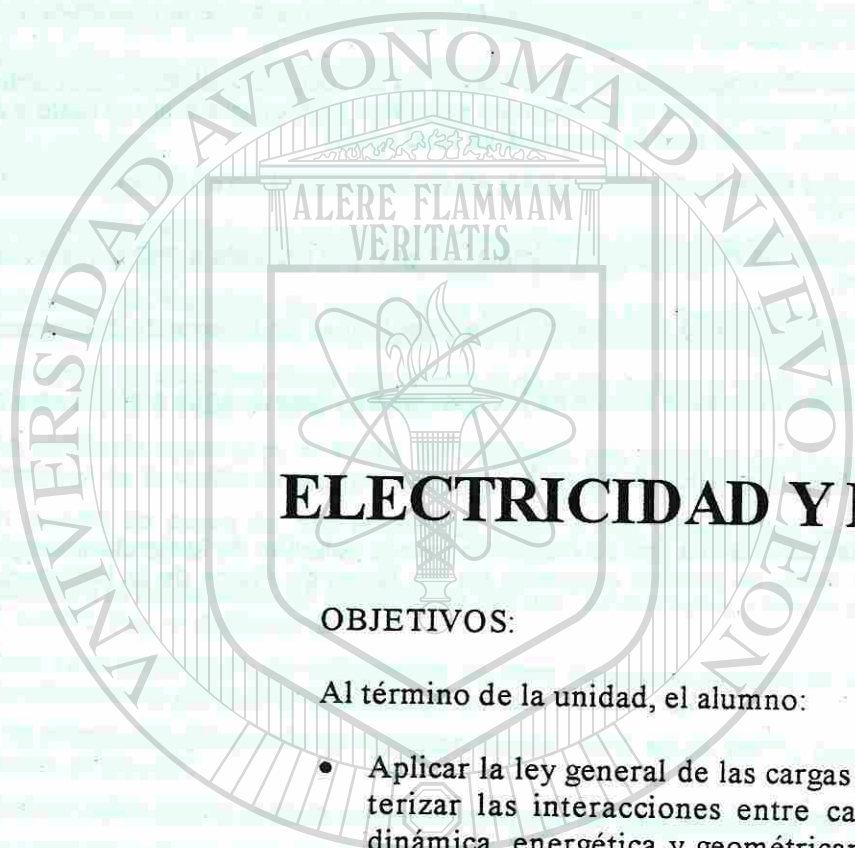
- 20.- ¿En qué sentido son similares el calor y el trabajo?
- 21.- Define transmisión de calor en función de la energía interna y da varios ejemplos.
- 22.- ¿Qué diferencia existe entre un sistema abierto y un sistema cerrado?
- 23.- ¿Qué estudia la Termodinámica?
- 24.- Enuncia la Primera Ley de la 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  $7^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ .  $\alpha_{\text{Cu}} = 1.7 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ .
- 2.- Una barra de 5 metros de longitud se expande 0.102 centímetros cuando su temperatura se incrementa en  $40^{\circ}\text{C}$ . ¿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  $25^{\circ}\text{C}$ . ¿Cuál será su longitud, si se calienta a  $465^{\circ}\text{C}$ ?  $\alpha_{\text{Al}} = 25 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ .
- 4.- Una varilla de acero ( $\alpha_{\text{Fe}} = 10.5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$ ) tiene una longitud de 11.5 metros a  $22^{\circ}\text{C}$ . ¿Cuál será la longitud de la varilla de acero a  $1221^{\circ}\text{C}$ ?
- 5.- Un puente de acero de 110 metros de largo a  $5^{\circ}\text{C}$ . ¿Cuál será su longitud, al aumentar su temperatura a  $25^{\circ}\text{C}$ ?
- 6.- Encuentra el incremento en volumen de  $120 \text{ cm}^3$  de mercurio, cuando su temperatura cambia de  $9^{\circ}\text{C}$  a  $39^{\circ}\text{C}$ .  $\beta_{\text{Hg}} = 0.00018 /^{\circ}\text{C}$ .
- 7.- ¿Cuál es el incremento en volumen de 16 litros de alcohol cuando se calienta de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , si el coeficiente de dilatación volumétrica es de  $11 \times 10^{-4} /^{\circ}\text{C}$ ?
- 8.- Si 38 kilogramos de plomo se calientan desde  $-30^{\circ}\text{C}$  hasta  $180^{\circ}\text{C}$ , ¿cuánta cantidad de energía absorbe el plomo?
- 9.- ¿Cuánto calor pierde el agua cuando disminuye su temperatura de  $75^{\circ}\text{C}$  a  $10^{\circ}\text{C}$ ?
- 10.- Al aplicarle calor a una masa de aluminio su temperatura se incrementa en  $69^{\circ}\text{C}$ . 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 800 gramos de hierro se encuentran a una temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$ , ¿cuál será su temperatura final, si se le agregan 41 850 J de energía calorífica?
- 12.- Una muestra desconocida de 500 gramos absorbe 5016 joules cuando su temperatura cambia de  $20^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ . Calcule el valor del calor específico de la muestra.
- 13.- Si se utilizan 3000 calorías para calentar 700 gramos de una sustancia desconocida, de  $14^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ . ¿Cuál es el calor específico de la sustancia?
- 14.- Se tienen 150 gramos de infusión de café a  $90^{\circ}\text{C}$ , ¿cuánta crema a  $10^{\circ}\text{C}$  tendrá que agregársele para que la temperatura baje a  $20^{\circ}\text{C}$ ? Suponga que el calor específico de la crema es de  $4.102 \text{ J/Kg }^{\circ}\text{C}$  y que el del café es igual que el del agua.
- 15.- Una pieza de metal de 75 gramos a  $97^{\circ}\text{C}$ , se deposita dentro de 300 gramos de agua a  $15^{\circ}\text{C}$  y su temperatura se incrementa hasta  $18.9^{\circ}\text{C}$ . ¿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  $15^{\circ}\text{C}$  debe agregar para tener un baño con agua a  $25^{\circ}\text{C}$ ? (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

## OBJETIVOS:

Al término de la unidad, el alumno:

- Aplicar la ley general de las cargas y la ley de Coulomb para caracterizar las interacciones entre cargas puntuales, caracterizando dinámicamente, energéticamente y geométricamente el campo electrostático a través de su intensidad, el potencial y las líneas de fuerza.

- Calcular las intensidades de corriente, diferencia de potencial, resistencia y potencia disipada en resistores, aplicando la Ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff para circuitos eléctricos resistivos con una sola fem y de hasta dos mallas, destacando el carácter de leyes de Conservación de la Carga y de la Energía de estas últimas.

- Calcular la fuerza magnética ejercida sobre partículas cargadas en movimiento en campos magnéticos y aplicar la ley de Inducción para explicar el funcionamiento del motor, generador y transformador eléctrico.

## METAS:

- Describir los métodos de conducción e inducción para cargar eléctricamente un cuerpo.

- Aplicar la ley de Coulomb en la solución de problemas que involucren cargas puntuales, determinando si la fuerza es de atracción o repulsión.
- Caracterizar dinámicamente, energéticamente y geométricamente el campo electrostático a través de su intensidad, el potencial y las líneas de fuerza, calculando la primera para cargas puntuales, destacando su carácter vectorial.
- Calcular la resistencia eléctrica de un conductor.
- Calcular la resistencia equivalente en circuitos serie, paralelo y mixto.
- Calcular la intensidad de la corriente, diferencia de potencial, resistencia, potencia disipada en resistores de circuitos eléctricos resistivos con una sola fem y de hasta dos mallas, aplicando la ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff, destacando el carácter de estas últimas de leyes de conservación de la carga y de la energía.
- Calcular la fuerza magnética ejercida sobre partículas cargadas en movimiento en campos magnéticos.
- Explicar el funcionamiento del motor, generador y transformador eléctrico aplicando la ley de Inducción.

## CONTENIDO

### Electricidad

- Producción.
- Precedentes históricos de la electricidad.
- Carga eléctrica.
- Materiales conductores, aislantes y semiconductores.
- Electrificación de un cuerpo.
- Electrificación de la carga eléctrica.
- Ley de Coulomb.
- Campo eléctrico.
- Campo eléctrico de una carga puntual.
- Energía potencial eléctrica.
- Diferencia de potencial.
- Diferencia de potencial entre dos placas paralelas.
- Intensidad de 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.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## 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 conseguido 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 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 nucleoeeléctricas. 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

## ELECTRICIDAD

describirse en función de conceptos más básicos y simples. La carga eléctrica que 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 la mecánica, como por ejemplo, los conceptos de fuerza, campo, trabajo y energía.

### ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA ELECTRICIDAD

El desarrollo del estudio de la electricidad así como su aplicación para beneficio de la humanidad se ha debido a muchos investigadores. En el siguiente cuadro mencionaremos algunos de ellos.

Científico	Aportación
Los griegos: Tales de Mileto: 600-547 a.C.	Descripción de los primeros fenómenos eléctricos. Atracción de los cuerpos al frotar el ámbar.
William Gilbert: 1544-1603	La adquisición de cargas no era exclusiva del ámbar, sino de muchas otras sustancias.
Benjamin Franklin: 1706-1790	Descubrió la existencia de cargas eléctricas en las nubes de una tormenta. Construyó el pararrayos. A él se debe la convención de la corriente eléctrica.
Charles Coulomb: 1733-1806	Estudió las leyes de atracción y repulsión eléctrica, midiendo las fuerzas de interacción entre las cargas puntuales.
Alessandro Volta: 1745-1827	Inventó la pila eléctrica combinando dos metales distintos con un líquido que servía como conductor.
Georg S. Ohm: 1789-1854	Descubrió la resistencia eléctrica de un conductor. en 1827 enunció la ley Fundamental de las Corrientes Eléctricas, conocida como la ley de Ohm.
Michael Faraday: 1791-1867	Inventó el generador eléctrico al descubrir cómo podía usarse un imán para generar corriente eléctrica en una espira de hierro.
Joule: 1818-1889	Estudió la relación que existe entre la corriente eléctrica y el calor desprendido en los circuitos eléctricos.

### 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. Un 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 normalmente 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 puede 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 mueve, 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. El cambio, el protón se encuentra en el núcleo, requiriéndose procesos 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. 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 existe en múltiplos enteros de una cantidad básica, la

Cabello cargado positivamente (perdió electrones)

Peine cargado negativamente (ganó electrones)



Fig No. 1. Los electrones que gana el peine, los pierde el cabello.

electrón, tanto si es positiva como negativa, la carga está cuantizada, esto es, sólo puede ser un múltiplo de la carga del electrón.

Si se frota dos trozos de vidrio con seda, se observa que se repelen entre sí (Fig. No. 2a).

Si se frota con piel de conejo, también se repelen (Fig. No. 2b). Por otro lado, 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 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 (Fig. No. 3).

Un péndulo eléctrico consiste en una pequeña esfera ligera revestida de cera 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 (Fig. No. 4).

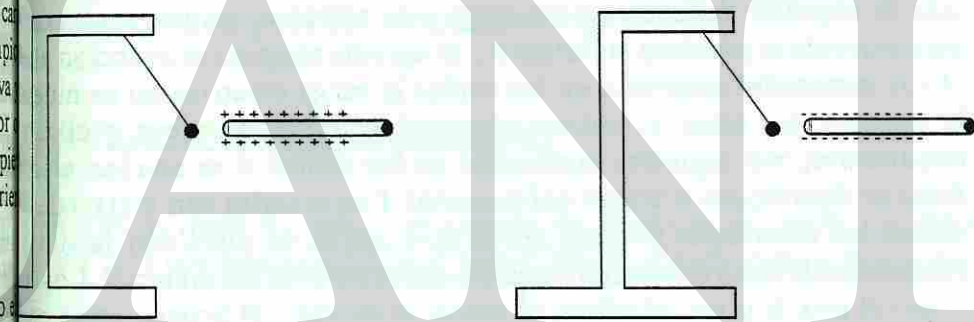


Fig No. 4.

Si se toca con el cuerpo cargado la esfera, al acercarse nuevamente el cuerpo cargado la esfera se aleja (Fig. No. 5).

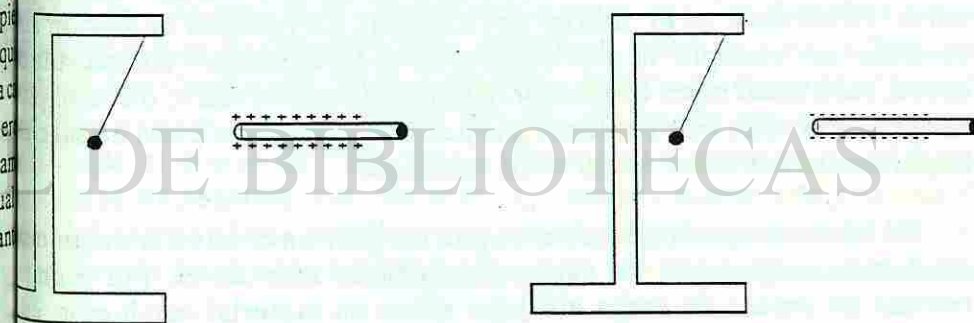


Fig No. 5. Después de tocar la esferita, el cuerpo cargado la rechaza.

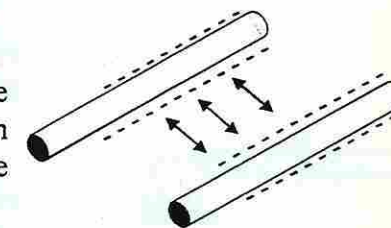
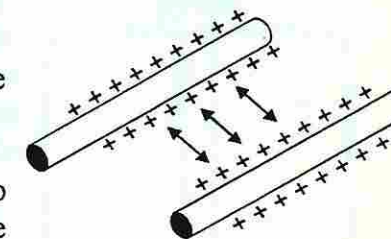


Fig. No. 2. Interacción entre cuerpos cargados. Cargas iguales se rechazan.

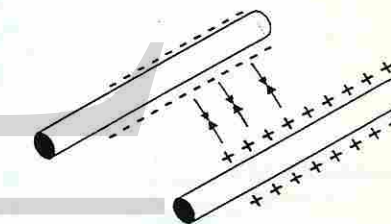


Fig. No. 3. Interacción entre cuerpos cargados. Cargas opuestas se atraen. Mediante este experimento y muchos otros se ha demostrado lo que con frecuencia se acostumbra denotar como la ley General de las Cargas.

Esto se debe a que al tocar la esfera, si la barra de vidrio tenía carga negativa, 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. 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.

## 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 el 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 si 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 metales 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, tienen una 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 (Fig. No. 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.

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 Fig. No 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 (Fig. No. 7b).

## 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 se pierden 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 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, y tanto, la tela de algodón los gana, quedando con una carga neta negativa.

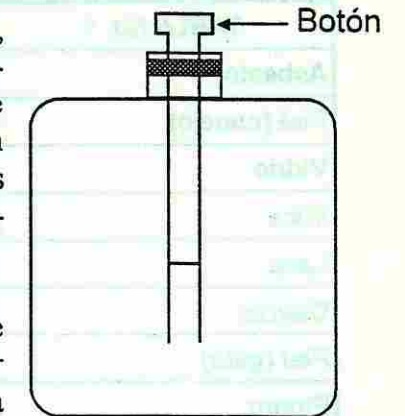


Fig No. 6. Electroscopio.

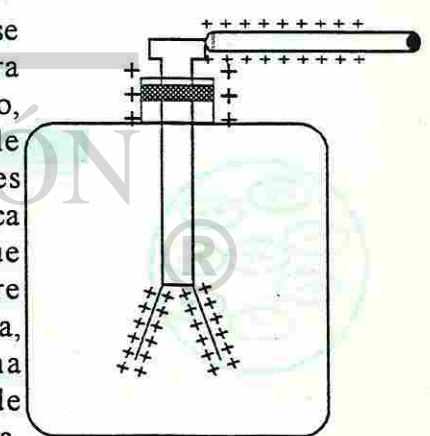
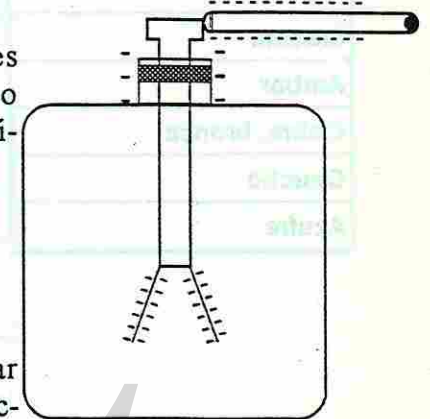


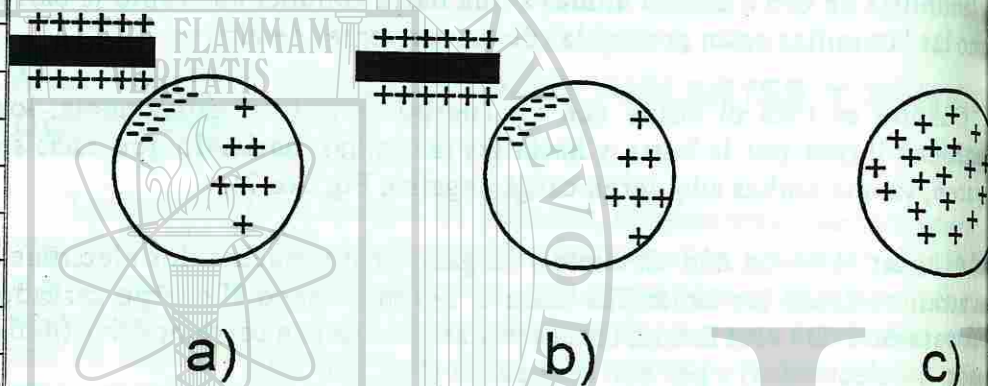
Fig No. 7. Funcionamiento de un electroscopio.

**TABLA No. 1**

Asbesto
Piel (conejo)
Vidrio
Mica
Lana
Cuarzo
Piel (gato)
Plomo
Seda
Piel (Humana)
Aluminio
Algodón
Madera
Ámbar
Cobre, bronce
Caucho
Azufre

El frotamiento entre cualesquiera dos sustancias de la columna hace que la que aparece por encima quede con carga positiva, y con carga negativa 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 No. 8. Después de separar la esfera metálica queda con carga positiva.



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 pierden 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

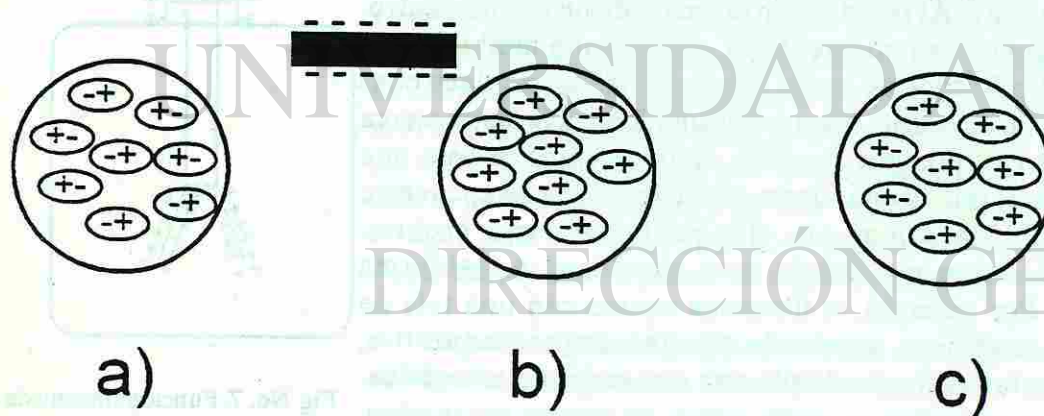


Fig No. 9. a) Cuerpo neutro. b) Carga inducida por la presencia de un cuerpo cargado. Los cuerpos se atraen. c) Si se retira el cuerpo cargado el trozo de papel vuelve a ser neutro.

## 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:

	C	$6.24 \times 10^{18}$ electrones
electrón	e	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
microcoulomb	mC	$10^{-3} \text{ C}$
microcoulomb	$\mu\text{C}$	$10^{-6} \text{ C}$
nanocoulomb	nC	$10^{-9} \text{ C}$

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 modo que:

$$1 \text{ estatcoulomb} = 1 \text{ ues} = 2.08 \times 10^9 \text{ veces la carga del electrón}$$

### LAW OF 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 una carga 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 2q1 y la otra (q2) se incrementa al triple (3q2), entonces F se incrementa a seis veces su valor inicial (6F). Si cada una de las cargas se incrementa al doble (2q1 y 2q2) 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 q1 sobre q2 como la fuerza que ejerce q2 sobre q1 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):

$$k = 9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

$$k = 1 \frac{\text{dina cm}^2}{\text{ues}^2}$$

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 eléctrica actúa en la dirección que sigue la recta que une las cargas y su sentido depende de 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 entre 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 partículas cargadas, en el aire o en el vacío, en donde la constante.

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:

$$q_1 = 6 \times 10^{-6} C.$$

$$q_2 = 3 \times 10^{-6} C.$$

$$r = 0.030 m = 3 \times 10^{-2} m.$$

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

$$= (9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}) \frac{(6 \times 10^{-6})(3 \times 10^{-6} C)}{(3 \times 10^{-2} m)^2}$$

$$= 18 \times 10^1 N = 180 N$$

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.

Quando 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.

**Ejemplo 2.**

Una carga  $q_1 = 2 \times 10^{-6} \text{C}$  se encuentra a una distancia de 20 cm. de otra carga  $q_2 = -4 \times 10^{-6} \text{C}$ , como se ve en la figura. Determinar el valor de la fuerza resultante y su sentido sobre una carga

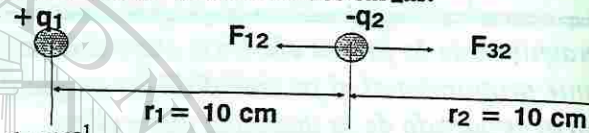
$q_2 = -4 \times 10^{-6} \text{C}$  al ser colocada en medio de las otras dos cargas.

$q_1 = 2 \times 10^{-6} \text{C}$

$q_2 = -4 \times 10^{-6} \text{C}$

$q_3 = 8 \times 10^{-6} \text{C}$

$r_1 = r_2 = 10 \text{cm} = 0.1 \text{m} = 1 \times 10^{-1} \text{m}$ .



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

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_{12} = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(2 \times 10^{-6} \text{C})(-4 \times 10^{-6} \text{C})}{(1 \times 10^{-1} \text{m})^2}$$

$F_{12} = -72 \times 10^{-1} \text{N} = -7.2 \text{N}$

$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$

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, en el mismo sentido, el que tenga la fuerza de mayor magnitud,

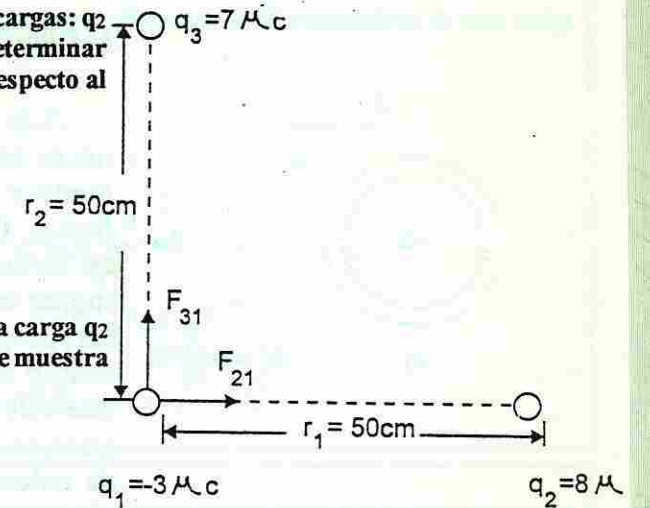
$F_R = F_{32} - F_{12}$   
 $F_R = 28.8 \text{N} - 7.2 \text{N}$   
 $F_R = 21.6 \text{N}$   
 hacia la derecha.

**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 horizontal.

$q_1 = -3 \mu\text{C} = -3 \times 10^{-6} \text{C}$   
 $q_2 = 8 \mu\text{C} = 8 \times 10^{-6} \text{C}$   
 $q_3 = 7 \mu\text{C} = 7 \times 10^{-6} \text{C}$   
 $r_2 = 50 \text{cm} = 0.5 \text{m} = 5 \times 10^{-1} \text{m}$

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. Calculando 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.

Sumando estas dos fuerzas eléctricas sobre  $q_1$

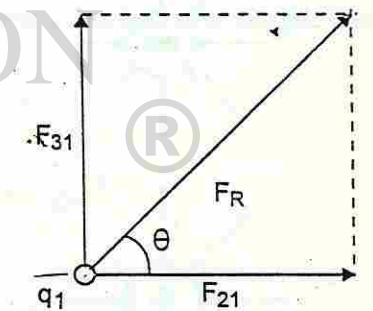
para calcular la fuerza resultante ( $F_R$ ) se tiene que:

Magnitud  $(F_R)^2 = (F_{21})^2 + (F_{31})^2$   
 $(F_R)^2 = (8.64 \times 10^{-1} \text{N})^2 + (7.56 \times 10^{-1} \text{N})^2$   
 $(F_R)^2 = 74.64 \times 10^{-2} \text{N}^2 + 57.15 \times 10^{-2} \text{N}^2$   
 $(F_R)^2 = 131.79 \times 10^{-2} \text{N}^2$   
 $F_R = 11.47 \times 10^{-1} \text{N}$   
 $F_R = 1.147 \text{N}$

Dirección:  $\tan \theta = \frac{F_{31}}{F_{21}} = \frac{7.56 \times 10^{-1} \text{N}}{8.64 \times 10^{-1} \text{N}}$

$\tan \theta = 0.875$

$\theta = \tan^{-1}(0.875) = 41.2^\circ$



### 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. La manera de describir estas fuerzas implica el uso del concepto de campo eléctrico. Como ya se ha visto, a una masa le rodea un campo gravitacional 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 un 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:

$$E = \frac{F}{q}$$

$$E = \frac{F}{q}$$

$$E = \frac{F}{q}$$

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 (Fig. No. 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.

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 suelta en dicho punto. Por ejemplo, supóngase que una carga positiva de prueba se pone en el punto A de la figura 11a. 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 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 (Fig. No. 11b). La carga positiva de prueba es repelida radialmente hacia afuera por la carga positiva central. Por

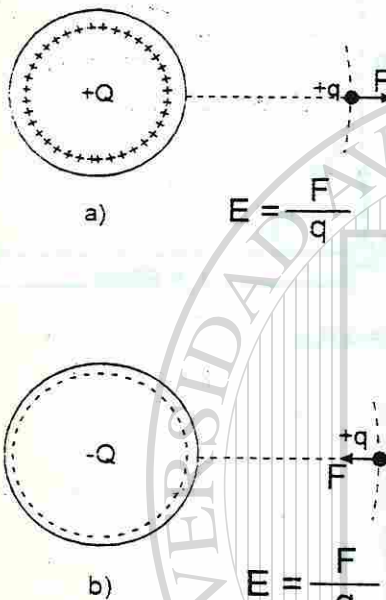


Fig No. 10. La magnitud del campo eléctrico es la fuerza por unidad de carga (F/q) y su dirección en un punto es la misma que corresponde a la dirección del movimiento de una carga positiva cuando se coloca en dicho punto.

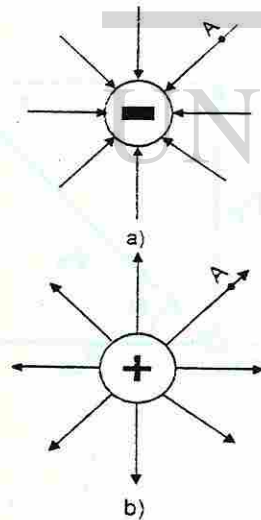
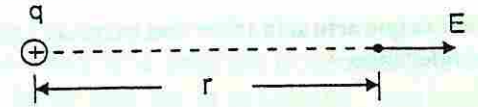


Fig No. 11. Líneas de campo

#### Ejemplo 4.

Calcular la intensidad del campo eléctrico a una distancia de 50 centímetros de una carga de 4 micro coulombs.

datos:  
 $q = 4 \mu\text{C} = 4 \times 10^{-6} \text{C}$   
 $r = 50 \text{ cm} = 0.5 \text{ m}$



$$E = k \frac{q}{r^2}$$

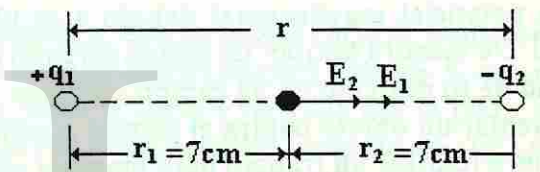
$$E = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(4 \times 10^{-6})}{(0.5 \text{ m})^2}$$

$$E = 144 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}} = 1.44 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

#### 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  $2 \mu\text{C}$  si se colocara en ese punto.

Datos:  
 $q_1 = 8 \mu\text{C} = 8 \times 10^{-6} \text{C}$   
 $q_2 = -3 \mu\text{C} = -3 \times 10^{-6} \text{C}$   
 $r_1 = r_2 = 7 \text{ cm}$   
 $r_1 = 0.07 \text{ m} = 7 \times 10^{-2} \text{ m}$



El campo eléctrico en el punto medio, debido a la carga  $q_1$  está dirigido hacia la derecha y su magnitud es:

$$E_1 = k \frac{q_1}{r^2}$$

$$E_1 = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(8 \times 10^{-6})}{(7 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$E_1 = 1.44 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

El campo eléctrico en el punto medio, debido a la carga  $q_2$  también está dirigido hacia la derecha y su magnitud es:

$$E_2 = k \frac{q_2}{r^2}$$

$$E_2 = \left(9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}\right) \frac{(-3 \times 10^{-6})}{(7 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$E_2 = -0.54 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}} = -5.4 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

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



$$E_R = E_1 + E_2$$

$$E_R = 1.44 \times 10^7 \text{ N/C} + 0.54 \times 10^7 \text{ N/C};$$

$$E_R = 1.98 \times 10^7 \text{ N/C} \quad \text{hacia la derecha de la gráfica.}$$

Cálculo de la fuerza que actuaría sobre una carga de 2 micro coulombs situada en el punto que se está considerando  
 $q = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$

$$E = \frac{F}{q} \quad \text{Por definición.}$$

$$F = E q$$

$$F = (1.98 \times 10^7 \frac{\text{N}}{\text{C}})(2 \times 10^{-6} \text{ C})$$

$$F = 3.96 \times 10^1 \text{ N} = 39.6 \text{ N}$$

## ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

Cuando se estudió la energía mecánica, se vio 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, y su energía potencial eléctrica se transforma en energía cinética.

Consideremos el campo eléctrico uniforme entre las dos placas paralelas de cargas opuestas, como se muestra en la figura 14.

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, que se conoce como energía potencial eléctrica. Al colocar la carga en el punto B, podemos soltarla y recuperar la energía potencial en

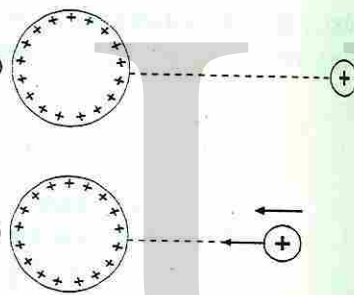


Fig No. 13. La carga pequeña tiene más energía potencial en (b) que en (a), debido al trabajo que se realizó para llevarla hasta la ubicación más cercana.

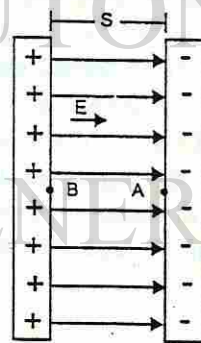


Fig No. 14. Placas paralelas con cargas opuestas.

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.

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 tirar 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).

## 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  $+1\text{C}$  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

$$\text{Trabajo para mover } q = \text{fuerza} \times \text{distancia} = (Eq) s$$

La diferencia de potencial entre A y B es el trabajo por unidad de carga, de tal forma que

$$V_{AB} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{carga}} = \frac{W}{q}$$

$$V_{AB} = \frac{Eq s}{q}$$

$$V = Es$$

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

$$\text{Trabajo} = W = V_{AB} \times q$$

## 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

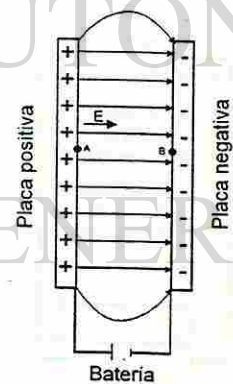


Fig No. 15. Campo eléctrico entre dos placas paralelas.

$$V_{AB} = \frac{W_{AB}}{q}$$

$$V_{AB} = \frac{F s_{AB}}{q}$$

$$V_{AB} = \left(\frac{F}{q}\right) s_{AB}$$

como  $E = \frac{F}{q}$  es la intensidad del campo eléctrico, entonces:

$$V_{AB} = Es$$

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  $V_{AB} = 45 \text{ V}$

Datos:

$$m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg masa del protón}$$

$$q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C carga del protón}$$

$$V_{AB} = 45 \text{ V}$$

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

$$E_k = V_{AB} q$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = V_{AB} q$$

$$v^2 = \frac{2 V_{AB} q}{m}$$

$$v^2 = \frac{2(45 \text{ V})(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})}{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}}$$

$$v = 92858.79 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

## EXPERIMENTO DE MILLIKAN

La carga del electrón fue medida primeramente en los históricos experimentos de Robert A. Millikan (1868-1953), iniciados en 1909 y también demostraron la cuantización de la carga. Su aparato constaba de dos placas metálicas paralelas, una fuente de voltaje variable, un atomizador, una fuente de rayos X, un microscopio y un voltímetro. Las partes esenciales del arreglo experimental se indican en la figura 16.

Las gotitas de aceite del atomizador caen en la región que existe entre las dos placas horizontales, a través de una perforación en la placa superior. A partir de moléculas de aire, a través de las cuales se hacen pasar rayos X ionizados, se liberan electrones. Estos electrones se adhieren a las pequeñas gotas de aceite, lo cual da por resultado que éstas tengan una carga negativa neta.

Por medio del microscopio se puede observar el movimiento descendente de las gotas de aceite, a medida que van cayendo lentamente bajo la influencia de su propio peso y de la fuerza viscosa ( $F_v$ ) ascendente provocada por la resistencia del aire (Fig. No. 16a). Se pueden utilizar las leyes de la hidrostática para calcular la masa  $m$  de una gota particular de aceite midiendo su velocidad de caída.

Después de obtener todos los datos necesarios para determinar la masa  $m$ , se conectan las placas paralelas a una batería con el fin de establecer un campo eléctrico uniforme  $E$  entre las placas con carga opuesta {ver figura 16(b)}. La magnitud de la intensidad del campo se puede controlar por medio de una resistencia variable intercalada en el circuito eléctrico. Millikan ajustó el campo eléctrico entre las placas, hasta que la fuerza eléctrica ascendente que actúa sobre la gota sea igual a la fuerza gravitacional descendente, de modo que la gota de aceite permanecía inmóvil, por lo tanto,

$$mg = Eq$$

donde

$q$  = carga neta de la gota de aceite

$m$  = masa de la gota de aceite

$g$  = aceleración debida a la gravedad

La intensidad del campo eléctrico  $E$  puede obtenerse fácilmente a partir del voltaje  $V$  y de la distancia  $s$  entre las placas, entonces:

$$V = Es \text{ y } E = V/s$$

sustituyendo ésta ecuación en (1), tenemos:

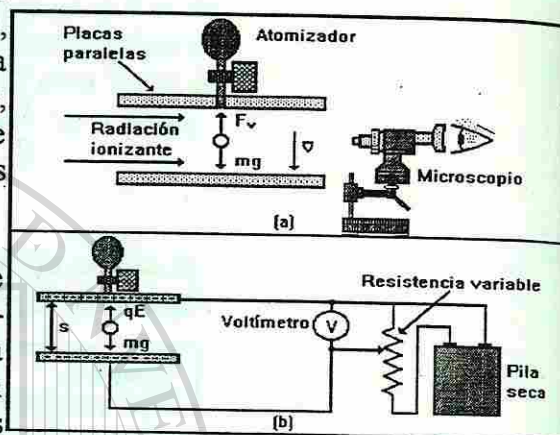


Fig. No. 16. Experimento de Millikan de la gota de aceite: (a) La masa  $m$  de la gota se determina a través de su velocidad de caída, en contra de la fuerza viscosa de la resistencia del aire. (b) La magnitud de la carga se puede calcular partiendo de las condiciones de equilibrio que mantienen suspendida la carga entre dos placas con carga opuesta.

Tabla No. 2

No. de Gota	Carga eléctrica C
1	$3.2 \times 10^{-19}$
2	$1.6 \times 10^{-19}$
3	$6.4 \times 10^{-19}$
4	$9.6 \times 10^{-19}$
5	$8.0 \times 10^{-19}$

Tabla No. 3

No. de Gota	Electrones en exceso
1	2
3	4
4	6
5	5

$$q = \frac{mgs}{V}$$

La diferencia de potencial  $V$  se puede determinar con un aparato llamado voltímetro, el cual lo describiremos más adelante.

Millikan y sus colaboradores realizaron miles de mediciones de este tipo y encontraron que todas las gotas, tenían una carga igual a un múltiplo entero de la carga elemental  $e$ . Es decir:

$$q = ne \text{ donde } n = 1, 2, 3, \text{ etc.}$$

Por lo tanto, llegó a la conclusión de que la carga eléctrica está cuantizada. Para comprender mejor los resultados de los experimentos de Millikan, supongamos los siguientes datos, que representan posibles valores de la carga eléctrica que se obtiene en algunas gotas. (Tabla No. 2).

Tomando en cuenta estos resultados, el menor valor de la carga en una gota es de  $1.6 \times 10^{-19}$  C y la demás cargas son múltiplos enteros de este valor mínimo. Millikan concluyó por esto, que la segunda gota adquirió únicamente un electrón en exceso, por lo tanto, el valor de la carga del electrón era de  $1.6 \times 10^{-19}$  C. Para las demás gotas tenemos la tabla No. 3.

Experimentos posteriores, realizados en otros campos de la Física, proporcionaron resultados que concordaban con los obtenidos por Millikan. Él recibió el Premio Nobel de Física por este trabajo en 1923.

## GENERADOR DE VAN DE GRAFF

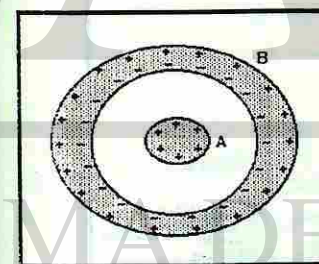


Fig. No. 17. El conductor electrificado A, puesto en el interior de un conductor descargado B, induce cargas en las superficies internas y externas de B.

En esta unidad se estudió el proceso de carga por conducción en el cual un cuerpo metálico A, electrificado, se pone en contacto con otro cuerpo B, también metálico e inicialmente descargado y hay una transferencia de sólo una parte de la carga de A a B. Ahora, supongamos que el cuerpo B posee una cavidad y que A se introduce en ella (Fig. No. 17). En estas condiciones, la carga A induce cargas eléctricas en las superficies internas y externas de B.

Por otro lado si el cuerpo A se coloca en contacto con la pared interna de B (Fig. No. 18), la carga inducida en esta pared será neutralizada por la carga de A. Tomando en cuenta la figura 18 podemos ver que, como consecuencia de esto, el cuerpo B quedará electrificado con una carga del mismo signo y de la misma magnitud que la carga inicial que el cuerpo A. Entonces, cuando colocamos un cuerpo metálico electrificado, en contacto interno con otro, toda su carga se transmite al segundo cuerpo. Esto no sucede cuando el contacto es externo. En principio, es posible incrementar la carga en el conductor hueco y su potencial, sin límite, repitiendo el proceso.

En 1929 Robert J. Van de Graff aplicó este principio para diseñar y construir un generador electrostático; este tipo de generadores se utiliza ampliamente en las investigaciones de Física Nuclear. Este aparato se muestra esquemáticamente en la figura 19. Obsérvese que está construido por una banda de transmisión que pasa por dos poleas, una de las cuales es accionada por un motor eléctrico que le genera rotación. La segunda polea se encuentra en el interior de una esfera metálica hueca, sostenida por un soporte aislante. La banda se carga en A por medio de una descarga entre el peine de agujas metálicas y una rejilla conectada a tierra. Las agujas normalmente se mantienen a un potencial positivo de aproximadamente 10,000 volts. La carga positiva se transfiere al electrodo de alto voltaje por medio de un segundo peine de agujas que se encuentra en B. Como el campo eléctrico dentro de un conductor hueco es despreciable, la carga positiva de la banda se trasfiere con facilidad, sin importar su potencial. En la práctica, es posible incrementar del electrodo de alto voltaje hasta que se presenta una descarga eléctrica a través del aire. Dado que la tensión de ruptura del aire es aproximadamente  $3 \times 10^6$  V/m, una esfera de 1 metro de radio se puede llevar a un potencial máximo de  $3 \times 10^6$  V. Puede aumentarse aún más el potencial si se incrementa el radio del conductor hueco y se coloca el sistema en un recipiente con gas a alta presión.

Los generadores Van de Graff pueden producir diferencias de potencial tan altas como 20 millones de volts. Los protones acelerados a través de diferencias de potencial de este orden reciben energía suficiente como para iniciar reacciones nucleares entre ellos y diversos núcleos que sirven de blanco.

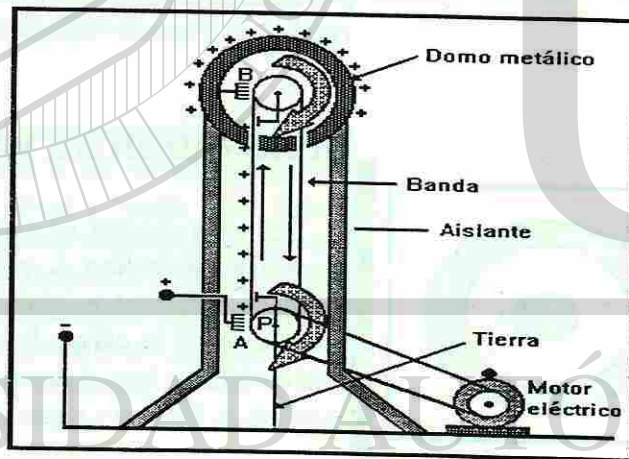


Fig No. 19. Generador de Van de Graff. La carga se deposita en el punto A en la banda giratoria y es transferida al conductor al conductor hueco en el punto B. Un motor eléctrico realiza el trabajo necesario para incrementar la energía potencial eléctrica.

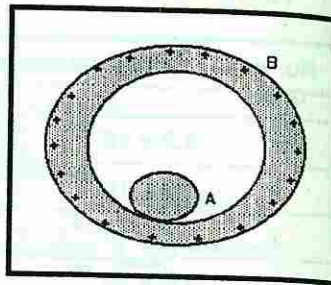


Fig No. 18. Cuando el cuerpo A está electrificado y en el interior de B, se pone en contacto con este último toda la carga de A pasa a B.

## CORRIENTE ELÉCTRICA.

Definiremos la corriente eléctrica como el flujo de electrones a través de un conductor. Es decir, que la corriente fluye cuando un conductor une dos puntos, uno de los cuales es más negativo que el otro o de regiones más negativas a regiones menos negativas (o positivas).

Los electrones seguirán fluyendo hasta que el número de electrones de cada región sean iguales (que ya no exista diferencia de electrones entre ellos).

Podemos comparar lo anterior, a lo que sucede cuando tenemos un sistema de vasos comunicantes en hidráulica. Si tenemos un recipiente con agua hasta el borde y otro recipiente vacío o con menos altura del líquido que el primero, los conectamos por medio de un tubo con una llave de paso en el punto medio, al abrir la llave de paso se generará una corriente de agua del recipiente con mayor altura de agua (mayor potencial) hacia el que no tiene o tiene menos. Esta corriente de agua se mantendrá hasta que la altura del nivel del agua sea el mismo. Si los dos recipientes son de las mismas dimensiones, esta corriente cesará hasta que los dos recipientes tengan la misma cantidad de agua.

En el caso del agua, lo que hace que se genere la corriente de agua, es el mayor potencial de líquido en el primer recipiente (mayor altura de agua) y en el caso de la corriente eléctrica será el mayor potencial eléctrico que exista en uno de los extremos del conductor.

La fuerza que hace que esos electrones se muevan se le llama fuerza electromotriz (fem) o diferencia de potencial. Al dispositivo con la capacidad de mantener una diferencia de potencial o voltaje entre dos puntos se le llama fuente de fuerza electromotriz. Esta fem se mide en volts. Algunos de estos dispositivos convierten energía química en energía eléctrica, otros energía mecánica a energía eléctrica, otros de energía lumínica a eléctrica, etc.

En el caso del sistema hidráulico si queremos medir la cantidad de agua que circula por la tubería en determinado tiempo, lo podemos hacer en cualquier unidad de volumen por unidad de tiempo (gasto). Así la corriente eléctrica también se puede medir en un punto determinado, por el número de electrones que pasan por segundo. La fuerza electromotriz representa un voltaje o diferencia de potencial no una fuerza.

Anteriormente se definió el coulomb (C) como una unidad de carga (q), ahora definiremos la unidad de medida de la corriente eléctrica, el ampere. El ampere es el flujo de coulomb por segundo, sobre un punto determinado de la conexión eléctrica. Aclarando que los electrones circulan de una termi-

nal negativa a una positiva, pero históricamente se estableció que el sentido de la corriente es del polo positivo al negativo (teoría de los dos fluidos de Benjamín Franklin). Algebraicamente:

$$I = q/t$$

$$q = IT$$

donde:

q = carga en coulomb (C).

I = corriente en amperes (A).

t = tiempo en segundos (s).

La corriente eléctrica se transmite por los conductores a una velocidad muy próxima a la velocidad de la luz (300,000 km/s), pero los electrones no se desplazan a dicha velocidad, sino con una velocidad promedio de 10 m/s debido a que cada electrón obliga al siguiente a moverse en forma instantánea a través del conductor.

Ya se señaló lo que es la corriente eléctrica y lo que es una fuente de fem, ahora lo importante es ver como se va a aprovechar dicha corriente eléctrica. Si se conecta un dispositivo a una fuente de potencial eléctrico, por ejemplo, una lámpara, por medio de cables, tendremos que lograr una trayectoria cerrada de tal manera que los electrones fluyan o sean conducidos de la terminal negativa de la fuente a través de la lámpara y de regreso a la terminal positiva de dicha fuente. Los cables y la lámpara son la trayectoria por la que fluye la corriente eléctrica. A este cable se le llama conductor y a la trayectoria cerrada se le denomina circuito eléctrico.

## FUENTES DE ELECTRICIDAD

Una de las fuentes más conocidas de tensión o potencial eléctrico son las baterías. Alessandro Volta, científico italiano, inventó la pila eléctrica más conocida en su honor como celda o pila voltaica. Volta descubrió que cuando dos elementos distintos se colocaban en un medio químico que actuaba sobre ellos, se establecía entre ambos un potencial eléctrico.

Se puede construir una buena pila, colocando una barrita de carbono (que puede retirarse de una pila seca vieja) y una lámina de zinc, en un recipiente de vidrio que contenga un ácido y agua (electrolito).

Si se verifica la polaridad de la barrita de carbono, se descubrirá que es positiva y la de zinc negativa. Si se conecta un cable entre estos elementos o electrodos (ánodo y cátodo) fluirá una corriente. En sí, la celda voltaica es un medio para transformar de energía química en eléctrica.

### Ejemplo No. 4.

Calcular el número de electrones que atraviesan por segundo una sección recta de un alambre por el que circula una corriente de 1 ampere de intensidad.

$$q = It$$

$$q = 1 \text{ A} \times 1 \text{ s}$$

$$q = \frac{1 \text{ C}}{\text{s}} \times 1 \text{ s}$$

$$q = 1 \text{ C} \times 6.24 \times 10^{18} \frac{\text{elec}}{\text{C}}$$

$$q = 6.24 \times 10^{18} \text{ electrones}$$

### Ejemplo No. 6

Por un alambre fluye una corriente de 0.25 ampere, calcular el número de coulomb por segundo que fluyen a lo largo del alambre.

$$q = It$$

$$q = 0.25 \text{ A} \times 1 \text{ s}$$

$$q = 0.25 \frac{\text{C}}{\text{s}} \times 1 \text{ s}$$

$$q = 0.25 \text{ C}$$

Si se usa ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) como electrolito, se produce una reacción química. El ácido sulfúrico se divide en iones positivos ( $\text{H}^+$ ) y en iones negativos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Los iones negativos se desplazan hacia el electrodo del zinc y se combinan con él, produciendo sulfato de zinc ( $\text{ZnSO}_4$ ) y los iones positivos van al electrodo del carbono.

Otra fuente de electricidad es la pila seca, que consiste en un recipiente de zinc que actúa como electrodo negativo. En su centro se encuentra una barra de carbono, que es el electrodo positivo. Alrededor de la barra de carbono existe una pasta de carbono molido, dióxido de manganeso ( $\text{MnO}_2$ ) y sal de amoníaco. El dióxido de manganeso actúa como despolarizador y el carbono molido aumenta la efectividad de la pila seca al reducir su resistencia interna.

También como fuentes de voltaje tenemos la pila de mercurio y las pilas recargables de níquel y cadmio.

Además, es muy común las pilas simples llamadas baterías. En realidad una batería consiste de dos o más celdas (ya mencionadas) en un recipiente conectando dichas celdas entre sí.

Es importante saber y comprender la finalidad y los resultados de conectar las celdas en grupos.

En una conexión serie de celdas, la terminal positiva de una celda se conecta a la negativa de otra celda y así sucesivamente hasta conectar todas las celdas que querramos. En este caso la tensión de salida será:

$$E_s = E_{\text{cada celda}} \times n$$

donde n es el número de celdas.

$$E_{\text{Total}} = (1.5 \text{ V/celda}) \times 4 \text{ celdas}$$

$$E_{\text{Total}} = 6 \text{ volts.}$$

En la conexión en paralelo se unen todos los negativos y todos los positivos y se obtiene un voltaje de una de ellas, pero tienen mayor durabilidad.

Se tienen otras fuentes, tales como los acumuladores de los automóviles (celdas de plomo y ácido), las fotoceldas (transforma la luz en corriente eléctrica), los termopares (energía calorífica en corriente eléctrica) y el origen de la electricidad por medio de la distorsión mecánica de un cristal, efecto piezo-eléctrico. Y las fuentes más importantes, la transformación de energía mecánica en eléctrica por medio del dinamo y el generador.

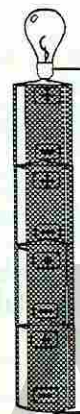


Fig No. 21. Pilas en serie.

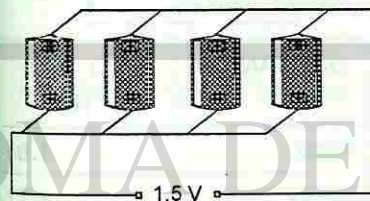


Fig No. 22. Pilas en paralelo.

### CORRIENTE ALTERNA Y DIRECTA

Existen dos tipos de corriente eléctrica, continua o directa (cc) y alterna (ca). Si comparamos la corriente alterna con la corriente directa, ésta última fluye en una sola dirección en un circuito mientras que la primera invierte periódicamente su dirección de flujo.

En la corriente directa, el voltaje de la fuente no cambia de polaridad y en la corriente alterna, cambia periódicamente entre positiva y negativa. En la gráfica se ilustra lo anterior. Comenzando en cero, el voltaje aumenta al máximo en la dirección positiva y vuelve a cero; a continuación sigue bajando, en la parte negativa del diagrama y vuelve otra vez a cero.

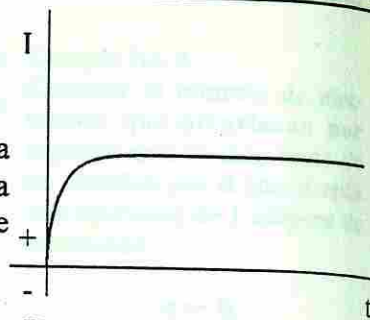


Fig No. 23. Gráfica del comportamiento en el flujo de corriente directa.

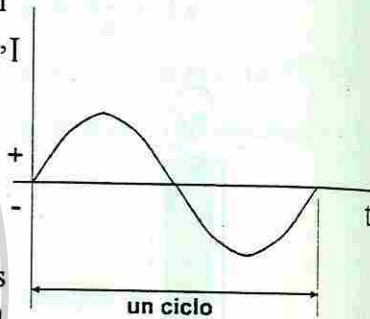


Fig No. 24. Gráfica del comportamiento del flujo de corriente alterna.

### RESISTENCIA ELÉCTRICA

No existen los conductores perfectos a las temperaturas ordinarias. Todas las sustancias, inclusive el cobre y otros metales, presentan cierta resistencia u oposición al flujo de electrones. Dicha resistencia real depende de 4 factores.

- a) La naturaleza del material usado como conductor.
- b) La temperatura.
- c) La longitud del conductor.
- d) Su área transversal.

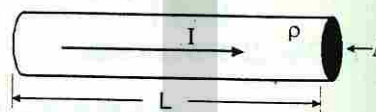


Fig No. 25.

Tabla No. 4. Resistividades de algunos metales.

SUSTANCIA	$\rho (\Omega - m) \times 10^{-8}$
Plata	1.05
Cobre	1.72
Oro	2.2
Aluminio	3.2
Tungsteno	5.5
Níquel	7.0
Platino	11.0
Hierro	15.0
Mercurio	94.1
Bismuto	119.0

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

donde:

R = resistencia en ohms ( $\Omega$ )

$\rho$  = resistencia específica o resistividad a la temperatura dada (ohm-m).

L = longitud del conductor (m).

A = área de la sección transversal ( $m^2$ ).

### CIRCUITO ELÉCTRICO

#### Ejemplo No. 6

Un alambre fino de platino de 0.4 milímetros de diámetro y 200 centímetros de largo, se usa como elemento sensible de un termómetro de resistencia eléctrica. Calcular su resistencia.

Datos:

$$d = 0.4 \text{ mm} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$L = 200 \text{ cm} = 2 \text{ m}$$

$$\rho = 11 \times 10^{-8} \Omega - m$$

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

$$A = \pi \frac{d^2}{4}$$

$$A = \frac{3.14 (4 \times 10^{-4})^2}{4}$$

$$A = 1.256 \times 10^{-7} m^2$$

$$R = \frac{11 \times 10^{-8} \Omega - m (2m)}{1.256 \times 10^{-7} m^2}$$

$$R = 1.75 \Omega$$

Un circuito cerrado en el que existe un movimiento de cargas, desde un elemento que hace la función de bombear (fuente) las cargas a través de un conductor, pasar por un dispositivo que convierte la energía eléctrica en otro tipo de energía (cinética (motor), luminica (foco), térmica (calentador), etc.), para luego regresar al sistema de bombeo, se le denomina *circuito eléctrico*.

Las cargas (electrones) que fluyen a través de cualquier aparato que convierte la energía, pierden energía potencial eléctrica. Se dice que el aparato o elemento que reduce la energía potencial de las cargas, se dice que posee una *resistencia* (Fig. No. 26).

Se sabe que las cargas no pueden ser creadas o destruidas, sólo separadas, es decir, la cantidad total de carga (número total de electrones y iones positivos), no cambia en el circuito. Si fluye un coulomb en un segundo en un generador, al conectar un motor, también fluirán un coulomb en un segundo. En suma, la carga y la energía se conservan.

La energía transportada por una corriente eléctrica depende de la carga transferida y de la diferencia de potencial a través de la cual se mueve.

$$E = qV$$

Donde q es medida en coluomb, la relación de flujo de carga o corriente eléctrica, se mide en coulomb por segundo, la cual recibe el nombre de amper (A) en honor de André-Marie Ampère (1775-1836).

$$1 \text{ C/s} = 1 \text{ A}$$

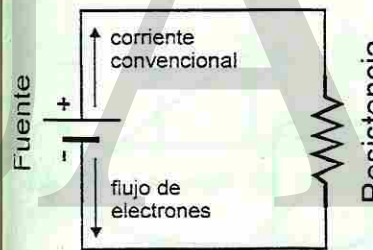


Fig No. 26. Circuito eléctrico.

La circulación del fluido se establece cuando existe una diferencia de potencial o de voltaje entre dos puntos y además, existe un conductor entre esos dos puntos.

### SIMBOLOGÍA EN LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS

Probablemente alguna vez hayas visto un diagrama eléctrico de un radio, televisor, estéreo o video casetera; puede parecer algo muy complicado pero está formado de partes fundamentales como resistencias, diodos, transistores, etc., cada una con su símbolo correspondiente.

Como son muchas las componentes eléctricas y electrónicas usadas en la actualidad, sólo representaremos a continuación algunas de ellas con su respectivo símbolo esquemático.

Unión de líneas	Tierra	Foco Incandescente	Resistencia	Reostato
Cruce de líneas	Fuente de voltaje (c.a.)	Fusible	Capacitor	Celda o pila eléctrica
Bobina	Transformador	Amperímetro	Voltímetro	Diodo (Rectificador)

Fig No. 27. Símbolos de algunos elementos eléctricos.

### FORMAS BÁSICAS DE LOS CIRCUITOS

Cualquier circuito eléctrico puede describirse en palabras, pero a medida que este se va haciendo más complejo, también se hace más compleja su expresión oral. Por ello es más frecuente desarrollar un diagrama de un circuito eléctrico manejando símbolos, ya establecidos como patrones, para los elementos de un circuito. Al diagrama completo se le da el nombre de *esquema del circuito*.

La primera y más sencilla de las formas de un circuito eléctrico consta de una fuente, un elemento resistivo y alambres de conexión, como se observa en la figura No. 28 (se puede agregar un dispositivo de control, en este caso un interruptor). A esta forma se le denomina **circuito simple**. En la figura No. 29 tenemos el circuito en **forma esquemática**.

La segunda forma consiste en una fuente de dos o más elementos resistivos conectados uno seguido de otro (Figura No. 30), que se conoce como **circuito serie**. en la figura No. 31 tenemos el circuito en forma esquemática.

La tercera forma de circuito consta de dos o más resistores conectados directamente a una fuente o un punto (Fig. No. 32), al que se le denomina

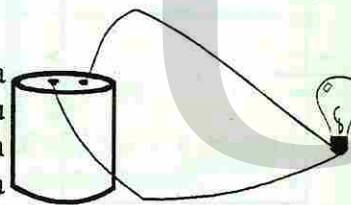


Fig No. 28. Circuito simple de fuente y resistencia.

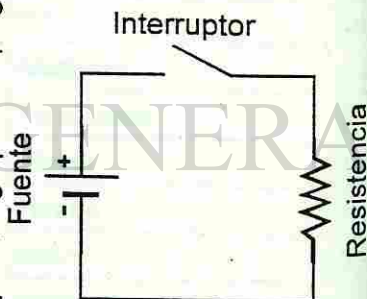


Fig No. 29. Esquema de un circuito simple.

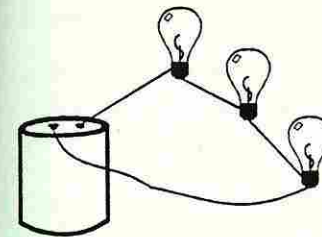


Fig No. 30. Circuito serie.

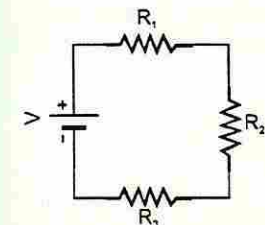


Fig No. 31. Esquema del circuito serie.

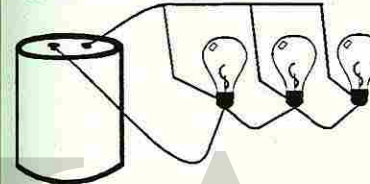


Fig No. 32. Circuito paralelo.

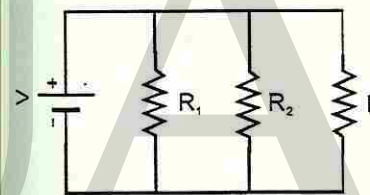
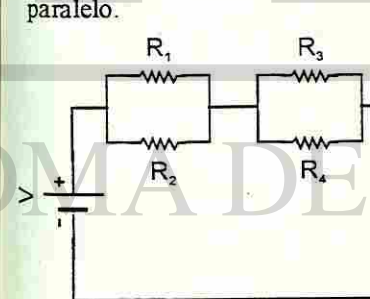


Fig No. 33. Esquema del circuito paralelo.



Figs. Nos. 34 y 35. Esquemas de circuitos mixtos.

**circuito paralelo**. En la figura No. 33 tenemos el circuito en forma esquemática.

La cuarta forma consta de dos o más grupos de resistores conectados en serie como en la figura No 34. o dos o más ramas en serie conectados en paralelo entre sí, como se ve en la figura No. 35. este tipo de conexiones se les llama **circuito mixto**. Estas son dos de las muchas combinaciones complejas que se pueden construir en los circuitos mixtos.

### SIMPLIFICACIÓN DE UN CIRCUITO

Si tenemos un circuito con dos o más cargas que estén conectadas en cualquiera de las formas: serie, paralelo o mixto, lo podemos simplificar, es decir, lo podemos reducir a un circuito simple como el mostrado en la figura No. 29. Pero tenemos que calcular la resistencia equivalente.

1o. Para un circuito serie se suman el total de resistencias que estén conectadas.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

2o. Para un circuito paralelo, el inverso de la resistencia equivalente es igual a la suma de los inversos de todas las resistencias conectadas en paralelo.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

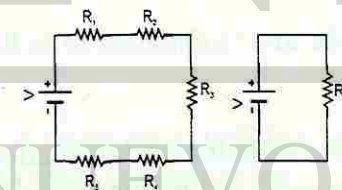


Fig No. 36. Simplificación de un circuito serie.

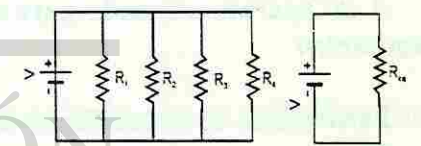


Fig No. 37. Simplificación de un circuito paralelo.

3o. Para un circuito mixto, tenemos que analizar detenidamente el diagrama y utilizar la solución del circuito serie y el circuito paralelo, hasta reducir al circuito simple. como estos circuitos son muy variados, también las soluciones son muy variadas.

## AMPERÍMETROS Y VOLTÍMETROS

Los instrumentos diseñados para medir una corriente eléctrica se les llama **amperímetros** y los proyectados para medir la diferencia de potencial se denominan **voltímetros**.

**Galvanómetro.** Una bobina de alambre fino de cobre está montado entre los dos polos de un imán permanente y su notación, está restringida por un resorte espiral. Cuanto más gire la bobina desde su posición de equilibrio o posición cero, es mayor la fuerza restauradora. A esta bobina está sujeta una larga aguja al final de la cual hay una escala fija que da lecturas en amperios si es un amperímetro, o en voltios si es un voltímetro. Al aumentar la corriente por la bobina móvil, el campo resultante entre la bobina y el imán se distorsiona más y más. Por lo tanto, el incremento resultante de la fuerza hace girar a la bobina un ángulo cada vez mayor, hasta llegar a un punto donde esté equilibrada por la fuerza restauradora del resorte espiral.

Los medidores son instrumentos costosos que deben usarse con cuidado y buen juicio. Si en un amperímetro se permitiera pasar una corriente grande por la bobina, no tardaría mucho en quemarse.

Un amperímetro debe conectarse siempre en serie con un circuito, **nunca en paralelo**. Una conexión en paralelo puede destruir inmediatamente al instrumento.

Un voltímetro se conecta siempre en paralelo con el circuito, **nunca en serie**. Al medir un voltaje desconocido, comience siempre por la escala más elevada.

A un aparato utilizado para medir el valor de una resistencia se le llama **ohmímetro**.

Para usarlo correctamente se ponen en corto circuito las terminales de prueba. Esto equivale a una resistencia cero y la aguja del medidor se desvía de la izquierda a la derecha. Se ajusta la aguja a cero. A continuación se coloca entre las terminales, una resistencia,  $R_x$ . La aguja se desviará menos en la escala completa. La escala se leerá directamente en ohms, o bien, para otros valores mayores puede especificarse que se multiplique el valor indicado por 10, 100 ó 1,000, según la escala.

Antes de usar el ohmímetro para probar un circuito, asegúrese que se haya retirado la energía del equipo que vaya a examinarse. Lo mejor será que este desconectada la clavija de la fuente de voltaje.

Los instrumentos modernos usados por los técnicos, incluyen por lo regular, un voltímetro, un amperímetro y un ohmímetro en una sola caja. Estos contienen un sistema interruptor apropiado para cambiar la función del medidor. A estos aparatos se les llama **multímetros**.

Al usar un multímetro hay que recordar como usarlo:

- Amperímetro, se debe conectar en serie al circuito.
- Voltímetro, se debe conectar en paralelo.
- Ohmímetro, el circuito que se va analizar debe estar desconectado de la fuente de energía.

## LEY DE OHM


George S Ohm observó que si se aumenta la diferencia de potencial o voltaje a 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. Tomando en cuenta estas observaciones enunció la ley que lleva su nombre:

**La intensidad de la corriente de un circuito eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial (voltaje) e inversamente proporcional a la resistencia.**

$$\text{Intensidad (I)} = \frac{(V) \text{ voltaje (volts)}}{(R) \text{ Resistencia (ohms)}}$$

$$I = \frac{V}{R}$$

A pesar de su utilidad, la ley de Ohm tiene limitaciones definidas. Entre otras están las siguientes:

- Se aplica sólo a los sólidos no a los líquidos. 
- Debe tomar en consideración cualquier cambio de temperatura. Esto es particularmente importante puesto que todos los resistores se calientan cuando los electrones los atraviesan.
- Debe modificarse cuando se aplica a los circuitos con corriente alterna.
- Algunas combinaciones de materiales conducen las cargas con mayor facilidad en un sentido que en el opuesto.



La ley de Ohm funcionará y le proporcionará las respuestas correctas para cualquiera de las situaciones en un problema que puede tratar de resolver con su ayuda, si se recuerda que en la ecuación, la primera regla es:

- La corriente (I) se expresa siempre en amper (A).  
El voltaje (V) se expresa en volts (V).  
La resistencia se expresa en ohms ( $\Omega$ ).

Hay una segunda regla que se debe aplicar desde el inicio. Siempre que se quiera resolver un problema que involucre la ley de Ohm, se debe dibujar un diagrama del circuito que se esté considerando antes de comenzar a realizar los cálculos basados en los valores del circuito.

### LEY DE LOS VOLTAJES DE KIRCHHOFF

La ley de los voltajes de Kirchhoff establece que la suma de las caídas de voltaje en cada una de las resistencia conectadas en serie es igual al voltaje total.

De la figura No. 38 podemos deducir:

$$V = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n$$

Por lo tanto podemos calcular el voltaje existente en cada uno de los puntos marcados en la figura para el ejemplo No. 13

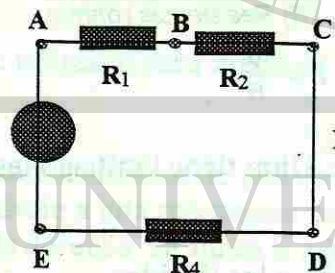


Fig No. 38

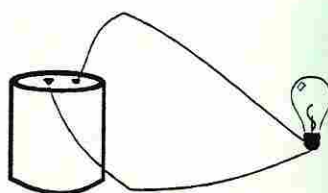
$$\begin{aligned} V_A &= 125 \text{ V} \\ V_B &= V_A - IR_1 = 125 \text{ V} - (6.25 \text{ A} \times 5 \Omega) = 93.75 \text{ V} \\ V_C &= V_B - IR_2 = 93.75 \text{ V} - (6.25 \text{ A} \times 5 \Omega) = 62.50 \text{ V} \\ V_D &= V_C - IR_3 = 62.50 \text{ V} - (6.25 \text{ A} \times 5 \Omega) = 31.25 \text{ V} \\ V_E &= V_D - IR_4 = 31.25 \text{ V} - (6.25 \text{ A} \times 5 \Omega) = 0 \text{ V} \end{aligned}$$

Otra forma de medir el voltaje a un circuito serie es utilizando un par de puntos. Trabajando en el mismo ejemplo tendremos:

$$V_{AB} = IR_1 = (6.25 \text{ A})(5 \Omega)$$

**Ejemplo No. 12**  
Se conectan varias baterías en serie y se obtiene un voltaje de 27 volts y se conecta una resistencia de 9 ohms. Calcular la intensidad de la corriente en el circuito.

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ I &= \frac{27 \text{ V}}{9 \Omega} \\ I &= 3 \text{ A} \end{aligned}$$

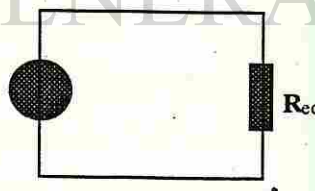


**Ejemplo No. 13**  
Se conectan en serie 4 focos de 5 ohms cada uno. Si el voltaje de la fuente es de 125 volts, ¿cuál es la corriente eléctrica en el circuito?

Se dibuja un diagrama del circuito (figura No. 38) y se reduce el circuito serie a un circuito simple (Figura inferior).

$$\begin{aligned} R_{eq} &= 5 \Omega + 5 \Omega + 5 \Omega + 5 \Omega \\ R_{eq} &= 20 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} \\ I &= \frac{125 \text{ V}}{20 \Omega} \\ I &= 6.25 \text{ A} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_{BC} &= IR_2 = (6.25 \text{ A})(5 \Omega) \\ V_{CD} &= IR_3 = (6.25 \text{ A})(5 \Omega) \\ V_{DE} &= IR_4 = (6.25 \text{ A})(5 \Omega) \\ V_T &= 125 \text{ V} \end{aligned}$$

Como se observa al realizar la suma de los voltajes en cada resistencia se cumple la ley de Kirchhoff para voltajes en el cual se obtiene el valor del voltaje de la fuente.

Para este ejemplo, los valores de los voltajes son iguales en cada resistencia por tener en ellas el mismo valor (5 ohms), pero circuitos en donde se tengan resistencias con valores diferentes, el valor del voltaje variará para cada resistencia.

Ahora conocemos tres puntos importantes acerca de los circuitos serie:

- La corriente que fluye a través de éste es la misma en cualquier punto.
- La resistencia total de un circuito serie es igual a la suma de las resistencias que componen el mismo.
- Cuando se suman entre sí las caídas de voltaje en un circuito serie, su valor total es igual al voltaje total aplicado.

**Ejemplo No. 14.**  
Se conectan en paralelo 4 focos de 5 ohms cada uno a una toma de 125 volts. Calcular la resistencia equivalente y la corriente máxima del circuito.

La solución se inicia con el diagrama del circuito para reducirlo a un circuito simple, como anteriormente se mencionó.

Por la definición del cálculo de la resistencia equivalente de un circuito paralelo, tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{eq}} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \\ \frac{1}{R_{eq}} &= \frac{1}{5 \Omega} + \frac{1}{5 \Omega} + \frac{1}{5 \Omega} + \frac{1}{5 \Omega} \\ \frac{1}{R_{eq}} &= \frac{0.2}{\Omega} + \frac{0.2}{\Omega} + \frac{0.2}{\Omega} + \frac{0.2}{\Omega} \\ \frac{1}{R_{eq}} &= 10 \frac{0.8}{\Omega} \\ R_{eq} &= \frac{1 \Omega}{0.8} \\ R_{eq} &= 1.25 \Omega \end{aligned}$$

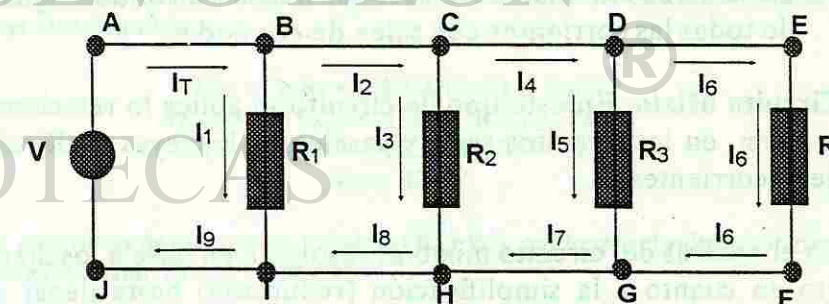
Por la ley de Ohm, tenemos:

$$\begin{aligned} I &= \frac{V}{R} = \frac{125 \text{ V}}{1.25 \Omega} \\ I &= 100 \text{ A} \end{aligned}$$

### LEY DE LAS CORRIENTES DE KIRCHHOFF

La ley de las corrientes de Kirchhoff establece que la suma de todas las corrientes que fluyen hacia cualquier punto de unión es igual a la suma de todas las corrientes que fluyen hacia afuera del mismo.

Utilizando la ley de las corrientes de Kirchhoff en el ejemplo 14, se obtendrá que el voltaje en cada resistencia es el mismo pero la corriente se disminuye en cada rama de acuerdo al valor de la resistencia.



Utilizando los datos que se tienen en el circuito simple de  $V$ ,  $I$  y  $R$  se obtendrán las corrientes para cada nodo (punto de unión).

Por la ley de Ohm, tendremos:

$$I_{R_1} = \frac{V}{R_1} = \frac{125 \text{ V}}{5 \Omega} = 25 \text{ A}$$

$$I_{R_2} = \frac{V}{R_2} = \frac{125 \text{ V}}{5 \Omega} = 25 \text{ A}$$

$$I_{R_3} = \frac{V}{R_3} = \frac{125 \text{ V}}{5 \Omega} = 25 \text{ A}$$

$$I_{R_4} = \frac{V}{R_4} = \frac{125 \text{ V}}{5 \Omega} = 25 \text{ A}$$

$$I_T = 100 \text{ A}$$

De acuerdo a lo que se muestra en la figura anterior:

$$I_{R_1} = I_1 = 25 \text{ A}$$

$$I_{R_3} = I_3 = 25 \text{ A}$$

$$I_{R_3} = I_5 = 25 \text{ A}$$

$$I_{R_4} = I_6 = 25 \text{ A}$$

Teniendo estos valores, podemos calcular la corriente por cada uno de los nodos observando la figura.

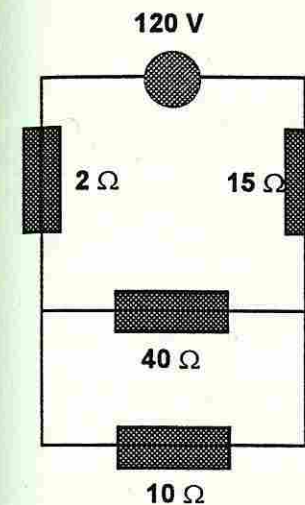
Nodo A = 100 A	Nodo B = 75 A	Nodo C = 50 A	Nodo D = 25 A
Nodo E = 25 A	Nodo F = 25 A	Nodo G = 50 A	Nodo H = 75 A
Nodo I = 100 A	Nodo J = 100 A		

Ahora conocemos tres puntos importantes acerca de los circuitos en paralelo.

- El voltaje de cada resistencia de un circuito paralelo es el mismo, y es igual al de la fuente de voltaje.
- Para el circuito paralelo, la resistencia equivalente de todos los elementos conectados en paralelo, es igual al inverso de la suma de los inversos de cada una de las resistencias.
- La suma de todas las corrientes que llegan a un nodo es igual a la suma de todas las corrientes que salen de ese nodo.

**Circuito Mixto:** En este tipo de circuito se aplica lo relacionado con la ley de Ohm, en los circuitos serie y paralelo, y las leyes de Kirchhoff para voltajes y corrientes.

En el análisis del circuito mixto se resolverá en base a los diagramas del circuito en cuanto a la simplificación (reducción) hasta llegar al circuito simple.



### Ejemplo No. 16

Se tiene un circuito mixto formado por 4 resistencias:  $R_1 = 2 \text{ ohms}$ ,  $R_2 = 10 \text{ ohms}$ ,  $R_3 = 4 \text{ ohms}$ ,  $R_4 = 15 \text{ ohms}$  y una fuente de voltaje de 120 volts, tal como se muestra en la figura. Calcular:

- La resistencia equivalente del circuito.
- La corriente total del circuito.
- El voltaje en cada resistencia.
- La corriente en cada resistencia.
- La corriente en cada nodo.

Realizando la simplificación del circuito mixto, tenemos que  $R_2$  y  $R_3$  se encuentran en paralelo, por lo que tenemos:

$$\frac{1}{R_{eq1}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{eq1}} = \frac{1}{10 \Omega} + \frac{1}{40 \Omega}$$

$$\frac{1}{R_{eq1}} = \frac{0.1}{\Omega} + \frac{0.025}{\Omega}$$

$$R_{eq1} = 8 \Omega$$

Quedando ahora reducido a un circuito serie, en las que intervienen:  $R_1$ ,  $R_{eq1}$  y  $R_4$ . Por lo que podemos calcular una nueva resistencia equivalente,  $R_{eqT}$ .

$$R_{eqT} = R_1 + R_{eq1} + R_4$$

$$R_{eqT} = (2 \Omega + 8 \Omega + 15 \Omega)$$

$$R_{eqT} = 25 \Omega$$

Hemos reducido a un circuito simple que consta de la fuente de voltaje y una resistencia ( $R_{eqT}$ ) por lo que podemos obtener la corriente total del circuito utilizando la ley de Ohm.

$$I_T = \frac{V}{R_{eqT}} = \frac{120 \text{ V}}{25 \Omega}$$

$$I_T = 4.8 \text{ A}$$

Como ya anteriormente vimos, la  $R_{eqT}$  la obtuvimos de un circuito serie, por lo que la corriente que circula por  $R_1$ ,  $R_{eq1}$  y  $R_4$  es la misma.

$$I_T = I_{R_1} = I_{R_{eq1}} = I_{R_4} = 4.8 \text{ A}$$

Utilizando los datos correspondientes y la ley de Ohm se obtienen los voltajes en las resistencias mencionadas.

$$V_{R_1} = I_T R_1 = (4.8 \text{ A})(2 \Omega) = 9.6 \text{ V}$$

$$V_{R_{eq1}} = I_T R_{eq1} = (4.8 \text{ A})(8 \Omega) = 38.4 \text{ V}$$

$$V_{R_4} = I_T R_4 = (4.8 \text{ A})(15 \Omega) = 72 \text{ V}$$

$$V_T = 120 \text{ V}$$

La  $R_{eq1}$  la obtuvimos de un circuito paralelo ( $R_2$  y  $R_3$ ), por lo que el voltaje entre esas dos resistencias es el mismo ( $V_{R_{eq1}} = 38.4 \text{ V}$ ).

$$V_{R_{eq1}} = V_{R_2} = V_{R_3} = 38.4 \text{ V}$$

$$I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R2} = \frac{38.4 V}{10 \Omega} = 3.84 A = I_1$$

$$I_{R3} = \frac{V_{R3}}{R3} = \frac{38.4 V}{40 \Omega} = 0.96 A = I_2$$

$$I_{Req1} = 4.8 A$$

Las corrientes en cada nodo:

$$I_T = I_{R1} = 4.8 A$$

$$I_1 = I_{R2} = 3.84 A$$

$$I_{R2} = I_{R3} = 0.96 A$$

$$I_3 = I_{R4} = 4.8 A$$

$$\text{Nodo A: } I_T = 4.84 A$$

$$\text{Nodo B: } I_T = 4.8 A$$

$$\text{Nodo C: } I_2 = 0.96 A$$

$$\text{Nodo D: } I_3 = I_2 + I_1 = 4.8 A$$

$$\text{Nodo E: } I_3 = 4.8 A$$

Y el caso de los voltajes:

$$V_A = 120 V$$

$$V_B = V_A - I_T R_1$$

$$= 120 V - (4.8 A \times 2 \text{ OHMS})$$

$$= (120 V - 9.6 V)$$

$$V_B = 110.4 V$$

$$V_C = 110.4 V$$

$$V_D = V_C - I_{R3} R_3$$

$$= 110.4 V - (0.96 A \times 40 \text{ ohms})$$

$$= (110.4 V - 38.4 V) = 72 V$$

$$V_E = V_D - I_{R4} R_4$$

$$= 72 V - (4.8 A \times 15 \text{ ohms})$$

$$= (72 V - 72 V) = 0 V$$

El voltaje para cada par de puntos.

$$V_{AB} = I_T R_1 = (4.8 A \times 15 \text{ ohms}) = 9.6 V$$

$$V_{BC} = 0 V$$

$$V_{CD} = I_2 R_3 = (0.96 A)(40 \text{ ohms}) = 38.4 V$$

$$V_{DE} = I_3 R_4 = (4.8 A)(15 \text{ ohms}) = 72 V$$

$$V_{BD} = I_1 R_2 = (3.84 A)(10 \text{ ohms}) = 38.4 V$$



## POTENCIA ELÉCTRICA

La potencia eléctrica es la rapidez con que se efectúa un trabajo, o bien, es la energía que consume una máquina o cualquier aparato eléctrico en cada segundo. La potencia eléctrica se expresa en watts (W).

La ley de Watt establece que la potencia en un circuito eléctrico es igual al producto de la intensidad de la corriente por la diferencia de potencial.

$$\text{Potencia (P)} = \text{voltaje (V)} \times \text{intensidad de corriente (I)}$$

$$\text{Potencia (watts)} = V \text{ (volts)} \times I \text{ (ampers)}$$

$$P = VI$$

$$P = Vq/t$$

donde V es la diferencia de potencial en volts, q es la carga eléctrica en columb y "t" es el tiempo en segundos.

$$P = I^2 R$$

La energía consumida en el hogar se puede calcular fácilmente, ya que la C.F.E. vende al público, la energía eléctrica consumida en forma de trabajo por cada hora. el trabajo total, la compañía lo determina por medio de un "medidor" que marca el número de kilowatts-hora consumidos durante un determinado tiempo. Es fácil de leer en la carátula de ese medidor.

Tabla. Algunos datos sobre el consumo en aparatos domésticos.

	P (W)	I (A)
Aire acondicionado (hab.)	1500	12.5
Aire acondicionado (central)	5000	41.7
Licudadora	800	6.7
Cafetera	1625	13.5
Secadora de pelo	1200	10.0
Calentador	1500	12.5
Horno de microondas	625	5.2
Rep. de Casetes	14	0.12
Refrigerador	400	3.3
Refrigerador, sin esc	500	4.2
Televisión B/N	50	0.42
Televisión Color	100	0.83
Tostador	950	7.9
Calentador de agua	4500	37.5

## CIRCUITOS DOMÉSTICOS

Aunque los circuitos domésticos suelen usar corriente alterna, y ésta no ha sido explicada, incluyen aplicaciones prácticas de algunos de los principios estudiados.

Por ejemplo, ¿esperaría usted que los elementos en un circuito doméstico (lámparas, electrodomésticos y demás) estén conectados en serie o paralelo?, debe estar claro que los elementos domésticos deben conectarse en paralelo. Por ejemplo, cuando el foco de una lámpara se funde, otros elementos del circuito continúan trabajando. Éste podría no ser el caso para un circuito en serie. Es más, los aparatos eléctricos y las lámparas por lo general se fabrican para 120 volts. Si estos elementos se conectaran en serie, la caída de voltaje a través de ellos se podría sumar hasta un *total* de 120 volts. Ninguno de los elementos del circuito tendría un voltaje adecuado y mientras más elementos estén conectados en serie, menos voltaje tendrá cada uno.

La potencia se suministra a una casa mediante un sistema de tres cables. Hay una diferencia de potencia de 240 volts entre los dos cables "calientes" o "vivos", o de alto potencial, y cada uno de ellos tiene una diferencia de potencial de 120 volts con la tierra. El tercer cable está conectado a tierra en el punto en el que los cables entran a la casa, por lo común mediante una varilla metálica dirigida dentro de la tierra. Este cable tiene un potencial cero y es el alambre neutro o de tierra.

La diferencia de potencial de 120 volts necesaria para la mayor parte de los aparatos domésticos se obtiene conectando éstos entre el cable conectado a tierra y cualquiera de los cables de alto potencial:  $\Delta V = 120 \text{ V} - 0 \text{ V} = 120 \text{ V}$  o  $\Delta V = 0 \text{ V} - (-120 \text{ V}) = 120 \text{ V}$ . Aun cuando el cable conectado a tierra tiene un potencial cero, es un cable que *conduce corriente* pues es parte de un circuito. Los aparatos grandes, como los acondicionadores centrales de aire, las estufas eléctricas y los calentadores de agua necesitan 240 volts para su operación, y esto se obtiene conectándolos entre los dos cables "calientes":  $\Delta V = 120 \text{ V} - (-120) = 240 \text{ V}$ .

La cantidad de corriente que utiliza un aparato se puede indicar en los "datos de placa", pero también se puede determinar a partir de los datos de potencia (utilizando  $P = VI$ ). Por ejemplo, un aparato de sonido clasificado a 180 watts a 120 volts puede usar 1.5 amperes ( $I = P/V$ ). Existen limitaciones en el número de elementos que puede incluir un circuito y la cantidad total de corriente utilizada. En particular, se debe considerar el calor de joule (pérdida =  $I^2R$ ). Por lo general, mientras más elementos (resistencias) estén conectadas en paralelo, menor será la resistencia equivalente. En cualquier caso, la resistencia equivalente será menor que la resistencia del elemento menor. El calor joule producido es inversamente proporcional a la resistencia del circuito:  $P = V^2/R$ . De este modo, si agregamos demasiados elementos acarreadores de corriente, es posible sobrecargar un circuito doméstico de modo que libere mucha corriente y produzca demasiado calor. El calor de Joule en los cables del circuito pueden fundir el aislante y provocar un incendio.

La sobre carga se evita limitando la corriente de un circuito por medio de dos tipos de dispositivos: los fusibles y los cortadores de circuito. Los fusibles son más comunes en las casas antiguas. Un fusible base de Edison tiene una rosca semejante al de la base de un foco. Dentro del fusible hay una tira metálica que se funde a causa el calor de joule cuando la corriente es mayor del valor de clasificación. La fusión de la tira abre el circuito y la electricidad se interrumpe.

Un problema de los fusibles de base de Edison es que son intercambiables. Por ejemplo, un fusible de 30 Amperes se puede poner en un circuito clasificado para 15 amperes. Esto puede generar una corriente del doble de aquella para la cual se diseñó el fusible.

Los **interruptores de circuito** se usan exclusivamente en el cableado de casas nuevas. Un tipo de interruptor de circuito, utiliza una tira bimetálica. A medida que aumenta la corriente a través de la tira, ésta se calienta y se dobla. al valor de clasificación de la corriente, la tira se ha doblado lo suficiente para ocasionar que el circuito se abra mecánicamente. La tira se enfría con rapidez, de modo que el interruptor puede reinstalarse. sin embargo, cuando un fusible se funde o un interruptor de circuito se dispara, quiere decir que el circuito está liberando o intenta liberar demasiada corriente. *Usted debe investigar siempre hasta encontrar y corregir el problema, antes de reemplazar el fusible o reinstalar el interruptor de circuito.*

Los interruptores, los fusibles y los interruptores de circuito se colocan en el lado "caliente" (de potencial elevado) de la línea. Pueden trabajar en el lado conectado a tierra, pero aun si el interruptor estuviera abierto, el fusible fundido o el interruptor de corriente disparado, el circuito y cualesquiera de sus elementos seguirían conectados a un potencial elevado, lo cual puede ser peligroso si una persona hace contacto eléctrico. Y aun con fusibles o interruptores de circuito en el lado caliente de la línea existe la posibilidad de provocar un choque eléctrico por un aparato defectuoso que tenga un mango metálico, como un taladro de mano. Un cable interior puede aflojarse y hacer contacto con el mango, que se calentaría o alcanzaría un potencial elevado. Una persona puede proporcionar una trayectoria a la tierra y convertirse en parte del circuito sufriendo un choque.

Para evitar que esto suceda, se agrega un tercer cable conectado a tierra al circuito que hace tierra con el mango metálico. Si un cable caliente entra en contacto con el mango, se completa el circuito a este cable conectado a tierra y el fusible se funde o el interruptor de corriente se dispara.

En las clavijas de tres dientes conectadas a tierra, el diente redondo grande se conecta con el cable de la tierra. Se puede utilizar adaptadores entre una clavija de tres dientes y una toma de corriente de dos dientes. Tales adaptadores tienen una agarradera o un cable que hacen tierra. Esto debe asegurarse a una caja receptáculo por un tornillo de seguridad o por algún otro medio. La caja receptáculo está conectada a tierra por medio del cable que hace tierra. Si la agarradera o el cable del adaptador no están conectados, el sistema queda desprotegido, lo cual frustra el propósito del dispositivo de seguridad dedicado a hacer tierra.

A veces nos referimos a la energía térmica gastada en un conductor de corriente como el calor de joule o pérdida de  $I$  al cuadrado por  $R$  ( $I^2R$ ). En muchos casos, la pérdida de calor de joule es indeseable, por ejemplo, en las líneas de transmisión eléctrica. Sin embargo, en otros casos, la conversión de energía eléctrica en energía térmica tiene un uso práctico. Estas aplicaciones incluyen los elementos de calentamiento (quemadores) de las estufas eléctricas, de las secadoras de pelo y de los tostadores.

Los focos para luz eléctrica se clasifican directamente en watts (potencia), por ejemplo, 100 W o 60 W. En tales bombillas, la energía eléctrica excita los átomos del filamento, y éstos irradian hacia afuera la energía extra en forma de luz. Mientras más elevado sea el voltaje de una bombilla, mayor será el consumo de energía por unidad de tiempo (joules por segundo). Las lámparas incandescentes son fuentes de luz relativamente ineficientes. Sólo alrededor del 5 % de la energía eléctrica es convertida en luz visible (la mayor parte de la energía radiante producida es radiación infrarroja invisible).

Los aparatos eléctricos están etiquetados con su potencia. Se indican tanto los requisitos de voltaje y potencia como los requisitos de voltaje y corriente. En cualquier caso, se puede calcular la corriente, la potencia y la resistencia efectiva las ecuaciones ya comentadas.

El altísimo consumo de electricidad ha provocado que el gobierno se haya dado a la tarea, por conducto de la CFE, ha mantenido un programa de cultura hacia el ahorro de energía eléctrica. Casi se considera que el 25 % de la la energía eléctrica producida en el país, se aplique para la iluminación y para lograr el ahorro se busca una mayor eficiencia en las lámparas. La lámpara fluorescente más eficiente en la actualidad, consume del 25 al 30 % menos energía que la lámpara fluorescente promedio y casi el 75 % menos que las lámparas incandescentes y con un nivel muy similar en iluminación. Los investigadores están utilizando nuevas técnicas en un esfuerzo por desarrollar lámparas fluorescentes más efectivas.

### CORTO CIRCUITO

Como ya se ha visto por la ley de Ohm, a mayor resistencia, menor es la corriente que pasa por el circuito y por supuesto, a menor resistencia mayor es la corriente que circula. También, la corriente tiene la característica de buscar el conducto que tenga menos resistencia.

En muchas ocasiones se presenta que dos alambres que tienen distinto voltaje, se unen y forman lo que se denomina **corto circuito**.

Cuando sucede esto tenemos una resistencia con el valor de 0 (cero), que va a intervenir en el cálculo de la  $R_{eq}$ . Esto afecta en la corriente que va a circular por cada conducto.

Si el corto circuito sucede en una resistencia de un circuito en serie, provoca que la corriente aumente en una cantidad que quizá puedan absorber las otras resistencias o los aparatos conectados en ese momento.

Si el corto circuito sucede en un circuito paralelo, la corriente que circulará por este elemento es absolutamente alta y si no se tiene un buen sistema de seguridad se puede afectar y ocasionar muy serios problemas.

## MAGNETISMO

### INTRODUCCION:

La observación de que ciertas piedras en estado natural se atraían entre sí y atraían también a pequeños trozos de un metal, el hierro, pero que ésta fuerza misteriosa no se ejercía sobre otros metales como el oro y la plata, dió origen en la antigüedad al desarrollo de la ciencia del magnetismo. Los antiguos griegos llamaban a estas piedras "magneto" nombre que proviene de cierta región del Asia menor (Magnesia), lugar donde se encontraron estas piedras, los chinos (año 100 D.C.) se percataron de que estas piedras, cuando se colgaban de un hilo delgado, tendían a orientarse en una dirección especial, este conocimiento fué aprovechado para construir toscas brújulas magnéticas que fueron utilizadas durante los siglos XI y XII como instrumentos de navegación. Sin embargo, no fué sino hasta el año de 1600 cuando un médico inglés William Gilbert explicó convincentemente el funcionamiento de estas brújulas náuticas. Gilbert examinó el fenómeno magnético mediante un conjunto de agujas giratorias imantadas que colocó a diferentes distancias de esferas de magnetita, (mineral de hierro magnético) descubriendo que en cada una de estas esferas existían dos puntos especiales. En uno de los cuales uno de los extremos de la aguja recibía un máximo de atracción, en el otro punto, era el extremo opuesto de la aguja el que recibía la atracción. Además, el conjunto de agujas imantadas se orientaba siempre según una curva definida que unía los puntos en que ocurrían las máximas atracciones: a los que llamó los polos magnéticos. Gilbert reconoció que sus observaciones experimentales, eran sumamente parecidas a las observadas en la brújula náutica en los distintos puntos del globo terráqueo, por lo que propuso que la tierra es un enorme imán, con un polo magnético cerca de cada polo geográfico. Entre los efectos del magnetismo terrestre encontramos, los cinturones de Radiación de Van Hallen y el grandioso espectáculo de las Auroras Boreales (Luces del Norte). La fuente exacta del magnetismo de la tierra no está del todo comprendida, se conoce el hecho de que la posición de los polos magnéticos ha cambiado a través de la historia de la tierra. Esto ha sido determinado al estudiar la magnetización de las partículas que se han encontrado en la lava de los volcanes. De los patrones de magnetización encontrados, los

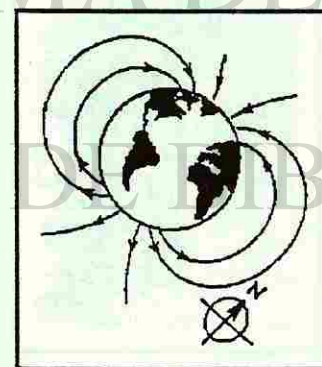


Fig. No. 1.

Los focos para luz eléctrica se clasifican directamente en watts (potencia), por ejemplo, 100 W o 60 W. En tales bombillas, la energía eléctrica excita los átomos del filamento, y éstos irradian hacia afuera la energía extra en forma de luz. Mientras más elevado sea el voltaje de una bombilla, mayor será el consumo de energía por unidad de tiempo (joules por segundo). Las lámparas incandescentes son fuentes de luz relativamente ineficientes. Sólo alrededor del 5 % de la energía eléctrica es convertida en luz visible (la mayor parte de la energía radiante producida es radiación infrarroja invisible).

Los aparatos eléctricos están etiquetados con su potencia. Se indican tanto los requisitos de voltaje y potencia como los requisitos de voltaje y corriente. En cualquier caso, se puede calcular la corriente, la potencia y la resistencia efectiva las ecuaciones ya comentadas.

El altísimo consumo de electricidad ha provocado que el gobierno se haya dado a la tarea, por conducto de la CFE, ha mantenido un programa de cultura hacia el ahorro de energía eléctrica. Casi se considera que el 25 % de la la energía eléctrica producida en el país, se aplique para la iluminación y para lograr el ahorro se busca una mayor eficiencia en las lámparas. La lámpara fluorescente más eficiente en la actualidad, consume del 25 al 30 % menos energía que la lámpara fluorescente promedio y casi el 75 % menos que las lámparas incandescentes y con un nivel muy similar en iluminación. Los investigadores están utilizando nuevas técnicas en un esfuerzo por desarrollar lámparas fluorescentes más efectivas.

### CORTO CIRCUITO

Como ya se ha visto por la ley de Ohm, a mayor resistencia, menor es la corriente que pasa por el circuito y por supuesto, a menor resistencia mayor es la corriente que circula. También, la corriente tiene la característica de buscar el conducto que tenga menos resistencia.

En muchas ocasiones se presenta que dos alambres que tienen distinto voltaje, se unen y forman lo que se denomina **corto circuito**.

Cuando sucede esto tenemos una resistencia con el valor de 0 (cero), que va a intervenir en el cálculo de la  $R_{eq}$ . Esto afecta en la corriente que va a circular por cada conducto.

Si el corto circuito sucede en una resistencia de un circuito en serie, provoca que la corriente aumente en una cantidad que quizá puedan absorber las otras resistencias o los aparatos conectados en ese momento.

Si el corto circuito sucede en un circuito paralelo, la corriente que circulará por este elemento es absolutamente alta y si no se tiene un buen sistema de seguridad se puede afectar y ocasionar muy serios problemas.

## MAGNETISMO

### INTRODUCCION:

La observación de que ciertas piedras en estado natural se atraían entre sí y atraían también a pequeños trozos de un metal, el hierro, pero que ésta fuerza misteriosa no se ejercía sobre otros metales como el oro y la plata, dió origen en la antigüedad al desarrollo de la ciencia del magnetismo. Los antiguos griegos llamaban a estas piedras "magneto" nombre que proviene de cierta región del Asia menor (Magnesia), lugar donde se encontraron estas piedras, los chinos (año 100 D.C.) se percataron de que estas piedras, cuando se colgaban de un hilo delgado, tendían a orientarse en una dirección especial, este conocimiento fué aprovechado para construir toscas brújulas magnéticas que fueron utilizadas durante los siglos XI y XII como instrumentos de navegación. Sin embargo, no fué sino hasta el año de 1600 cuando un médico inglés William Gilbert explicó convincentemente el funcionamiento de estas brújulas náuticas. Gilbert examinó el fenómeno magnético mediante un conjunto de agujas giratorias imantadas que colocó a diferentes distancias de esferas de magnetita, (mineral de hierro magnético) descubriendo que en cada una de estas esferas existían dos puntos especiales. En uno de los cuales uno de los extremos de la aguja recibía un máximo de atracción, en el otro punto, era el extremo opuesto de la aguja el que recibía la atracción. Además, el conjunto de agujas imantadas se orientaba siempre según una curva definida que unía los puntos en que ocurrían las máximas atracciones: a los que llamó los polos magnéticos. Gilbert reconoció que sus observaciones experimentales, eran sumamente parecidas a las observadas en la brújula náutica en los distintos puntos del globo terráqueo, por lo que propuso que la tierra es un enorme imán, con un polo magnético cerca de cada polo geográfico. Entre los efectos del magnetismo terrestre encontramos, los cinturones de Radiación de Van Hallen y el grandioso espectáculo de las Auroras Boreales (Luces del Norte). La fuente exacta del magnetismo de la tierra no está del todo comprendida, se conoce el hecho de que la posición de los polos magnéticos ha cambiado a través de la historia de la tierra. Esto ha sido determinado al estudiar la magnetización de las partículas que se han encontrado en la lava de los volcanes. De los patrones de magnetización encontrados, los

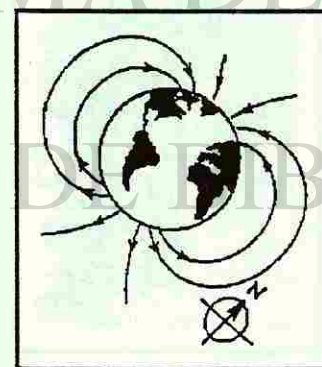


Fig. No. 1.

científicos han podido deducir que los polos magnéticos de la tierra se han invertido con mucha regularidad a lo largo de la historia geológica. En los últimos años las observaciones de las sondas espaciales interplanetarias apoyan la teoría de cierta clase de efecto de "DINAMO", como la probable fuente del magnetismo terrestre y de otros planetas.

Durante mucho tiempo, la electricidad, el magnetismo y el galvanismo fueron consideradas áreas muy distintas en el estudio de la física, la primera centrada en el estudio de las interacciones entre cargas eléctricas estacionarias (efectos eléctricos) estudiados entre otros por Cavendish y Coulomb, El galvanismo que se desarrolló a partir de las observaciones del físico Italiano Luigi Galvani acerca de la reacción del nervio ciático de la rana a estímulos eléctricos y que condujeron más tarde al descubrimiento de reacciones electroquímicas que se pudieron utilizar para construir aparatos galvánicos (pilas voltaicas), esto es baterías capaces de mantener una corriente continua en un circuito cerrado y el magnetismo, que como ya se mencionó se ocupaba de estudiar las propiedades de los imanes y sus interacciones (si es que las había) sobre otros objetos (efectos magnéticos) A continuación se listan algunas de estas propiedades:

- 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).
- 2.- Los polos aunque distintos no pueden ser separados. Los monopolos magnéticos o bien no existen o son tan sumamente raros que la relación como carga magnética individual no tiene valor práctico.
- 3.- Los polos iguales se repelen, mientras que los opuestos se atraen.
- 4.- Una brújula es un imán pequeño, en forma de aguja, balanceado sobre un alambre fino. El polo norte de la brújula apunta hacia el sur magnético de la Tierra. El norte magnético y el geográfico no están localizados en el mismo lugar.

Actualmente la electricidad y el magnetismo constituyen un solo capítulo de la Física, y se le atribuye al físico Danés Hans Christian Oersted (1777-1851) quien con su célebre experimento realizado en el año de 1820 formuló la relación existente entre los llamados efectos magnéticos y eléctricos.

Síntesis del experimento de Oersted:

*"Juntamos los polos opuestos del aparato galvánico (pila) mediante un alambre metálico delgado. Al efecto producido en este conductor y el espacio vecino le llamaremos conflicto eléctrico. Coloquemos el tramo recto de este*

*alambre sobre la aguja magnética suspendida adecuadamente, en forma horizontal y paralela a ella... al haber dispuesto así todas estas cosas, la aguja magnética se moverá inclinándose al oeste cuando esté bajo aquella parte del conductor más próxima del extremo negativo del aparato galvánico. Los efectos del conductor sobre la aguja magnética atraviesan el vidrio, los metales, la madera, las piedras y la loza, y son tan distintos como es posible de los efectos de una fuerza eléctrica."*

De manera similar a como lo hicimos en la unidad de electricidad, cuando describimos al espacio alrededor de un objeto cargado como el lugar ocupado por un campo eléctrico, introduciremos ahora el concepto de campo magnético para referirnos al efecto que Oersted llamó conflicto eléctrico, es decir:

Al espacio alrededor de un conductor que conduce corriente o de un imán permanente como el lugar ocupado por un campo magnético.

En la presente unidad, analizaremos los efectos magnéticos como una propiedad inseparable de la corriente eléctrica, describiremos los procedimientos que nos permitan establecer si hay un campo magnético presente en una cierta región del espacio (como entre los polos de un imán permanente) y estudiar los efectos de este campo en términos de la fuerza de origen magnético ejercida sobre objetos, como cargas en movimiento, o conductores con corriente que se localicen en dicha región, nos ocuparemos además de la fuente del campo magnético y de ver como el funcionamiento, de algunos dispositivos que la mayoría conocemos, tales como el motor eléctrico, el transformador, grabadoras, televisores, etc. depende para su operación de los efectos magnéticos sobre las corrientes eléctricas.

## EL CAMPO MAGNETICO:

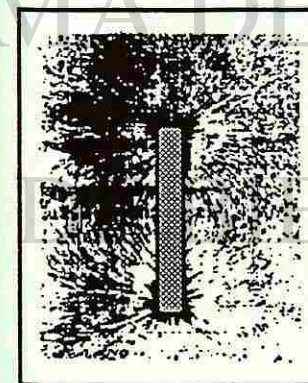


Fig. No. 2.

La importancia histórica del experimento de Oersted, al revelar la interrelación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos, trajo consigo un periodo de intensa actividad experimental entre la comunidad científica de su época que se abocaron a elaborar y extender esas investigaciones. Ampere en Francia propuso que si una corriente ejerce una fuerza sobre un imán (experimento de Oersted), entonces por la tercera ley de Newton, un imán debe ejercer una fuerza sobre un conductor con corriente. El experimento se llevó a cabo sin demora, obteniéndose el resultado predicho por Ampere. De una manera sencilla es posible "visualizar" un campo magnético, si sobre un proyector de acetatos colocamos un imán permanente de barra y sobre él colocamos un acrílico o vidrio y le vertimos cuidadosamente finas limaduras de hierro. En la figura No. 2, se muestra el patrón de distribución de las limaduras de hierro en el espacio cercano a un pequeño imán. Del mismo modo podemos utilizar una delgada hoja de papel blanco a

través de la cual hacemos pasar un alambre conduciendo una corriente, y vertimos cuidadosamente pequeñas limaduras de hierro sobre el papel y se observaran una disposición de círculos concéntricos alrededor del conductor tal y como se muestra en la figura No. 3. Esta manera de revelar la presencia de los efectos magnéticos, constituye una forma de caracterización gráfica del campo magnético, mediante lo que se ha dado en llamar "Las líneas de Inducción Magnética"

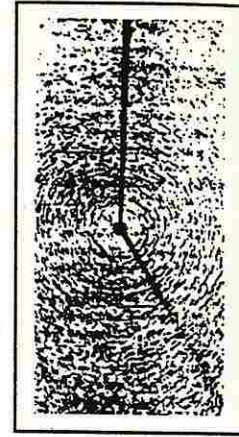


Fig. No. 3.

La magnitud y dirección del campo magnético, representado por  $B$ , la definiremos en términos de la fuerza sobre una corriente, y como una corriente es el resultado de portadores de carga en movimiento, la definición que usaremos está basada en observaciones experimentales obtenidas al analizar la fuerza experimentada por una carga aislada "q" que se mueve con una cierta velocidad a través del espacio ocupado por un campo magnético.

- 1.- La fuerza magnética  $F$  actúa siempre en ángulo recto a la dirección de  $V$ . (al proyectar la carga aislada en diferentes direcciones, hallamos que no importa cual sea la dirección de  $V$ , la fuerza magnética siempre está en ángulo recto con esa dirección).
- 2.- La magnitud de  $F$ , varía en proporción directa con la magnitud de la velocidad y la magnitud del campo magnético  $B$ , cambiando desde cero cuando  $V$  y  $B$  tienen la misma dirección hasta un valor máximo cuando la dirección de  $V$  forma un ángulo recto con la dirección de  $B$ . En ángulos intermedios la magnitud de  $F$  varía según el seno del ángulo  $\theta$  que forman la velocidad  $V$  y el campo magnético  $B$ . Conserve que existen dos condiciones para que  $F = 0$ ; cuando  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = 180^\circ$
- 3.- Hallamos también que  $F$  es proporcional a la magnitud de la carga "q" y que  $F$  invierte su dirección cuando "q" cambia de signo.

Estas observaciones experimentales se pueden resumir en la fórmula:

$$F = BqV \text{ Sen } \theta$$

Donde  $\theta$  es el ángulo mas pequeño entre  $V$  y  $B$ .

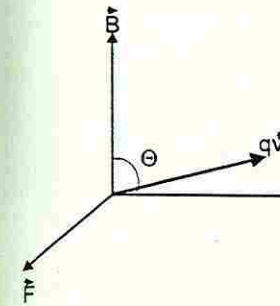
En virtud de que  $F$ ,  $V$  y  $B$  son vectores, la ecuación anterior puede ser escrita como un producto vectorial (producto cruz)

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

Entonces la dirección del vector fuerza magnética se determina por medio de la regla de la mano derecha, semejante a la que se utilizó para calcular la dirección del vector resultante de un producto cruz que se estudió en el capítulo uno del módulo VI de Física I. (nota 1 y nota 2)

Regla de la mano derecha (RMD- 1)

La dirección del vector  $F$  es aquella a lo largo de la que avanzaría un tornillo de rosca derecha si se hace girar el vector  $qV$  un ángulo menor de  $180^\circ$  para que quede sobre el vector  $B$ .



$q(+)$  La figura No. 4 ilustra la relación geométrica que existe entre los vectores  $qV$ ,  $B$  y  $F$ . Nótese que, como es siempre el caso en un producto vectorial, la fuerza  $F$  siempre es perpendicular al plano formado por los dos vectores  $B$  y  $V$ .

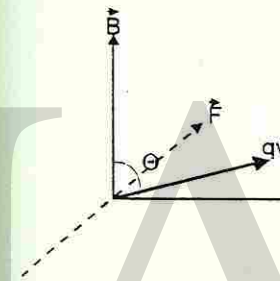


Fig. No. 4.

Podemos obtener algunas conclusiones importantes si analizamos la relación de estos tres vectores; puesto que la fuerza de origen magnético siempre es perpendicular a la dirección del movimiento de la carga "q", el trabajo efectuado por esta fuerza debe ser exactamente cero (la fuerza siempre forma un ángulo recto con el desplazamiento de la partícula y no puede realizar trabajo sobre ella.  $W = F \times d \cos 90^\circ$ ). La fuerza magnética no puede cambiar la magnitud de  $V$ ,  $q(-)$  únicamente su dirección por lo tanto siempre es una fuerza deflectora lateralmente (desviadora), por lo tanto en un campo magnético constante no se puede cambiar la energía cinética de una partícula cargada en movimiento (mas adelante se estudiarán campos magnéticos variables en el tiempo que pueden cambiar la energía cinética de una partícula). La fuerza magnética no es una fuerza central es decir no es una fuerza que actúa radialmente hacia, o alejándose de la fuente del campo de fuerza, por lo tanto, no es posible asociarle al campo magnético una función potencial escalar.

Estableceremos ahora el procedimiento para definir el campo magnético  $B$  en términos de una fuerza que actúa sobre una carga positiva "q" que se mueve con velocidad "v": primero se determina la fuerza que actúa sobre la carga cuando está en reposo (fuerza eléctrica), después se resta esa fuerza de las fuerzas que se midan posteriormente, lo cual presumiblemente nos deja sólo la fuerza de origen magnético. Se puede observar una fuerza dependiente de la velocidad; en cuyo caso hay que identificar la dirección de la velocidad para la que alcance un máximo esta fuerza ( $F_{\text{máx}}$  o  $F_1$ ). Entonces la magnitud de  $B$  está dada por:

$$B = \frac{F_{\text{máx}}}{qv}$$

y su dirección se obtiene mediante RMD-1.

La unidad de  $B$  en el S.I. es el tesla (T) haciendo el análisis dimensional en la ecuación anterior podemos ver que:

Nota 1: La relación descrita entre las magnitudes físicas, marca la necesidad de mostrar la relación geométrica entre los vectores involucrados en un sistema de coordenadas  $R^3$ .

Nota 2: Además de la necesidad de utilizar la simbología "x" (entrando al plano de la hoja y " " (saliendo del plano de la hoja)



$$1 \text{ tesla} = 1 \frac{N}{\text{coul} \cdot \frac{m}{s}} = 1 \frac{\text{newton}}{\text{ampere} \cdot \text{metro}}$$

## ESTUDIO DE LOS EFECTOS MAGNÉTICOS.

En el punto anterior, estudiamos como una partícula de masa "m" y carga "q" que viaja con una velocidad "v" a través de una región de campo magnético uniforme **B** (**B** v), experimenta una fuerza de origen magnético, cuya dirección es perpendicular al plano que forman **B** y **v**. Bajo la acción de esta fuerza, la partícula será desviada de su trayectoria rectilínea, pero cuando el vector velocidad cambie de dirección, como consecuencia de la aceleración, también lo hará la fuerza ya que ésta siempre deberá permanecer perpendicular a la dirección del vector velocidad, este tipo de relación descrita en esta situación, claramente nos recuerda una situación con la que nos familiarizamos al estudiar los contenidos del Módulo VI, cuando vimos que la fuerza necesaria para mantener un movimiento circular uniforme es de magnitud constante y perpendicular a la velocidad.

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

en nuestro caso la fuerza centrípeta es la fuerza de origen magnético que experimenta la partícula cargada.

$$F_c = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

La partícula seguirá entonces una trayectoria circular con un radio orbital que puede ser despejado de la relación antes mostrada.

$$r = \frac{mv}{Bq}$$

Ampliaremos ahora el estudio de los efectos magnéticos, analizando un conductor (alambre metálico de longitud **L** y área de sección transversal despreciable) colocado en una región de campo magnético uniforme y por el cual fluye una corriente **I**. Como una corriente es un conjunto de cargas en movimiento y como ya sabemos un campo magnético ejerce una fuerza lateral sobre una carga en movimiento, al considerar las cargas individuales que fluyen por el conductor, éstas experimentarán una fuerza debida al al campo magnético externo, pero como no pueden escapar lateralmente ya que estan confinadas a moverse dentro del alambre, es el conductor mismo el que exhibe esta fuerza ante los ojos del observador, éste fue el descubrimiento hecho por Ampère.

La expresión para la fuerza lateral total sobre un segmento del alambre de longitud **L**, puede ser derivada de la ecuación para obtener la fuerza magnética sobre cada electrón en el segmento multiplicada por "N" que representaría el número total de electrones ( $q = -e$ ) en dicho segmento.

$$F = N(F_e)$$

o bien, escrita en términos de **I** y **L**.

$$F = ILB \sin \theta \quad \text{donde } \theta \text{ es el ángulo entre } B \text{ y } L.$$

La relación puede ser escrita también en forma vectorial de la forma siguiente :

$$\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B}$$

Siendo el vector **L** paralelo al conductor y apuntando en la dirección de la corriente **I**. La dirección de la fuerza que actúa sobre el conductor se obtiene aplicando la regla de la mano derecha (RMD-1). Cuando la corriente se invierte, la desviación también se invierte (RMD), la desviación también se invierte cuando el campo **B** se invierte. Cuando por el alambre conductor no fluye corriente, no experimenta ningún efecto desviador.

## GENERACION DE CAMPOS MAGNÉTICOS.

Nos ocuparemos ahora de revisar la fuente de campos magnéticos, completemos el análisis hecho en el punto anterior sobre el campo magnético **B** debido a un alambre recto largo que conduce corriente. En la figura # se observa que las líneas de campo forman círculos concéntricos alrededor del alambre, las líneas de **B** se trazan de modo que la tangente a cualquier línea da la dirección de **B**, además las líneas están muy próximas entre sí cuando la magnitud de **B** es grande, y muy separadas cuando **B** es pequeño.

El campo magnético no señala ni hacia la fuente del campo (que es la corriente) ni alejándose de ella, ¡Sino siempre perpendicular a ella! tal y como puede determinarse observando la orientación de una brújula que se mueva lentamente alrededor del conductor (experimento de Oersted). La dirección del campo magnético puede obtenerse mediante la regla de la mano derecha #2 (RMD-2).

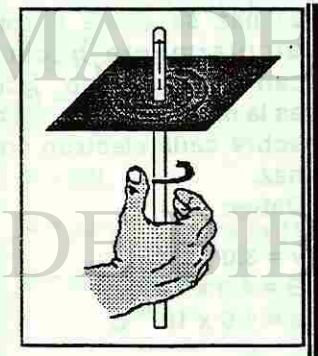


Fig. No. 5.

**RMD-2 : Si con la mano derecha se agarra el conductor, de modo que el pulgar señale en la dirección de la corriente, los dedos de la mano derecha circundan a la corriente en la dirección del campo magnético.**

Es importante señalar que el campo magnético creado por la corriente que fluye por el alambre, no puede ejercer una fuerza sobre el propio alambre, del mismo modo que el campo gravitatorio terrestre no puede ejercer una fuerza sobre la tierra misma sino solamente sobre otro cuerpo. En la figura señalada, no existe una fuerza magnética sobre el conductor porque no hay presente ningún campo magnético externo.

La magnitud del campo magnético B en un punto alejado del conductor a una distancia "r" varía directamente con la intensidad de la corriente I que fluye por el conductor e inversamente proporcional a la distancia "r". Esto se puede escribir como :

$$B = \text{constante} \times \left(\frac{I}{r}\right)$$

el valor de la constante de proporcionalidad, si el medio presente es el vacío y se utilizan unidades de S.I. se escribe generalmente como

$$\frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \times 10^{-7}$$

donde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ . se conoce como la permeabilidad del espacio vacío. Entonces la magnitud del campo magnético se escribe :

$$B = \left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right) \left(\frac{I}{r}\right)$$

Poco tiempo después de que Oersted descubriera que un conductor portador de corriente, genera un campo magnético que desviaba la aguja de una brújula magnética, Ampère propuso que un segundo conductor con corriente colocado cerca del primero experimentaría una fuerza de origen magnético.

La magnitud y dirección de la fuerza que le produce a este segundo conductor el campo externo creado por la corriente circulando en el primer alambre puede ser calculado por la expresión antes estudiada  $F_{21} = I_2 B_1 L \sin\theta$  y la RMD. Debido a la Tercera Ley de Newton, el alambre 1 debe entonces sentir una fuerza  $F_{12} = -F_{21}$ .

Este análisis lo podemos resumir en el siguiente enunciado acerca de conductores rectos y paralelos que conducen corriente :

*"Dos conductores largos, rectos y paralelos que conducen corriente en la misma dirección, se atraen entre sí, y si conducen corrientes en dirección y sentido opuesta se repelen."*

**Ejemplo 1.**  
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:

$$v = 3.0 \times 10^6 \text{ m/s}$$

$$B = 4.0 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$F = Bqv$$

$$F = 4 \times 10^{-2} \text{ T} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 3 \times 10^6 \text{ m/s}$$

$$F = 1.9 \times 10^{-14} \text{ N}$$

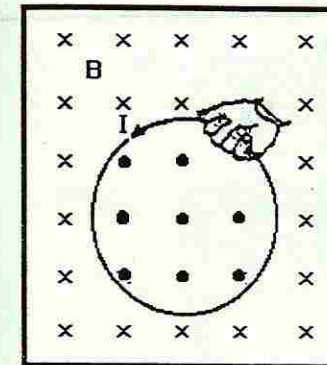


Fig. No. 6.

Esta configuración entre alambres conductores largos y paralelos se utiliza para definir el Ampère.

*Ampère : es la corriente en cada alambre que produciría una fuerza de  $2 \times 10^{-7}$  Newtons por metro de longitud cuando los alambres de sección transversal despreciable se encuentran separados en el vacío una distancia de un metro.*

En el presente capítulo se han estudiado los efectos magnéticos, como una propiedad inseparable de la corriente eléctrica. Ampère, a principios del siglo XIX reconoció que una simple espira con corriente origina un campo magnético asociado con momentos dipolares magnéticos de partículas fundamentalmente subatómicas, como electrones, protones y neutrones que se relacionan con sus momentos angulares de spin intrínsecos (visión microscópica de los efectos magnéticos). De manera análoga, Ampère razonó que los efectos magnéticos asociados a un imán permanente se origina por "anillos" de corriente muy pequeños dentro del imán.

Síntesis de la hipótesis de Ampère :

*"Concibo a los fenómenos presentados por los imanes considerándolos como si fueran ensambles de corrientes eléctricas muy pequeños alrededor de sus partículas."*

**Ejemplo 3**

Un alambre de 10 centímetros de largo se coloca perpendicularmente a un campo magnético uniforme. El acampo tiene una inducción de 0.060 teslas. La corriente en el alambre es de 4 amperes. Determina la magnitud de la fuerza.

Datos:

$$L = 1 \times 10^{-1} \text{ m}$$

$$B = 6 \times 10^{-2} \text{ T}$$

$$I = 4 \text{ A.}$$

$$F = BIL$$

$$F = (6 \times 10^{-2} \text{ T})(4 \text{ A} \times 1 \times 10^{-1} \text{ m})$$

$$F = 2.4 \times 10^{-2} \text{ N}$$

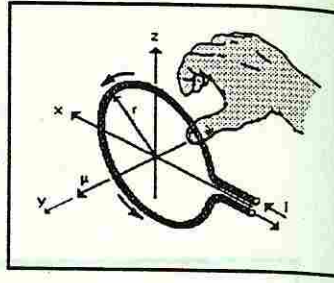
La figura # 6 muestra una sencilla espira de alambre por la que fluye una corriente I, en el sentido opuesto al movimiento de las manecillas del reloj, tal y como se indica. Si se aplica la RMD-2 para determinar la dirección del campo magnético B en la parte superior de la espira, vemos que el campo B debido a ese segmento de la espira, señala hacia afuera del papel por debajo y hacia adentro del papel por encima de ese segmento del conductor. Si repetimos la aplicación de la RMD-2 en cualquier segmento de la espira concluiremos que la corriente que fluye en la espira en contra de las manecillas del reloj produce un campo magnético que sale hacia afuera de la página en la parte interior de la espira, y hacia adentro de la página en el área externa de la espira.

Este patrón de campo descrito, es muy similar al que produce un imán de barra corto, esto significa que desde el punto de vista de los efectos magnéticos producidos sobre el ambiente externo, no es posible distinguir entre una espira pequeña y un imán pequeño. De una manera análoga sus respuestas a un campo magnético externo son también idénticas.

En particular, sabemos que pequeñas agujas imantadas experimentan un torque dentro de un campo magnético uniforme que tiende a alinearlos con las líneas del campo (experimento de Gilbert). Del mismo modo podemos esperar entonces que una espira con corriente experimente también un torque que tiende a alinearla con el campo magnético.

Resulta conveniente introducir una nueva magnitud vectorial para explicar este efecto magnético sobre la espira con corriente, el Momento Magnético " $\mu$ " cuya magnitud está dada por :  $\mu = IA$

donde A es el área de la espira (sin importar su forma) y cuya dirección es la del campo magnético debido a la espira con corriente en su centro. La espira con corriente, al colocarse en la región ocupada por un campo magnético externo, experimentará un torque que tiende a alinear a " $\mu$ " y a B (Efecto Motor).



La dirección del vector Momento Magnético se determina mediante la regla de la mano derecha # 3 (RMD-3)

**RMD-3 :** "Si la mano derecha circunda la espira o bobina de corriente, de modo que los dedos señalan en dirección de la corriente, entonces el pulgar apuntará en la dirección del vector momento magnético. (La misma dirección de B dentro de la espira)

La determinación de la magnitud del campo magnético debido a una sola espira con corriente en un punto arbitrario del espacio está fuera del alcance de la herramienta matemática de este curso, ya que requiere del uso del cálculo infinitesimal. Mediante consideraciones de simetría es posible determinar en el centro de la espira el campo mediante la siguiente expresión :

$$B = \frac{(\mu_0 I)}{2r}$$

Un dispositivo eléctrico que consiste de un alambre largo devanado en una hélice fuertemente apretada y conductor de una corriente I, llamado Solenoide suele utilizarse para crear un campo magnético uniforme que a menudo acelera a un material magnético por ejemplo en los timbres caseros, en los altavoces etc. El efecto de utilizar varias espiras como las analizadas anteriormente nos conduce a una nueva expresión para la magnitud del campo :

$$B = \mu_0 I n$$

donde n = # de espiras por unidad de longitud.

Un Toroide se puede considerar como un Solenoide doblado en forma de rosca, la expresión para la magnitud del campo de este dispositivo nos queda :

$$B = \frac{\mu_0 I N}{2 \pi r} \quad \text{donde } N = \# \text{ total de espiras.}$$

Fig. No. 7.

**Ejemplo 3.**  
Una corriente de 5 A fluye por un alambre de 1 metro de largo. El alambre está colocado perpendicularmente a un campo magnético uniforme. La fuerza sobre el alambre es de 0.2 newtons. ¿Cuál es la magnitud de la intensidad del campo magnético.

Datos:  
F = 0.2 N  
I = 5 A  
L = 1 m

$$B = \frac{F}{IL}$$

$$B = \frac{0.2 \text{ N}}{(5 \text{ A})(1 \text{ m})}$$

$$B = 0.04 \frac{\text{N}}{\text{A-m}}$$

$$B = 0.04 \text{ T}$$

## D.- INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La Revolución industrial que transformó al mundo hace más de un siglo se basó en tres adelantos científicos principales : la invención de la máquina de vapor y el desarrollo de las máquinas térmicas gracias a la Termodinámica, el descubrimiento de que las fuerzas para girar los motores podían producirse por la interacción de corrientes eléctricas con campos magnéticos y el descubrimiento de que las corrientes pueden producirse cambiando campos magnéticos. Ya se han analizado los dos primeros adelantos ; ahora investigaremos el tercero.

### D.1. FEM INDUCIDA

El descubrimiento de que las corrientes eléctricas generan campos magnéticos fue hecho por el físico danés Hans Christian Oersted en 1820. Este nuevo conocimiento de la naturaleza dio lugar a intensas investigaciones de los fenómenos relacionados. Uno de los caminos de experimentación fue el que siguieron aquellos que querían encontrar la respuesta a la pregunta : "Si las corrientes producen campos magnéticos, ¿no es posible que los campos magnéticos produzcan corrientes ?" Unos diez años más tarde, Michael Faraday (1791-1867) demostró en Inglaterra que la respuesta a esta pregunta era afirmativa ; éste hallazgo también lo realizó en forma independiente Joseph Henry (1797-1878) en Albany, Nueva York, debido a que sólo se publicó en Estados Unidos y pocas personas supieron de él, sus experimentos tuvieron poca influencia en los avances científicos de la época.

Veamos un experimento sencillo, similar a como lo hizo Faraday para demostrar que los campos magnéticos podían producir corriente.

En este experimento se usa el sencillo equipo de la figura D.1. Se observa que se trata de dos circuitos simples en serie. Uno consiste en una batería y un interruptor conectados en serie por medio de un largo alambre enrollado alrededor de una varilla de hierro dulce ; a este arreglo se le llama **bobina primaria** porque está conectado a la batería. Un segundo alambre independiente del primero, también está enrollado alrededor de la varilla. Esta bobina que está en serie con un galvanómetro, pero, que no contiene una batería en su circuito, se conoce como **bobina secundaria**. Como no hay batería en el circuito de la bobina secundaria, podría imaginarse que la corriente a través de él siempre es cero. Sin embargo, sucede algo sorprendente al abrir o cerrar el interruptor del circuito primario. En ese instante, la aguja del galvanómetro se mueve y regresa a cero. En otras palabras, durante un instante se induce una corriente en el circuito de la bobina secundaria. Es como si el circuito secundario tuviera una batería (una fuente de fem) durante el breve periodo en que tarda el interruptor en abrirse o cerrarse. Decimos que durante ese instante existe una **fem inducida** en la bobina secundaria. Otra

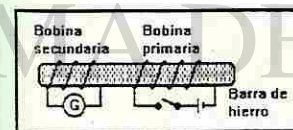


Fig No. D-1. Sólo existe una corriente inducida en la bobina secundaria cuando cambia la corriente en la bobina primaria.

característica que se puede observar, de la corriente y la fem inducidas es que: la corriente de corta duración va en una dirección cuando se cierra el interruptor y en dirección contraria cuando se abre. Esto nos dice que la dirección de la fem inducida depende de si la corriente de la bobina primaria aumenta o disminuye.

En la figura D.2 se presenta un experimento similar, que comprende un imán de barra y una bobina en serie con un galvanómetro. Cuando el imán está estacionario junto a la bobina, como en *a* y *c*, no hay corriente en la bobina. Sin embargo, al mover el imán con respecto a la bobina aparece una corriente en la bobina, como se ilustra en *b*, *d* y *e*. Vemos entonces que existe una fem inducida en la bobina sólo cuando el imán y la bobina están en movimiento relativo. *No hay fem inducida cuando las condiciones no cambian.*

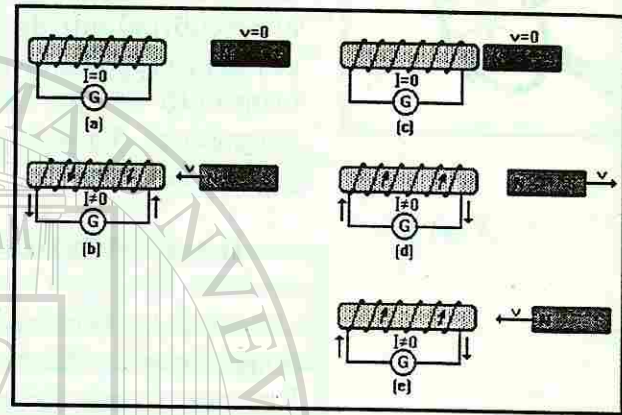


Fig D.2.- La corriente se induce en la bobina sólo cuando el imán se mueve con respecto a la bobina. La dirección de la corriente depende de la dirección del movimiento del imán y de la dirección del campo del imán.

Hay dos formas de analizar este efecto. En una se usa el hecho de que una carga que se mueve por un campo magnético experimenta una fuerza. Aunque en la figura D.2 se muestra el imán en movimiento, ocurren exactamente los mismos efectos si el imán se mantiene fijo y se mueve la bobina. Las cargas libres del alambre experimentan una fuerza, etc. ( ), porque se mueven en el campo magnético del imán. Fluyen por la acción de esta fuerza y por lo tanto originan la corriente inducida.

Este enfoque explica la relación entre la fem inducida y los fenómenos que hemos estudiado. Sin embargo, hay otro método que es más útil para la mayoría de las situaciones prácticas. Este método comprende el concepto de flujo magnético.

## D.2.- FLUJO MAGNÉTICO

Faraday explicó la fem inducida en una bobina en términos de una cantidad llamada *flujo magnético*. Para hacerlo, desarrolló una regla para elaborar una representación gráfica de las líneas de campo magnético. Si el campo magnético en una región del espacio tiene magnitud  $B$ , esta magnitud se representa gráficamente con el convenio de dibujar las líneas de campo con cierta separación según su magnitud. De esta manera, los campos más fuertes se representan con líneas más próximas y los campos más débiles se representan con líneas más separadas. Otra forma de decirlo es que la *densidad* de las líneas de campo en el dibujo es proporcional al valor de  $B$ .

La forma de medir esta densidad de líneas es construyendo una superficie imaginaria perpendicular a las líneas y luego contando el número de líneas por unidad de área que pasan por la superficie, como en la figura D.3. Podemos ver que pasan 20 líneas por el área de  $1 \text{ m}^2$ . Podemos definir que esta densidad de líneas represente la magnitud de campo que deseamos, por ejemplo,  $1 \text{ T}$ . Entonces, si en el mismo dibujo hay una región de 10 líneas por metro cuadrado, representaría un campo con la mitad de la magnitud ( $0.5 \text{ T}$ ), mientras que una región con 40 líneas por metro cuadrado representaría un campo de  $2 \text{ T}$ , etcétera. De esta manera, la interpretación gráfica de  $B$  es que  $B$  es proporcional a la densidad de las líneas de campo, que es el número de líneas de campo que pasan por una región dividido entre el área.

De esta interpretación se tiene que el número de líneas por el área  $A$  representa a  $B A$  ( $B$  perpendicular a  $A$ ). Esta cantidad se denomina *flujo magnético* por  $A$  y se designa con el símbolo  $\Phi$ :

flujo magnético a través de  $A = \Phi = B A$  (ec. D.1)

Es evidente que las unidades del flujo magnético en el Sistema Internacional son . Esta combinación de unidades recibe un nombre especial: el *weber (Wb)*. Así,

o, a la inversa,

Debido a la segunda expresión, el campo magnético  $B$  también se conoce como *densidad de flujo magnético*.

Es muy importante recordar que hemos considerado que  $B$  es perpendicular al plano del área  $A$ , como se muestra en la figura D.4a. Si rotamos  $A$  en la forma ilustrada en la figura D.4b, no pasan líneas de campo por el área y  $\Phi = 0$ . El flujo también puede ser negativo, como se muestra en la figura D.4c, donde  $n$  y  $B$  tienen sentidos opuestos.

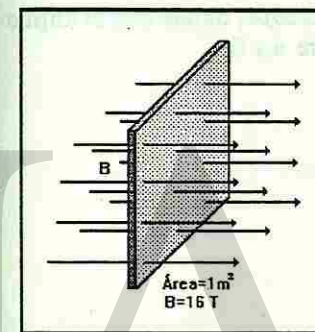


Fig D.3.- Empleando el convenio de dibujar un número de líneas magnéticas proporcional a  $B$  por unidad de área perpendicular a las líneas de campo.

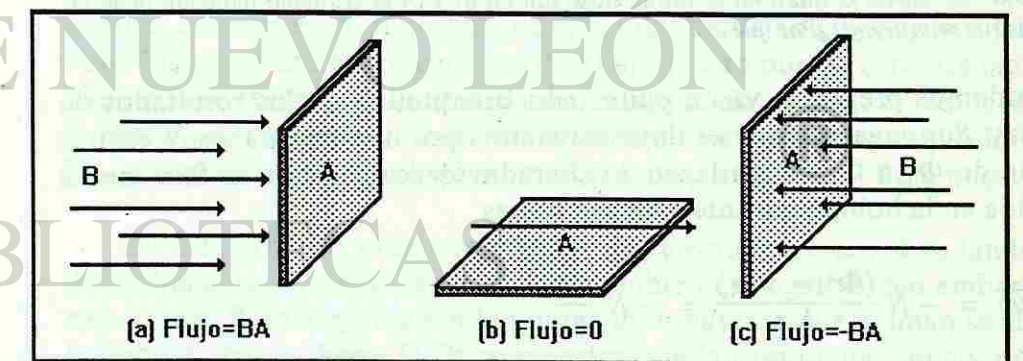


Fig D.4.- El flujo magnético por un área depende de la orientación relativa del área y las líneas de campo.

Una forma sencilla de escribir la manera en que  $F$  depende de la orientación es describiendo la dirección de la *normal*,  $n$ , del área  $A$ . En la figura D.5 se muestra que la componente de  $B$  sobre la normal es  $B_n$ . Por consiguiente, la expresión general del flujo magnético es

$$\Phi = (B \cos \theta) A = BA \cos \theta \quad (\text{ec. D.2})$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre  $B$  y  $n$ .

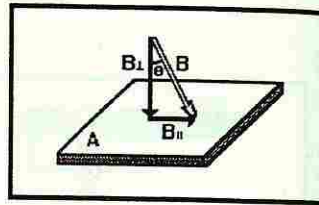


Fig D.5.- El flujo magnético  $\Phi$  por un área  $A$  es el producto de  $A$  por la componente del campo magnético  $B$  sobre la normal al área,  $n$ . Así,  $\Phi = (B \cos \theta) A$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre  $n$  y  $B$ .

### D.3.- LEY DE FARADAY Y LEY DE LENZ

El experimento que se muestra en la figura D.6 también confirma la conclusión de Faraday. Observemos que, como las líneas de campo son más densas cerca del imán, el flujo por la bobina aumenta al acercarlo. Se observa una corriente en la bobina mientras el imán se va acercando. No hay cambio en el flujo cuando el imán está inmóvil, de manera que no se induce corriente en la bobina. Al quitar el imán, como en la figura D.6c, el flujo *disminuye* y el galvanómetro muestra una corriente en sentido opuesto. Los sentidos de las dos corrientes indican que la polaridad de la fem inducida por el acercamiento del imán es opuesta a la que induce el imán que se aleja; esta situación se presenta en las figuras D.6b y D.6c.

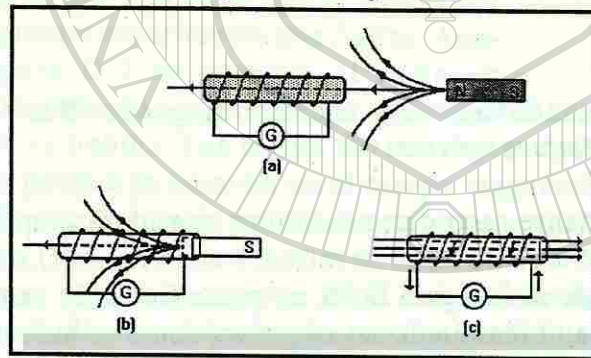


Fig D.6.- Al mover el imán en la forma ilustrada en b) y c) la corriente inducida tiene el sentido que se muestra. ¿Por qué?

Podemos presentar ya un enunciado cuantitativo de los resultados de Faraday. Supongamos que el flujo magnético por una bobina de  $N$  espiras cambia de  $\Phi_1$  a  $\Phi_2$  en un lapso  $\Delta t$ . Faraday descubrió que la fem media inducida en la bobina durante este cambio es

$$\overline{fem} = -N \frac{(\Phi_2 - \Phi_1)}{\Delta t} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Esto se conoce como *ley de la inducción magnética de Faraday*. Más adelante se explicará el significado del signo menos en la ecuación. Es uno de

los principios más importantes de la electricidad y el magnetismo y es la base de los generadores, los motores eléctricos y otros dispositivos importantes.

Como sucede con cualquier otra corriente, esta corriente inducida produce un campo magnético propio. En la figura D.7 se muestran las direcciones del campo inducido ( $B_{ind}$ ) por los dos movimientos del imán que aparece en las figuras D.6b y c. Verifica que las direcciones indicadas para  $B_{ind}$  en la figura D.7 concuerdan con la regla de la mano derecha.

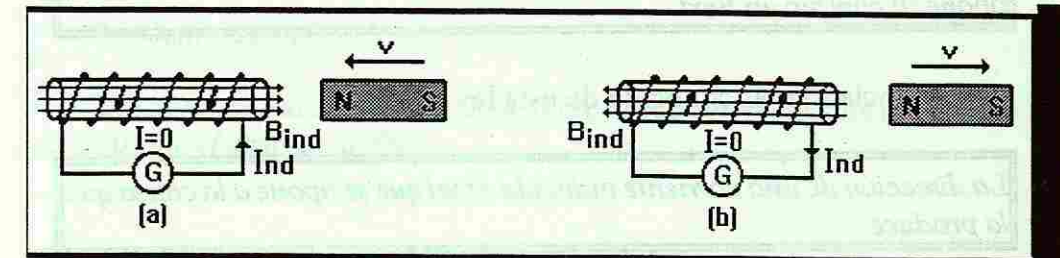


Fig D.7.- La corriente inducida crea un flujo magnético en la bobina, que tiende a oponerse al flujo producido por un campo externo cambiante (que no aparece en la figura). a) El polo norte del imán se aproxima a la bobina. b) El polo norte del imán se aleja.

Es importante tener presente que el flujo magnético  $\Phi$  puede ser positivo o negativo, dependiendo de si el ángulo  $\theta$  entre  $B$  y  $n$  está entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  entre  $90^\circ$  y  $180^\circ$ . En otras palabras, si invierte la dirección del campo magnético por un área, el signo de  $\Phi$  también se invierte. En los análisis subsecuentes diremos que la normal al plano de la bobina y el imán externo están sobre el eje  $x$ . De esta manera podemos decir que el flujo es positivo cuando el campo magnético tiene una componente en la dirección  $+x$  y negativo cuando tiene una componente en la dirección  $-x$ .

En las situaciones presentadas en las figuras D.6 y D.7, hay *dos* fuentes de campo magnético y por lo tanto dos fuentes de flujo magnético en la bobina. La fuente del flujo  $\Phi_{ext}$  es el campo del imán ( $B_{ext}$ ) y la fuente del flujo  $\Phi_{ind}$  es el campo magnético ( $B_{ind}$ ) producido por la corriente inducida. Notemos en la figura D.6b que el campo  $B_{ext}$  se dirige hacia la izquierda, por lo cual  $F_{ind}$  es negativo. Conforme se aproxima el imán, pasan más líneas de  $B_{ext}$  por el plano de la bobina y de esta manera aumenta el flujo negativo.

En la figura D.7c, el campo magnético externo que crea a  $\Phi_{ext}$  también se dirige hacia la izquierda, así que  $\Phi_{ext}$  también es negativo. Sin embargo, en este caso el flujo negativo por la bobina *disminuye*, ya que el imán se aleja de la bobina. En la figura D.7b se muestra que el campo magnético inducido  $B_{ind}$  que produce la corriente inducida se dirige ahora hacia la izquierda. Por consiguiente, el flujo  $\Phi_{ind}$  que crea es negativo. Este flujo  $\Phi_{ind}$  negativo reemplaza a parte del flujo  $F_{ext}$  que disminuye por el alejamiento del imán. Una vez más, *el flujo inducido se opone al cambio en el flujo externo*.

El aspecto común de estos dos casos es que al inducir una corriente en una dirección se crea un flujo inducido que se opone al cambio en el flujo externo que impone  $B_{ext}$ . Es decir, el *flujo inducido trata de mantener la condición de flujo original*. Esta observación es un principio general conocido como *ley de Lenz* :

Un cambio en el flujo magnético externo  $\Phi_{ext}$  por una bobina induce una fem en la bobina. La dirección de la corriente producida por esta fem es tal que el campo magnético que crea,  $B_{ind}$ , produce un flujo  $\Phi_{ind}$  que se opone al cambio en  $F_{ext}$ .

Un enunciado más conocido de esta ley es:

La dirección de una corriente inducida es tal que se opone a la causa que la produce.

El signo menos en la ecuación D.3 indica la polaridad de la fem inducida, que se encuentra si se considera la corriente inducida y su efecto, de acuerdo con la ley de Lenz.

La aplicación de la ley de Lenz para determinar la dirección de una corriente inducida es más sencilla si se recuerda el procedimiento siguiente :

- 1.- Determinar la dirección del campo magnético externo que pasa por la bobina. Una vez que se conozca la dirección de  $B_{ext}$ , se sabrá cuál es el signo de  $\Phi_{ext}$ . Si  $B_{ext}$  tiene componente sobre el eje x positivo,  $F_{ext}$  será positivo ; si  $B_{ext}$  tiene componente sobre el eje x negativo,  $F_{ext}$  será negativo.
- 2.- Determinar si  $B_{ext}$  aumenta o disminuye.
- 3.- Determinar el signo que debe tener  $\Phi_{ind}$  para oponerse al cambio en  $\Phi_{ext}$  que ocasiona el cambio en  $B_{ext}$ . Recordemos que el flujo no necesariamente se opone al flujo externo, pero siempre se opone a los cambios en el flujo.
- 4.- Determinar la dirección que debe tener  $B_{ind}$  para producir un flujo  $\Phi_{ind}$  con el signo determinado en el paso 3.
- 5.- Determinar con la regla de la mano derecha la dirección que debe tener la corriente inducida para crear la dirección de  $B_{ind}$  establecida en el paso 4.

Hasta ahora se han considerado cambios de flujo producidos por cambios en el campo magnético que pasa por una bobina. Sin embargo, recordemos que el flujo también depende del área de la bobina y de su orientación con respecto al campo. Por lo tanto, el flujo por una bobina puede cambiar en cualquiera de las tres formas :

- 1.- Cambios en  $B$ .
- 2.- Cambios en el área  $A$ .
- 3.- Cambios en  $\theta$ .

Las leyes de Faraday y Lenz han demostrado ser válidas *sin importar cómo se ocasione el cambio de flujo*.

#### D.4.- INDUCCIÓN MUTUA

La ley de Faraday de la fem inducida en una bobina se aplica a cualquier método de cambio del flujo en la bobina. Supongamos que tenemos dos bobinas lado a lado, como en la figura D.8. Al abrir el interruptor, las dos bobinas tienen flujo magnético de cero ; al cerrar el interruptor repentinamente, la bobina primaria actuará como electroimán y generará un flujo en la región cercana. Una parte de este flujo pasará por la bobina secundaria y por lo tanto el flujo en la bobina secundaria cambiará al cerrar repentinamente el interruptor. De acuerdo con la ley de Faraday, se generará una fem inducida en la bobina secundaria mientras la corriente en la bobina primaria sube de cero a su valor final. Debes demostrar que la dirección de la corriente inducida que circula por la resistencia de la figura D.8 irá de b a a al cerrar el interruptor y en sentido opuesto al abrirlo.

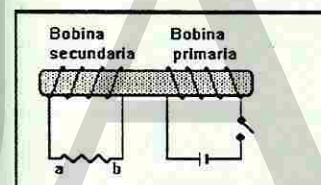


Fig D.8.- ¿Porqué la corriente va de a a b en la bobina secundaria en el instante en que se abre el interruptor S?

La magnitud de la fem inducida en la bobina secundaria depende de muchos factores geométricos, entre los cuales están el número de vueltas o espiras de alambre en cada bobina, la proximidad de las bobinas, su orientación relativa y su área transversal. Además, el flujo en la bobina secundaria será proporcional a la corriente eléctrica en la bobina primaria, de manera que la fem inducida en la bobina secundaria será proporcional a la rapidez de cambio de la corriente eléctrica en la bobina primaria,  $DI_p/Dt$ . Con base en lo anterior, se escribe la siguiente ecuación de la fem inducida en la bobina secundaria :

$$fem = -M \frac{\Delta I_p}{\Delta t} \quad (\text{ec. D.4})$$

donde la constante de proporcionalidad  $M$  considera los efectos de la geometría de las dos bobinas.  $M$  se conoce como *inductancia mutua* de las

dos bobinas. Si la fem está en volts,  $I$  en amperes y  $t$  en segundos, la unidad de inductancia  $M$  se define como el henry (H) o  $\frac{V \cdot s}{A}$

Por último, una forma importante de aumentar la inductancia mutua es enlazando las dos bobinas a través de un núcleo de material ferromagnético como el hierro. Por el gran valor de permeabilidad magnética relativa, el campo producido por una corriente en la bobina primaria aumenta mucho con respecto a lo que sería sin el núcleo de hierro. A su vez, esto aumenta el flujomagnético que enlaza a las dos bobinas con cualquier corriente que exista en la primaria. Al variar la corriente en la bobina primaria, el flujo cambia y la fem inducida en la bobina secundaria es proporcionalmente mayor que lo que sería sin el núcleo. Esto da como resultado un gran valor de inductancia mutua, como puede verse en la definición de  $M$  de la ecuación D.4.

### D.5.- AUTOINDUCTANCIA

La ley de Faraday dice que cualquier cambio en el flujo magnético por una bobina induce una fem en la bobina. Una bobina aislada que transporta corriente crea un campo magnético cuyo flujo pasa por el plano de la bobina. De esto se desprende que al variar la corriente en la bobina, cambia el flujo que pasa por ella. Por lo tanto, en cualquier instante en que cambia la corriente en una bobina, se *autoinduce* una fem en la bobina durante ese cambio.

Supongamos que la corriente ilustrada en la figura D.9 cambia de cero a un valor finito cuando se cierra el interruptor. El aumento de corriente genera un campo magnético creciente que se dirige hacia la izquierda por la bobina. Según la ley de Faraday, se induce una fem en la bobina que intenta producir un campo opuesto, hacia la derecha por la bobina. Por tanto, la fem inducida debe oponerse a la fem de la batería. Sin embargo, si de repente se abre el interruptor, la fem inducida ayudará a la batería, en lugar de oponerse a ella. Debes ser capaz de demostrarlo.

La rapidez de cambio del flujo magnético en la bobina será proporcional a la rapidez de cambio de la corriente eléctrica en la bobina. Si  $DI/Dt$  es la rapidez de cambio de la corriente eléctrica por la bobina, se puede escribir la siguiente ecuación para la fem media inducida:

$$\overline{fem} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (\text{ec. D.5})$$

La constante de proporcionalidad  $L$  se denomina *autoinductancia* de la bobina. Depende de la geometría de la bobina y del material del núcleo alrededor del cual se enrolla la bobina.  $L$  tiene las mismas unidades que la inductancia mutua: henrys.

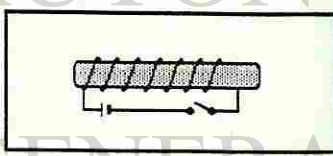


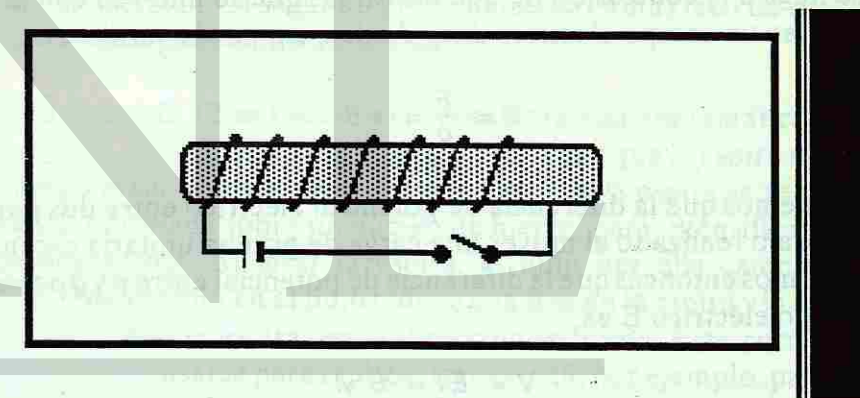
Fig D.9.- Al cerrar por primera vez el interruptor, la bobina inducirá una fem en sí misma. Esta fem, ¿será a favor o en contra de la batería?

Si la bobina está alrededor de un núcleo de hierro, el flujo que pasa por ella es mucho mayor que si estuviera presente un material no ferromagnético. Por tanto, si se desea una autoinductancia muy grande, se deberá enrollar la bobina sobre un núcleo de hierro. Estos conceptos son muy importantes en los circuitos de corriente alterna (ca), donde la corriente, y por consiguiente el flujo, cambian continuamente.

### D.6.- FEM DE MOVIMIENTO O FEM CINÉTICA

Una fem puede inducirse de varias maneras. Hasta ahora nos hemos centrado en los cambios de flujo en bobinas estacionarias y la fem inducida correspondiente. Sin embargo, en ocasiones la fem se induce como resultado del movimiento de un alambre por el campo magnético. En estos casos es más conveniente obtener un resultado que no se base de manera directa en el concepto de cambio de flujo en una espira.

Analicemos el sencillo experimento que se muestra en la figura D.10. Una varilla de longitud  $l$  rueda con velocidad  $v$  sobre los alambres paralelos que forman una espira en forma de U por  $m$ ,  $r$ ,  $s$ , y  $n$ .



FigD.10.- Cuando la varilla se mueve hacia la derecha, el área encerrada por el circuito  $pqrsp$  aumenta y crece el flujo magnético por el circuito. De acuerdo con la ley de Lenz, esto ocasiona la inducción de una fem en el circuito.

Observemos que la varilla y los alambres forman un circuito ( $pqrsp$ ) a la izquierda de la varilla. cuando ésta se mueve hacia la derecha, aumenta el área de este circuito.

Supongamos que en esta región existe un campo magnético  $B$  dirigido hacia afuera de la página. Cuando la varilla avanza, el flujo por el área del circuito aumenta porque el área crece. Por lo tanto, se induce una fem en el circuito. Para calcular esta fem observemos que en el tiempo  $\Delta t$  la varilla rueda una distancia  $v\Delta t$ . Como resultado, el área del circuito aumenta en una cantidad  $\Delta A = l(v\Delta t)$ , que es el área a la derecha de la varilla en la figura D.10. El cambio en el flujo que acompaña a este movimiento es

$$\Delta \Phi = B \Delta A = B l v \Delta t$$

De acuerdo con la ley de Faraday, la magnitud de la fem inducida en el circuito es

$$fem\ inducida = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Hay otra forma de analizar la situación. Consideremos una carga positiva  $q$  en la varilla móvil, como se muestra en la figura D.11. Esta carga, por su movimiento con velocidad  $v$  por el campo  $B$ , experimenta una fuerza. En este caso, el campo es perpendicular a la velocidad de la carga, así que. Por lo anterior, llegamos a la conclusión de que

$$F = \text{fuerza sobre } q = qvB$$

¿Hacia dónde se dirige la fuerza sobre  $q$ ?

A partir de la definición del campo eléctrico como fuerza por unidad de carga, se llega a la conclusión de que las cargas que se mueven con la varilla experimentan un campo eléctrico dirigido de  $q$  a  $p$  por la varilla. Así,

$$E = \frac{F}{q} = vB$$

Recordemos que la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos es igual al trabajo realizado al mover una carga de prueba unitaria de un punto a otro. Sabemos entonces que la diferencia de potencial entre  $p$  y  $q$  ocasionada por el campo eléctrico  $E$  es

$$V = El = Bvl$$

Observemos que esto es lo mismo que la fem inducida en el circuito que se calculó con la ley de Faraday. Asimismo, el campo eléctrico inducido por el movimiento de la carga produce una corriente en el sentido de las manecillas del reloj en el circuito, en el mismo sentido que el predicho por la ley de Faraday.

Se pueden resumir estos resultados como sigue :

Un alambre (o una varilla) de longitud  $l$  que se mueve con velocidad perpendicular a un campo magnético  $B$  y a su longitud tiene una fem inducida a lo largo del alambre dada por :  $fem\ inducida = Bvl$  (ec. D.6)

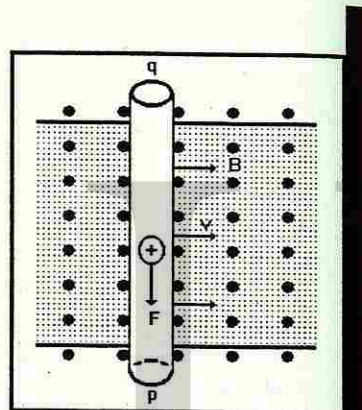


Fig. D.11.- Fuerza sobre una carga en una varilla conductora que se mueve en forma transversal a un campo magnético.

Esto se conoce como *fem cinética*. observemos que no se requiere una espira ni un circuito completo para que se induzca la fem entre los extremos de la varilla. En el caso más general en el que  $B$ ,  $v$  y el alambre no son mutuamente perpendiculares, se deberá usar las componentes de  $B$  y  $v$  que sean perpendiculares entre sí y con el alambre. El enunciado anterior puede expresarse también de la siguiente manera :

Un alambre en movimiento se induce él mismo una fem proporcional a la rapidez con la que el alambre corta las líneas del campo magnético.

En muchas ocasiones es conveniente usar el concepto de fem cinética.

## D.7.- GENERADORES DE CORRIENTE ALTERNA(CA)

Un generador es un dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Esto lo logra cambiando el flujo en una bobina e induciendo así una fem entre las dos terminales de la bobina. En teoría, el flujo podría cambiarse moviendo un imán con respecto a la bobina o moviendo la bobina con respecto al imán. El segundo procedimiento es más fácil de realizar en la práctica y el que generalmente se usa.

En la figura D.12 se muestra la representación esquemática de un generador simple. Una fuente de energía externa hace que la espira metálica gire en el campo magnético del imán. (En la práctica, la espira se reemplaza con una bobina enrollada sobre un núcleo de hierro, para intensificar los efectos que analizaremos). Al girar la espira, el flujo por ella cambia en forma continua. Este cambio en el flujo induce una fem en la espira y la fem produce una corriente por la espira, en la dirección indicada. Esta corriente puede usarse para realizar trabajo útil, por ejemplo, para encender un foco como en la figura.

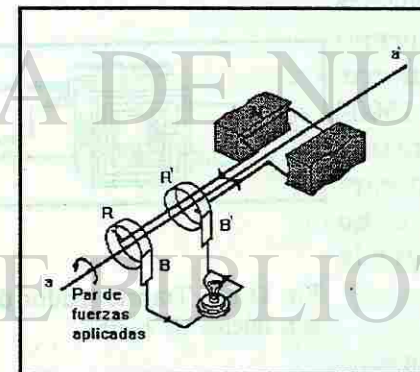


Fig D.12.- Se produce una fem alternante entre las terminales B y B' cuando la espira gira en un campo magnético externo.

En un generador bien diseñado, la fuente externa que hace girar la bobina realiza un trabajo mínimo en contra de la fricción. Sin embargo, debe efectuar trabajo, ya que el generador produce corriente que puede realizar un trabajo. Para ver como ocurre este intercambio del trabajo de entrada y el trabajo de salida, recordemos lo que le sucede al alambre con corriente de la bobina. Ya que el alambre pasa a través de un campo magnético, la corriente experimenta una fuerza debido a dicho campo. Como en la sección anterior, esta fuerza tiene una dirección que se opone a la rotación de la bobina ; cuanto mayor sea la corriente, mayor será la fuerza opositora. Vemos entonces que la fuente de energía externa debe efectuar trabajo para girar la bobina y cuanta más corriente se extraiga del generador para realizar



un trabajo útil, más trabajo debe efectuar la fuente de energía externa para hacer girar la bobina. De esta manera, la fuente de energía que alimenta al generador suministra la energía que usa la corriente del generador para realizar trabajo útil. Un motor diesel o una cascada son ejemplos de fuentes externas de energía. En cursos más avanzados se ven más detalladamente todas las características y el funcionamiento de los generadores.

## D.8.- MOTORES ELÉCTRICOS

Un motor eléctrico es un dispositivo que convierte energía eléctrica en energía mecánica. en la figura D.13 se presenta el diagrama esquemático de un motor sencillo. Una fuente de fem (una batería en este caso) envía una corriente por la espira de alambre, una parte de la cual está en el campo magnético creado por un imán permanente. Este campo magnético externo hace que la espira experimente un momento de torsión que hace girar la espira sobre su eje. De esta manera, la energía suministrada por la batería a la espira hace que ésta gire y lleve a cabo un trabajo externo por medio de una polea en su eje. Cuanto más trabajo realice el motor, más difícil es girarlo y por ende la batería debe suministrar mayor energía. En cursos más avanzados se ven más detalladamente todas las características y el funcionamiento de los motores.

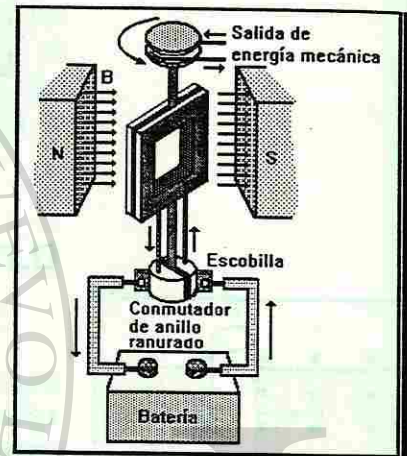


Fig D.13.- Motor sencillo de cc. Con el anillo colector en la posición ilustrada, ¿en qué dirección debe girar el motor ?

## D.9.- TRANSFORMADORES

Una de las aplicaciones más importantes de la inducción magnética se presenta en el transformador, un dispositivo que cambia (transforma) un voltaje en *ca* a otro voltaje en *ca*. Por ejemplo, en un televisor típico, un transformador cambia el voltaje en *ca* de entrada, de 120 V, a los 15000 V necesarios para operar el cinescopio. Otro ejemplo es un timbre común, que requiere un voltaje de unos 9 V; se usa un transformador para obtener este voltaje de los 120 V del voltaje doméstico. Los transformadores no pueden usarse para cambiar voltajes en *cc* porque su operación depende del cambio constante de un flujo.

En la figura D.14 se presenta un transformador típico. El transformador consiste en un núcleo de hierro sobre el cual se enrollan dos bobinas, la primaria (con  $N_p$  espiras) y la secundaria (con  $N_s$  espiras). La bobina primaria se conecta a la fuente de potencia de *ca* y la corriente alterna en esta bobina establece un campo magnético cambiante en el núcleo de hierro. Como las líneas de flujo tienden a seguir el hierro, forman un círculo por la

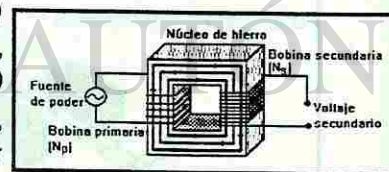


Fig D.14.- Transformador de subida con núcleo de hierro.

bobina secundaria en la forma indicada. De esta manera, el flujo  $F$  en las bobinas primaria y secundaria es el mismo.

El flujo cambiante en la bobina secundaria origina una fem inducida en la misma bobina :

$$\text{fem de la bobina secundaria} = -N_s \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

la resistencia de las bobinas es insignificante en la mayoría de los transformadores, de manera que el principal factor limitante de la corriente es la fuerza contraelectromotriz que la bobina primaria induce en sí misma. En otras palabras, la fem inducida de la bobina primaria es igual al voltaje de la fuente de potencia. Por tanto, se puede escribir

$$\text{fem de la bobina primaria} = -N_p \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

donde  $\Phi$  es el mismo flujo que pasa por la bobina secundaria.

$$\frac{\text{fem de la bobina secundaria}}{\text{fem de la bobina primaria}} = \frac{N_s}{N_p}$$

Obteniendo el cociente entre estas dos fems inducidas, se tiene

Ésta es la *ecuación del transformador*, que indica la relación entre la fem de la bobina secundaria y la fem de la bobina primaria. La relación entre las dos es la misma que existe entre el número de espiras en las bobinas. Un transformador que aumenta la fem de entrada ( $N_s > N_p$ ) se denomina *transformador elevador* y uno que la reduce ( $N_p > N_s$ ) se llama *transformador reductor*. Debemos tener cuidado en notar que los transformadores usan voltajes en *ca*, no *cc*.

Si el circuito secundario no está cerrado, la corriente en él debe ser cero. por consiguiente, no hay pérdida de potencia en la bobina secundaria cuando no se usa. Este hecho permite que la compañía de energía eléctrica mantenga transformadores en las líneas que cruzan la ciudad aunque nadie use la electricidad que proveen. Los transformadores en sí consumen muy poca energía.

Sin embargo, si se extrae corriente de la bobina secundaria, por ejemplo, para operar un calentador eléctrico, el calentador consume energía. Esta energía debe alimentarse a la bobina primaria del transformador para que pueda suministrarse a la bobina secundaria. En estas condiciones, la pérdida de potencia en la bobina secundaria hace que la primaria actúe como si tuviera una resistencia.

Una de las aplicaciones más importantes de los transformadores tiene que ver con la transmisión de potencia. Varias compañías de energía eléctrica suministran la potencia eléctrica a ciudades que están a 100 km o más de los generadores, algo que representa un problema. Supongamos que cada habitante de una ciudad de 100000 habitantes usa 150 W de potencia, el equivalente a uno o dos focos encendidos por persona. La potencia que se consume es  $(150)(100000)W$  y a un voltaje de 120 V (el voltaje doméstico usual) se tiene

$$\begin{aligned} P_{\text{tot}} &= VI \\ (159 \text{ W})(100,000) &= (120 \text{ V})(I) \\ I &= 125,000 \text{ A} \end{aligned}$$

Un alambre ordinario de uso doméstico sólo puede transportar de manera segura unos 20 A sin sobrecalentarse, de manera que la compañía de energía eléctrica necesitaría unos 6500 de estos alambres para transmitir la energía a la ciudad con este nivel de corriente. Aunque no es imposible, el simple costo del cobre sería tremendo. Las compañías de energía eléctrica superan este problema al notar que la cantidad importante para determinar la potencia es  $VI$ , no sólo  $I$ . En el ejemplo anterior, si  $V$  es 100000 V, se tendría

$$\begin{aligned} (150 \text{ W})(1000,000) &= (100,000 \text{ V})(I) \\ I &= 150 \text{ A} \end{aligned}$$

Como se puede ver, la corriente requerida es mucho menor en este caso. La transmisión de alto voltaje, baja corriente, también tiene otra consecuencia importante: las pérdidas por calentamiento en los alambres de transmisión se reducen notablemente. Recordemos que estas pérdidas de potencia dependen del *cuadrado* de la corriente ( $I^2R$ ), por lo que la reducción de la corriente en un factor de 1000 reduce la pérdida en la transmisión en un factor aproximado de ¡un millón! Es por esto que las compañías de energía eléctrica usan líneas de alto voltaje, (también conocidas como líneas de alta tensión) para transmitir potencia a grandes distancias. En algunos casos, el voltaje de transmisión es superior a 500000 V.

Es obvio que las compañías no se atreverían a alambrear estos voltajes tan elevados directamente a una casa, ya que el peligro de electrocución o incendio sería enorme. En lugar de ello, usan transformadores reductores en las subestaciones de distribución y otros más en los postes para convertir los altos voltajes a unos 120 V.

Algunas casas también tienen líneas de 240 V porque algunos aparatos eléctricos de gran tamaño (acondicionadores de aire, secadoras, estufas) operan con 240 V en lugar de 120 V. Esto se debe en esencia a la misma razón por la cual la compañía de energía eléctrica usa altos voltajes. ¿Porqué estos aparatos de elevado consumo de potencia operan de manera más rentable con 240 V que con 120 V?

## 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 (fig. No. D.14). 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 produce un campo magnético en el espacio (Fig. No. D.14b). Por ejemplo, un electrón se pone en movimiento, el campo eléctrico varía. el campo eléctrico variable genera, entonces, un campo magnético en el espacio.

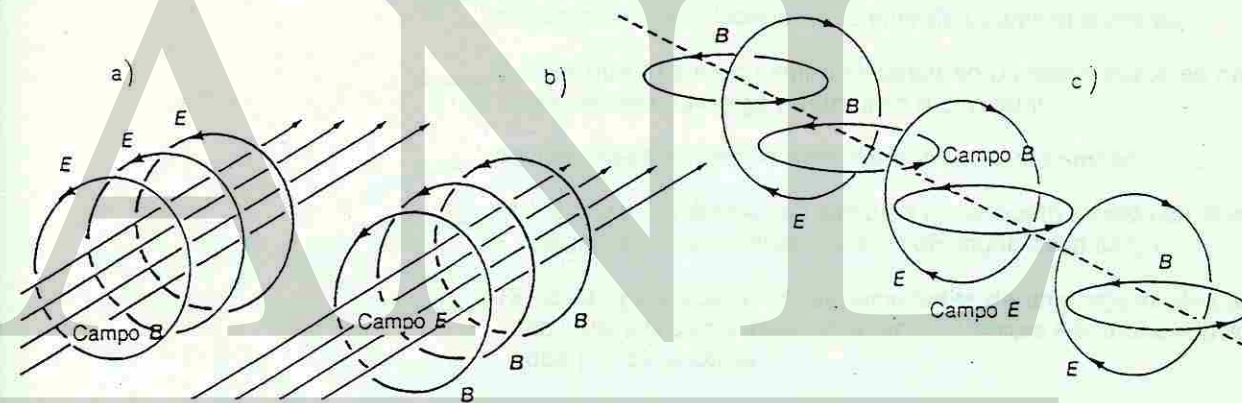


Fig D.14. Representación de un campo eléctrico inducido, b) Un campo magnético y c) ambos campos.

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 No. D.14c. 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 (Fig. No. D.15). 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.

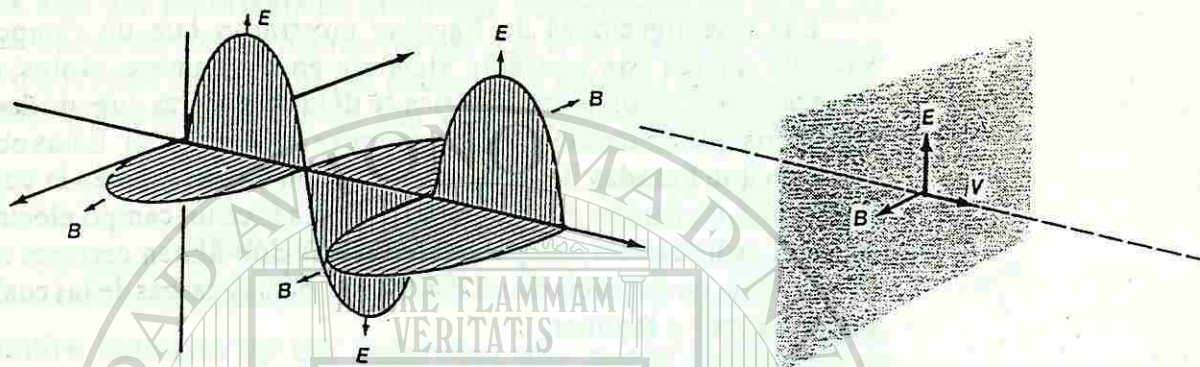


Fig D.15. Una vista de unas porciones de los campos en un instante en el tiempo.

## AUTOEVALUACIÓN

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 pone 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.

la luz no es un fenómeno especial, sino un tipo de onda electromagnética, generada por campos eléctricos y magnéticos.

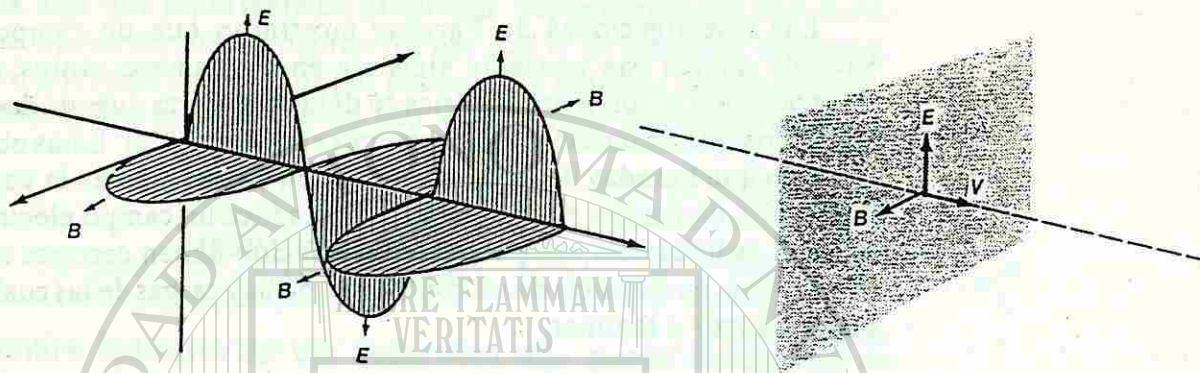


Fig D.15. Una vista de unas porciones de los campos en un instante en el tiempo.

## AUTOEVALUACIÓN

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 pone 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 paréntesis 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.

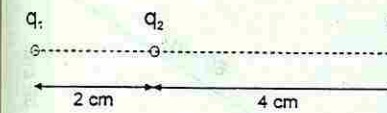
- ( ) 3. La magnitud del campo eléctrico en un punto del espacio depende de
- a) El signo de la carga que se considere en el punto.  
b) Solamente de la magnitud de la carga que se considere en el punto.  
c) Tanto de la magnitud de la fuerza eléctrica como de la magnitud de la carga que se considere en el punto.  
d) Solamente de la magnitud de la fuerza eléctrica.
- ( ) 4. La ebonita atrae 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
- a) Ohm                                  b) Ohm-m  
c) Ohm/m.                              d) Volts
- ( ) 18. Tres resistencias, de 8 ohm, 6 ohm y otra de 24 ohm se conectan en paralelo. ¿Cuál es la resistencia equivalente?
- a) 1 ohm                                  b) 3 ohm  
c) 6 ohm                                  d) 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?
- a) 12 ohm                                  b) 300 ohm  
c) 6 ohm                                  d) 30 ohm.
- ( ) 20. Cuando una partícula cargada, se encuentra en reposo, dentro de un campo magnético
- a) No se ejerce ninguna fuerza sobre ella  
b) Se ejerce una fuerza eléctrica sobre ella  
c) Se ejerce una fuerza magnética sobre ella  
d) Se ejerce una fuerza electromagnética sobre ella.
- ( ) 21. Una tesla equivale a
- a) 1N/A-m                                  b) 1N/C-m  
c) 1C/A-m                                  d) 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?
- a)  $1.6 \times 10^{-19}$  N                                  b)  $1.6 \times 10^{-20}$  N  
c)  $1.6 \times 10^{-18}$  N                                  d)  $1.6 \times 10^{-17}$  N
- ( ) 23. El campo magnético producido por un electro imán depende
- a) Solamente de la corriente a través de la bobina  
b) Solamente del número de espiras en la bobina  
c) Del material magnético del núcleo  
d) 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 sí
- a) Cuando las corrientes en ellos fluyen en la misma dirección  
b) Cuando las corrientes en ellos fluyen en direcciones opuestas  
c) Cuando son de materiales diferentes  
d) Cuando son del mismo material

## PROBLEMAS PROPUESTOS

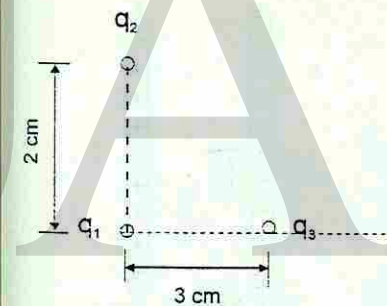
1.-Calcular la fuerza eléctrica entre dos cargas cuyos valores son:  $q_1 = 3 \mu\text{C}$ ,  $q_2 = -5 \mu\text{C}$  al estar separadas en el vacío por una distancia de 15 centímetros. Determinar si la fuerza es de atracción o de repulsión.



2.- 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:

a) La fuerza que ejerce la carga  $q_1$  sobre la carga  $q_2$   
b) La fuerza que ejerce la carga  $q_2$  sobre la carga  $q_1$   
c) ¿Cómo son estas fuerzas?

Problema No. 5.



3.- 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?

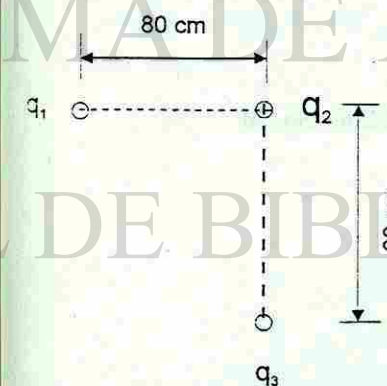
4.-Una carga  $q_1 = 6 \mu\text{C}$  se encuentra a una distancia de 12 centímetros de una carga  $q_3 = 9 \mu\text{C}$ . Calcular la magnitud y dirección de la fuerza resultante que actúa sobre una carga  $q_2 = 4 \mu\text{C}$ , colocada en el punto medio entre las dos cargas.

5.- 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:

a).- La magnitud y la dirección de la fuerza resultante que actúa sobre la carga  $q_2$ .  
b).- La magnitud y la dirección de la fuerza resultante sobre la carga  $q_3$ .

6.- 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  $q_1$ .

Problema No. 6



7.- Calcular la fuerza que actúa sobre la carga  $q_2$  en la siguiente figura. En donde

$q_1 = 10 \mu\text{C}$   
 $q_2 = 8 \mu\text{C}$   
 $q_3 = 20 \mu\text{C}$

8.- De la figura anterior, calcular la fuerza resultante sobre la carga  $q_3$ .

9.- Una carga de prueba de  $5 \times 10^{-4}$  C se coloca en un campo eléctrico que ejerce una fuerza de  $2.5 \times 10^{-4}$  N sobre ella. ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico en el lugar en que se encuentra la carga de prueba?

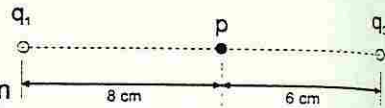
10.-La intensidad del campo eléctrico producido por una carga de 3 C en un punto determinado es de  $6 \times 10^6$  N/C. ¿A que distancia del punto considerado se encuentra la carga?

Problema No. 7.

11.- Determinar la magnitud del campo eléctrico en el punto medio entre dos cargas puntuales e iguales a  $7 \mu\text{C}$  cada una, separadas 16 centímetros.

12.- Determinar la magnitud y la dirección del campo eléctrico en el punto (p) que se indica en la siguiente figura. En donde

$q_1 = 8.2 \times 10^{-6} \text{ C}$   
 $q_2 = -6.4 \times 10^{-6} \text{ C}$



Problema No. 12.

13.- De la gráfica anterior, ¿Cuál será la magnitud del campo eléctrico resultante en un punto colocado a 4 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.

Problema No. 14.

15.- Dos placas paralelas están separadas una distancia de 0.50 metros. La intensidad del campo eléctrico entre las placas es de  $6 \times 10^3 \text{ N/C}$ .

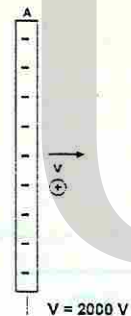
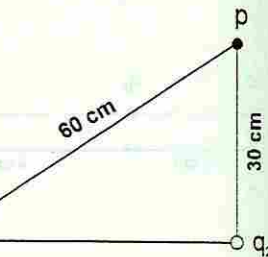
- a) ¿Cuál es la diferencia de potencial entre las placas?
- b) ¿Cuánto trabajo se requiere para mover un electrón de una placa hasta la otra?

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 9V? Si se suelta el protón al llegar a la placa positiva, ¿con qué velocidad regresa a la placa negativa?

Problema No. 14.

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 V, ¿Con qué rapidez llegará a la placa B? Si la separación entre las placas es de 5cm, ¿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.

Problema No. 14.



Problema No. 17.

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 metros de largo y 1.0 milímetros de diámetro de sección transversal?

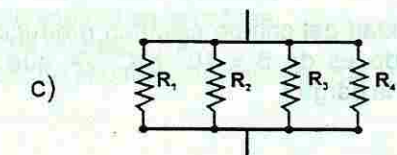
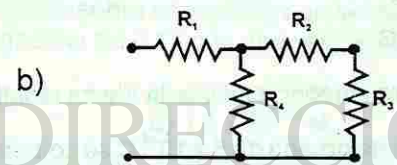
19.- Un alambre de hierro cuya resistividad es de  $10 \times 10^{-8} \text{ -m}$ , tiene una longitud de 4m. ¿Cuál es su resistencia si su sección transversal es un círculo de radio igual a 4 milímetros?

20.- Encuentra la resistencia equivalente ( $R_e$ ) para los siguientes casos:

- Donde:
- $R_1 = 8 \Omega$
  - $R_2 = 10 \Omega$
  - $R_3 = 5 \Omega$
  - $R_4 = 20 \Omega$



Problema No. 20.

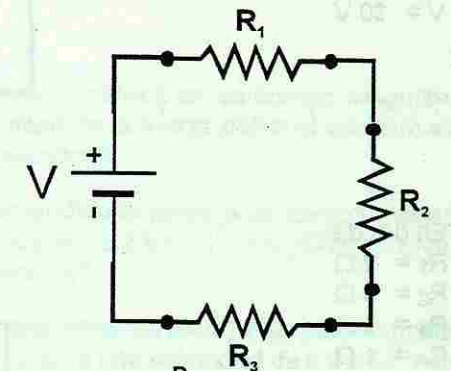


21.- Para cada uno de los siguientes circuitos, calcular:

- 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.

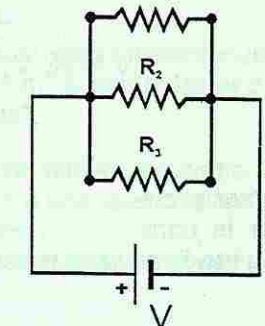
1º) En donde:

$R_1 = 8 \Omega$   
 $R_2 = 12 \Omega$   
 $R_3 = 6 \Omega$   
 $V = 90 \text{ V}$



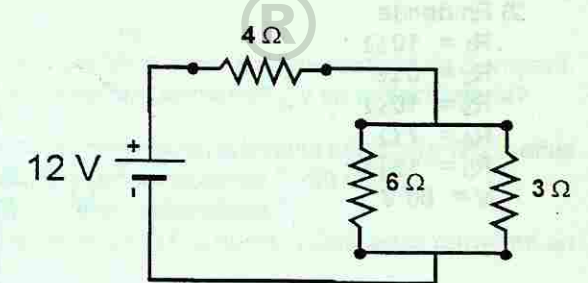
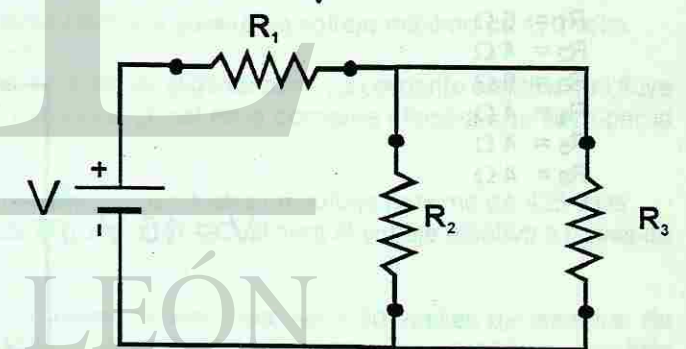
2º) En

donde  
 $R_1 = 10 \Omega$   
 $R_2 = 12 \Omega$   
 $R_3 = 16 \Omega$   
 $V = 60 \text{ V}$

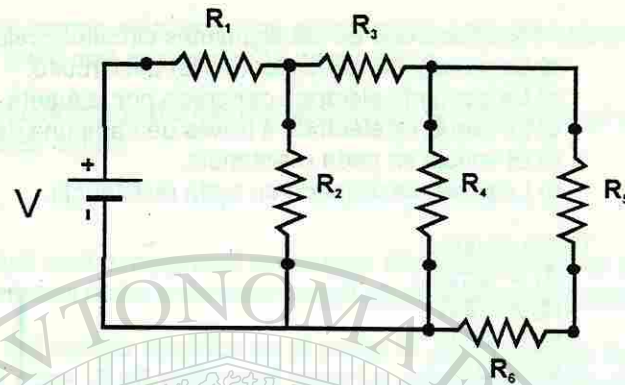


3º) En donde

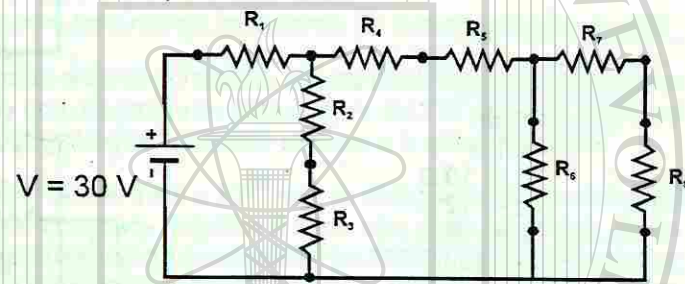
$R_1 = 5 \Omega$   
 $R_2 = 4 \Omega$   
 $R_3 = 4 \Omega$   
 $V = 24 \text{ V}$



- 5) En donde  
 $R_1 = 2 \Omega$   
 $R_2 = 4 \Omega$   
 $R_3 = 10 \Omega$   
 $R_4 = 8 \Omega$   
 $R_5 = 19 \Omega$   
 $R_6 = 5 \Omega$   
 $V = 30 \text{ V}$

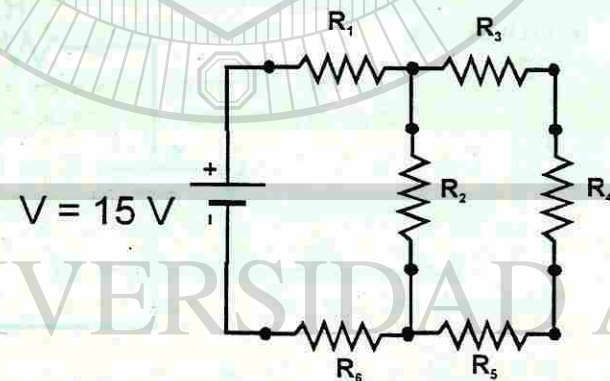


- 6) En donde  
 $R_1 = 2 \Omega$   
 $R_2 = 3 \Omega$   
 $R_3 = 5 \Omega$   
 $R_4 = 1 \Omega$   
 $R_5 = 2 \Omega$   
 $R_6 = 4 \Omega$   
 $R_7 = 5 \Omega$   
 $R_8 = 2 \Omega$

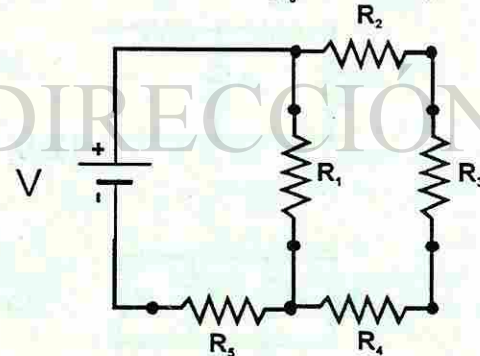


22.- En los siguientes circuitos, encontrar la corriente eléctrica a través de cada resistencia, utilizando las Leyes de Kirchoff

- 1) En donde  
 $R_1 = 6 \Omega$   
 $R_2 = 4 \Omega$   
 $R_3 = 6 \Omega$   
 $R_4 = 4 \Omega$   
 $R_5 = 4 \Omega$   
 $R_6 = 4 \Omega$

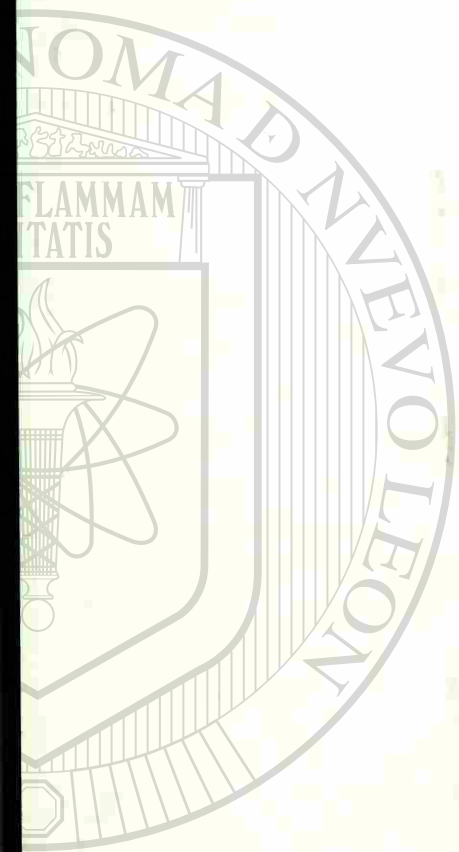


- 2) En donde  
 $R_1 = 10 \Omega$   
 $R_2 = 8 \Omega$   
 $R_3 = 10 \Omega$   
 $R_4 = 7 \Omega$   
 $R_5 = 16 \Omega$   
 $V = 60 \text{ V}$



- 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?
- 26.- Un haz de electrones se mueve perpendicularmente a un campo magnético de  $6.0 \times 10^{-2}$  teslas. Los electrones se mueven a  $2.5 \times 10^7$  m/s. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza que actúa sobre cada electrón?
- 27.- Una partícula alfa (átomo de helio doblemente ionizado) viaja perpendicularmente a un campo magnético de  $5.0 \times 10^{-2}$  teslas, a una velocidad de  $4.0 \times 10^4$  m/s. ¿Cuál es la fuerza sobre la partícula?
- 28.- Una partícula beta (un electrón veloz) viaja perpendicularmente a un campo magnético de intensidad igual a 0.6 N/A.m. Si su rapidez es de  $2.5 \times 10^7$  m/s, ¿Cuál es la fuerza que actúa sobre la partícula?
- 29.- Un alambre de 0.5 metros de largo se mueve perpendicularmente a un campo con inducción magnética de 0.4 N/A.m, a una velocidad de 20 m/s.  
 a) ¿Cuál es la fem inducida en el alambre?  
 b) El alambre es parte de un circuito con resistencia total de 6.0. ¿Cuál es la corriente en el circuito?
- 30.- Un generador en una planta eléctrica genera un voltaje máximo de 170 volts.  
 a) ¿Cuál es el voltaje efectivo?  
 b) Una bombilla de 70 volts se conecta al generador. La corriente efectiva que fluye por la bombilla es de 0.70 amperes. ¿Cuál es la corriente efectiva que fluye por la bombilla?
- 31.- Un generador de corriente alterna suministra un voltaje máximo de 425 volts.  
 a) Si un circuito se conecta al generador, ¿Cuál será el voltaje efectivo a través de él?
- 32.- La bobina primaria de un transformador ideal tiene 50 vueltas de alambre. Su bobina secundaria tiene 1500 vueltas. La bobina primaria se conecta a un voltaje de 120 volts.  
 a) Calcular el voltaje en la bobina secundaria.  
 b) Determinar la corriente en la bobina primaria, si en la secundaria es de 3 amperes.  
 c) ¿Cuál es la potencia generada en la bobina primaria? ¿y en la secundaria?
- 33.- Un transformador tiene 7500 vueltas de alambre en la bobina primaria y 125 vueltas en la secundaria. El voltaje a través de la primaria es de 7 200 volts.  
 a) ¿Cuál será el voltaje a través de la bobina secundaria?  
 b) Si la corriente en la bobina primaria es de 0.6 amperes. ¿Cuál es la corriente en la bobina secundaria?





UAN

SIDAD AUTÓNOMA DE NUE  
ECCIÓN GENERAL DE BIBLIOT