

Este libro constituye el texto oficial para los alumnos del octavo grado de la Educación General Politécnica y Laboral de la República de Cuba. Con él se prosigue el estudio de profundización y sistematización del curso de Física del ciclo preuniversitario. Se tratan los hechos, conceptos y leyes de la teoría cinético-molecular de la estructura de la sustancia y de la teoría electrónica y de los campos relacionados con la electrodinámica, propios de este nivel.

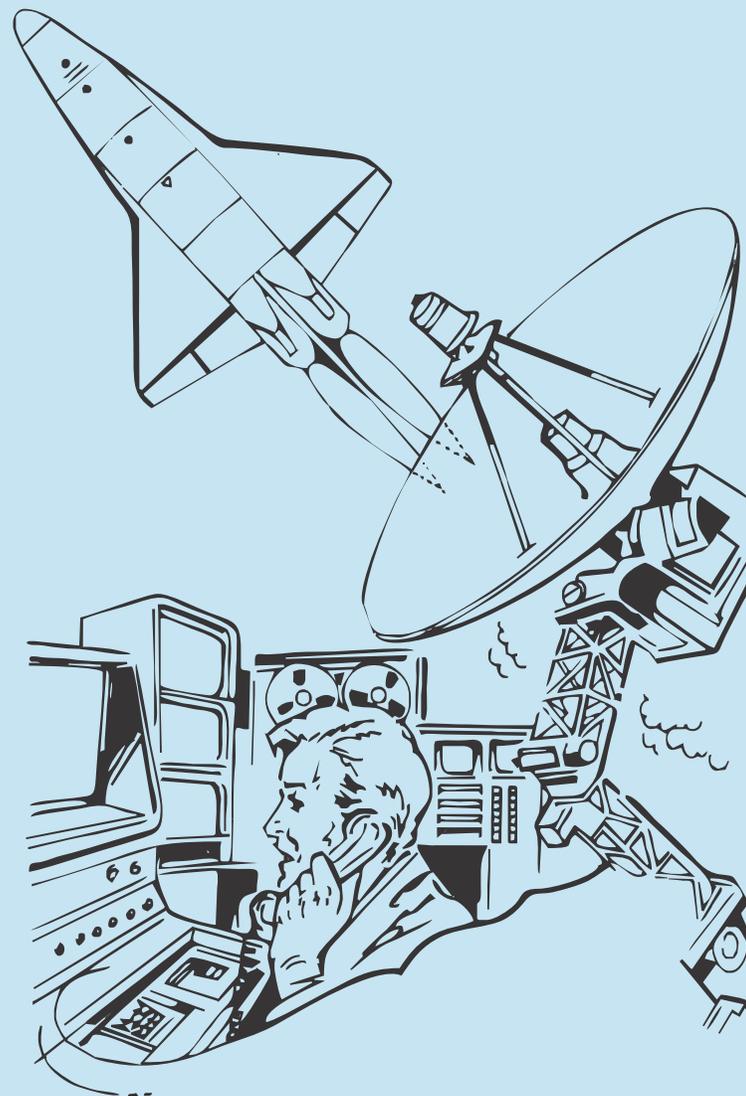
El texto comprende dos temas: física molecular y electrodinámica.

El enfoque metodológico se caracteriza por ser fundamentalmente inductivo-deductivo, en el cual prevalece el análisis a nivel microscópico de los fenómenos y procesos relacionados con la estructura de la sustancia, la conducción eléctrica en los distintos medios y el comportamiento de los distintos tipos de circuitos.

El tratamiento conceptual permite ampliar los conocimientos de los elementos de las teorías físicas que se brindan en el décimo grado.

Los trabajos de laboratorios, que se encuentran estrechamente relacionados con los contenidos de cada capítulo, desempeñan una importante función en la sólida formación de conocimientos y habilidades práctico-experimentales.

El texto se completa con un sistema de tareas teóricas y experimentales, cualitativas y cuantitativas, que están relacionadas con el contenido.



# **FÍSICA**

## **Onceno grado**

### **Parte 1**

Prof. Juan Núñez Viera  
Dr. Lisardo García Ramis  
Lic. Carlos Sifredo Barrios  
Lic. Ángel Menéndez Valdés  
Lic. Olga Castro Escarrá  
Dr. José Ducongé Hernández  
Dr. José Luis Hernández Báez



**Editorial  
Pueblo y Educación**

Diseño: Osvaldo Valdés de la Nuez  
Ilustración: Sonia Acosta Milián  
Emplane: Selandia Urquhart Rojas

© Octava reimpresión, 2011  
© Primera reimpresión, 1991  
© Ministerio de Educación, Cuba, 1990  
© Editorial Pueblo y Educación, 1990

ISBN 978-959-13-0713-2 (Obra completa)  
ISBN 978-959-13-0714-9 (Parte I)

**EDITORIAL PUEBLO Y EDUCACIÓN**  
Ave. 3ra. A No. 4601 entre 46 y 60,  
Playa, La Habana, Cuba. CP 11300.  
epe@ceniai.inf.cu

## **AL ALUMNO**

**Este, tu libro de física, te permitirá continuar los estudios de profundización sobre dos temáticas que estudiaste en forma cualitativa en la secundaria básica: las nociones de Física Molecular y de Electrodinámica.**

**En este grado profundizarás fundamentalmente en los aspectos microscópicos, la formulación de las leyes en forma cuantitativa y las cuestiones fundamentales de las teorías cinético-molecular de la sustancia y la electrónica, asequibles a este nivel.**

**Para que puedas asimilar con solidez los contenidos, es necesario que trates de responder las preguntas que acompañan a cada epígrafe, que tienen por objetivo orientar tu autoestudio. Asimismo, debes analizar detenidamente los ejemplos de problemas resueltos, pues ellos son portadores de una metodología racional para la solución de problemas propios del grado.**

**Los trabajos de laboratorio, en la mayoría de los casos, están ubicados en el epígrafe con el que se relacionan. Durante su realización debes tomar notas y hacer resúmenes sobre los resultados, que anotarás en tu libreta de clase. Ellos te permitirán comprender mejor los contenidos del texto.**

**Queremos expresarte, además, que este libro es el resultado de la experiencia y el esfuerzo de un grupo de profesores que esperan de ti el estudio sistemático de sus contenidos y el cumplimiento de las tareas que te oriente tu profesor, para que puedan serte útiles los conocimientos atesorados en él.**

# ÍNDICE

## Primera parte FÍSICA MOLECULAR

<b>Capítulo 1 POSTULADOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA CINÉTICO-MOLECULAR</b> .....	1
1.1 <i>Ideas principales de la teoría cinético-molecular</i> .....	1
1.2 <i>Movimiento caótico de las moléculas. Explicación del movimiento browniano</i> .....	2
1.3 <i>Masa de las moléculas</i> .....	4
1.4 <i>Cantidad de sustancia</i> .....	6
1.5 <i>Número de Avogadro</i> .....	6
1.6 <i>Tamaño de las moléculas</i> .....	7
1.7 <i>Velocidades de las moléculas. Experimento de Stern</i> .....	10
<i>Tareas generales del capítulo</i> .....	13
<b>Capítulo 2 TEORÍA CINÉTICA DEL GAS IDEAL</b> .....	14
2.1 <i>Gas ideal</i> .....	14
2.2 <i>Cálculo de la presión con ayuda de la teoría cinético molecular</i> .....	15
2.3 <i>Concepto temperatura. Interpretación de la temperatura según la teoría cinético molecular</i> .....	19
2.4 <i>Temperatura absoluta. Escala de temperatura</i> .....	22
2.5 <i>Relación de la temperatura con la velocidad de las moléculas</i> .....	24
2.6 <i>Ecuación de estado del gas ideal</i> .....	26
2.7 <i>Leyes de los gases</i> .....	28
2.8 <i>Aplicación de las leyes de los gases a la interacción entre un líquido y su vapor. Presión de vapor saturado</i> .....	35
2.9 <i>Aplicación de la dependencia de la presión del vapor saturado con la temperatura</i> .....	37
<i>Tareas generales del capítulo</i> .....	39

<b>Capítulo 3 FENÓMENOS TÉRMICOS Y FUNDAMENTOS DE TERMODINÁMICA</b> .....	46
3.1 <i>Introducción a la termodinámica</i> .....	46
3.2 <i>Equilibrio termodinámico</i> .....	46
3.3 <i>Procesos reversibles e irreversibles</i> .....	47
3.4 <i>El trabajo en la termodinámica</i> .....	48
3.5 <i>Equivalencia entre cantidad de calor y trabajo</i> .....	50
3.6 <i>Energía interna</i> .....	51
3.7 <i>Primera ley de la termodinámica</i> .....	53
3.8 <i>Irreversibilidad de los procesos en la naturaleza</i> .....	61
3.9 <i>Principio de Thomson (segunda ley de la termodinámica)</i> ..	62
3.10 <i>Interpretación estadística de la direccionalidad de los procesos físicos</i> .....	63
3.11 <i>Motores térmicos</i> .....	64
3.12 <i>Valor máximo del coeficiente de rendimiento de los motores</i> ..	66
3.13 <i>Ventajas y desventajas de la teoría macroscópica de los fenómenos térmicos</i> .....	68
<i>Tareas generales del capítulo</i> .....	68

## Segunda parte ELECTRODINAMICA

<b>Capítulo 4 ELECTROSTÁTICA</b> .....	74
4.1 <i>Carga eléctrica</i> .....	74
4.2 <i>Ley de Coulomb</i> .....	79
4.3 <i>Campo eléctrico</i> .....	85
4.4 <i>Intensidad del campo electrostático</i> .....	86
4.5 <i>Representación gráfica del campo electrostático</i> .....	88
4.6 <i>Intensidad del campo electrostático inherente a un cuerpo puntual cargado y a un sistema de cuerpos puntuales cargados</i> ..	90
4.7 <i>Trabajo realizado por el campo electrostático</i> .....	97
4.8 <i>Energía potencial de un cuerpo cargado en un campo electrostático</i> .....	99
4.9 <i>Potencial electrostático</i> .....	100
4.10 <i>Superficies equipotenciales y su relación con las líneas de fuerza</i> .....	102
4.11 <i>Relación entre la intensidad del campo electrostático y la diferencia de potencial</i> .....	103
4.12 <i>Potencial en el campo inherente a un cuerpo puntual cargado y a un sistema de cuerpos puntuales cargados</i> .....	105

4.13	<i>Campo electrostático entre dos placas planas paralelas cargadas muy próximas entre sí</i>	107
4.14	<i>Campo electrostático de una esfera metálica cargada</i>	110
4.15	<i>Conductores dentro del campo electrostático</i>	115
4.16	<i>Dieléctricos en un campo electrostático</i>	118
4.17	<i>Condensadores. Capacidad eléctrica</i>	121
4.18	<i>Condensador plano</i>	122
4.19	<i>Energía almacenada en el campo electrostático</i>	126
4.20	<i>Acoplamiento de condensadores</i>	128
	<i>Tareas generales del capítulo</i>	130
	<b>Respuestas</b>	146
	<i>Tareas de final de epígrafe</i>	146
	<i>Tareas generales del capítulo</i>	146

## Primera parte

# FÍSICA MOLECULAR

Durante el estudio de la mecánica aprendimos que el movimiento mecánico de los cuerpos está sujeto a leyes. Es decir, que cuando un cuerpo se desplaza de un punto a otro en el espacio, entre su desplazamiento y el tiempo existen determinadas relaciones, así como entre su velocidad en cualquier instante de tiempo y su velocidad al inicio del movimiento. Conocemos varias de esas relaciones. Si, por ejemplo, un cuerpo se mueve bajo los efectos de una fuerza constante, entonces sabemos que su movimiento será rectilíneo y uniformemente acelerado, y que el desplazamiento del cuerpo puede expresarse como  $S = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2$  y su velocidad en cualquier instante de tiempo como  $v = v_0 + a t$ .

La mecánica, como teoría del movimiento mecánico, nos permitía explicar y predecir el movimiento de los cuerpos. Sin embargo, ya sabemos que no todos los fenómenos que ocurren en la naturaleza son mecánicos. Conocemos que durante el intercambio térmico entre los cuerpos, ocurren multitud de fenómenos. Muchas veces, en las mañanas, vemos como el campo aparece lleno de gotas de rocío, la ropa tendida en la noche aparece generalmente húmeda; cuando cocinamos con una cocina de keroseno del tipo *Pike*, tenemos que producir previamente el calentamiento y la vaporización del combustible para que esta funcione eficientemente; cuando mejoramos la calidad de los motores de nuestros vehículos de transporte, es con el fin de reducir su consumo de combustible y mejorar su eficiencia.

Todos estos hechos, y muchos otros, ocurren también sujetos a leyes físicas, sólo que diferentes de las mecánicas. Por ellos es que podemos, con precisión suficiente, conocer el combustible necesario en un central para toda una zafra, o el tiempo que funcionará un balón de acetileno en la reparación de un equipo.

También sabemos que los cuerpos físicos, que en la mecánica suponíamos "puntuales" o de dimensiones despreciables, están constituidos por un número enorme de moléculas en constante movimiento. Con ayuda de algunas representaciones sobre la interacción entre ellas, pudimos explicarnos fenómenos como la evaporación, la transmisión de energía entre los cuerpos, etc. Valdría la pena preguntarnos: ¿Ocurren estos fenómenos con arreglo a determinadas leyes? ¿Qué diferencia a estas leyes de las ya estudiadas? ¿Tendrá alguna relación con el carácter de esas leyes, la enorme cantidad de partículas de las que están constituidos los cuerpos?

Estas y muchas otras interrogantes deberemos responder en este curso, y empezaremos para ello estudiando los fenómenos térmicos y las teorías físicas que les dan explicación. En cada una de las partes que estudiemos deberemos hacernos las preguntas siguientes:

¿Cuáles son los hechos físicos que estudiamos y qué conocimientos de los que poseemos les dan respuestas?

¿Qué nuevas suposiciones debemos hacer para explicarnos los hechos físicos?

¿Qué conclusiones podemos sacar de nuestras suposiciones?

¿Cómo nuestras suposiciones explican la realidad que nos rodea y los nuevos hechos físicos?

# **Capítulo 1**

## **POSTULADOS FUNDAMENTALES DE LA TEORÍA CINÉTICO-MOLECULAR**

### *1.1 Ideas principales de la teoría cinético-molecular*

Así como la mecánica es la teoría que explica el movimiento mecánico, los fenómenos térmicos son explicados con la ayuda de la teoría cinético-molecular. Como su nombre indica, esta teoría tiene como fundamento la existencia de las moléculas y de su movimiento constante.

Desde la secundaria básica poseemos algunas ideas de esta teoría, que hemos aplicado a los diferentes estados de agregación de la sustancia. Estas ideas se pueden resumir planteando que:

- 1) Los cuerpos están constituidos por moléculas, que interactúan entre sí, de forma que cuando están muy cerca se repelen y cuando están muy alejadas se atraen.
- 2) Entre las moléculas constituyentes de los cuerpos hay espacios.
- 3) Los movimientos de las moléculas son incesantes y desordenados.

¿En qué hechos físicos nos apoyamos para formular estas hipótesis? Por supuesto que suposiciones tan generales no se basaron solamente en unos cuantos experimentos. Fueron necesarios años de estudio para su establecimiento definitivo en la ciencia. No obstante, en el curso de Física de secundaria básica se hizo referencia a experiencias tales como la compresión de los cuerpos, la difusión de líquidos y gases, la evaporación, la transmisión de calor y otros, que pueden ser explicados con ayuda de estas suposiciones.

Desde el octavo grado respondimos a la pregunta: ¿se nos presentan los cuerpos siempre de la misma forma? Hoy sabemos que una misma sustancia puede presentarse en diferentes estados de agregación y, en ellos, los movimientos e interacciones de las partículas que constituyen el cuerpo físico pueden ser diferentes.

En muchos casos estas partículas son las moléculas, pero en algunos líquidos y cristales son iones o agrupaciones de estos, y precisamente de acuerdo con el tipo de interacción entre ellos serán las propiedades de los cuerpos físicos.

Todavía es más complejo lo referente al tipo de movimiento de las moléculas o átomos de acuerdo con el estado de agregación. Mientras en los gases las interacciones entre las moléculas son, en promedio, débiles, y el movimiento es caótico y desordenado, en los sólidos, producto de interacciones más fuertes, las partículas efectúan oscilaciones incesantes al-

rededor de posiciones más o menos fijas en el cristal. En los líquidos, sin embargo, el movimiento de las partículas es tal que se rompe el "orden" más o menos preciso y extendido del sólido cristalino, y cambian con frecuencia su posición en el líquido.

Como se ha podido observar en múltiples experiencias, los conceptos "lejano" o "cercano" tienen mucho que ver con las dimensiones y estructura de las moléculas. Usualmente, cuando las moléculas están separadas a distancias mayores que dos o tres veces su diámetro (suponiendo que están encerradas en una esfera de ese diámetro), como ocurre en los gases, podemos suponer que la interacción entre ellas es muy débil, mientras que si las distancias entre las moléculas son del orden de uno o dos diámetros moleculares, las interacciones entre ellas serán fuertes.

## 1.2 *Movimiento caótico de las moléculas. Explicación del movimiento browniano*

La difusión de unas sustancias en otras, la presión en los gases, la evaporación y la ebullición, entre otros, son hechos físicos que solo pueden ser explicados suponiendo que las partículas que constituyen la sustancia se encuentran en continuo y desordenado movimiento. El carácter desordenado del movimiento térmico y la existencia de las interacciones moleculares son suposiciones que es necesario realizar para interpretar la relación entre las propiedades y el estado de las diferentes sustancias.

Para la teoría cinético-molecular, tuvo una trascendencia especial la explicación y descripción del movimiento incesante e irregular de partículas macroscópicas en suspensión en un líquido (o gas). Esto se conoce como *movimiento browniano*, en honor al botánico inglés Robert Brown, quien lo observó por primera vez, en 1827, en granos de polen en suspensión en agua. A su vez, las partículas que realizan este movimiento se denominan *partículas brownianas*.

El experimento de Brown fue repetido cientos de veces por muchos científicos con diversos líquidos, a diferentes temperaturas, con diferentes tamaños de las partículas brownianas, etc. Fueron intentadas variadas y complejas explicaciones que no consideraban la existencia de las moléculas ni su movimiento caótico. La experiencia demostró que solo una explicación basada en las ideas moleculares era capaz de dar una solución satisfactoria del experimento.

Un significativo aporte fue la explicación del movimiento browniano suponiendo la existencia de las moléculas, dada por Maryan Smolujouski y Albert Einstein en 1905, así como las determinaciones experimentales de Jean Perrin, cuyos resultados concordaban con los predichos por Einstein y Smolujousky.

Perrin midió la posición de la partícula browniana en intervalos determinados de tiempo (cada 30 s), utilizando para esta finalidad un microscopio al que adaptó un retículo que permitía efectuar la medición con

suficiente precisión, y obtuvo una gráfica como la que se muestra en la figura 1.1, en que cada trazo recto une 2 posiciones de la partícula browniana.

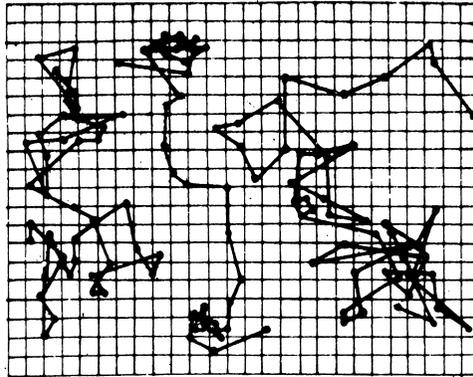


Fig. 1.1

Como se puede observar en la figura 1.1, el movimiento de las partículas brownianas es complejo. Una explicación cualitativa del movimiento browniano se obtiene al analizar la acción de las innumerables moléculas del líquido sobre la partícula browniana.

Si suponemos que el movimiento molecular tiene un carácter caótico, sobre la partícula browniana se producen choques de las moléculas en todas las direcciones. La experiencia demuestra que el número de choques en cada instante puede ser diferente en las distintas direcciones (dado el carácter desordenado del movimiento), por lo que sobre la partícula macroscópica se ejerce en una dirección, en cada instante, una fuerza resultante de todas las acciones, que la mueve. El cambio constante en la dirección del movimiento de la partícula browniana es una consecuencia de los cambios o fluctuaciones momentáneas en el número de choques en una dirección determinada; de ahí que el agitado movimiento de las partículas refleje el carácter caótico del movimiento molecular y sea una prueba evidente de ello.

El movimiento de la partícula browniana no es el movimiento molecular, aunque esta se mueve en forma semejante a las partículas del líquido o del gas, a pesar de ser una partícula macroscópica. El movimiento browniano pone de manifiesto la existencia de las variaciones en el valor de la fuerza sobre la partícula, debido al gran número de moléculas. Estas influencias reflejan las variaciones en el número de choques y en la presión ejercida sobre la partícula, entre otras.

A pesar de la complejidad del movimiento de las partículas brownianas, Albert Einstein pudo determinar una ley que lo describiera. Einstein predijo que el cuadrado de la desviación promedio de la partícula browniana era proporcional al tiempo transcurrido.

Los cálculos realizados por Perrin de la variación de la posición de las partículas con el tiempo confirmaron esta teoría. Esta predicción, formulada sobre la base de la existencia de las moléculas y del carácter desordenado de su movimiento, es demostrativa también de la existencia de regularidades físicas en los fenómenos en los que intervienen un número grande de partículas.

## Tareas

1. ¿A qué se denomina movimiento browniano? ¿Cuál es su importancia para la teoría cinético-molecular?
2. ¿En qué se diferencia el movimiento browniano del movimiento molecular?
3. Explica cualitativamente el movimiento de las partículas brownianas en las observaciones realizadas por J. Perrin.

### 1.3 Masa de las moléculas

La determinación de la masa de las moléculas no se realiza de la misma forma en que medimos la masa de un auto, o del arroz que adquirimos en los comercios. En el caso de las moléculas es necesario utilizar métodos indirectos.

Una vía muy importante fue la utilizada por Perrin en sus estudios del movimiento browniano. Perrin y sus colaboradores prepararon, en un recipiente, una emulsión en agua de pequeñas partículas brownianas (granos) de casi el mismo radio y masa. Estas partículas, como ya conocemos, se movían de forma desordenada, similar a como lo hacen las moléculas del líquido. La idea del experimento de Perrin era estudiar cómo estas partículas se distribuían en la altura. Para ello observó, con ayuda de un microscopio, el número de los granos formados a diferentes profundidades de esta emulsión. El experimento mostró que el número de partículas con la altura disminuía de forma tal que, para una determinada variación de altura, el número de estas con relación al nivel anterior, se reducía a la mitad, como puede observarse en la figura 1.2. En este caso,  $n/n_0$  es el número de partículas con relación al número de moléculas en el fondo de la cubeta. (Analiza en la gráfica los valores para 30 y 60  $\mu\text{m}$ )

Lo asombroso de este resultado es que se apreciaba el mismo comportamiento observado en la disminución del número de moléculas con la altura en la atmósfera. Es decir, esta emulsión se comportaba como una pequeña atmósfera! Naturalmente, las diferencias se deben a las distancias medidas y a las magnitudes de las cifras.

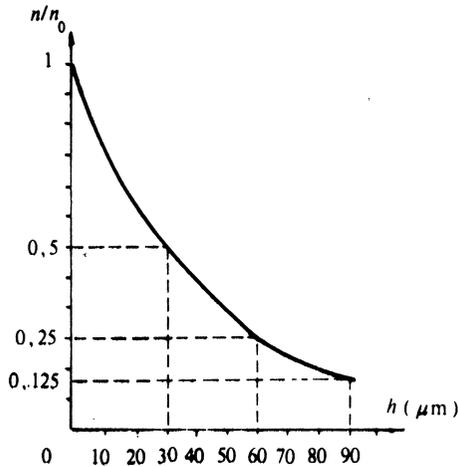


Fig. 1.2

Esa similitud entre el comportamiento de las moléculas en la atmósfera y el de las partículas brownianas en el experimento de Perrin, se explica por el hecho de que, en ambos casos, el movimiento es caótico y desordenado. Las interacciones de las moléculas con la tierra se manifiestan de forma similar.

Si denotamos por  $m_1$  la masa de las partículas brownianas a la altura  $h_1$  y por  $m_2$  la masa a la altura  $h_2$ , en la cual las partículas han disminuido a la mitad, se comprueba que la relación:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad (1.1)$$

es válida para cualquiera de los dos movimientos caóticos estudiados, tanto el de las moléculas en la atmósfera como el de las partículas brownianas. Con algunos procedimientos adicionales, Perrin comparó la masa de la partícula browniana con la masa de la molécula de oxígeno y determinó, para esta última, un valor aproximado de  $5,1 \cdot 10^{-26}$  kg. Las mediciones actuales dan  $5,31 \cdot 10^{-26}$  kg.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> El procedimiento de Perrin no fue complejo. Para la atmósfera, la altura donde se reduce a la mitad el número de moléculas, es aproximadamente  $H = 5,5$  km, mientras que en la cubeta utilizada es  $h = 3 \cdot 10^{-5}$  m. Aplicando a la relación 1.1 esos valores con las masas de las moléculas de oxígeno y de la partícula browniana, queda:

$$\frac{H}{h} = \frac{m_{\text{part}}}{m_{\text{O}_2}}$$

$$\text{y } \frac{m_{\text{part}}}{m_{\text{O}_2}} = 1,83 \cdot 10^8$$

En el caso de algunos experimentos de Perrin,  $m_{\text{part}} = 8,5 \cdot 10^{-18}$  kg.

Es decir, la masa de las moléculas, aun cuando difiere para cada sustancia, es extremadamente pequeña y, por tanto, el trabajo práctico con tales magnitudes resulta muy difícil. Esto puso de manifiesto la importancia de trabajar no con los valores absolutos de las masas de las moléculas, sino con los *valores relativos* respecto a alguna sustancia considerada como referencia. Para ello se tomó como unidad, como ya conoces de Química,  $1/12$  de la masa del átomo de carbono (de número 12).

La masa molecular relativa es la suma de las masas atómicas relativas de los átomos que la componen.

## 1.4 Cantidad de sustancia

Mientras mayor sea el número de átomos o moléculas en los cuerpos macroscópicos, mayor será la cantidad de sustancia contenida en el cuerpo dado.

Ahora bien, el número de moléculas contenidas en los cuerpos macroscópicos es muy grande, de ahí que resulte conveniente determinar el número relativo de átomos o moléculas.

El número relativo de átomos o moléculas en un cuerpo dado caracteriza una magnitud física denominada *cantidad de sustancia*. Se llama cantidad de sustancia a la relación entre el número de moléculas en el cuerpo dado y el número de átomos en 0,012 kg de carbono 12.

Para determinar la cantidad de sustancia, se utiliza la unidad de medida denominada *mole*. El mole es igual a la cantidad de sustancia que contiene tantos átomos o moléculas como hay en 0,012 kg de carbono 12. Por ejemplo, 3 moles de oxígeno indica que el número de moléculas en esa masa es de 3 veces la que hay en 0.012 kg de carbono 12. La masa del mole de sustancia, medida en gramos, es numéricamente igual a su masa molecular relativa.

## 1.5 Número de Avogadro

De la propia definición de mole se deduce que el número de moléculas (o átomos) que hay en un mole es el mismo para todas las sustancias. Este número se denomina *número de Avogadro*, en honor al científico italiano Amadeus Avogadro, y es igual a la cantidad de átomos que hay en 0.012 kg de carbono 12 (que es la masa de 1 mole de carbono).

Los científicos han ideado numerosos métodos para determinar el valor del número de Avogadro, que como ya sabemos del curso de Química, es de  $6.02 \cdot 10^{23}$  moléculas por mole (o mole<sup>-1</sup>).

El número de Avogadro es muy importante en toda la física molecular y, en especial, en la teoría cinético-molecular de la sustancia. Mediante el número de moles de una sustancia ( $n$ ) y el número de Avogadro

( $N_1$ ) podemos conocer la cantidad de moléculas que hay en esa cantidad de sustancia con solo multiplicar ambas magnitudes.

$$N = nN_1$$

## Tareas

4. Menciona las afirmaciones fundamentales que constituyen la base de la teoría cinético-molecular.
5. Explica a qué se denomina cantidad de sustancia. ¿Qué unidad se utiliza para medirla? ¿A qué es igual esta unidad?
6. ¿Qué es el número de Avogadro y cuál es su valor? ¿Qué importancia tiene para la física molecular?

### 1.6 Tamaño de las moléculas

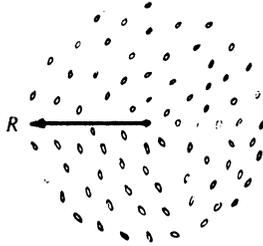
En grados anteriores observamos cómo podemos formar, con una pequeña cantidad de agua coloreada, un número de disoluciones cada vez menos concentradas, pero en las cuales permanece el color. Sabemos, además, que los líquidos pueden extenderse, en determinadas condiciones, por grandes superficies, así como que pueden formarse capas muy delgadas de oro utilizando simples métodos mecánicos.

Tanto de estos ejemplos como de toda la experiencia acumulada por nosotros, se puede deducir cuán reducidas serán las dimensiones de las moléculas. Para la interpretación de muchos fenómenos ha resultado conveniente considerar la molécula encerrada en una pequeña esfera, pero sin especificar sus dimensiones ni su forma. La estructura de algunas moléculas depende de su disposición espacial lineal, otras son más complicadas.

No obstante, como un método para llegar a tener una idea aproximada de las medidas de las moléculas, podemos determinar el espesor de la delgada capa que se forma cuando se deja caer una pequeña cantidad de aceite, petróleo u otra sustancia en un recipiente con agua. ¿Cómo podríamos hacerlo?

Este problema se parece mucho al de determinar el ancho de un grano de arroz disponiendo solo de una regla graduada, una probeta graduada y una cantidad pequeña de arroz. La tarea está clara: determinar el mayor ancho de un grano de arroz.

Para ello, medimos en la probeta el volumen que ocupa nuestra masa de arroz y lo anotamos. Esparcimos ahora el arroz en una superficie de papel, hasta que formemos un círculo de una sola capa de arroz. Si lo miramos desde arriba, observaremos una imagen como la de la figura 1.3. La superficie de ese círculo es  $S = \pi R^2$ , donde  $R$  es el radio del círculo, que podemos medir con ayuda de la regla.



**Fig. 1.3**

Como la capa de arroz formada tiene sólo el espesor o ancho de un grano de arroz, el volumen total de arroz, medido en la probeta se podrá calcular como:

$$V = S \cdot e$$

donde  $S$  es la superficie del círculo y  $e$  es el ancho de un grano de arroz (fig. 1.4).



**Fig. 1.4**

Entonces, como conocemos  $V$  y  $S$ , podemos determinar  $e$  como:

$$e = \frac{V}{S}$$

Para tener una idea de las dimensiones de una molécula podríamos seguir un procedimiento semejante, más confiable aún si consideramos que las dimensiones de estas son muy pequeñas, y su número colosalmente mayor que el de granos de arroz.

Suponiendo que dejamos caer sobre el agua una gota de aceite de volumen  $V$  y que esta ocupa una superficie  $S$  sobre el agua se puede, mediante cálculos sencillos, determinar el orden de magnitud de las moléculas, pues:

$$V = S \cdot h$$

y por tanto:

$$h = \frac{V}{S}$$

Realizando las mediciones necesarias, se pueden hallar los valores del espesor de la capa del orden de  $10^{-7}$  cm, y ese es aproximadamente el orden de magnitud del diámetro de la molécula.

En general, las dimensiones lineales de átomos y moléculas se consideran aproximadamente del orden de  $10^{-8}$  cm. Dimensiones tan peque-

ñas no son fácilmente imaginables. Basta decir que si se aumentara, en igual proporción, la longitud de una hormiga ordinaria (que mide 0,3 cm) y la de un átomo hasta que alcanzara un tamaño de 1 cm, la hormiga tendría entonces una longitud de 300 km.

Actualmente, con ayuda del microscopio electrónico se han podido fotografiar las llamadas *macromoléculas* y apreciar su estructura por determinados medios (fig 1.5)

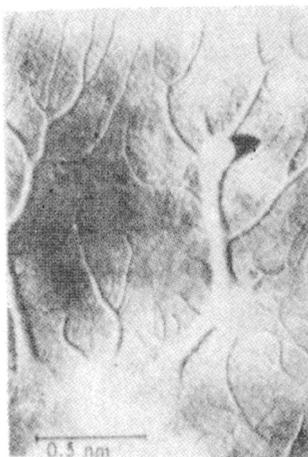


Fig. 1.5

Como las dimensiones de las moléculas son tan pequeñas, es muy elevado el número de ellas que en condiciones normales se hallan en un determinado volumen. Por ejemplo, en 1 cm<sup>3</sup> de agua el número de moléculas es de  $3,34 \cdot 10^{22}$ . Por ello no nos percatamos, en muchos casos, de la naturaleza discreta de la sustancia.

Otra forma de calcular aproximadamente el tamaño de las moléculas es utilizando la relación existente entre el volumen de una gota de líquido,  $V$ , y el número de moléculas que ocupan ese volumen,  $N$ :

$$V_{\text{mol}} = \frac{V}{N}$$

Si suponemos la molécula como una esfera de radio  $R$ , entonces:

$$V_{\text{mol}} = \frac{4}{3} \pi R^3$$

El número de moléculas,  $N$ , se puede calcular como:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A$$

donde  $m$  es la masa de la porción del líquido tomada;  $\mu$ , la masa molar del líquido; y  $N_A$  el número de Avogadro.

Así:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{V}{\frac{m}{\mu} N_A}$$

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{\mu}{N_A \frac{m}{V}}$$

Como la densidad del líquido es  $\rho = \frac{m}{V}$ , entonces:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{\mu}{\rho N_A}$$

$$R^3 = \frac{3\mu}{4\pi} \frac{1}{\rho N_A}$$

y, por lo tanto:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3\mu}{4\pi} \cdot \frac{1}{\rho N_A}}$$

## Tareas

7. ¿Qué consideraciones físicas tenemos que lograr para realizar el experimento ya descrito?
8. Si en un experimento similar al de la gota de aceite el diámetro de la superficie es de 70 cm y el volumen de aceite es  $5,7 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$ , calcula el ancho de la capa molecular. ¿Qué volumen ocuparía una esfera de ese diámetro?

### 1.7 Velocidades de las moléculas. Experimento de Stern

Numerosas experiencias físicas nos demuestran que las partículas constituyentes de los cuerpos están en constante movimiento. Sin embargo, ¿tienen las velocidades de todas las moléculas el mismo valor?, ¿cambian las moléculas sus velocidades en el tiempo?

Conocemos algunos hechos físicos que solo pueden explicarse si admitimos la existencia de moléculas con diferentes velocidades. Por ejemplo, ¿cómo explicar la evaporación de una gota de líquido, sin admitir que unas moléculas son "más veloces" que otras?; y más aún, ¿cómo explicar el enfriamiento que se produce en la evaporación si no es mediante el hecho de que se escapan del líquido moléculas con grandes velocidades y disminuye la energía interna promedio del líquido?

De los estudios de mecánica sabemos que durante el choque de dos cuerpos se produce la variación de sus velocidades como resultado de la

colisión. Es lógico suponer entonces que, como producto del choque entre las partículas que constituyen un cuerpo, sus velocidades varíen.

No obstante, fue necesario realizar experimentos específicos para determinar la existencia de velocidades diferentes en las moléculas. Las experiencias fundamentales en ese sentido fueron desarrolladas por O. Stern en 1920, y comprobaron predicciones teóricas formuladas con anterioridad por James C. Maxwell y Ludwig Boltzmann.

La idea del experimento de Stern se reduce a lo siguiente: imaginemos un recipiente cilíndrico, a lo largo de cuyo eje hay colocado un alambre  $K$  (fig. 1.6), que está rodeado por un tabique circular de platino recubierto con una capa de plata, de forma que al hacer pasar por el alambre una corriente, la plata se vaporiza y se produce un haz molecular que sale por la hendidura  $a$  y llega al punto  $b$  de la pared, formando una franja estrecha de plata. Con el fin de reducir las colisiones con las moléculas de los gases del aire, se hace un alto vacío en todo el recipiente.

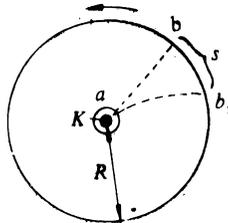


Fig. 1.6

Si se hace girar el recipiente alrededor de su eje, entonces el haz no incidirá sobre el punto  $b$ , sino que se retrasará con respecto a la pared y dejará su marca en el punto  $b_1$ . La separación  $S$  entre  $b$  y  $b_1$ , se puede calcular por medio de la velocidad angular con la que gira el recipiente, como:

$$S = \omega t R$$

donde  $t$  es el tiempo que demoran los átomos en recorrer la distancia  $R$ . Por lo tanto, si  $v$  es la velocidad de los átomos, tenemos:

$$t = \frac{R}{v}$$

y sustituyendo:

$$S = \frac{\omega R^2}{v} \text{ o despejando: } v = \frac{\omega R^2}{S}$$

Conociendo los valores expresados en esta fórmula se puede calcular el valor de  $v$ . Realmente, la huella que se produce es algo imprecisa, lo cual indica que las velocidades de las moléculas son distintas. Midiendo

la distancia al centro de la huella se puede hallar la velocidad media de las moléculas.

Los cálculos realizados por medio del experimento de Stern estuvieron en perfecto acuerdo con los valores calculados teóricamente.

Experimentos realizados posteriormente también comprueban estos resultados. La medición de las velocidades moleculares permite conocer cuántas moléculas ( $\Delta N$ ) tienen velocidades comprendidas en un cierto intervalo de velocidades, es decir, qué cantidad de ellas poseen velocidades entre los valores  $v_1$  y  $v_1 + \Delta v$ . Si se representa gráficamente el número relativo de moléculas ( $\Delta N/N$ ), cuyas velocidades están en el intervalo  $\Delta v$ , se obtiene una curva como la representada en la figura 1.7, en la cual el área rayada representa la cantidad de moléculas que tienen velocidades entre  $v_1$  y  $v_1 + \Delta v$  y, por tanto, el área bajo la curva es numéricamente igual al número de moléculas del gas.

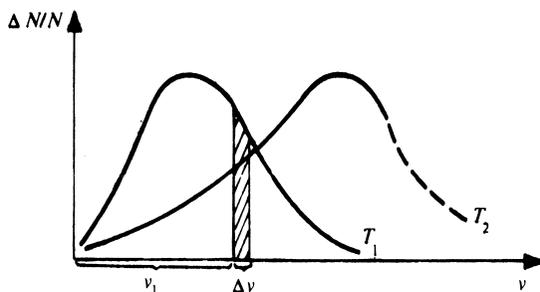


Fig. 1.7

El análisis de esta gráfica, obtenida teórica y experimentalmente, demuestra que la velocidad más probable de entre todas las velocidades es aquella a la cual se mueve un mayor número de moléculas, como indica el punto de mayor altura. Al aumentar la temperatura del gas varía algo la forma de la curva, porque las velocidades de las moléculas aumentan, aun cuando siempre habrá moléculas con velocidades pequeñas, sólo que en un número inferior al que hay a temperaturas menores.

Otro aspecto importante de este experimento radica en que, a pesar de que las moléculas están en continuo movimiento y varían sus velocidades como resultado de los choques continuos, la distribución del número de moléculas en un intervalo de velocidades no varía; es decir, si el cuerpo está en equilibrio la forma de la curva no cambia, pues mientras unas moléculas disminuyen su velocidad, otras la aumentan, de forma que la distribución general no se altera. Esta distribución regular es propia también de algunos fenómenos donde intervienen muchas partículas que se mueven desordenadamente, y pueden simularse con ayuda de medios mecánicos.

Si utilizamos una caja donde han sido colocadas varias hileras de pequeños tacos de madera (fig. 1.8); y dejamos caer en ella bolitas de me-

tal, obtendremos una distribución de las bolitas muy similar a la obtenida en el experimento de Stern. No importa cuántas veces repitamos el experimento, mientras mayor sea el número de bolitas, más regular es la distribución.

En este caso los taquitos provocan choques con las bolitas, que son, en cierta forma, casuales y desordenados, como si se tratara del movimiento de las partículas en el gas.

Cuando el número de bolitas utilizadas es pequeño, caen en una u otra ranura. A medida que aumentamos la cantidad, este aparente desorden adquiere una distribución regular, con lo cual volvemos a comprobar que los fenómenos donde interviene un gran número de partículas son regidos también por leyes, que poseen un carácter estadístico.

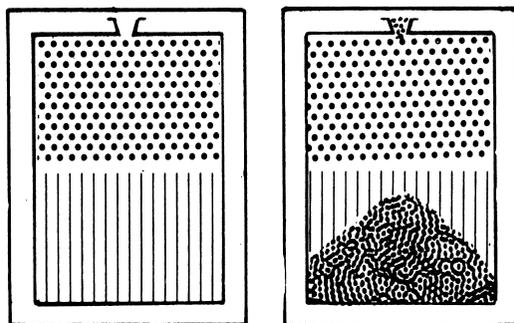


Fig. 1.8

## Tareas

9. Describe el experimento de Stern y di cuál fue el propósito de este.
10. ¿Qué representa la curva mostrada en la figura 1.7?
11. ¿Qué se entiende por velocidad más probable de las moléculas?

### Tareas generales del capítulo

1. La masa de 1 mol de una sustancia es de 23 g. ¿Cuál es el valor de la masa de una molécula de esa sustancia?
2. ¿Cuántos moles y cuántas moléculas de oxígeno ( $O_2$ ) hay en 4 g de este gas, si su masa molecular relativa es de 32?
3. Determina el número de moléculas que hay en una muestra de  $CO_2$  de masa 11 g.
4. Una sustancia tiene una masa molecular relativa de 16. ¿Cuál será el valor de la masa de sus moléculas si la masa de una molécula de carbono es  $1,995 \cdot 10^{-26}$  kg?

## Capítulo 2

# TEORÍA CINÉTICA DEL GAS IDEAL

### 2.1 Gas ideal

En los estudios realizados hasta el presente, describimos cualitativamente las principales propiedades de los diferentes estados de las sustancias, auxiliándonos para ello de las nociones sobre la constitución de los cuerpos que ya conocíamos. Este punto de vista implica la creación de un modelo físico para explicar una parte de los fenómenos que nos rodean, de manera que concuerde con los resultados de los experimentos.

Para profundizar en nuestro conocimiento de la naturaleza, no solo debemos describir las propiedades de los cuerpos; también es imprescindible determinar los posibles *estados* en los que estos se hallarán para las distintas condiciones físicas.

El estado físico de un sistema se caracteriza mediante los valores de determinadas magnitudes, que dependen del sistema físico analizado. Por ejemplo, dos sistemas aislados cuyas temperaturas son diferentes, intercambian energía hasta que ambos alcanzan la misma temperatura. Por ello, la temperatura de un sistema es una magnitud física con la cual se determina si este intercambia o no energía con otros sistemas.

Si se tratara de un gas contenido en un recipiente, por ejemplo, podríamos describir su estado proporcionando la presión a la que está sometido, su volumen, temperatura y composición. Si el volumen del gas es  $V_1$ , su temperatura  $T_1$  y su presión  $P_1$ , decimos que se encuentra en el estado de presión  $P_1$ , volumen  $V_1$  y temperatura  $T_1$ , y que los valores  $P_1$ ,  $V_1$  y  $T_1$  caracterizan el estado del gas. Cualquier variación de estos parámetros modifica el estado del gas o sistema analizado. Estas son magnitudes macroscópicas con las cuales describimos el sistema.

Muchas magnitudes macroscópicas de un sistema son, en realidad, los valores medios de un gran número de características microscópicas como la velocidad de las moléculas, su energía media, el número medio de choques y otras.

La creación de un modelo físico por medio del cual relacionaremos las magnitudes macroscópicas con las microscópicas, es uno de los objetivos de la teoría cinético-molecular. Resulta natural, por tanto, que los modelos utilizados para ello tengan sus limitaciones al explicar todo tipo de fenómenos, pues constituyen simplificaciones mayores o menores de la realidad que reflejan.

En tus estudios anteriores has utilizado distintos modelos físicos, a veces sin percatarte de ello. Por ejemplo, cuando suponemos que las dimen-

siones de un cuerpo son despreciables con respecto al camino recorrido o las dimensiones de los objetos circundantes, hemos utilizado el modelo de punto material.

Ahora trataremos de aplicar las leyes del movimiento, ya conocidas, a la descripción de un sistema físico integrado por muchas partículas: un gas.

Para explicar el comportamiento de los gases supondremos, como primera aproximación, que las moléculas del gas son cuerpos puntuales que no interactúan entre sí, salvo cuando realicen choques elásticos entre ellas y con las paredes del recipiente que las contiene. Estas restricciones pueden considerarse válidas si el volumen de todas las moléculas es despreciable con relación al del recipiente que las contiene.

Al gas formado por semejantes moléculas lo llamaremos *gas ideal*, y constituirá el modelo físico que utilizaremos para explicar los fenómenos en los gases. Como veremos, un gas real se comporta como un gas ideal sólo en determinadas condiciones, generalmente a bajas presiones y altas temperaturas, por lo que los resultados que obtengamos con la aplicación del modelo tendrán un carácter limitado. Otra suposición teórica de nuestro modelo físico para estudiar los gases en condiciones ordinarias, es que este está constituido por un gran número de partículas que se encuentran en movimiento caótico y desordenado y que, en su movimiento, cumplen con las leyes del movimiento de Newton.

## Tareas

1. Explica las suposiciones que se hacen para explicar, en primera aproximación, el comportamiento de los gases, y qué nombre recibe el modelo de gas que surge como consecuencia de estas restricciones.
2. ¿En que condiciones un gas real se comporta como el gas ideal?

### 2.2 Cálculo de la presión con ayuda de la teoría cinético-molecular

Supongamos que tenemos una masa de gas encerrada en un recipiente, sea  $N$  el número de moléculas que ahí se encuentran y  $m$  la masa de cada molécula. Admitiendo que se trata de un gas ideal, sabemos entonces que no hay interacción de las moléculas, salvo en el momento de los choques entre ellas y con las paredes del recipiente, y que dichos choques son perfectamente elásticos. Tomemos por comodidad un recipiente de forma cúbica de lado  $l$ .

¿Cómo calcular la presión que ejerce un gas, aplicando nuestras suposiciones sobre la estructura del gas ideal y las características del movimiento molecular?

Ante todo debemos explicarnos cómo se origina la presión en las paredes del recipiente, de acuerdo con nuestros actuales conocimientos. De

forma resumida pudiéramos decir que la presión es el resultado de los choques de las partículas del gas contra las paredes del recipiente. Cada partícula, en el choque, transmite una cierta cantidad de movimiento a la pared, es decir, ejerce una fuerza sobre ella. Como resultado de los reiterados y múltiples choques se origina la presión del gas. (Si sobre uno de los brazos de una balanza dejamos caer chicharos, frijoles o pequeñas bolas, podremos simular ese comportamiento.)

Por lo tanto, nuestra tarea es clara: calculando el aporte de cada molécula en el choque y sumando las fuerzas ejercidas por todas y cada una de las moléculas, podríamos determinar la presión del gas.

Pero nuestro conocimiento nos dice también que el movimiento de las moléculas del gas es desordenado, es decir, las moléculas se mueven en todas direcciones y en el seno del gas las moléculas poseen velocidades diferentes. ¿Cómo resolver entonces el problema?

Precisamente, las regularidades del movimiento desordenado nos facilitan resolver el problema, pues nos permiten hacer las siguientes suposiciones:

- a) como el movimiento es desordenado, podemos suponer, sin contradicciones, que en una dirección determinada la mitad de las moléculas se mueven hacia la derecha y la mitad hacia la izquierda, ya que no existe una dirección o sentido privilegiado en ese movimiento;
- b) más aún, si cada dirección no es predominante sobre otra, entonces los valores medios de las magnitudes físicas medidas en una dirección no debían diferir de los valores medidos en otra dirección.

Tratemos de aprovechar estas suposiciones para calcular la presión, valiéndonos del esquema que ya propusimos. Para ello:

- 1) calculamos la fuerza ejercida por una molécula con una velocidad dada;
- 2) determinamos el aporte de todas las moléculas que en un volumen dado se mueven con esa velocidad;
- 3) sumamos todas las fuerzas producidas por todas las moléculas;
- 4) calculamos entonces la presión resultante de los innumerables golpes como el cociente de la magnitud de la fuerza calculada y el área de la superficie en que esta fuerza se aplica.

Analicemos qué ocurre cuando una molécula que se mueve con velocidad  $v_0$  choca con la pared del recipiente (fig. 2.1).

Si la molécula situada en  $A$  tiene una velocidad  $v_0$ , entonces su cantidad de movimiento, al chocar elásticamente con la pared en  $B$  y rebotar, es  $-mv_0$  (el signo menos nos indica que ahora la molécula se mueve en el sentido negativo del eje de las  $x$ , es decir, en sentido contrario al tomado inicialmente como positivo), y el impulso transmitido a la pared es:

$$J_x = -(-mv_0 - (mv_0)) = 2mv_0 \quad (2.1)$$

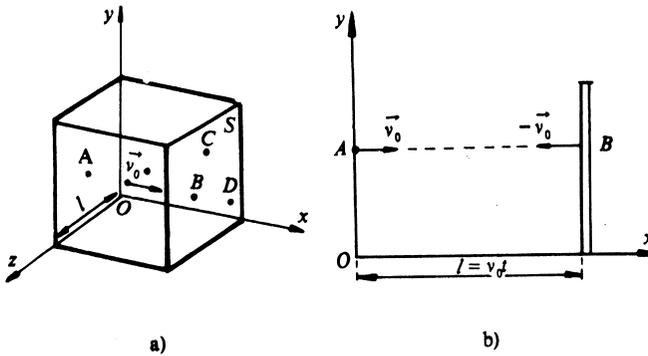


Fig. 2.1

Lo mismo sucede en los puntos C y D con otras moléculas, si suponemos que estas no chocan con ninguna partícula durante el tiempo  $t$  que demoran en recorrer la distancia  $l$ . Si  $f$  es la fuerza media que ejerce cada molécula en el intervalo de tiempo que dura el choque, entonces la variación de la cantidad de movimiento provocada en este tiempo es:

$$ft = 2 m v_{0x}$$

y despejando:

$$f = 2 \frac{m v_{0x}}{t} \tag{2.2}$$

Sin embargo, este es solo el impulso transmitido por una molécula del gas y la fuerza ejercida por ella.

Si el número de moléculas en la unidad de volumen es  $n_0$ ,  $S$  el área de la superficie y  $l = v_{0x} t$  la longitud recorrida por una molécula al ir desde A hasta B durante el tiempo  $t$ , entonces el número de moléculas con esa velocidad  $v_0$  en el volumen  $S \cdot v_0 t$  será igual a:

$$N = n_0 v_{0x} t S$$

pues  $V = S \cdot l$

Tal y como se supone anteriormente, de ellas golpearán la pared solo la mitad, es decir:

$$\frac{N}{2} = \frac{1}{2} n_0 v_{0x} t S \tag{2.3}$$

Entonces, la fuerza total transmitida a la pared por las moléculas con velocidad  $v_{0x}$  es igual al producto de la fuerza media ejercida por una molécula, por el número de moléculas que chocan contra la pared:

$$F = fN$$

Sustituyendo las expresiones de  $f$  y  $N$ , dadas en las ecuaciones 2.2 y 2.3, nos queda:

$$F = \left( \frac{1}{2} n_0 v_{0,x} t S \right) 2 \frac{m v_{0,x}}{t}$$

$$F = n_0 m v_{0,x}^2 S \quad (2.4)$$

Como la presión es la fuerza por unidad de área, entonces, dividiendo por  $S$ , queda:

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

y resulta:

$$P = n_0 m v_{0,x}^2 \quad (2.5)$$

De modo que hemos hallado la presión que ejercen las moléculas con velocidad  $v_{0,x}$  en una de las caras del recipiente. Pero como en el gas las moléculas poseen diferentes velocidades, para hallar la presión promedio debemos sustituir en la expresión el valor de  $v_{0,x}^2$  por el valor promedio de dicha magnitud, con lo cual nos queda:

$$P = n_0 m \bar{v}_x^2 \quad (2.6)$$

donde  $\bar{v}_x^2$  es el valor promedio de las velocidades en el eje  $x$ .

Como no hay una dirección privilegiada en el movimiento de la moléculas del gas, debido a su carácter desordenado, los promedios de los cuadrados de las velocidades en la dirección  $x$ ,  $y$  o  $z$  son iguales entre sí, o sea:

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$$

y como:

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2 \quad (2.7)$$

donde  $v$  es el módulo de la velocidad de las moléculas, entonces tenemos

$$\bar{v}^2 = 3 \bar{v}_x^2$$

y sustituyendo en la ecuación 2.6 expresamos la presión en función del módulo de la velocidad de la molécula:

$$P = \frac{n_0 m \bar{v}^2}{3} \quad (2.8)$$

La magnitud  $\bar{v}^2$  es el promedio de los cuadrados de las velocidades ( $v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2$ ), y su raíz cuadrada se denomina *velocidad cuadrática media* y se representa por  $\sqrt{\bar{v}^2} = v$ .

Multiplicando y dividiendo por 2 en la ecuación 2.8, y agrupando, queda:

$$P = \frac{2}{3} \frac{n_0 m v^2}{2} \quad (2.9)$$

De esta forma hemos obtenido una expresión para la presión en función de los parámetros microscópicos del gas: la cantidad de partículas por unidad de volumen, la masa de las moléculas y la velocidad cuadrática media de las moléculas. A medida que aumenta el número de partículas en un mismo volumen, aumenta  $n_0$  y, con ello,  $P$ . Si disminuimos el volumen, aumenta  $n_0$ , porque la cantidad de moléculas por centímetro cúbico es mayor, elevándose el número de choques con las paredes y por consiguiente,  $P$ .

La magnitud  $\frac{m v^2}{2}$  corresponde a la energía cinética promedio de las partículas del gas, de ahí que:

$$P = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_c \quad (2.10)$$

Es por ello que, al aumentar la agitación molecular, es decir, la energía cinética promedio de las moléculas, aumenta también la presión en el gas.

La ecuación anterior se conoce con el nombre de ecuación *fundamental de la teoría cinética del gas*.

## Tareas

- ¿De qué parámetros microscópicos depende la presión que ejerce un gas sobre las paredes del recipiente?
- Explica la significación de cada término de la ecuación 2.9.
- ¿Cuál es el significado físico del producto  $P \frac{V}{N}$  ?

### 2.3 Concepto temperatura. Interpretación de la temperatura según la teoría cinético-molecular

La noción de temperatura la adquirimos desde pequeños, a través de la noción de lo "frío" y lo "caliente", y llegamos a saber que se realiza su medición con ayuda de los termómetros.

En la secundaria básica conocimos que la temperatura de un cuerpo está estrechamente vinculada con el movimiento de las partículas que lo constituyen; así aprendimos que mientras más intenso es el movimiento molecular, mayor es la temperatura del cuerpo.

Más aún, sabemos que si ponemos en contacto dos cuerpos con diferentes temperaturas, al cabo de un cierto tiempo entre ambos cesa el intercambio de energía y alcanzan la misma temperatura. Decimos entonces que ambos cuerpos están en *equilibrio térmico*. El estado de equilibrio térmico es el estado de un sistema de cuerpos entre los cuales no hay intercambio de energía.

En el estado de equilibrio térmico los cuerpos interactuantes poseen la misma temperatura. Esta es la propiedad fundamental de la temperatura: ser la misma para todos los cuerpos en equilibrio térmico. Es decir, la temperatura es una magnitud física que nos permite caracterizar un conjunto de sistemas físicos que están en equilibrio térmico entre sí. Los cuerpos están entonces en un estado *estable*.

Realicemos ahora un experimento que nos permita determinar la magnitud que tiene igual valor para todos los cuerpos en equilibrio térmico.

Preparemos inicialmente un baño de hielo y agua en una cubeta apropiada, y coloquemos dentro balones en los cuales hemos introducido determinadas masas de gases diferentes, por ejemplo, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. A los extremos de los balones se han colocado manómetros para medir la presión de los gases dentro de cada recipiente (fig. 2.2).

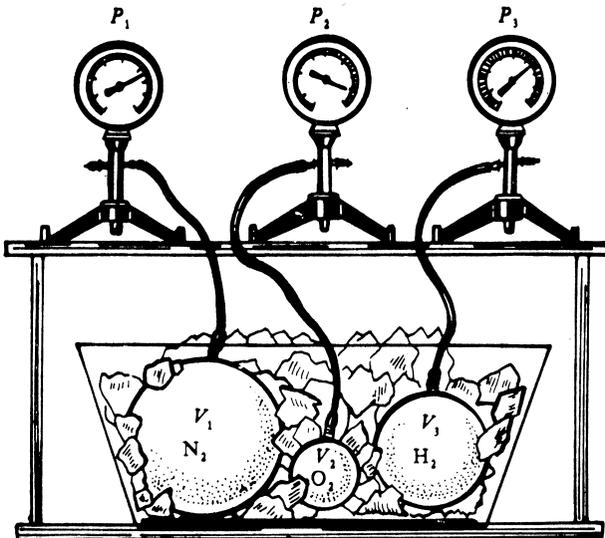


Fig. 2.2

Al colocar los balones en el agua, las presiones variarán hasta que se estabilizan en un valor determinado para cada gas. Por supuesto, como los balones están sumergidos en el agua, todos estarán (al cabo de cierto tiempo) a una misma temperatura, que será la temperatura de fusión del hielo.

Si medimos ahora el valor de la presión en cada balón, y calculamos el número de moléculas de gas contenido dentro de cada uno de ellos, se puede comprobar que el producto de la presión del gas en cada recipiente, por el volumen del recipiente, dividido entre el número de moléculas de cada gas, es un valor constante para todos los balones colocados en equilibrio térmico, es decir:

$$\frac{PV}{N} = \text{cte.} \quad (2.11)$$

A la temperatura de cero grado Celsius, esta constante es igual a  $3,7 \cdot 10^{-21}$  J.

¿Cómo explicar este singular resultado y qué importancia tiene en la medición de la temperatura?

Para responder esta pregunta, utilizaremos la expresión para el cálculo de la presión según la teoría cinética del gas ideal. La ecuación fundamental deducida, 2.10, plantea que:

$$P = \frac{2}{3} n_0 \bar{E}_c$$

Si sabemos que  $n_0 = \frac{N}{V}$ , donde  $N$  es el número de partículas del gas y  $V$  el volumen ocupado por el gas, entonces tenemos que:

$$P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_c$$

y despejando  $\bar{E}_c$  nos queda:

$$\frac{PV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}_c \quad (2.12)$$

es decir, la magnitud  $\frac{PV}{N}$  es proporcional a la energía cinética media de las moléculas del gas ideal que, como ya sabemos, es la energía interna media del gas ideal.

Si, como hemos visto,  $\frac{PV}{N}$  es la misma para todos los gases contenidos en el recipiente, eso indica que la energía interna de las moléculas del gas ideal puede ser la magnitud física con la cual mediremos la temperatura. De esta forma, midiendo la energía interna media del gas y comparándola con la de otro gas, sabremos si ambos, puestos en contacto, estarán o no en equilibrio térmico.

De tal forma, la temperatura resulta ser la magnitud física que nos permite determinar si dos cuerpos están o no en equilibrio térmico entre sí. Además, es una medida de la energía media de las moléculas del cuerpo. En el caso concreto que hemos analizado, comprobamos que los

cuerpos que están en equilibrio térmico poseen el mismo valor de la energía cinética media de sus moléculas, y su temperatura es la misma.

Decimos entonces que la energía cinética promedio,  $E_c$ , es proporcional a la temperatura, que representaremos por la letra  $T$ , o sea:

$$E_c \propto T$$

Introduciendo una constante de proporcionalidad  $k$ , la energía cinética promedio se calcula como:

$$E_c = \frac{3}{2} kT \quad (2.13)$$

La constante  $k$  se denomina constante de Boltzmann, e indica cuánto aumenta la energía cinética media de las moléculas del gas cuando aumentamos su temperatura en un grado.

## 2.4 Temperatura absoluta. Escala de temperatura

Nada impide, rigurosamente, tomar las unidades de energía para medir la temperatura. No obstante, problemas prácticos aconsejan medir la temperatura no en joule, sino en otra unidad creada para ello: el kelvin.

Con este fin, podemos calcular experimentalmente la energía mediante la ecuación:

$$E_c = \frac{3}{2} \frac{PV}{N} \quad (2.14)$$

y luego, con la expresión 2.13:

$$E_c = \frac{3}{2} kT$$

hallamos la temperatura.

Para construir la nueva escala y determinar el valor de  $k$ , se utiliza, por comodidad, una escala centígrada (de 100 grados), que toma como puntos fijos la fusión y la ebullición del agua en condiciones normales.

Si denominamos  $T_c$  la temperatura de ebullición del agua, y  $T_f$  la de fusión, entonces:

$$T_c - T_f = 100 \text{ K}$$

(se lee 100 kelvin).

La energía cinética en la ebullición,  $E_{c,c}$ , se calcula como:

$$E_{c,c} = \frac{3}{2} kT_c$$

y la energía de la fusión se expresa como:

$$E_{c,i} = \frac{3}{2} k T_i$$

Entonces:

$$E_{c,c} - E_{c,i} = \frac{3}{2} k (T_c - T_i) \quad (2.15)$$

El valor de  $(PV/M)$  a la temperatura de fusión lo conocemos. Si realizamos un proceso similar para el caso de la ebullición, puede medirse el valor de  $E_{c,c}$ . Sustituyendo en 2.15, se puede calcular el valor de que la constante  $k$ , que resulta ser:

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

Esto permite hallar el valor de la temperatura de un sistema conociendo su energía cinética media:

$$T = \frac{2}{3} \frac{\bar{E}_c}{k}$$

Si se calcula la temperatura de fusión del agua en esta escala, se obtiene que es igual a:

$$T_i = 273.15 \text{ K}$$

La escala así construida se denomina *escala absoluta de temperatura*, y la temperatura cero, *cero absoluto*. En esta escala no hay temperaturas con valores negativos, ya que la energía cinética  $\left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2\right)$  es siempre positiva. La temperatura del cero absoluto corresponde a aquel estado en el cual la energía cinética debe ser cero.

En realidad, la energía media de las partículas de los cuerpos no llega a ser cero en la práctica. En el caso particular que analizamos, según 2.14:

$$E_{c,i} = \frac{3}{2} \frac{PV}{N}$$

$P$  o  $V$  deben ser cero. El caso de  $V=0$  es realmente descartable, y la presión nula no ocurre en la práctica.

Para transformar temperaturas de la escala celsius a la kelvin, basta solo utilizar una regla simple, que es:

$$T \text{ (en kelvin)} = t \text{ (en grado Celsius)} + 273.15$$

Por ejemplo, la temperatura de ebullición del agua es 373.15 K.

## Tareas

6. ¿Qué parámetros microscópicos del gas se relacionan con la temperatura? ¿Cómo es la relación?
7. ¿Qué significado tiene la constante de Boltzmann?
8. ¿Qué relación existe entre la temperatura medida en grados centígrados y en kelvin?

### 2.5 Relación de la temperatura con la velocidad de las moléculas

Ya obtuvimos, en el epígrafe anterior, que la energía cinética promedio de las moléculas del gas ideal está relacionada con la temperatura de forma directa, es decir, que:

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2} kT$$

donde  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{grado}^{-1}$ .

Este resultado permite profundizar en el significado físico de la temperatura. Como se ha señalado, la temperatura está relacionada con el movimiento molecular. Se ha discutido que se hacía más intenso el carácter de la agitación molecular a medida que aumentaba la temperatura del cuerpo, lo cual puede comprobarse por medio del movimiento browniano.

Mediante la teoría cinético-molecular se comprueba que la temperatura es una medida de la energía promedio de las moléculas del gas ideal. Este importante resultado es válido para los restantes estados, de ahí que hasta ahora se haya considerado como una magnitud que caracterizaba la energía interna de los cuerpos.

Del resultado de la ecuación 2.13 se llega, como  $E_c = \frac{1}{2} m\bar{v}^2$  a que:

$$\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

$$\bar{v}^2 = \frac{3 kT}{m} \quad (2.16)$$

Como  $\bar{v}^2$  se determina considerando las velocidades de todas las moléculas, por esta ecuación ponemos de manifiesto la relación entre los parámetros macroscópicos y microscópicos y el carácter estadístico de los primeros.

Como vemos, la temperatura solo tiene sentido cuando se trata de cuerpos macroscópicos, constituidos por muchas partículas, pues es un criterio para describir si un sistema está o no en equilibrio térmico con

otros. Mide, por tanto, la energía promedio de todas las moléculas del cuerpo y no la energía de una molécula. Es por tal razón que carece de sentido hablar de la temperatura de una molécula.

Al sustituir la temperatura en la ecuación 2.13, se debe tener en cuenta que viene medida en kelvin, es decir, que se trata de la temperatura absoluta del cuerpo.

Para tener una idea de la medida de la energía promedio de las moléculas, calculemosla para un gas a la temperatura ambiente de 27 °C.

Para ello, calculamos la temperatura absoluta a la que se encuentra el gas. Como sabemos:

$$T = t + 273$$

$$T = 27 + 273$$

$$T = 300 \text{ K}$$

luego:

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2} kT$$

$$\bar{E}_c = \frac{3}{2} 4,14 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$\bar{E}_c = 6,21 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

Este valor, aunque pequeño en comparación con los valores ordinarios de energía, nos permite hallar la velocidad cuadrática media de las moléculas, pues:

$$\frac{m\bar{v}^2}{2} = E_c$$

$$\bar{v}^2 = \frac{E_c}{m}$$

Sustituyendo el valor de  $m$  para el hidrógeno ( $m = 3,3 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ), obtenemos que  $\bar{v} \approx 1,9 \cdot 10^5 \text{ cm/s}$ , con lo que vemos que esta velocidad es extraordinariamente grande. A pesar de ello, la difusión en los gases es lenta, lo que se debe al elevado número de choques que sufren las moléculas en la unidad de tiempo.

## Tareas

9. Plantea una relación matemática que ligue la temperatura con la velocidad de las moléculas de un gas. ¿Qué significan las magnitudes que intervienen en esa relación?

## 2.6 Ecuación de estado del gas ideal

Con ayuda del modelo del gas ideal hemos calculado la presión de un gas y establecido su relación con la energía cinética promedio de este gas. También comprobamos que esta energía solo depende de la temperatura a la que se encuentra el gas, pues, si como vimos en la ecuación 2.10:

$$P = \frac{2}{3} n_0 E_c$$

y como, según 2.13:

$$E_c = \frac{3}{2} kT$$

entonces:

$$P = n_0 k T \quad (2.17)$$

Ahora,  $N$  es el número de moléculas del gas y  $V$  es el volumen que este ocupa. Sustituyendo en 2.17 nos queda:

$$P = \frac{N}{V} k T$$

$$PV = N k T \quad (2.18)$$

Dividiendo y multiplicando por el número de Avogadro (número de moléculas que hay en un mole) del gas,  $N_A = 6.02 \cdot 10^{23}$  moléculas, la relación anterior toma la forma:

$$PV = \frac{N}{N_A} N_A k T$$

y como:

$$\frac{N}{N_A} = \text{número de moles de gas} = n$$

entonces:

$$PV = nRT \quad (2.19)$$

donde  $R = N_A k$  es una constante que no depende del tipo de gas, y cuyo valor es  $8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{kmol}}$

Por lo tanto:

$$\frac{PV}{T} = nR$$

es decir, con ayuda del modelo del gas ideal, hemos obtenido una relación entre los parámetros macroscópicos del gas.

La ecuación  $PV = nRT$  se conoce con el nombre de *ecuación de Clausius-Clapeyron*. Es la ecuación de estado del gas ideal, pues establece la relación entre los diferentes parámetros macroscópicos del gas en cada estado es decir, que una masa de gas puede hallarse solo en aquellos estados que cumplen la referida ecuación.

La ecuación de estado del gas ideal se puede aplicar a los gases reales cuando estos se encuentran a altas temperaturas y bajas presiones, aunque se obtienen resultados satisfactorios para los gases en condiciones ordinarias.

Esta concordancia entre los resultados prácticos y los previstos por la teoría cinético-molecular del gas ideal es una prueba de su validez.

Veamos un ejemplo de aplicación de la ecuación de estado a la resolución de problemas.

## Problema resuelto

Una bomba de aire de bicicleta expelle, en cada bombeo un volumen de aire  $V_0 = 40 \text{ cm}^3$ . ¿Cuántos bombeos son necesarios para que la presión en una cámara de bicicleta de  $2\,000 \text{ cm}^3$  sea igual a  $1\,519,5 \text{ hPa}$ ? (Considera que la presión atmosférica es de  $1\,013 \text{ hPa}$  y desprecia el calentamiento del aire en la bomba.)

### Solución

La cantidad de sustancia (en moles) que se bombea a la cámara en cada bombeo es de:

$$m = \frac{P_0 V_0}{RT}$$

por lo que al cabo de  $N$  bombeos será:

$$M = N \frac{P_0 V_0}{RT}$$

Esta masa de gas se halla sometida, en la cámara a una presión  $P = 1\,519,5 \text{ hPa}$ , ocupando un volumen  $V = 2\,000 \text{ cm}^3$ , por lo que cumple la ecuación:

$$M = \frac{PV}{RT}$$

por lo que:

$$N \frac{P_0 V_0}{RT} = \frac{PV}{RT}$$

y simplificando:

$$N = \frac{PV}{P_0 V_0} = 75$$

## Tareas

10. ¿Qué significan cada uno de los factores que intervienen en la fórmula  $P = n_0 k T$ ?
11. ¿Cómo se puede calcular el número de moles que hay en una masa de gas conociendo el número de moléculas y el número de Avogadro?
12. Considera que conoces la presión, el volumen y la temperatura de una masa de gas. ¿Puedes conocer el número de moles? Explica.
13. ¿Qué significa la ecuación  $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$ ?

### 2.7 Leyes de los gases

La ecuación de estado de los gases:

$$PV = nRT$$

puede ser aplicada con éxito para la descripción de los cambios de estado físico que tienen lugar en un gas y para la obtención de las leyes que rigen estos procesos. Veremos a continuación algunos ejemplos de ello.

#### *Procesos que ocurren en un gas a temperatura constante*

Un gas encerrado en un recipiente puede dilatarse o comprimirse por diferentes vías. Una de ellas, muy importante, es la variación que ocurre a temperatura constante. Los procesos en los cuales no varía la temperatura se denominan *isotérmicos*.<sup>1</sup>

Aplicando la ecuación de estado a este caso particular queda:

$$PV = nRT$$

pero como la masa de gas no varía y la temperatura es constante, entonces el miembro derecho de la igualdad ( $nRT$ ) es constante. De ahí que para los procesos isotérmicos se cumple que:

$$PV = \text{const.}$$

Es decir, en los procesos isotérmicos son posibles los estados en los cuales el producto de la presión y el volumen ocupado por el gas es constante. Esto significa que si el gas se encuentra en un estado en donde su presión es  $P_1$ ; su volumen  $V_1$  y su temperatura es  $T$ , y pasa sin variar la

<sup>1</sup> Palabra griega. *Isos* significa igual, y *térmico*, temperatura.

temperatura a un estado con los valores de presión y volumen  $P_2$  y  $V_2$ , entonces se cumple que:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \tag{2.20}$$

Una familia de gráficas de la presión en función del volumen se muestra en la figura 2.3a para los valores de temperatura  $T_1$  y  $T_2$ . Cada una de esas curvas se denomina isoterma para la temperatura dada.

En la figura 2.3b se representa el equipo escolar mediante el cual se puede comprobar experimentalmente la certeza de la ley isotérmica. Girando la manivela  $A$  se puede reducir o incrementar el volumen del fuelle  $B$ . El valor de la presión se mide con el manómetro  $C$ .

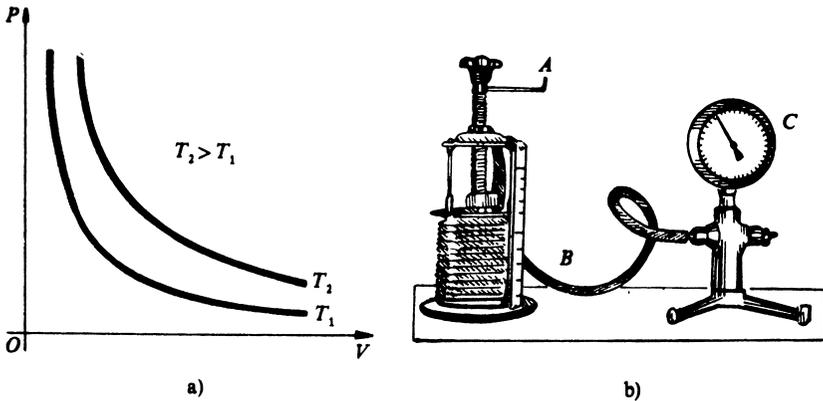


Fig. 2.3

Esta ley,  $PV = \text{const.}$ , fue descubierta empíricamente por el físico inglés Robert Boyle en el siglo pasado, y se conoce con el nombre de *ley de Boyle-Mariotte*.

*Procesos que ocurren en un gas a presión constante*

Cuando un proceso ocurre a presión constante, se dice que es un proceso *isobárico*.<sup>1</sup> Procesos de este tipo nos son familiares, pues la ebullición ordinariamente ocurre a la presión atmosférica constante, la combustión y la evaporación, en condiciones normales, son procesos isobáricos.

Aplicando la ecuación de estado, es fácil obtener la fórmula correspondiente a la ley que rige los procesos isobáricos, pues si en la ecuación 2.19 hacemos  $P = \text{const.}$  y agrupamos, resulta:

$$\frac{V}{T} = \frac{nR}{P}$$

<sup>1</sup> Palabra griega. *Baras* significa presión.

y como ni la masa del gas ni la presión varían, el término  $\frac{nR}{P}$  es constante, luego:

$$\frac{V}{T} = \text{const.}$$

Es decir, en los procesos isobáricos el volumen y la temperatura son directamente proporcionales, o lo que es lo mismo, el volumen varía linealmente con la temperatura.

Al pasar de un estado físico a otro por un proceso isobárico, la temperatura y el volumen se relacionan como:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2.21)$$

donde  $V_1$ ,  $T_1$  y  $V_2$ ,  $T_2$  son los valores de dichas magnitudes antes y después de la variación de estado

#### *Procesos que ocurren en un gas a volumen constante*

Este tipo de proceso recibe el nombre de *isocórico*:

Si en la ecuación de estado del gas ideal despejamos el término  $\frac{nR}{V}$ , obtenemos:

$$\frac{P}{T} = \frac{nR}{V}$$

Como ni la masa ni el volumen del gas varían, entonces  $\frac{nR}{V}$  es constante y se obtiene que:

$$\frac{P}{T} = \text{const.}$$

O sea, en un proceso isocórico la presión y la temperatura son directamente proporcionales; la presión varía linealmente con la temperatura.

La relación entre los valores de las magnitudes en dos estados alcanzados mediante un proceso isocórico cumple la relación.

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (2.22)$$

Las leyes  $\frac{P}{T} = \text{const.}$  y  $\frac{V}{T} = \text{const.}$ , para los procesos isocóricos e isobáricos respectivamente en los gases, fueron establecidas en el siglo pasado empíricamente, y se conocen con el nombre de *leyes de Gay-Lussac*.

## Ley de Dalton

Supongamos que en un recipiente con gas podemos introducir, por algún procedimiento, diferentes gases. Como resultado de este proceso, se obtiene en el recipiente una mezcla de estos. ¿Cómo influirá la presencia de un segundo o tercer gas en la presión ejercida por el primero? ¿Cuál será la presión resultante? Este problema tiene, sin lugar a dudas, gran importancia práctica, pues lo más corriente es hallar en la naturaleza mezclas de varios gases. El mismo aire que respiramos es una mezcla de oxígeno, hidrógeno y muchos otros gases. El químico inglés John Dalton observó empíricamente que, en gases que están suficientemente enrarecidos, la presión sobre las paredes del recipiente es igual a la suma de las presiones que ejerce cada gas independiente de que se sacara o no del recipiente el resto de la mezcla, es decir:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

donde  $P_1, P_2, \dots, P_n$  son las presiones que ejerce cada gas cuando no se hallan en el recipiente los restantes. A cada una de estas presiones se le llama *presión parcial* del gas.

La teoría cinético-molecular ofrece también una explicación a este hecho. Si los gases están suficientemente enrarecidos, pueden considerarse como ideales. Sus moléculas no interactúan entre sí y cada gas ejerce su acción, independiente de los restantes sobre la pared del recipiente que los contiene.

El número total de choques con las paredes es:

$$N = N_1 + N_2 + \dots + N_n$$

donde  $N_1, N_2, \dots, N_n$  son la cantidad de moléculas de cada gas. Sustituyendo  $N$  en la ecuación 2.18, que nos da la expresión de  $P$  en los gases ideales, nos queda que:

$$P = \frac{N_1 k T}{V} + \frac{N_2 k T}{V} + \dots + \frac{N_n k T}{V}$$

Como:

$$\frac{N_i k T}{V} = P_i$$

es la presión que ejerce cada gas en el recipiente de volumen  $V$ , con independencia de los demás (presión parcial). Entonces:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

Este resultado concuerda con lo obtenido en el experimento de Dalton, lo cual constituye otra prueba de la validez de la teoría cinético-molecular.

## Ley de Avogadro

Como ya es conocido del curso de Química, los experimentos realizados a inicios del siglo XIX, referentes a las combinaciones químicas en los gases, demostraron que los volúmenes de los gases reaccionantes guardan entre sí relaciones definidas. Con estas evidencias, y después de continuos y sistemáticos experimentos, Amadeo Avogadro pudo formular, en 1811, la siguiente hipótesis: *a igual presión y en iguales condiciones de temperatura, un mole de cualquier gas ocupa un mismo volumen, cuyo valor es  $V_0 = 0,0024 \text{ m}^3$  (o 22,4 L).* Este enunciado es conocido como *ley de Avogadro*.

La explicación de este hecho nos la ofrece la teoría cinético-molecular. Como vimos en la ecuación 2.17.

$$P = n_0 k T$$

Para iguales condiciones de presión y temperatura, la densidad  $n_0$  es la misma en los diferentes gases, y como:

$$n_0 = \frac{N}{V}$$

se obtiene que, para volúmenes iguales de diferentes gases, el número de moléculas es el mismo.

La interpretación de esta ley desde el punto de vista de la teoría cinético-molecular tuvo gran importancia en la confirmación de las ideas atomísticas, y es una comprobación de la existencia de las moléculas en los gases.

## Tareas

14. ¿A qué se llama proceso isotérmico?
15. ¿Qué plantea la ley de Boyle-Mariotte?
16. Representa gráficamente la ley de Boyle en un diagrama  $P-V$ .
17. ¿Qué es un proceso isobárico? ¿Cómo se relacionan los parámetros del estado en un proceso de este tipo? Representa este proceso en un diagrama  $P-V$ .
18. ¿Qué nombre reciben los procesos de volumen constante? ¿Qué relación existe entre la presión y la temperatura en este proceso? ¿Cómo se representa este proceso en un diagrama  $P-V$ ?
19. Considera que a un tanque de metal se le inyecta aire mediante una bomba; el manómetro indica un aumento de presión. ¿Se cumplirá aquí la relación  $\frac{P}{T} = \text{const.}$ ? Explica.
20. ¿Qué plantea la ley de Dalton?

21. ¿Qué significan los términos presión parcial y presión total?.
22. ¿Qué plantea la ley de Avogadro en correspondencia con la teoría cinético-molecular de los gases?

## TRABAJO DE LABORATORIO 1 Comprobación de la Ley de Boyle-Mariotte

*Instrumentos y materiales:* Tubo de Boyle-Mariotte, regla graduada en milímetros, barómetro aneróide u otro barómetro, base con varilla, pinza, tapón de goma monohoradado, plomada, semicírculo con varilla, doble nuez.

*Indicaciones para el trabajo*

1. Analiza el tubo de Boyle y sus características. Observa que la columna de mercurio mantiene encerrada cierta cantidad de aire en la cámara del final del tubo; este gas encerrado actúa con una presión:

$$P = P_{at} + P_{Hg}$$

donde  $P_{at}$  es la presión atmosférica que actúa sobre el mercurio por la boca abierta del tubo y  $P_{Hg}$  la presión debida a la columna de mercurio que, para distintas posiciones del tubo, se puede hallar por  $P_{Hg} = l_{Hg} \cos \alpha$  ( $\alpha$  es el ángulo que forma el tubo con la dirección vertical y  $l_{Hg}$  es la magnitud de la columna de mercurio).

Con un montaje como el de la figura 2.4, se puede variar la posición del tubo respecto a la dirección vertical. Sobre el gas actuarán entonces diferentes valores de presión, y para medirlos es conveniente medir los ángulos  $\alpha$  formados.

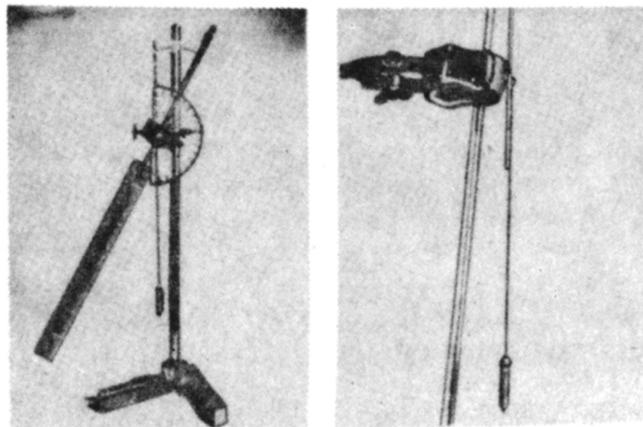


Fig. 2.4

- El experimento se realiza a temperatura ambiente, que no debe ser alterada por nada. Esto posibilita que los cambios de presión ofrezcan cambios de volumen en la cámara de aire. Si el volumen es  $V = Sl$ , donde  $S$  es el área interior del capilar, que no cambia en los diferentes experimentos, entonces  $l$ , que es la longitud del aire en el interior de la cámara, es lo único que hace variar el volumen y por tanto es el valor a medir para cada una de las posiciones del tubo respecto a la vertical.
- Lleva a la tabla 2.1 los valores obtenidos de  $\alpha$  y  $l$ . Puede resultar más sencillo si tomas valores fijos del ángulo y mides las longitudes correspondientes a cada uno.
- Pide a tu profesor el valor de la presión atmosférica del lugar y efectúa el cálculo de la presión del gas, así como el producto de esta por la longitud correspondiente a la cámara de aire. Refleja estos resultados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1

$\alpha$	$\cos \alpha$	$l$ (cm)	$P(P_{at} + l_{Hg} \cos \alpha)$ (cm de Hg)	$P \cdot l$
$0^\circ$	1			
$60^\circ$	$\frac{1}{2}$			
$90^\circ$	0			
$120^\circ$	$-\frac{1}{2}$			
$180^\circ$	-1			

Responde las siguientes preguntas:

- ¿Por qué puede hallarse  $P_{Hg}$  por  $l_{Hg} \cos \alpha$ ?
- Si tocas con la mano el lugar donde se encuentra sostenida la cámara de gas, ¿qué pasará?, ¿por qué? ¿Cómo influye tocar la cámara que contiene el gas con la mano en el resultado de la comprobación de la ley de Boyle-Mariotte?
- Explica los resultados del producto  $p \cdot l$  y por qué no da exactamente constante.

## TRABAJO DE LABORATORIO 2 Comprobación de la ecuación de estado del gas ideal

*Instrumentos y materiales:* Tubo de Boyle-Mariotte, base soporte, pinzas, doble nuez, regla graduada en milímetros o papel milimetrado, termómetro entre  $10^\circ\text{C}$  y  $100^\circ\text{C}$  aproximadamente, barómetro aneróide u

otro barómetro. probeta de 250 mL. hilo. hornilla eléctrica. base de precipitado de 250 mL.

### *Indicaciones para el trabajo*

Para comprobar la ecuación de estado, es necesario que la relación entre los parámetros  $P$ ,  $V$  y  $T$  de dos estados (1 y 2) por los cuales pase el gas sea:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \text{const.}$$

1. Verifica tal relación con los materiales relacionados, midiendo los parámetros  $P$ ,  $V$  y  $T$  para una posición horizontal, a temperatura ambiente y para otra vertical dentro de agua previamente calentada.

## *2.8 Aplicación de las leyes de los gases a la interacción entre un líquido y su vapor. Presión de vapor saturado*

Como ya sabemos, la superficie de un líquido constituye un obstáculo para la salida libre de las moléculas de su seno. No obstante, moléculas suficientemente veloces escapan siempre hacia el exterior, formando el vapor del líquido correspondiente. ¿Podremos describir el comportamiento del vapor con ayuda de nuestros conocimientos?

En la figura 2.5 se representa un líquido en un recipiente, en el cual se dispone de un émbolo que permite comprimir el vapor que se encuentra por encima de un líquido.

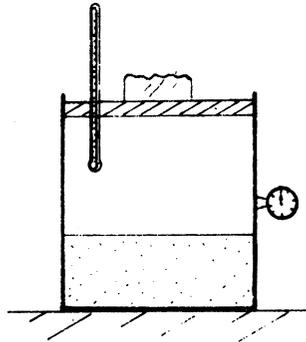


Fig. 2.5

La experiencia demuestra que si comprimimos el vapor a diferentes temperaturas, se obtiene una relación entre la presión y  $T$  como la que se muestra en la figura 2.6.

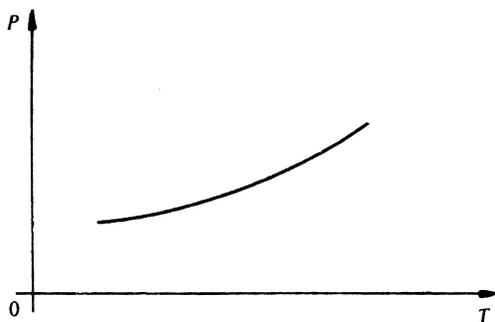


Fig. 2.6

Es decir, para cada temperatura del sistema existe un valor de la presión del vapor en equilibrio con el líquido. A esta presión se le denomina *presión de vapor saturado* y, como su nombre indica, se refiere a la presión de la mayor cantidad de vapor que se admite a esa temperatura; el recipiente se ha "saturado" del vapor correspondiente. Es decir, la presión del vapor en equilibrio con el líquido depende solo de la temperatura a la que se encuentre el vapor.

En la tabla 2.2 se presentan los valores de la presión y la masa por metro cúbico, de vapores de agua saturados, en función de la temperatura

Tabla 2.2

$t$ (°C)	$P$ (mm de Hg)	$m$ (g/m <sup>3</sup> )	$t$ (°C)	$P$ (mm de Hg)	$m$ (g/m <sup>3</sup> )
0	4,6	4,8	16	13,6	13,6
1	4,6	5,1	17	14,5	14,3
2	5,3	5,6	18	15,5	15,4
3	5,7	6,0	19	16,5	16,6
4	6,1	6,4	20	17,5	17,3
5	6,5	6,9	21	18,5	18,5
6	7,0	7,3	22	19,8	19,4
7	7,5	7,8	23	21,1	20,8
8	8,0	8,2	24	22,4	21,8
9	8,6	8,9	25	23,8	23,2
10	9,2	9,4	26	25,2	24,4
11	9,8	10,0	27	26,7	25,9
12	10,5	10,7	28	28,4	27,2
13	11,2	11,5	29	30,1	28,8
14	12,0	12,1	30	31,8	30,3
15	12,8	12,9			

Si tomamos un recipiente con agua en una habitación en la cual se ha eliminado casi todo el vapor de agua, es decir, se ha deshumedecido, ¿se evaporará toda el agua o parte de ella?

La respuesta a esa pregunta requiere que tengamos en cuenta el concepto presión de vapor saturado. Si la habitación está a 20 °C, la presión de vapor saturado que le corresponde según la tabla es 17,5 mm de mercurio. Esto significa que se evaporará agua del recipiente hasta que se alcance una presión equivalente a la ya señalada, y no mayor. La presión del vapor en una habitación dada puede ser menor a la del vapor saturado, puesto que depende de la masa de líquido evaporada a la temperatura dada.

¿Contradice este hecho la ley de los gases,  $PV = nRT$ ? ¿Cómo explicar este fenómeno?

No hay contradicción alguna. Analicemos este proceso en detalle.

Durante la evaporación del líquido una parte pasa a vapor. Por supuesto, debido al carácter desordenado del movimiento de las moléculas del gas, algunas de ellas también retornan al líquido. En un recipiente cerrado, se llega a establecer un equilibrio dinámico entre las moléculas que salen y las que retornan al líquido.

De forma tal que, en el vapor del líquido se cumple que:

$$PV = nRT \quad \text{o} \quad PV = \frac{N}{N_A} RT.$$

Cuando comprimimos el vapor, a la misma temperatura, disminuimos  $V$ . Pero, al mismo tiempo, disminuye el número  $N$  de moléculas en el vapor, ya que un número mayor de ellas retorna al líquido y se impide la salida de moléculas, de forma tal que la presión permanece constante.

En este caso estamos aplicando la expresión  $PV = \frac{N}{N_A} RT$  a un proceso en el que varían simultáneamente el volumen y el número de moléculas. Por eso, la presión de vapor saturado depende solo de la temperatura.

Por ejemplo, la presión de vapor de agua en la atmósfera no siempre alcanza los valores de la presión de vapor saturado. La ropa no se seca en los días "húmedos" precisamente porque la cantidad de vapor de agua en el aire es alta y solo puede evaporarse cierta cantidad de líquido hasta que se alcance la presión de vapor saturado.

## 2.9 Aplicación de la dependencia de la presión del vapor saturado con la temperatura

### *Explicación del rocío*

Los fenómenos antes estudiados nos permiten explicar la aparición del rocío. El rocío no es más que la condensación de vapor de agua atmosférica durante la noche. ¿Por qué durante la noche? Por el descenso de temperatura que tiene lugar.

Entonces debemos explicar la aparición de agua durante el descenso de la temperatura nocturna. Esa agua obviamente se obtiene de la atmósfera por condensación de vapor.

Auxiliémonos con la gráfica de la variación de presión con la temperatura (fig. 2.7).

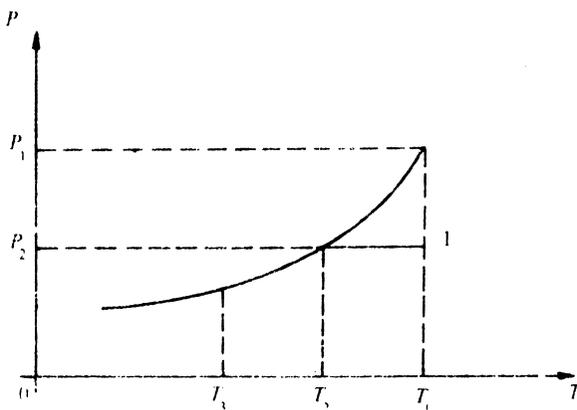


Fig. 2.7

El punto 1, correspondiente a la temperatura  $T_1$ , representa el valor de la presión de vapor del agua durante la noche. Este valor es inferior al valor de la presión de vapor saturada del agua a esa temperatura  $T_1$ . A medida que transcurre la noche, la temperatura va descendiendo, sin que varíe por ello la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. Sin embargo, según la curva, las presiones de vapor saturada de agua para cada nueva temperatura es cada vez menor, hasta que, para la temperatura  $T_2$ , el valor de la presión de vapor máxima de agua en la atmósfera es igual a la que provoca el vapor atmosférico.

En consecuencia, si la temperatura continúa disminuyendo, por ejemplo, hasta  $T_3$ , entonces una parte del vapor de agua de la atmósfera, que se ha venido enfriando, se condensa hasta que quede una parte de vapor cuya presión es igual a la presión de vapor saturada a la temperatura  $T_3$ .

Por eso no siempre hay rocío, pues no siempre la presión del vapor de agua en la atmósfera llega a ser mayor que la que corresponde a la temperatura del amanecer.

La temperatura en la que comienza a producirse el rocío se denomina *punto de rocío*.

#### *Cálculo de la humedad atmosférica*

Para calcular la **humedad** del aire se utilizan dos conceptos: primero, la **humedad absoluta**, que se mide por la masa de vapor de agua que contiene  $1 \text{ m}^3$  de aire; y segundo, la **humedad relativa**, que se mide por la

relación entre la masa de vapor de agua que hay en  $1 \text{ m}^3$  de aire y la masa de vapor necesaria para saturar  $1 \text{ m}^3$  de aire a la temperatura dada, expresada en tanto por ciento.

Expresemos la humedad relativa en función de las presiones de vapor correspondientes.

Si  $P$  es la presión del vapor atmosférico y  $P_s$  es la presión del vapor saturado a la temperatura  $T$ , entonces la humedad relativa será:

$$H_r = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa de vapor saturado}} \cdot 100 \%$$

Definamos a  $\mu$  como la masa molar del agua. Entonces:

$$\text{masa de vapor} = \frac{P_s \mu V}{R T}$$

$$\text{masa de vapor saturado} = \frac{P_s \mu V}{R T}$$

por lo tanto:

$$H_r = \frac{P}{P_s} \cdot 100 \%$$

Como se puede comprender, la humedad relativa es una buena medida de cuán húmedo está el aire, ya que tiene en cuenta no la masa absoluta de vapor de agua, sino que dice el porcentaje que esta ocupa respecto a la masa que admite el aire a la temperatura dada.

En nuestro país la humedad relativa varía con la época del año, pero tiene altos valores en comparación con otros países. Con frecuencia está por encima del 80%.

## Tareas

23. ¿A qué llamamos presión de vapor saturado?
24. ¿Cómo se explica que la presión de vapor saturado no depende del volumen?
25. ¿Se puede aplicar la ley de los gases  $PV = nRT$  a la descripción del vapor en equilibrio con el líquido?
26. Explique cómo se produce el rocío.
27. ¿A qué se denomina humedad relativa y cómo se puede determinar?

## Tareas generales del capítulo

1. Cita dos propiedades de los gases que demuestren la existencia del movimiento molecular.

2. Si en un recipiente cerrado que tiene un volumen fijo, una temperatura fija y cierta cantidad de gas, se inyecta una nueva cantidad de gas, la presión aumenta, y si se extrae gas, la presión disminuye. ¿Por qué?
3. En un gas real sometido a experimento, ¿podría hallarse una relación de la forma  $\frac{P}{T} = \text{constante}$  para cualquier temperatura cuando  $V$  es constante? Explica.
4. En una mezcla de gases que no reaccionan químicamente entre sí, cada uno ejerce su presión independiente de los demás (ley de Dalton). ¿Está de acuerdo este hecho con la teoría cinética? Explica.
5. Si dos cuerpos cualesquiera que tienen distintas temperaturas se ponen en contacto, siempre fluye calor del cuerpo más caliente (mayor temperatura) al cuerpo más frío (menor temperatura). ¿Cómo se explicaría este fenómeno, según la teoría cinética, si los dos cuerpos fueran gases ideales?
6. Se comprimen  $10^3 \text{ cm}^3$  de gas a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  y presión normal ( $1,01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ), hasta que su volumen se reduce a  $20 \text{ cm}^3$ , permaneciendo constante la temperatura. ¿Cuál es la nueva presión del gas?
7. En un recipiente cuyo volumen es de  $3,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  se tiene un gas con una presión de  $2,02 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ . Si se conecta el recipiente con otro cuya capacidad es de  $2,2 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ , y en el cual se ha hecho el vacío, ¿cuál es la presión final del gas cuando alcanza el equilibrio? Considera que la temperatura se mantuvo constante.
8. La temperatura de un gas aumenta de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , permaneciendo la presión constante. Si el volumen inicial era de  $100 \text{ cm}^3$ , calcula el volumen final.
9. Un gas ocupa, a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , un volumen de  $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$ . Si al calentarlo a presión constante se dilata en  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , calcula su temperatura final.
10. El volumen de un gas, a la presión de  $1,01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  y a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  es de  $4,3 \text{ m}^3$ . ¿Cuál será su volumen si la temperatura pasa a ser  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  a presión constante?
11. Un gas ocupa  $600 \text{ cm}^3$  a  $-23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si su volumen aumenta en una tercera parte a presión constante, calcula la variación de temperatura.
12. La presión de un gas es de  $2,02 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  a  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si la presión se reduce a  $5,05 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$  a volumen constante, calcula su temperatura final.
13. Un gas ejerce una presión de  $8,08 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Calcula la variación de temperatura necesaria para que la presión aumente en  $2 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ , a volumen constante.

14. Un gas se encuentra a 30 °C. ¿Cuál será su nueva temperatura si su presión se reduce en un 20 % a volumen constante?
15. Durante un experimento de química se obtienen 280 cm<sup>3</sup> de dióxido de carbono a una presión de  $1,01 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> y una temperatura de 27 °C. ¿Cuál será su volumen a  $2,02 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> y 0 °C?
16. Un gas, cuyo volumen es 300 cm<sup>3</sup> y está sometido a una presión de  $1,06$  N/m<sup>2</sup> y una temperatura de -13 °C, se dilata 2 000 cm<sup>3</sup> cuando su temperatura se eleva en 24 °C. Calcula la variación de la presión.
17. Un gas ocupa  $2 \cdot 10^{-2}$  m<sup>3</sup> a la presión de  $0,91 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> y 17 °C. Calcula la variación de temperatura si el volumen se reduce a  $5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup> y la presión se duplica.
18. Una masa de hidrógeno ocupa 60 cm<sup>3</sup> en determinadas condiciones de presión y temperatura. Su presión se triplica y su temperatura absoluta se duplica. ¿Cuál será su volumen?
19. Un recipiente contiene aire a la presión atmosférica y 20 °C. ¿A qué temperatura hay que elevarlo para que expulse la mitad del aire que contiene?
20. ¿Qué volumen ocupa 1 mol de gas a la presión de  $1,01$  N/m<sup>2</sup> y a la temperatura de 10 °C?
21. ¿Cuántos moles de oxígeno hay en un recipiente de  $10^{-3}$  m<sup>3</sup> de volumen que se halla a la presión de  $1,01 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> y a la temperatura de 40 °C?
22. Calcula el número de moléculas de un gas contenido en un volumen de 1 cm<sup>3</sup>, a una presión de  $10^5$  N/m<sup>2</sup> y a una temperatura de 300 K.
23. Calcula la energía cinética media de las moléculas de un gas ideal a las temperaturas:
  - a) - 50 °C;
  - b) 0 °C
  - c) 1 000 °C
24. ¿Cuál es la energía de 1 mol de gas ideal a las temperaturas del problema 23?
25. ¿A qué temperatura debe estar 1 mol del gas ideal para tener una energía igual a la energía potencial de una esfera de 1 g de masa a una altura de 100 m?
26. Calcula la temperatura a la cual la velocidad cuadrática media de las moléculas de hidrógeno es igual a la segunda velocidad cósmica.
27. Una burbuja de aire, de 20 cm<sup>3</sup> de volumen, está en el fondo de un lago a 40 m de profundidad, donde la temperatura es 40 °C. La burbuja se eleva a la superficie, que está a 20 °C. Considera que la temperatura a 1 m de profundidad es de 20 °C. ¿Cuál será el volumen de la burbuja a esta profundidad? La presión atmosférica es de  $10^5$  N/m<sup>2</sup>.

28. ¿Cómo podrías medir la profundidad del agua en una piscina si cuentas solo con una probeta graduada? Considera que la temperatura es la misma dentro y fuera del agua, y la presión atmosférica es de  $10^5 \text{ N/m}^2$ .
29. La masa de la molécula de hidrógeno es de  $3,32 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ . Si en  $1 \text{ s}$ ,  $10^{23}$  moléculas de hidrógeno chocan contra  $2 \text{ cm}^2$  de pared, formando un ángulo de  $45^\circ$  con la normal y moviéndose a una velocidad de  $10^5 \text{ cm/s}$ , ¿qué presión ejercen sobre la pared?
30. En un recipiente de  $10 \text{ L}$  de capacidad hay un gas a la temperatura de  $30^\circ \text{C}$  y  $5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  de presión (fig. 2.8). Este recipiente está comunicado con otro que tiene la mitad de su volumen y que está también a la misma temperatura y presión. Si se abre la llave que comunica ambos recipientes, ¿cuál será la presión después que se alcance el equilibrio? Considera que la temperatura no cambia en el proceso.

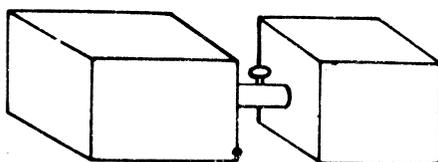


Fig. 2.8

31. En la figura 2.9 se representa un ciclo de transformaciones en el diagrama  $P$ - $V$ . Representa este ciclo con un diagrama  $P$ - $T$  y en uno  $V$ - $T$ .

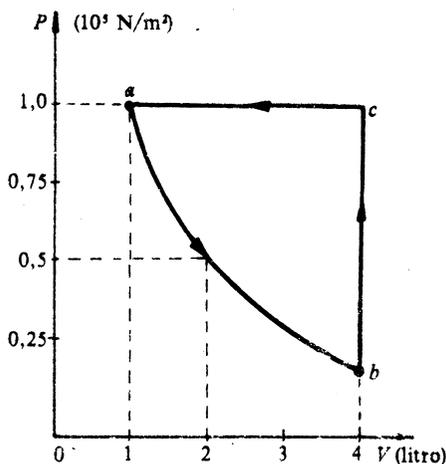


Fig. 2.9

32. Un gas se encontraba en un recipiente de  $2 \text{ dm}^3$  de capacidad, a  $10^5 \text{ N/m}^2$  de presión y  $100 \text{ K}$  de temperatura. Se le aumentó la tem-

peratura, a volumen constante, hasta 200 K; luego, manteniendo esta temperatura constante se le duplicó el volumen, por último, se le devolvieron las condiciones iniciales mediante un proceso isobárico. Representa este ciclo en un diagrama  $P-V$  y en uno  $P-T$ .

33. Representa en un diagrama  $P-V$  el ciclo que se muestra en el diagrama  $P-T$  de la figura 2.10 si el volumen del estado  $a$  es de  $1 \text{ dm}^3$ .

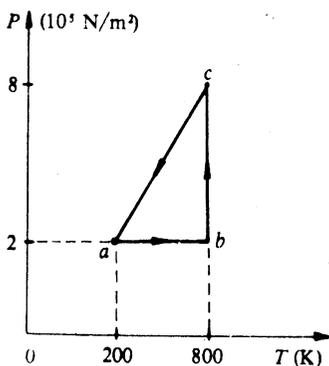


Fig. 2.10

34. Describe las transformaciones a que fue sometido el gas del problema 33.
35. En el diagrama de la figura 2.11 la temperatura del estado  $a$  es de 200 K. Teniendo en cuenta esto y los datos de la figura, responde:
- ¿qué procesos se representan?;
  - ¿cuáles son los parámetros de estado ( $P$ ,  $V$ ,  $T$ ) de los puntos representados por  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ ?;
  - ¿con cuántos moles de gas se ha trabajado?

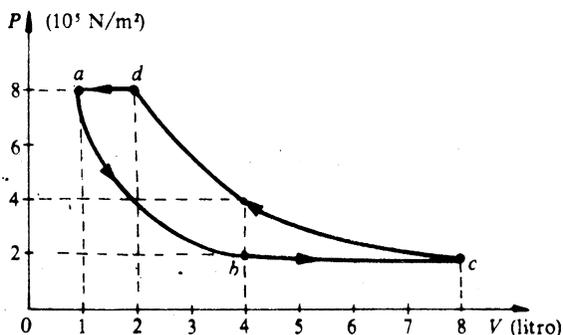


Fig. 2.11

36. Calcula la energía cinética del gas del problema anterior:
- en el estado  $a$ ;
  - en el estado  $c$ .

37. Demuestra, a partir de las ideas básicas de la teoría cinético-molecular aplicada al gas ideal, que:

$$P = \frac{1}{3} mn_0\bar{v}^2$$

donde  $P$  es la presión,  $m$  la masa de una molécula,  $n$  el número de moléculas por unidad de volumen y  $\bar{v}^2$  es la velocidad cuadrática media.

38. A partir de la ecuación del problema anterior, demuestra que:

$$PV = nRT$$

y explica la significación de cada término.

39. Demuestra que la energía cinética de  $n$  moles de gas ideal se puede determinar por la fórmula:

$$U = \frac{3}{2} nRT$$

40. ¿Es posible aplicar las leyes de Boyle-Mariotte y Gay-Lussac a los vapores saturados?
41. Construye una gráfica de la dependencia de la presión del vapor saturado con la temperatura, de acuerdo con los datos que se dan en la tabla 2.3.

Tabla 2.3

Temperatura (°C)	Presión (atm)
0	0.006
50	0.17
100	1.03
150	4.8
200	16
250	41
300	88
350	169
374	225

Utilizando la gráfica, halla el vapor de la presión de los vapores saturados para una temperatura de 175 °C. ¿Para qué valor de la temperatura la presión es de 10 atm?

42. El vapor saturado de un líquido se encuentra a una temperatura de 100 °C y ocupa un determinado volumen. ¿Cómo varía la presión del vapor si su volumen se reduce a la mitad, permaneciendo la temperatura constante?

43. La humedad absoluta del aire a una temperatura de  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  es  $9\text{ g/m}^3$ .  
¿Cuál es la humedad relativa del aire?
44. Halla el punto de rocío para una temperatura del aire de  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa de  $70\%$ .
45. ¿Para qué temperatura del aire la humedad relativa es igual al  $50\%$ , si es conocido que el punto de rocío es  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
46. En una habitación la humedad relativa del aire, para una temperatura de  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , constituye el  $65\%$ . ¿Cómo varía esta humedad para una disminución de la temperatura de  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , si permanece constante la humedad absoluta?
47. La humedad relativa para una temperatura de  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  es el  $80\%$ . ¿Qué cantidad de agua en forma de rocío se obtiene de cada metro cúbico de aire, si la temperatura disminuye hasta  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

# Capítulo 3

## FENÓMENOS TÉRMICOS Y FUNDAMENTOS DE TERMODINÁMICA

### 3.1 *Introducción a la termodinámica*

Al iniciar los estudios de la física molecular, nos referimos a la importancia que tenían para el hombre los fenómenos térmicos, y cómo en estos se revelaba una forma de movimiento físico: el movimiento térmico. En el estudio realizado hasta ahora de estos fenómenos, se ha prestado atención a la estructura interna de la sustancia y su relación con sus propiedades externas. Para esto fue necesario recoger y estudiar la información experimental que nos brindara la descripción macroscópica de los sistemas físicos analizados. Este camino no es el producto de la casualidad. Es imprescindible y necesario aprender a describir cuantitativamente los procesos térmicos que se llevan a cabo en los cuerpos macroscópicos antes de poder obtener las leyes que los rigen y elaborar una teoría que los explique.

La parte de la física que estudia las leyes generales bajo las cuales los fenómenos térmicos ocurren, se denomina termodinámica. Dentro de los análisis de los procesos térmicos tiene gran importancia la determinación de la ecuación de estado para el sistema objeto de estudio. Utilizando esta ecuación, podemos determinar las magnitudes que caracterizan el sistema durante el desarrollo de un proceso, si conocemos las condiciones externas y el estado inicial. Hasta ahora, solo sabemos la ecuación de estado del gas ideal, que obtuvimos con ayuda de datos experimentales.

Como hemos visto, la temperatura caracteriza el estado de equilibrio de un sistema con respecto a los restantes y tiene, además, un carácter estadístico, es decir, es una característica de todo el sistema, y para cualquier punto de este su valor es el mismo si el sistema está en equilibrio térmico.

### 3.2 *Equilibrio termodinámico*

Como hemos dicho, la termodinámica describe las propiedades de la sustancia ligadas con el movimiento térmico desde un punto de vista energético, para los sistemas en equilibrio.

Un sistema se encuentra en equilibrio termodinámico cuando los valores medios de las magnitudes macroscópicas que determinan su estado son independientes del tiempo. Evidentemente esto no niega las posibles variaciones de dichas magnitudes, que se producen por el gran número de moléculas que poseen los cuerpos: por ejemplo, la presión en un gas

varía con el tiempo, pues de forma rápida se efectúan pequeñas oscilaciones de sus valores respecto a un valor medio; igualmente sucede con otras magnitudes.

Una vez que el sistema alcance el equilibrio, no influyen en él las condiciones en las que se encontraba antes. Así, una vez que la corriente se establece en un circuito, esta no se ve afectada por los procesos de inducción que tuvieron lugar al cerrar el interruptor y que hicieron que la corriente no se estableciera rápidamente; de la misma forma, el proceso de enfriamiento de un trozo de hierro calentado, al ser colocado en un recipiente con agua, no se ve afectado, una vez que se alcanza el equilibrio, por las condiciones en que este se estableció.

Con ayuda de las leyes de la termodinámica podremos conocer mejor cómo se llevan a cabo los procesos físicos en los cuerpos.

## Tareas

1. ¿Qué estudia la termodinámica?
2. ¿Cuándo un sistema está en equilibrio termodinámico?

### 3.3 *Procesos reversibles e irreversibles*

Hasta ahora nos hemos familiarizado con tres tipos diferentes de procesos: isotérmicos, isobáricos e isocóricos. Pero no puntualizamos una cuestión importante: se ha considerado que todos estos procesos ocurren muy lentamente. Por ejemplo, supusimos que la compresión de un gas en un cilindro ocurre tan suavemente que en cualquier momento se puede establecer en el sistema un nuevo estado de equilibrio con nuevos valores de la presión y del volumen.

**Si después de una lenta compresión permitimos al gas expandirse lentamente, entonces el sistema pasará por los mismos estados de equilibrio que tuvo durante la compresión, y volverá al estado inicial sin que se modifique el estado de los cuerpos externos al sistema. Por esta causa es que estos procesos se denominan *reversibles*.**

Precisamente los estados de equilibrio térmico y los procesos reversibles son objeto de investigaciones de primer orden en la teoría de los fenómenos térmicos. En este caso, la formulación de las leyes que los rigen es muy simple.

El proceso de variación de un estado, en el cual no se mantiene el equilibrio del sistema o se modifica el estado de los cuerpos externos, se llama *irreversible*.

Sea un pistón que comprime muy rápidamente un gas en un cilindro. Entonces el equilibrio entre las distintas partes del gas se destruye. Sólo después de cierto tiempo, el gas llega a un nuevo estado de equilibrio; tal proceso es irreversible. En compresiones rápidas la presión debajo del

pistón, en el primer momento es mayor que en el resto del cilindro; mientras que en una expansión rápida ocurre lo contrario. O sea, los estados por los que pasa el gas en una compresión son diferentes a los de una expansión.

Los procesos reales no ocurren de forma infinitamente lenta y, por tanto, son irreversibles. Las condiciones para que se realice un proceso reversible son idealizaciones de los procesos reales; por ejemplo, el movimiento de un cuerpo rígido o la fluidez de un líquido ideal en la mecánica son modelos ideales de procesos reales; si los procesos térmicos son suficientemente lentos, estos pueden considerarse como una buena aproximación de procesos reversibles.

## Tareas

3. ¿Qué entiendes por proceso reversible?
4. ¿Cómo se debe realizar la compresión de un gas que puede ser considerada como proceso reversible? ¿Por qué?

### 3.4 *El trabajo en la termodinámica*

Nos familiarizaremos ahora más detalladamente con el proceso de variación del estado de un cuerpo o de un sistema de cuerpos. El cambio de estado de un sistema se produce mediante intercambio de energía. Hay dos tipos de causas, sustancialmente diferentes, que llevan a la variación del estado de los cuerpos. La primera de ellas es mediante la realización de trabajo.

Observemos el sistema constituido por un gas en un cilindro, bajo un émbolo. Se puede variar el volumen, la presión y la temperatura del gas moviendo el émbolo hacia abajo (fig. 3.1a). En este caso, la variación del estado del gas está condicionada por la acción macroscópica de un cuerpo (émbolo) que actúa sobre el gas. Aquí, la fuerza con que actúa el émbolo sobre el gas  $\vec{F}$  realiza un trabajo igual en valor, pero de signo contrario, al que realiza el gas sobre el émbolo.

Si suponemos que la presión del gas  $P$  permanece constante, y si la variación del volumen se pone de la forma:

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

resulta que el trabajo realizado por el gas se calcula como:

$$W = P \Delta V \quad (3.1)$$

El trabajo realizado por el gas tendrá signo negativo en la compresión del gas, pues  $\Delta V < 0$ , y la fuerza  $P$ , que ejerce el gas sobre el émbolo,

realiza un trabajo negativo. En caso de que  $\Delta V > 0$ , entonces el trabajo realizado es positivo (fig. 3.1b).

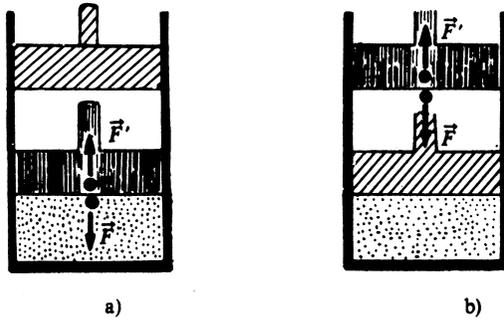


Fig. 3.1

La expresión obtenida del gas en el cilindro no es aplicable solo para una compresión o una expansión, sino también para cualquier variación arbitraria del volumen del sistema en una cantidad  $\Delta V$  pequeña.

Al trabajo que realiza el sistema al producirse una variación de volumen se le puede dar una interpretación geométrica. Si se traza una gráfica de la dependencia de la presión con el volumen (fig. 3.2), el área situada bajo esa curva hasta el eje  $V$ , y entre las líneas  $ab$  y  $cd$ , correspondientes a las presiones  $P_1$  en el estado inicial y  $P_2$  en el estado final, será igual al trabajo durante la variación del volumen de  $V_1$  a  $V_2$ . En la figura 3.2a, el área rayada bajo la curva corresponde al trabajo realizado a presión constante. En realidad, el trabajo en una pequeña variación del volumen  $\Delta V$  es numéricamente igual a  $W_i = P_i \Delta V_i$  (donde  $P_i$  es el valor de la presión en el volumen  $V_i$ , como se ve en la fig. 3.2b). Toda el área de la figura  $abcd$  se puede considerar como la suma de las áreas de estos rectángulos elementales.

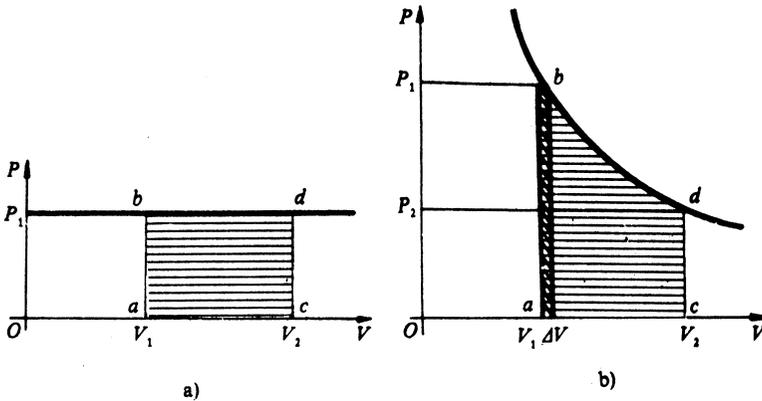


Fig. 3.2

## Tareas

5. Plantea la fórmula que permite calcular el trabajo en termodinámica y explica cuál es la significación de cada término.
6. Cuando un gas se comprime, ¿qué signo tiene el trabajo del agente que lo comprimió? Explica.
7. En la situación que describe la pregunta 6, ¿qué signo tendrá el trabajo realizado por el gas? Explica.
8. Considera que un gas se comprime a presión constante,  $P$ , desde el volumen  $V_0$  al  $V_1$ . Representa este proceso gráficamente y señala en la gráfica el trabajo realizado.

### 3.5 Equivalencia entre cantidad de calor y trabajo

Con experimentos directos se demuestra que el calentamiento de un cuerpo puede ocurrir sin comunicarle cantidad alguna de calor. Convencerse de eso no es difícil. Tomemos una goma corriente y frotémosla energícamente sobre un papel. Si se pone después sobre la mejilla, se sentirá que la goma se ha calentado apreciablemente.

En grandes proporciones, un fenómeno semejante fue observado también en 1798 por el científico alemán Rumford. La perforación de un cañón en el cual se había introducido agua, hizo que ella comenzara a ebullición. ¿De donde salió aquí el calor? Rumford, valientemente, supuso que el agua se calentaba en el proceso de realización de trabajo en la perforación (horadación).

Es bien conocido que, sin lubricación que disminuya el rozamiento, el trabajo de las fuerzas de fricción conduce a tal calentamiento que, por ejemplo, en el cigüeñal de un automóvil, los rodillos se funden. En los perforadores modernos y en los tornos, el calentamiento de la broca o la cuchilla es tan grande que, para su enfriamiento, se utilizan líquidos especiales.

Con ayuda de la fricción de palos secos de árboles se puede producir fuego, o sea, calentar la madera hasta una temperatura superior a la de combustión. Esto lo sabían y lo utilizaban los primitivos aborígenes. Es cierto que en este caso se necesita de gran habilidad y es poco probable que lo podamos hacer solos, sin un entrenamiento adecuado.

Estos y muchos otros experimentos similares muestran que un calentamiento igual puede ser obtenido debido a la transmisión de alguna cantidad de calor o la realización de un trabajo. Así como en la mecánica el trabajo mecánico realizado es igual a la variación de la energía del cuerpo, en termodinámica es necesario considerar la cantidad de calor como una medida de la variación de la energía del sistema. El calor, al igual que el trabajo, es una forma de variar la energía de un sistema.

El trabajo caracteriza cuantitativamente la variación de la energía del sistema que está acompañada de traslaciones macroscópicas de los cuer-

pos (el movimiento de un pistón, la rotación de un eje, una perforadora, etcétera). La cantidad de calor es una característica de la variación de la energía que no está acompañada de traslaciones macroscópicas de los cuerpos (calentamiento de un gas en un cilindro, la transferencia de calor en el calorímetro, etc.). El trabajo y la cantidad de calor se miden en la misma unidad: el *joule*.

Sin embargo, la equivalencia entre la cantidad de calor y el trabajo fue completa y rigurosamente demostrada solo después de que muchos experimentos permitieron deducir que, en la liberación de calor debido a la realización de trabajo, un trabajo de 4,19 J siempre está acompañado de la obtención de una cantidad de calor igual a 1 cal; y, por el contrario, en la realización de trabajo por cuenta del calor (por ejemplo, con ayuda de una máquina de vapor) 1 cal permite realizar un trabajo de 4,19 J.

El número 4,19 J/cal (más exactamente 4,1868 J/cal) llamado *equivalente mecánico del calor*, es el factor que reduce las unidades térmicas a las mecánicas.

En el SI la cantidad de calor se mide en joule y el calor específico en joule/(kilogramo · grado).

## Tareas

9. ¿Qué diferencia existe entre el calor y el trabajo?
10. ¿Qué significa el equivalente mecánico del calor?

### 3.6 Energía interna

La cantidad de calor entregada o extraída a un cuerpo, del mismo modo que el trabajo, representa una medida de la variación de su energía. Pero, ¿de qué energía? En la realidad, la comunicación a un sistema de alguna cantidad de calor o, al contrario, la entrega de calor por este, no varía directamente la energía mecánica del sistema. Si, por ejemplo, calentamos agua en un vaso de precipitados, no varía por ello la velocidad del centro de masas, ni tampoco la energía potencial de interacción del agua con los cuerpos externos.<sup>1</sup> Sin embargo, varía su *energía interna*. Aun cuando el centro de masas del cuerpo esté fijo (la energía cinética del movimiento del cuerpo, como un todo, es cero) y no interactúe con otros cuerpos (la energía potencial es igual a cero), el cuerpo, de todas formas, posee energía interna.

Desde el punto de vista de la teoría científico-molecular, la energía interna de un cuerpo es igual a la suma de la energía cinética del movimiento caótico de todas las moléculas respecto al centro de masa del

<sup>1</sup> Si despreciamos la subida insignificante del centro de gravedad debido a la dilatación térmica.

cuerpo, más la energía potencial media de interacción de todas las moléculas, unas con otras (pero no con otros cuerpos).

En el calentamiento de un cuerpo nosotros aumentamos su energía interna. De aquí se deduce que la energía interna del cuerpo depende, en general, de la temperatura y el volumen, pues con la variación del volumen cambian también las distancias entre las moléculas del cuerpo y, por tanto, la energía potencial de su interacción. Para el caso de un gas que se considera ideal, la energía interna, como hemos visto, depende sólo de la temperatura.

De la misma forma que la energía mecánica de una piedra lanzada depende de su velocidad y altura en relación con la superficie de la tierra, la energía interna, en termodinámica, depende del valor de las magnitudes termodinámicas (parámetros del sistema  $T$  y  $V$ ). Así, como estos parámetros caracterizan el estado del sistema, se puede decir que la energía interna define el estado del sistema.

Una parte de la energía interna de un sistema se puede transformar en energía mecánica. Si se calienta agua en un tubo de ensayo que esté tapado con un corcho, entonces la energía interna del agua aumenta. Después de comunicar una suficiente cantidad de calor, el agua comenzará a hervir y la presión del vapor aumentará tanto que el corcho saldrá expelido hacia afuera (fig. 3.3). La energía cinética del corcho aumenta a causa de la energía interna del vapor. Al expandirse, el vapor de agua realiza un trabajo y se enfría. Su energía interna, de esta forma, disminuye.

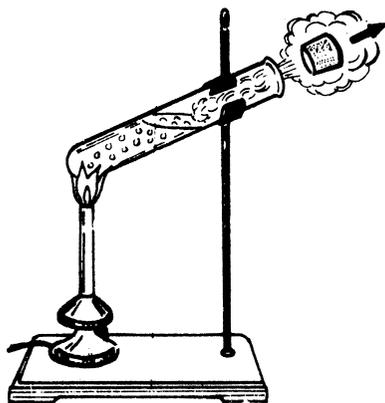


Fig. 3.3

Por el contrario, durante el proceso de realización de trabajo por las fuerzas de fricción en un sistema que esté aislado del medio ambiente y que, por lo tanto, no recibe energía, al disminuir la energía mecánica ocu-

re un calentamiento de los cuerpos. En este caso, a la disminución de la energía mecánica corresponde un aumento de la energía interna.

## Tareas

11. ¿Cómo se puede aumentar la energía interna de un sistema?
12. ¿De qué parámetros microscópicos depende la energía interna de un sistema?
13. ¿De qué tipo es la energía interna de un gas ideal, cinética o potencial? Explica.
14. En los procesos isotérmicos, ¿varía la energía interna del gas ideal? Explica

## TRABAJO DE LABORATORIO 3 Formas de variación de la energía interna

*Instrumentos y materiales:* Hornilla, pedazo de tela, moneda.

*Indicaciones para el trabajo*

1. Propón varias formas de variar la energía interna de una moneda y comprueba tu proposición de forma cualitativa y experimental, si cuentas con los materiales antes señalados.
2. Explica, en cada caso, a expensas de qué energía hiciste variar la energía interna del cuerpo (moneda)

### 3.7 Primera ley de termodinámica

En los grados anteriores fue bien estudiada la ley de conservación de la energía mecánica. Se demostró que si debido a la interacción de los cuerpos, actúan fuerzas que dependen solo de la distancia, entonces, en el paso del sistema de cuerpos del estado inicial 1 al estado final 2, la variación de energía es igual al trabajo de las fuerzas externas:

$$E_2 - E_1 = W$$

Después de aclarar que a la par de la energía mecánica el cuerpo tiene, además, energía interna que puede variar no solo durante la realización del trabajo, sino también durante la transferencia de calor, la ley de conservación de la energía se puede generalizar a los fenómenos térmicos.

De lo anterior se puede concluir que cuando a un sistema se le entrega una cierta energía, el cambio en el estado termodinámico del sistema puede implicar la variación de la energía interna del sistema o la realiza-

ción de un trabajo por parte de este, o ambas. Es decir, puede producirse una variación de la energía interna y un trabajo por parte del sistema.

Se puede entonces formular la ley de conservación de la energía de la siguiente forma: la variación de la energía interna ( $\Delta U$ ) en el paso de un sistema de un estado a otro, más el trabajo realizado por el sistema ( $W$ ) es igual a la cantidad de calor recibido por el sistema  $Q$ , o sea:

$$Q = W + \Delta U \quad (3.2)$$

Esta es la *primera ley de la termodinámica*. Al utilizar la ecuación 3.2, debemos tener en cuenta que  $Q$  se considera positivo cuando entra calor al sistema y  $W$  es positivo cuando el sistema realiza trabajo.

En algunos casos, cuando el sistema que se analiza está aislado térmicamente de los otros cuerpos que lo rodean ( $Q = 0$ ; es decir, que no intercambia energía con otros cuerpos), la variación de la energía interna puede tener lugar solamente a cuenta del trabajo:

$$\Delta U = -W$$

Estos procesos se denominan *adiabáticos*.

En la teoría de los fenómenos térmicos frecuentemente se analizan cuerpos cuyos centros de masa varían su posición insignificadamente. En estos casos la energía mecánica de los cuerpos prácticamente no varía.

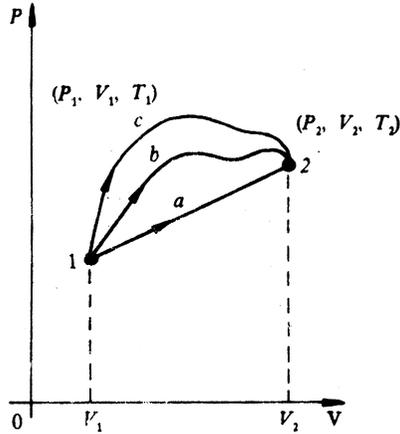
La ley general de la conservación de la energía ha sido obtenida del resultado de la generalización de hechos experimentales; es una ley experimental (empírica).

La primera ley de la termodinámica nos permite determinar la variación de la energía interna durante el paso de un sistema de un estado inicial a otro final.

En un sistema aislado totalmente (o simplemente aislado), es decir, en un sistema en el cual no actúan fuerzas externas ( $W = 0$ ) y que no intercambia calor ( $Q = 0$ ), la energía interna permanece invariable:  $\Delta U = 0$ .

Es importante comprender claramente que el trabajo y la cantidad de calor entregados al sistema determinan la variación de energía de este, pero no son completamente idénticos a la energía. Ellos no caracterizan propiamente el estado de un sistema como la energía interna, sino el proceso de transferencia de energía en el cambio de estado. No se puede decir que en el sistema existe una determinada cantidad de calor o de trabajo. Solamente la energía interna tiene un significado determinado para un sistema.

La energía interna es una función del estado del sistema. Si analizamos, por ejemplo, los procesos representados en la gráfica  $P$ - $V$  para un gas ideal (fig. 3.4), observaremos que el sistema puede pasar del estado 1 (caracterizado por las magnitudes macroscópicas  $P_1$ ,  $V_1$  y  $T_1$ ) al estado 2 (caracterizado por  $P_2$ ,  $V_2$  y  $T_2$ ) por tres procesos diferentes  $a$ ,  $b$  o  $c$ .



**Fig. 3.4**

En estos tres caminos la variación de la energía interna es la misma porque:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

no depende del proceso, sino de los valores inicial y final de  $U$ ; sin embargo, el trabajo realizado en cada caso es diferente (lo cual podemos comprobar si nos fijamos en que el área bajo la curva de los procesos  $a$ ,  $b$  y  $c$  es distinta).

De igual forma, la cantidad de calor que entrega (o cede) el sistema es diferente en cada caso. Tanto el trabajo que se realiza en el sistema como la cantidad de calor que se recibe o entrega, dependen de las vías por las que se lleve a cabo el proceso, lo cual no sucede con la energía interna.

Así, un gas calentado en un cilindro en reposo puede enfriarse sin realizar trabajo, solo cediendo calor a los cuerpos que lo rodean.

Veamos algunas aplicaciones de la primera ley de la termodinámica.

## Problemas resueltos

Analicemos la aplicación de la primera ley de la termodinámica a los procesos isocóricos (a volumen constante) e isobáricos (a presión constante) en un gas ideal.

**1.** Veamos primeramente el caso del proceso isocórico, que ocurre como indica la figura 3.5. Calculemos el calor específico.

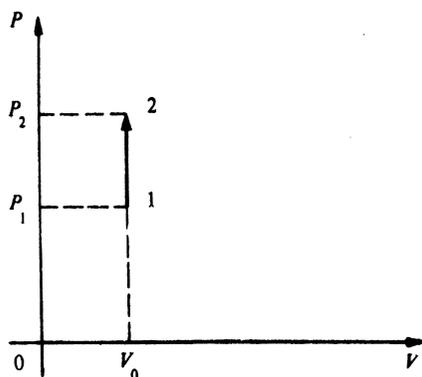


Fig. 3.5

### Solución

En este proceso, el gas pasa del estado 1, caracterizado por los parámetros  $P_1$ ,  $V_1$  y  $T_1$ , al estado 2, caracterizado por la presión  $P_2$ , el volumen  $V_2$  y la temperatura  $T_2$ .

Lo peculiar de este proceso es que el cambio de estado ocurre sin variación de volumen del gas, o sea,  $V_1 = V_2$  y  $\Delta V = 0$  (¿qué ejemplo conoces de procesos similares?). En este caso, sobre el sistema no se realiza trabajo, pues:

$$W = P\Delta V = 0$$

y la ley queda como:

$$Q = W + \Delta U$$

$$Q = \Delta U \quad (3.3)$$

es decir, que toda la energía que se entregue al sistema provoca un incremento de su energía interna.

Como se trata de un gas ideal, su energía interna en cada estado puede calcularse con ayuda de su energía media. Sea  $N$  el número de moléculas del gas, la energía interna del estado 1 será:

$$U_1 = NE_1 = N \frac{3}{2} kT_1$$

multiplicando y dividiendo por el número de Avogadro:

$$U_1 = \frac{N}{N_A} \frac{3}{2} N_A kT_1$$

y como  $\frac{N}{N_A} = n$  es el número de moles, entonces nos queda:

$$U_1 = n \frac{3}{2} RT_1$$

Lo mismo será para el estado de temperatura  $T_2$ , cuya energía interna quedaría:

$$U_2 = n \frac{3}{2} R T_2$$

Por lo tanto:

$$U = U_2 - U_1$$

$$U = n \frac{3}{2} R T_2 - n \frac{3}{2} R T_1$$

$$U = n \frac{3}{2} R \Delta T$$

Expresando  $Q$  de la forma:

$$Q = n c_v \Delta T$$

donde  $c_v$  es el calor específico a volumen constante, y sustituyendo todo en 3.3, nos queda:

$$n c_v \Delta T = n \frac{3}{2} R \Delta T$$

simplificando:

$$c_v = \frac{3}{2} R \tag{3.4}$$

Es decir, el calor específico a volumen constante para un gas ideal tiene un valor de 24,92 J/mol K.

(Si el proceso fuera inverso, de 2 a 1, ¿cómo interpretar la expresión  $Q \doteq \Delta U$ ?)

2. Veamos el caso del proceso isobárico, que tiene una forma como la mostrada en la figura 3.6. Calculemos el calor específico en ese proceso:

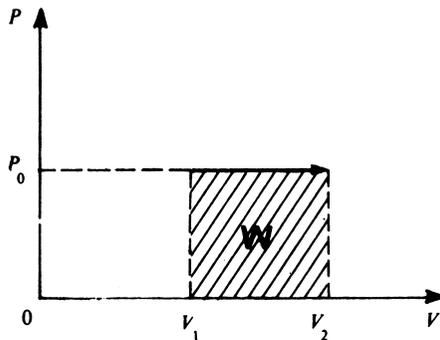


Fig. 3.6

### Solución

En este caso, el gas ideal pasa del estado caracterizado por la presión  $P_0$ , el volumen  $V_1$  y la temperatura  $T_1$ , al estado 2, de presión  $P_0$ , el volumen  $V_2$  y temperatura  $T_2$ .

En este proceso, sobre el gas se realiza un trabajo (representado por  $W$  en la figura) y, como varía la temperatura, también se modifica la energía interna del gas.

Primero determinemos el trabajo realizado sobre el gas.

$$W = P_0 \Delta V$$

$$W = P_0(V_2 - V_1) = P_0V_2 - P_0V_1$$

Con ayuda de la ecuación de estado del gas ideal en los estados 2 y 1, se ve que:

$$P_0V_2 = nRT_2$$

$$P_0V_1 = nRT_1$$

y por tanto:

$$W = nRT_2 - nRT_1$$

$$W = nR\Delta T$$

Por su parte la variación de la energía interna es:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

y como:

$$U_2 = n \frac{3}{2} RT_2$$

$$U_1 = n \frac{3}{2} RT_1$$

entonces:

$$\Delta U = n \frac{3}{2} R\Delta T$$

Si expresamos  $Q$  como:

$$Q = nc_p \Delta T$$

donde  $c_p$  es el calor específico en el proceso de presión constante, y sustituimos esto en la expresión de la primera ley:

$$Q = W + \Delta U$$

nos queda:

$$nc_p \Delta T = nR \Delta T + n \frac{3}{2} R \Delta T$$

Simplificando:

$$c_p = R + \frac{3}{2} R$$

$$c_p = \frac{5}{2} R \quad (3.5)$$

Como ya fue calculado en la ecuación 3.4 que  $c_p = \frac{5}{2} R$ , la expresión anterior podría expresarse como:

$$c_p = c_v + R$$

La aplicación de la primera ley a estos procesos muestra que el calor específico para un gas ideal depende del proceso seguido.

En el caso del proceso isobárico, cuando suministramos calor al sistema, el gas no sólo aumenta su energía interna, sino que es también capaz de realizar cierto trabajo. De forma inversa, si comprimimos isobáricamente un gas (paso del estado 2 al 1), entonces no solo se disminuye la energía interna, sino que cede una cierta cantidad de calor al ambiente.

3. Una masa de gas carbónico de 200 g se encuentra en un cilindro al que se ha acoplado un pistón que puede moverse libremente. El gas se calienta desde la temperatura de 20 °C hasta 109 °C. ¿Qué trabajo realiza el gas durante el calentamiento?

*Solución*

El proceso se lleva a cabo bajo la acción de la presión atmosférica, por lo cual estamos en presencia de un proceso isobárico.

Para el caso de un proceso isobárico:

$$W = P (V_2 - V_1)$$

donde  $V_1$  y  $V_2$  son los volúmenes inicial y final del gas

Si expresamos el volumen en función de la temperatura y de la presión del gas, por medio de la ecuación de estado, obtenemos:

$$V = \frac{nRT}{P}$$

y, por tanto:

$$W = nR(T_2 - T_1)$$

Sustituyendo:

$$W = 3,32 \text{ kJ}$$

## TRABAJO DE LABORATORIO 4 Estudio del equilibrio térmico y del cumplimiento de la ley de conservación de la energía

*Instrumentos y materiales:* Agua, 2 termómetros (entre 10 °C y 110 °C), 2 vasos de precipitado de 200 mL, hornilla, agitador, balanza.

*Indicaciones para el trabajo*

Un líquido caliente posee más energía interna que otro menos caliente. Al unir ambos, el de mayor energía cede cierta cantidad al otro. Esta transferencia ocurrirá hasta que se igualen las temperaturas de ambos líquidos o de toda la mezcla. De este análisis se desprende que la cantidad de calor cedido por el cuerpo más caliente se puede hallar por:

$$Q_c = m_1 c_1 \Delta t_1$$

y la cantidad de calor absorbida por el líquido menos caliente:

$$Q_a = m_2 c_2 \Delta t_2$$

1. Toma dos volúmenes diferentes de agua y viértelos en los vasos de precipitado. Determina sus masas.
2. Calienta uno de los volúmenes de líquido hasta una temperatura de 60 °C.
3. Mide la temperatura del agua del otro vaso.
4. Mezcla ambos volúmenes de agua, agitando la mezcla, determina la temperatura de equilibrio (temperatura final).
5. Anota en la tabla 3.1 los valores de las masas, los calores específicos y las temperaturas inicial y final de los líquidos.
6. Calcula los valores de energía correspondientes al calor cedido por el líquido más caliente y el calor absorbido por el líquido menos caliente. Anótalos en la tabla 3.1.

Tabla 3.1

Líquido	masa	calor específico	$t_1$	$t_2$	$Q$
Cede					
Absorbe					

Responde las siguientes preguntas:

- a) ¿Por qué se alcanza una misma temperatura para toda la mezcla?
- b) Compara los valores de energía obtenidos para el calor cedido y el absorbido. Explica estos resultados.

- c) ¿En cuánto varió la energía interna de cada masa de líquido?  
 d) ¿Por qué pudo variar la energía interna del líquido? Justifica tu respuesta basándote en la primera ley de la termodinámica.

### 3.8 Irreversibilidad de los procesos en la naturaleza

Del gran conjunto de procesos completamente admisibles desde el punto de vista de la ley de conservación de la energía, no todos ocurren en la realidad. Por ejemplo, los cuerpos previamente calentados se enfrían entregando su energía a los cuerpos más fríos que los rodean. El proceso contrario, el paso del calor de los cuerpos fríos a los calientes, no contradice la ley de conservación de la energía y sin embargo, en la realidad no ocurre.

Las oscilaciones de un péndulo desplazado de su posición de equilibrio se amortiguan (fig. 3.7). A causa del trabajo de las fuerzas de fricción, la energía mecánica disminuye y la temperatura del péndulo y del aire que lo rodea aumenta. Imaginemos el proceso contrario, en el que la amplitud de las oscilaciones del péndulo aumenta a consecuencia del enfriamiento del mismo péndulo y del medio que lo rodea. Como sabemos, tal proceso no se observa. *La energía mecánica espontáneamente pasa a energía interna, pero no al revés.* De esta forma, el movimiento ordenado del cuerpo como un todo se convierte en un movimiento térmico desordenado de las moléculas que lo forman, y nunca al revés.

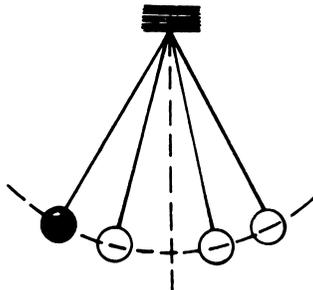


Fig. 3.7

Muchos procesos son considerados reversibles, pero solo por aproximación, pues en rigor no existen procesos reversibles en los cuerpos macroscópicos.

### Tareas

15. ¿En qué consiste el proceso irreversible?  
 16. ¿Cuáles son los procesos irreversibles más típicos?

### 3.9 Principio de Thomson (segunda ley de la termodinámica)

La segunda ley de la termodinámica da el sentido de las posibles transformaciones de la energía, y expresa la irreversibilidad de los procesos en la naturaleza. Esta ley es una conclusión directa de resultados experimentales.

Hay algunas formulaciones de la segunda ley de la termodinámica que sin tener en cuenta ciertas diferencias externas, expresan en esencia lo mismo y, por tanto, son equivalentes.

Una formulación se debe al científico inglés Thomson y se denomina *principio de Thomson*:

*Es imposible que ocurra un proceso periódico cuyo único resultado sea la obtención de trabajo a cuenta de calor tomado de una fuente.*

Aquí se comprueba una vez más que si, por ejemplo, una máquina de vapor realiza trabajo a cuenta del calor tomado de una caldera de vapor, entonces el trabajo obtenido de este modo no es el "único resultado" del proceso, pues parte del calor, obligatoriamente, va a la atmósfera junto con el vapor de escape. Lo mismo pasa en las máquinas de combustión interna y, en general, en todos los motores térmicos. Dicho de otra manera, ningún motor térmico puede tener una eficiencia térmica tal que convierta totalmente en trabajo mecánico la energía que se le entrega de forma cíclica.

Como coeficiente de eficiencia térmica de un motor térmico ( $\eta$ ) se entiende la relación entre el trabajo realizado por la máquina ( $W$ ), y la cantidad de calor entregada para este fin ( $Q$ ), o sea:

$$\eta = \frac{W}{Q} \quad (3.6)$$

El número de ejemplos que demuestran esta ley puede aumentar ilimitadamente. Todos ellos manifiestan que los procesos térmicos tienen un *sentido* definido, sin violar de alguna forma la primera ley de la termodinámica. De hecho, la mayoría de los procesos en la naturaleza ocurren espontáneamente sólo en un sentido definido. Los procesos en la naturaleza son, en general, irreversibles. Los más trágicos de ellos son el envejecimiento y la muerte de los organismos.

Puntualicemos el concepto *proceso irreversible*. Se entiende por *proceso irreversible* aquel cuyo inverso puede ocurrir solo como uno de los eslabones de un proceso más complejo. Así, volviendo al ejemplo del péndulo, se puede aumentar de nuevo la amplitud de sus oscilaciones golpeándolo con la mano. Pero este aumento de la amplitud no surge por sí solo, sino que es posible como resultado de un proceso más complejo, del golpe con la mano. Por otro lado, en principio se puede hacer pasar calor de un cuerpo frío a otro más caliente, pero para esto es necesario un equipo de enfriamiento que consuma energía.

Una buena ilustración de fenómeno irreversible en la naturaleza es la proyección de una película en el sentido inverso. Por ejemplo, al observar en sentido inverso un salto al agua de una piscina, será visto de la siguiente manera: el agua, tranquila en la piscina, comienza a agitarse, aparecen las piernas que precipitadamente se mueven hacia arriba y después todo el individuo. La superficie del agua rápidamente se pone en reposo. Poco a poco la velocidad del clavadista disminuye y se le encuentra parado en el trampolín. Lo que nosotros vemos en la pantalla pudiera ocurrir en la realidad si los procesos pudieran invertirse. El "absurdo" de lo ocurrido se deriva de que estamos acostumbrados a un sentido determinado de los procesos, y no dudamos de la imposibilidad de que ocurran en sentido contrario. No requiere mucho análisis comprender que el proceso de la ascensión del clavadista del agua al trampolín no contradice la ley de conservación de la energía, ni las leyes de la mecánica ni alguna otra ley, excepto la segunda ley de la termodinámica.

Los procesos irreversibles más típicos son:

1. El paso de calor de un cuerpo caliente a uno frío.
2. La transformación de la energía mecánica en energía interna.

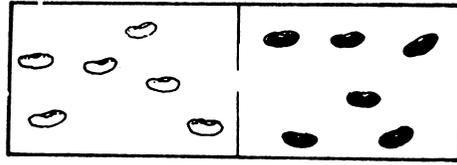
La formulación de la segunda ley plantea la imposibilidad de construir un móvil que realice trabajo sólo por cuenta del enfriamiento de algún cuerpo. Un móvil así no infringe la ley de conservación de la energía. De existir, dispondríamos en la práctica de una fuente ilimitada de trabajo; pues esto se podría lograr tomando trabajo de los océanos, como consecuencia del enfriamiento de estos. Sin embargo, en cuanto la temperatura del océano se hiciera inferior a la temperatura ambiente, se necesitaría el paso de calor de un cuerpo más frío a uno más caliente, y tal proceso no puede ocurrir por sí mismo.

### *3.10 Interpretación estadística de la direccionalidad de los procesos físicos*

La esencia física de la irreversibilidad de los procesos físicos puede ser comprendida sólo sobre la base de la teoría cinético-molecular. Una idea intuitiva podemos obtenerla si pensamos con ayuda de un modelo cómo ocurre el proceso de difusión.

Dividamos una caja de cartón a la mitad con un tabique que tenga un orificio en el medio. Coloquemos en la mitad izquierda varios frijoles negros, y en la derecha, frijoles blancos (puede echarse también bolas de distintos colores), como indica la figura 3.8.

Demos vuelta a la caja y observemos el resultado. Como es de esperar, los frijoles se mezclarán en ambos lados. Al cabo de varias vueltas la mezcla será uniforme en cada lado. Nada impide, en las leyes físicas, que al cabo de muchas vueltas en cada lado aparezcan de nuevo separados los frijoles. ¿Por qué no ocurre? ¿En qué se parece este proceso al de la difusión?



**Fig. 3.8**

La explicación podemos buscarla en las características del movimiento de las partículas y en el número extraordinariamente grande de ellas. Si el número de bolas o frijoles fuera de dos o cuatro y las colocamos todas en un solo lado de la caja, entonces es posible esperar que, al agitar la caja, todas lleguen a colocarse en un solo lado de nuevo, mientras que cuando el número de bolas aumenta, ese suceso, que a todas luces es posible, se hace cada vez menos probable.

Sabemos que el número de moléculas por centímetro cúbico en condiciones normales, en cualquier cuerpo, es cerca de  $10^{22}$  moléculas. El proceso simulado con bolas o frijoles, con las diferencias lógicas de esa simplificación, permite comprender que algo similar ocurre en los fenómenos moleculares, como la difusión y otros.

También en el intercambio térmico entre dos cuerpos ocurre algo parecido. Los choques continuos entre las moléculas, mediante los cuales un cuerpo cede energía a otro (uno se calienta y el otro se enfría), provocan una distribución de la energía entre las moléculas tal que el proceso inverso es poco probable. Si eso ocurriera, el cuerpo frío deberá calentarse espontáneamente y el cuerpo caliente, enfriarse.

## Tareas

17. Enuncia la segunda ley de la termodinámica.
18. ¿Cómo se manifiesta la irreversibilidad en los procesos físicos?  
¿Cómo podemos explicarla?

### 3.11 Motores térmicos

La realización de trabajo a cuenta del intercambio de calor ocurre mediante procesos periódicos. Tal tipo de proceso es el que se emplea en los motores térmicos.

Los motores térmicos pueden ser de muchas formas, según su construcción y su finalidad. De cursos de física anteriores ya conoces las turbinas de vapor en las centrales termoeléctricas, los motores de combustión interna en los automóviles y tractores y también los motores de reacción de diferentes tipos.

La más simple máquina térmica se puede montar con un vaso de precipitado con agua, gotas de anilina y un mechero.

En la figura 3.9 está representada una vasija alta con agua, calentada en el fondo por un mechero. La temperatura  $T_2$  del agua en las capas superiores es menor que la temperatura  $T_1$  en el fondo.

La anilina es una sustancia cuya densidad varía con la temperatura mucho más que la densidad del agua. A la temperatura  $T_1$  ella es menos densa que el agua, y a  $T_2$ , más densa. Si se añade varias gotas de anilina al agua, a temperatura  $T_2$ , entonces irán hacia el fondo. Después del calentamiento sus densidades varían y ellas van a la superficie. En la superficie, a consecuencia del enfriamiento, la densidad de la anilina se hace de nuevo mayor que la del agua y las gotas de nuevo bajan al fondo. Así se repite todo el ciclo.

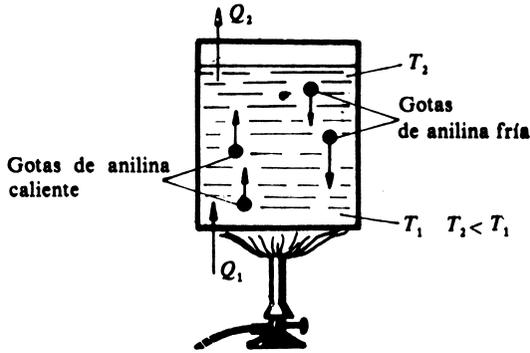


Fig. 3.9

En cada ciclo se realiza un trabajo positivo cuando la gota vence la fricción en el agua. Si las gotas abajo "cargaran" y arriba "descargaran", entonces la máquina podría utilizarse para el levantamiento de alguna carga. Si el vaso se tapa con una lámina de vidrio, entonces la temperatura de las capas superiores aumenta y la máquina deja de trabajar.

Durante el trabajo de una máquina térmica, ella recibe del calentador (mechero) una cantidad de calor  $Q_1$  y le da al condensador (en este caso la atmósfera) una cantidad de calor  $Q_2$ .

Según la ley de la conservación de la energía, el trabajo realizado por la máquina en un ciclo es igual a la diferencia entre la cantidad de calor recibida del calentador y la cedida al condensador, o sea:

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (3.7)$$

El coeficiente de eficiencia térmica, al sustituir 3.7, es igual a:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (3.8)$$

Cualquier motor térmico (la máquina de vapor, la turbina de vapor, el motor de combustión interna) durante su trabajo recibe de un cuerpo denominado calentador (a la temperatura  $T_1$ ) la cantidad de calor  $Q_1$ , y

entrega al foco frío, llamado condensador (a la temperatura  $T_2$ ), la cantidad de calor  $Q_2$ .

El coeficiente de rendimiento térmico de todos los motores se expresa por la ecuación 3.8.

## Problema resuelto

1. Una máquina toma una cantidad de calor de 14 332 J de un foco caliente y devuelve al ambiente 12 512 J. Calcule el trabajo realizado por la máquina y su eficiencia.

*Solución*

Como sabemos, la máquina térmica extrae calor de un foco y lo entrega a otro que tiene una temperatura inferior. Para ello es necesario realizar un trabajo igual a:

$$W = Q_1 - Q_2$$

donde  $Q_1$  es la cantidad de calor suministrada a la máquina, y  $Q_2$  la cantidad de calor entregado por la máquina, por lo que:

$$W = 14\,332\text{ J} - 12\,512\text{ J} = 1\,820\text{ J}$$

Pero la eficiencia de la máquina es:

$$\eta = \frac{W}{Q_1}$$

entonces:

$$\eta = \frac{1\,820\text{ J}}{14\,332\text{ J}}$$

$$\eta = 0,126$$

es decir, el coeficiente de rendimiento térmico es de un 12.6%.

## Tareas

19. ¿Cómo se calcula el coeficiente de eficiencia térmica de un motor térmico?

### 3.12 Valor máximo del coeficiente de rendimiento de los motores

En 1824 el ingeniero francés Sadi Carnot, en su libro *Reflexiones sobre la fuerza motriz del fuego*, demostró que en la realización de trabajo

a causa de alguna cantidad de calor tomada de un calentador de temperatura  $T_1$  solo una parte del calor se entrega al condensador de temperatura más baja,  $T_2$ . Como consecuencia, fue demostrado que el coeficiente de rendimiento térmico de cualquier motor no puede superar cierto valor máximo.

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

En calidad de ejemplo determinaremos el límite superior de los posibles valores del coeficiente de rendimiento térmico de una turbina de vapor.

Las temperaturas inicial y final típicas para una turbina de vapor son  $T_1 = 800$  K y  $T_2 = 300$  K. Con estos valores:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% = 62\%$$

Debido a las diferentes pérdidas de energía, en la realidad el coeficiente de rendimiento será:

$$\eta = 40\%$$

Parecería que el coeficiente de rendimiento térmico de la turbina se puede aumentar incrementando la temperatura  $T_1$  del vapor. Sin embargo, la posibilidad de aumentar  $\eta$  de esta forma está limitada por la insuficiente termorresistencia del material de las espátulas de la turbina.

En la práctica, resulta difícil construir una máquina térmica que funcione cíclicamente entre dos focos de temperatura  $T_1$  y  $T_2$ , de uno de los cuales obtenga calor, y que lo cede al segundo.

El proceso cíclico descrito por esa máquina se conoce como *ciclo de Carnot* (fig. 3.10), y sería un ciclo compuesto por dos procesos adiabáticos (4-1 y 2-3) y dos isotérmicos (1-2 y 3-4) a las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ . Sería precisamente en estos últimos procesos en los cuales la sustancia utilizada en la máquina absorbería y cedería el calor si describiera este ciclo.

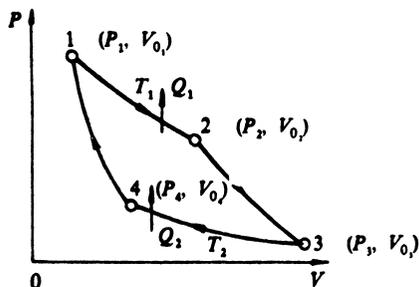


Fig. 3.10

## Tareas

20. Explica la significación de la fórmula:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

21. Calcula la eficiencia máxima del ejemplo resuelto en el epigrafe anterior si la máquina trabajara con un ciclo de Carnot a las temperaturas 227 °C y 127 °C, respectivamente.

### 3.13 *Ventajas y desventajas de la teoría macroscópica de los fenómenos térmicos*

Nos hemos familiarizado con las leyes fundamentales de la teoría de los fenómenos térmicos. Ellas resultaron suficientemente simples y muy generales. Con similares éxitos son aplicadas a los gases, líquidos, sólidos e, incluso, a la luz.

Formulada la ley general de la conservación de la energía, se analizó brevemente el sentido espontáneo de los procesos en la naturaleza. Pero junto con las ventajas, la teoría macroscópica de los fenómenos térmicos (termodinámica) muestra una limitación definida. Las leyes generales de la termodinámica son insuficientes para describir totalmente determinados procesos.

Es necesario, además de las leyes fundamentales, incorporar a la teoría una serie de experimentos que permitan llegar a conclusiones particulares. Por ejemplo, no se puede calcular la energía interna, incluso de un sistema sencillo como el gas ideal, sin referirse al experimento.

Además, la teoría tampoco puede encontrar una relación entre los parámetros que caracterizan el estado del cuerpo, es decir, la ecuación de estado.

Pero lo fundamental no es esto. En la termodinámica no se descubre la naturaleza cinético-molecular del calor. De igual forma no se descubre profundamente el sentido de conceptos tales como temperatura y energía.

El importante problema de explicar la estructura interna de todos los cuerpos no puede ser establecido en los límites de la termodinámica. Por ello, aparece la necesidad de recurrir a una mayor profundización para describir los procesos desde el punto de vista de la estructura microscópica de los cuerpos. Esta es la causa por la cual fue elaborada la teoría cinético-molecular de la estructura de la sustancia.

### *Tareas generales del capítulo*

1. ¿Se puede considerar el enfriamiento de una taza de café como un proceso reversible?

2. ¿Puede, en algún caso, pasar toda la energía interna de un sistema a la realización de trabajo?
3. Se expande un gas en un cilindro que está aislado térmicamente del exterior. ¿Qué clase de transformación sufre el gas? ¿Cómo varía su temperatura?
4. ¿Puede una masa constante de gas ideal experimentar un proceso isotérmico e isobárico a la vez? Explica.
5. ¿Puede un pedazo de hielo sufrir una transformación que sea a la vez isotérmica e isobárica? Explica.
6. ¿Cómo se puede realizar, aproximadamente, una expansión reversible de un gas?
7. A 1 mol de gas se le suministra 680 J de calor isotérmicamente. ¿En cuánto se eleva su energía interna? Explica.
8. Un cuerpo absorbe 10 000 calorías y realiza un trabajo de 30 000 J. Calcula la variación de su energía interna.
9. Un gas ideal absorbe  $10^5$  calorías y acumula una energía interna igual a la mitad de ese valor. ¿Qué trabajo habrá realizado este gas?
10. Un gas ideal absorbe 5 000 calorías isotérmicamente:
  - a) ¿Se expandirá o se comprimirá? Explica.
  - b) ¿Qué trabajo habrá realizado contra el medio? Explica.
11. Determina el trabajo realizado por un gas cuando se expande, a una presión constante de  $2 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>, desde 0,25 m<sup>3</sup> hasta 0,5 m<sup>3</sup>.
12. Un gas se comprime, a una presión constante de  $10^6$  N/m<sup>2</sup>, desde 1 m<sup>3</sup> hasta 0,2 m<sup>3</sup>. Determina el trabajo realizado por el gas.
13. Representa en un diagrama  $P$ - $V$  un proceso isotérmico del gas ideal. Sabiendo que  $V_1 = 2V_2$  y  $P_1 = \frac{1}{2}P_2$ , señala en la gráfica el trabajo realizado por el gas.
14. ¿Realiza trabajo un gas que experimenta un cambio isotérmico? Explica.
15. Un gas realiza un trabajo de 50 J a la presión constante de  $2 \cdot 10^4$  N/m<sup>2</sup>. ¿Cuál será su variación de volumen?
16. Determina el trabajo realizado por el gas ideal en el proceso que se señala en el diagrama representado en la figura 3.11.

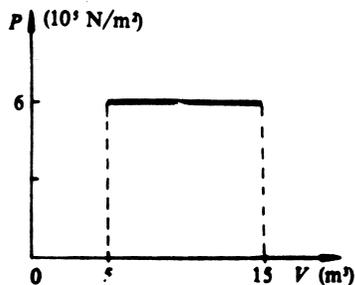


Fig. 3.11

17. Demuestra que la energía interna de  $n$  moles del gas ideal es

$$U = \frac{3}{2} nRT$$

18. El volumen de un gas pasa, a la presión constante de  $5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ , de  $10^{-1} \text{ m}^3$  a  $10^{-2} \text{ m}^3$  cuando se le suministraron 112 500 J de calor. ¿En cuánto varió su energía interna?

19. Un gas absorbe 1 000 J de calor y se dilata en  $1 \text{ m}^3$ . Si acumuló 600 J de energía interna:

a) ¿qué trabajo realizó?

b) si la dilatación fue a presión constante, ¿cuál fue el valor de esta presión?

20. Un  $\text{m}^3$  de gas está a una presión de  $5 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$  y 500 K de temperatura. Si su temperatura se reduce isobáricamente a 250 K, determina:

a) el trabajo realizado por el gas;

b) la variación de energía interna experimentada,

c) el calor absorbido o desprendido por el gas durante el proceso (considera el gas ideal).

21. Cuando un gas ideal se comprime isotérmicamente, ¿desprende o absorbe calor? Explica.

22. Demuestra que un gas ideal sometido a un proceso isobárico cumple que:

$$W = nR\Delta T$$

$$Q = \frac{5}{2} nR\Delta T$$

23. Demuestra que si al gas ideal se le somete a un proceso isocórico, entonces:

$$Q = \frac{3}{2} nR\Delta T$$

24. Determina el calor que hay que suministrarle a 1 mol de gas ideal para elevar su temperatura en 100 K:

a) a presión constante;

b) a volumen constante;

c) ¿a qué se debe la diferencia en los resultados?

25. A la presión normal de  $1.01 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ , 1 g de agua tiene un volumen de  $1 \text{ cm}^3$ , y cuando hierve totalmente a esta presión el volumen es de  $1 617 \text{ cm}^3$  de vapor. Si el calor de vaporización del agua es 539 cal/g, determina:

a) el calor que hay que suministrarle a 1 kg de agua cuando hierve para que se evapore, si está a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  y presión normal;

- b) el trabajo que realiza 1 kg de agua cuando hierve en las condiciones del inciso anterior;
- c) la variación de la energía interna;
- d) cómo explicarías el hecho de que, siendo la temperatura constante, la energía interna aumentó?
26. Di en qué caso una misma masa de gas eleva más su temperatura al suministrarle una cantidad de calor dada:
- a) si no se le permite variar el volumen;
- b) si el volumen aumenta venciendo una presión constante.
27. Explica por qué la temperatura de un gas disminuye durante su dilatación adiabática.
28. En la figura 3.12 se representa un ciclo de transformaciones a las que se sometió un gas ideal.

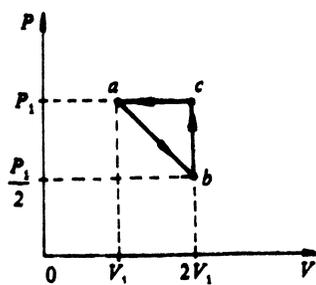


Fig. 3.12

- a) ¿En cuál de los procesos del ciclo el trabajo es mayor? Explica.
- b) ¿Durante el ciclo el gas habrá absorbido o desprendido calor? Explica.
29. Una máquina térmica recibe del calentador 20 000 J y cede al condensador 15 000 J en cada ciclo. ¿Cuál es su rendimiento?
30. Una máquina térmica tiene una potencia de 5 000 W y un rendimiento del 20%. Si en cada ciclo recibe del medio 15 000 J de calor:
- a) ¿qué tiempo dura el ciclo?
- b) ¿qué calor cede a la atmósfera en 1 min?
31. Una máquina térmica reversible absorbe calor del foco (a 500 K) y lo cede al condensador (a 200 K). Calcula:
- a) el rendimiento;
- b) el trabajo que realiza en cada ciclo si recibe del foco caliente  $10^4$  J;
- c) la potencia, si el ciclo dura 0,25 s;
- d) la rapidez con que cede calor al foco frío.
32. Una máquina reversible tiene una potencia de 5 968 W y trabaja entre las temperaturas 140 °C y 20 °C. ¿Cuántas calorías absorbe por segundo del foco caliente y cuántas entrega por segundo al foco frío?

33. Tres moles de gas ideal se someten a un ciclo de transformación que consta de cuatro fases (en el estado inicial  $A$  están a 400 K y presión de  $10^5 \text{ N/m}^2$ ):
1. de  $A$  a  $B$ : expansión isobárica, hasta duplicar su volumen;
  2. de  $B$  a  $C$ : transformación **isocórica** hasta alcanzar 543 K;
  3. de  $C$  a  $D$ : compresión isobárica hasta alcanzar el volumen inicial;
  4. de  $D$  a  $A$ : transformación isocórica hasta alcanzar la presión inicial.
- Representa el ciclo en un diagrama  $P$ - $V$ ; calcula el trabajo realizado y el calor absorbido.
34. Un hombre que trabaja consume energías a razón de 140 W. ¿Qué cantidad de pan, cuyo calor de combustión es de 8 000 cal/g, debe comer para poder trabajar una hora?
35. Una bola de 20 g, cuya temperatura es  $0^\circ\text{C}$ , tiene una velocidad de 300 m/s y penetra en un bloque de hielo que está a  $0^\circ\text{C}$ . Calcula la masa de hielo fundido. El calor de fundición del hielo es  $3,4 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ .
36. Un automóvil tiene una masa de 800 kg y una velocidad de 72 km/h. Si se detiene al aplicar los frenos, calcula la cantidad de calor desarrollado por fricción de las ruedas con el pavimento.
37. Para calcular la cantidad de calor que absorbe o desprende un gas, se acostumbra usar las siguientes fórmulas:
- a) a presión constante,  $Q = nc_p \Delta T$ ;
  - b) a volumen constante,  $Q = nc_v \Delta T$ .
- ¿Qué significado físico tiene  $c_p$  y  $c_v$ ? Utiliza las fórmulas de  $Q$  en los problemas 22 y 23.
38. Un mole del gas ideal realiza un trabajo de  $10^3 \text{ J}$  durante una expansión adiabática. ¿En cuánto habrá aumentado o disminuido su temperatura?
39. Considera que un recipiente herméticamente cerrado contiene un líquido, y sobre éste, gas a presión. ¿Qué sucede a la temperatura del líquido cuando se abre el recipiente? Explica. Considera el proceso adiabático.

## Segunda parte

# ELECTRODINÁMICA

En esta parte del curso de Física, llamada electrodinámica, se estudian los procesos determinados por el movimiento y la interacción de las partículas cargadas, denominada interacción electromagnética. El estudio de su naturaleza conduce a uno de los conceptos fundamentales, el campo electromagnético.

La creación y el desarrollo de la electrodinámica fue posible por descubrimientos casuales e investigaciones científicas sistemáticas, que comenzaron desde la Antigüedad (al conocerse que un mineral de hierro, magnetita, atrae al hierro y que el ámbar frotado con seda atrae a cuerpos ligeros) hasta alcanzar un gran auge en los siglos XIX y XX.

Entre los cuatro tipos de interacciones descubiertos por la ciencia (gravitatorias, electromagnéticas, fuertes y débiles) son las electromagnéticas las que el hombre, en su vida cotidiana y en la técnica, encuentra con mayor frecuencia.

La importancia de la interacción electromagnética se comprende al darnos cuenta de que está presente entre los núcleos y electrones en los átomos, o entre los átomos y las moléculas de gases, líquidos y sólidos.

Las innumerables aplicaciones prácticas de los fenómenos electromagnéticos han transformado la vida del hombre en todos los ámbitos.

La mayor cantidad de las fuentes de energía empleadas en la tecnología son electromagnéticas.

En las comunicaciones, también se utilizan los fenómenos electromagnéticos (el teléfono, el telégrafo, la radio, la televisión, las transmisiones vía satélite, etcétera).

En la electrónica podemos citar el caso de las computadoras, que son utilizadas en todas las ramas de la sociedad.

En la medicina y la biología son múltiples sus aplicaciones, prácticamente todos los procesos vitales son fenómenos electromagnéticos.

De lo dicho resulta que el estudio de la interacción electromagnética permitirá comprender con mayor profundidad las propiedades eléctricas, dondequiera que estas se manifiesten. En general, podemos decir que el conocimiento de la interacción electromagnética es esencial para alcanzar una interpretación científica de la naturaleza.

En los próximos capítulos del texto, dada su importancia, se abordará el estudio de las leyes fundamentales de la interacción electromagnética y su utilización práctica.

## Capítulo 4 ELECTROSTÁTICA

### 4.1. Carga eléctrica

Comenzaremos el epígrafe analizando un sencillo experimento, estudiado por ti en noveno grado. Acercaremos una varilla de plástico a cuerpos ligeros, antes y después de ser frotada con una piel. En la figura 4.1 se muestra cómo la varilla, después de ser frotada, atrae a cuerpos ligeros; esta propiedad no la tenía antes de ser frotada.

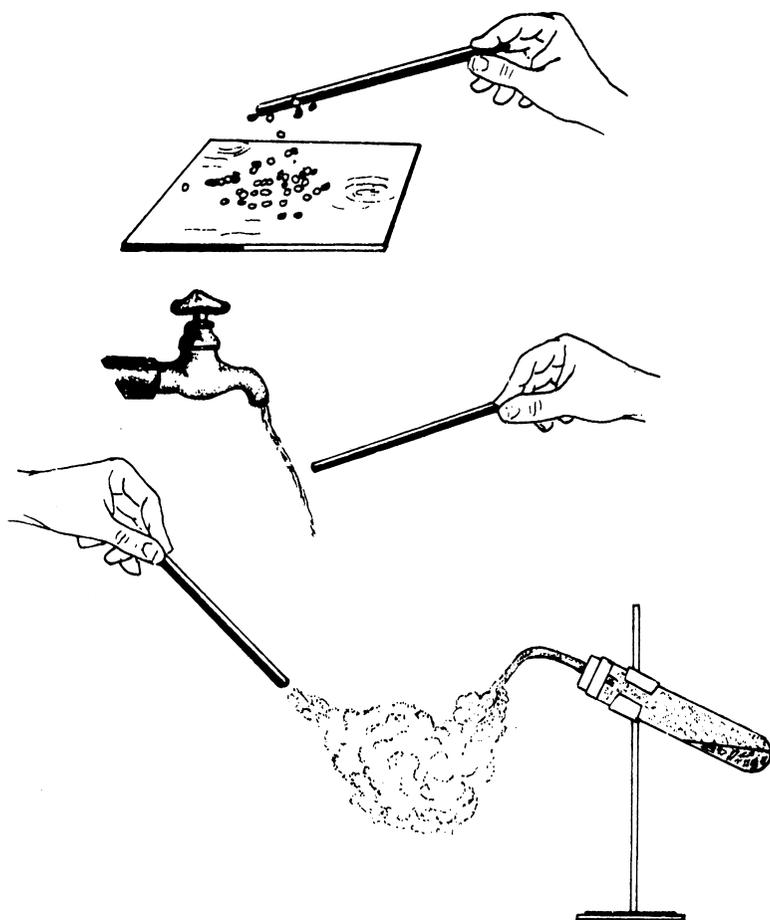


Fig. 4.1

Este fenómeno ya era conocido desde el siglo VI a.n.e. por el científico de la Grecia antigua Thales de Mileto, al observarlo en el ámbar después de ser frotado con lana.

No fue hasta muchos siglos después, en 1600, que el médico inglés William Gilbert estudió con regularidad el fenómeno descrito por Thales de Mileto, nombrándolo electrización. Gilbert, mediante la experimentación, descubrió que el vidrio, la porcelana, y otras sustancias, previamente frotadas con cuero, paño, seda, etc., adquirirían la misma propiedad del ámbar frotada con lana. Hoy se conoce que es posible electrizar cualquier sólido frotándolo con otra sustancia. Así, un automóvil se electriza por efecto de su roce con el aire, un peine se electriza al frotarlo en el cabello, en las fábricas textiles el hilo se electriza con su roce con las diferentes partes de la máquina, etc. Comúnmente se dice que los cuerpos electrizados están cargados eléctricamente o, simplemente, cargados, y cuando no lo están, descargados o neutros.

La electrización de los cuerpos se explica por el desequilibrio entre las cantidades de electrones y protones en los cuerpos. Cuando el vidrio se frota con seda, pasan electrones del vidrio a la seda. El vidrio queda cargado positivamente al tener un déficit de electrones, mientras la seda queda cargada negativamente, porque en ella hay un exceso de electrones.

De lo estudiado se puede deducir que el comportamiento de los cuerpos macroscópicos electrizados depende de las propiedades de los electrones y protones que constituyen su estructura interna.

Los electrones, protones y otras partículas microscópicas tienen una propiedad intrínseca, en virtud de la cual interactúan unas con otras y entre sí con fuerzas eléctricas, muy intensas en comparación con la fuerza gravitatoria que existe entre ellas.

La magnitud física que da la medida de la intensidad de las interacciones de estas partículas es denominada *carga eléctrica*, de forma semejante a como la masa lo es para las interacciones gravitatorias.

Todos los cuerpos tienen masa y por eso se atraen entre sí. Pero este tipo de interacción que ahora estudiamos puede ser atractiva o repulsiva. Este hecho importante significa que hay dos tipos de carga eléctrica, llamadas *positiva* y *negativa*. Además, si las partículas poseen cargas eléctricas del mismo tipo (positivas o negativas) se repelen, y si son de tipos diferentes, se atraen.

Para medir la carga eléctrica de los cuerpos se emplea un instrumento llamado *electrómetro*. En la escuela utilizaremos uno similar al que aparece en la figura 4.2a. El funcionamiento del electrómetro se basa en la interacción de los cuerpos cargados. Cuando la varilla se carga, la aguja también se carga y ambas se repelen, como se observa en la figura 4.2b.

Cuando la esfera del electrómetro se toca con un cuerpo cargado, la aguja se separa de la varilla, y mientras mayor sea la carga del cuerpo, mayor será el ángulo de desviación de la aguja. De esta forma podemos juzgar si el cuerpo está cargado y la cantidad de carga eléctrica que tiene.

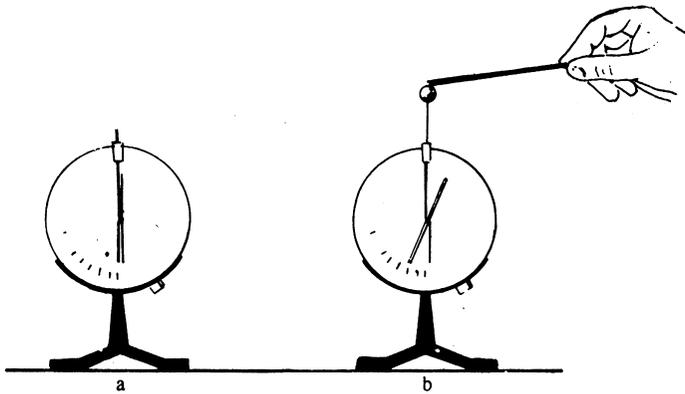


Fig. 4.2

La carga eléctrica tiene diferentes propiedades, procedamos a estudiar algunas de ellas.

*Ley de conservación de la carga eléctrica*

Inicialmente, tomemos una varilla de ebonita y un pedazo de piel, ambos descargados. Posteriormente frotemos la varilla de ebonita con la piel; queda la varilla cargada de forma negativa, y la piel, positiva. Si los dos cuerpos son acercados por separado a la esfera de un electrómetro (fig. 4.3 a y b), se observa que la aguja, en ambos casos, indica la misma carga eléctrica. Pero cuando acercamos ambos cuerpos juntos a la esfera (fig. 4.3 c), la aguja no indica ninguna carga eléctrica.

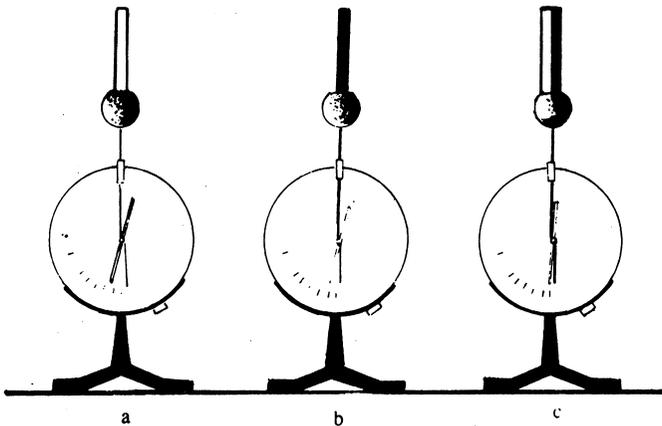


Fig. 4.3

Este experimento demuestra que, durante la electrización por frotamiento, se produce una redistribución de las cargas eléctricas en los cuer

pos que eran neutros inicialmente. Una pequeña parte de los electrones pasan de un cuerpo a otro. No aparecen ni desaparecen partículas cargadas. La suma algebraica de las cargas positivas y negativas sigue siendo nula como al principio.

En el experimento explicado anteriormente se cumple la *ley de conservación de la carga eléctrica*. Esta ley es válida para un sistema en el cual no entren ni salgan partículas cargadas.

La ley de conservación de la carga eléctrica se puede expresar de la siguiente forma: *en todo sistema en el cual no entren ni salgan partículas cargadas, la suma algebraica de las cargas de todas las partículas permanece invariable.*

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.}$$

donde  $q_i$  representa la carga de cada partícula.

#### *Carácter discreto de la carga eléctrica*

Si tenemos dos electrómetros iguales, uno cargado y otro descargado (fig. 4.4a), y son unidos por una varilla metálica que se sujeta por un mango de plástico, la carga se distribuye por igual en ambos electrómetros (fig. 4.4b), o sea, en cada uno quedará la mitad de la carga inicial  $\left(\frac{q}{2}\right)$ .

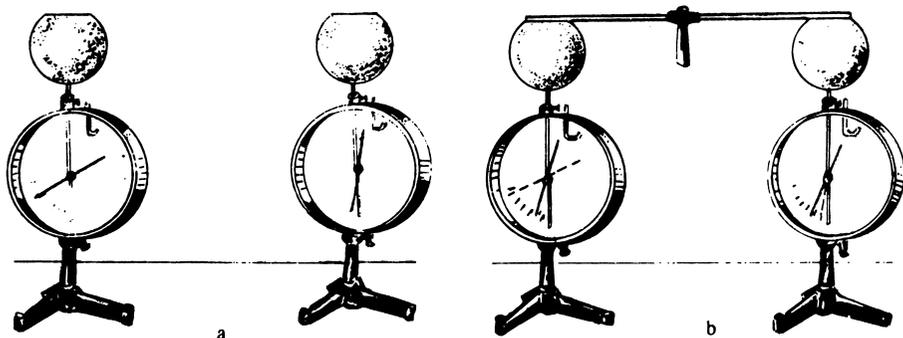


Fig. 4.4

Ahora, si quitamos la varilla y descargamos uno de los electrómetros, tocándolo con la mano, y nuevamente lo unimos con el otro mediante la varilla, la carga que queda en el primero nuevamente se distribuye entre los dos en partes iguales, o sea, en cada uno quedará la cuarta parte de la carga que había inicialmente  $\left(\frac{q}{4}\right)$ .

Con este procedimiento se pudiera ir fraccionando en partes la carga inicial, obteniendo sucesivamente la octava, la decimosexta, etc., hasta

llegar a una carga eléctrica que no permita ser dividida. En la práctica con los electrómetros no es posible llegar a medir cargas muy pequeñas.

Estas mediciones las logró por vez primera el científico R. Millikan en 1911. Para lograrlo cargó pequeñas gotas de aceite y estudió su movimiento, con lo cual llegó al resultado de que siempre estas tenían una carga eléctrica que era un múltiplo de una carga elemental, encontrándose que esta carga, que ya no era divisible, estaba asociada a una partícula que era precisamente *el electrón*.

La carga eléctrica mínima es la que poseen los electrones, los protones y otras partículas subatómicas, y su valor es  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C y se representa por la letra  $e$ . Los electrones tienen una carga eléctrica  $-e$  y los protones  $+e$ ; pero hay otras partículas que no poseen carga eléctrica, como los neutrones.

Cuando una magnitud característica de una propiedad, como es la carga eléctrica, se presenta en porciones y no en forma continua, se dice que tiene un *carácter discreto*.

Como los cuerpos cargados tienen un defecto o exceso de electrones, la carga que tienen dichos cuerpos es un número entero de  $e$ . Por ejemplo, es imposible que un cuerpo tenga una carga eléctrica de  $5,2 e$  o de  $-0,708 e$ .

En el sistema internacional de unidades, SI, la unidad de carga eléctrica es el coulomb (C), que se define como *la cantidad de carga eléctrica que pasa, en un segundo, a través de la sección transversal de un conductor por el que circule una corriente de un ampere*.

### *Invarianza de la carga*

Esta propiedad consiste en que la cantidad de carga eléctrica de un cuerpo o partícula es independiente de la velocidad con que dicho cuerpo o partícula se mueve, es decir, no depende del sistema de referencia. Otras magnitudes, como la masa, no poseen esta propiedad, como conoces de décimo grado.

## **Tareas**

1. ¿En qué consiste el fenómeno de la electrización de los cuerpos?
2. ¿Cuál es la forma más simple de electrizar un cuerpo?
3. ¿Cómo se puede determinar si un cuerpo se ha electrizado?
4. ¿Cuántos tipos de carga eléctrica pueden adquirir los cuerpos?
5. ¿Cómo fueron denominadas esas cargas?
6. ¿Cómo interactúan los cuerpos cargados con cargas del mismo tipo?  
¿Y de tipos diferentes?
7. ¿Pueden ser electrizados cuerpos de cualquier sustancia?

8. Cita ejemplos de fenómenos producidos por cuerpos electrizados que hayas observado en la vida diaria.
9. Una varilla de ebonita se electriza, ¿permanece su masa invariable?
10. En la figura 4.5 aparecen dos electrómetros iguales, tocados por los cuerpos *A* y *B*. ¿Cuál de los dos cuerpos tiene una mayor carga eléctrica, si inicialmente los electrómetros estaban descargados? Argumenta tu respuesta.

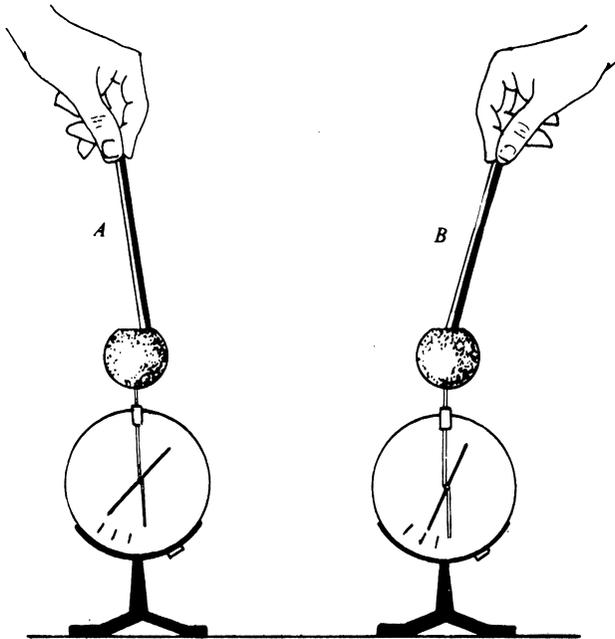


Fig. 4.5

11. ¿Qué expresa la ley de conservación de la carga eléctrica?
12. ¿Por qué la carga eléctrica tiene un carácter discreto?
13. ¿Puede ser la carga eléctrica de una partícula electrizada igual a  $0,801 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ? ¿Y a  $8,010 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ?

## 4.2 Ley de Coulomb

Hasta ahora hemos estudiado las interacciones entre los cuerpos cargados desde un punto de vista cualitativo. En este epígrafe comenzamos a estudiar las leyes cuantitativas de las interacciones electromagnéticas. Primero vamos a considerar el caso más simple, en que los cuerpos cargados se encuentran en reposo. La parte de la electrodinámica dedicada a estudiar estos casos se llama *electrostática*.

La ley fundamental de la electrostática es la ley de la interacción de dos cuerpos puntuales cargados o partículas cargadas en reposo, que fue establecida experimentalmente en el año 1785 por el físico francés Charles A. Coulomb.

En la realidad, los cuerpos puntuales cargados no existen. Pero si la distancia entre los cuerpos es muchas veces mayor que sus dimensiones, ni su forma ni sus dimensiones influyen de forma notoria en su acción mutua. En este caso, los cuerpos se pueden considerar como puntuales.

La fuerza de interacción de los cuerpos cargados depende de las propiedades del medio que hay entre ellos. Aquí vamos a suponer que las interacciones tienen lugar en el vacío. La experiencia demuestra que el aire es un medio que influye muy poco en estas interacciones, por lo que, en muchos casos en que el aire esté presente, podemos considerar que los cuerpos cargados interactúan como si estuvieran en el vacío.

Para sus experimentos Coulomb utilizó una balanza de torsión (fig. 4.6 a), que aparece representada en un esquema en la figura 4.6 b. Esta balanza de torsión consiste en un fino alambre elástico  $h$ , el cual sostiene una varilla de vidrio que tiene, en uno de sus extremos, una esfera metálica  $B$ , y en el otro un contrapeso  $C$ . Otra esferita metálica,  $A$ , está sujeta a la tapa de la balanza.

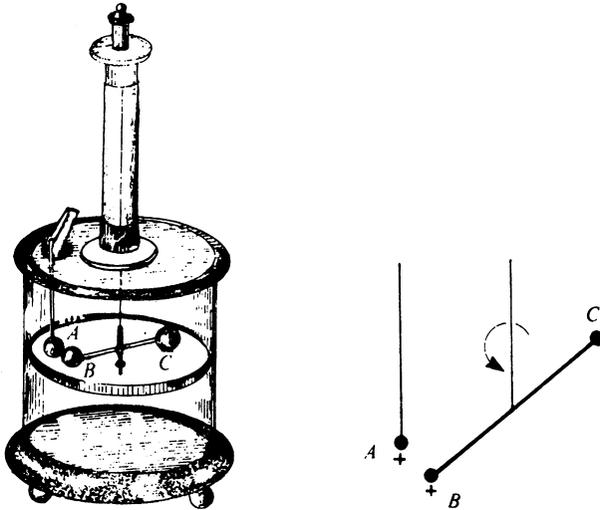


Fig. 4.6

Si las esferitas metálicas  $A$  y  $B$  son cargadas con cargas de igual signo, se repelen entre sí haciendo girar la varilla horizontal hasta una nueva posición donde la fuerza eléctrica se equilibra con la fuerza de torsión del alambre. Calculando la fuerza de torsión del alambre, en dependencia

con el ángulo girado, podemos conocer el valor de la fuerza eléctrica entre los cuerpos cargados, para diferentes distancias entre ellos.

Los experimentos condujeron al establecimiento de la ley conocida como Ley de Coulomb, que plantea: *la fuerza eléctrica de interacción es directamente proporcional al producto las cargas eléctricas de los cuerpos que interactúan, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.* Esta es la ley fundamental de la electrostática. A esta fuerza se le llama fuerza coulombiana.

Si representamos las cargas por  $q_1$  y  $q_2$ , y la distancia entre ellas por  $r$ , entonces la ley de Coulomb se puede escribir de la forma siguiente:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{4.1}$$

La constante de proporcionalidad  $k$  tiene un valor aproximado de  $9 \cdot 10^9$ , obtenido experimentalmente. Esta constante también se escribe como:

$$k = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

donde  $\epsilon_0$  es una constante que se denomina constante dieléctrica del vacío y su valor numérico se obtiene despejando  $\epsilon_0$  y efectuando. Se llega a que:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$

También de los experimentos es posible concluir que la fuerza de interacción tiene la dirección de la recta que une los dos cuerpos, y el sentido depende de si las cargas de los cuerpos puntuales son de signos iguales (fig. 4.7a) o de signos diferentes (fig. 4.7b).

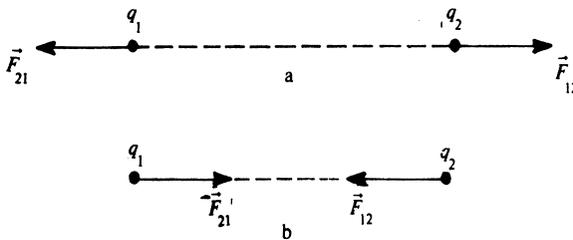


Fig. 4.7

Estas fuerzas se llaman *centrales* y, de acuerdo con la tercera ley de Newton:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Se ha comprobado que la ley de Coulomb es válida para un amplio rango de valores de distancia, que va desde las del orden de  $10^7$  m, hasta la separación entre partículas subatómicas, de  $10^{-17}$  m.

La ley de Coulomb permite calcular la fuerza de interacción electrostática entre dos cuerpos puntuales cargados. Ahora bien, en muchos casos tenemos un sistema de cuerpos puntuales cargados y nos interesa la acción del conjunto sobre uno de ellos. La ley de Coulomb por sí sola no puede resolver esta situación, pues no da una explicación de si se modifica o no la fuerza de interacción entre dos cuerpos puntuales cargados, debido a la presencia de un tercer cuerpo cargado. Analicemos la siguiente experiencia:

Se colocan tres cuerpos puntuales con cargas  $q$ ,  $q_1$  y  $q_2$  (fig. 4.8). Se mide la fuerza  $\vec{F}_1$  que el cuerpo con carga  $q_1$  ejerce sobre el cuerpo con carga  $q$ , cuando el cuerpo con carga  $q_2$  está muy lejos de ambos. Luego se aleja  $q_1$ , se acerca  $q_2$  y se mide  $\vec{F}_2$ . A continuación se acercan ambos cuerpos cargados ( $q_1$  y  $q_2$ ), se sitúan en las posiciones que habían ocupado antes y se mide la fuerza  $\vec{F}$  que actúa sobre el cuerpo con carga  $q$ . La experiencia demuestra que:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

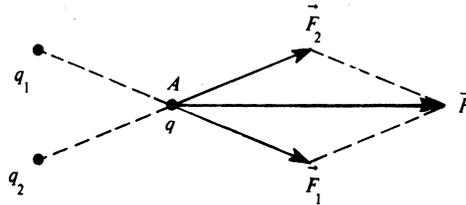


Fig. 4.8

Este resultado se puede generalizar para cuatro, cinco y más cuerpos puntuales cargados, lo cual nos pone en condición de afirmar que *la fuerza que un sistema de cuerpos puntuales cargados ejerce sobre otro cuerpo puntual cargado, es igual a la suma vectorial de las fuerzas que cada uno de los cuerpos del sistema ejerce, respectivamente, sobre el cuerpo puntual cargado; esto se conoce como principio de superposición.*

En el principio de superposición está implícito que cada cuerpo puntual cargado del sistema ejerce su propia acción sobre otro cuerpo puntual cargado, independientemente de la presencia de otros cuerpos cargados.

Para un sistema de  $n$  cuerpos puntuales cargados, si  $\vec{F}$  es la fuerza resultante, se tiene:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n \quad (4.2)$$

donde  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$  son las fuerzas que cada uno de los cuerpos puntuales cargados del sistema ejercen sobre un cuerpo puntual cargado dado. Empleando el signo de suma:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$$

### Problemas resueltos

1. Calcula el valor de la fuerza de interacción entre los cuerpos puntuales representados en la figura 4.9a. Representa dichas fuerzas gráficamente.

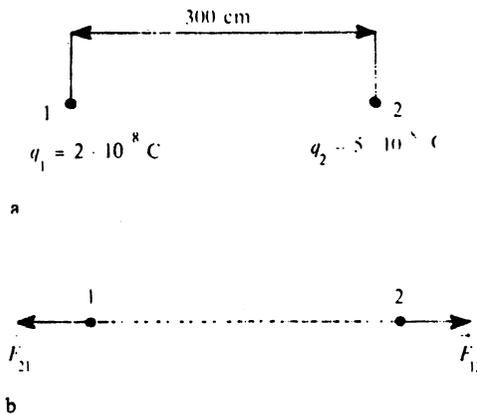


Fig. 4.9

*Solución*

Datos:

$$q_1 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

$$q_2 = 5 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

$$r = 300 \text{ cm} = 3 \text{ m}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Aplicando la expresión de la ley de Coulomb:

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

$$F = \frac{9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot 2 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{(3 \text{ m})^2}$$

$$F = 10^{-10} \text{ N}$$

En la figura 4.9b aparecen representadas las fuerzas.

2. Compara la fuerza de atracción gravitatoria ( $\vec{F}_g$ ) con la fuerza de repulsión electrostática ( $\vec{F}_e$ ) entre dos electrones que se encuentran a una distancia  $d$ .

*Solución*

Datos:

$$m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

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

Sustituyendo los valores numéricos dados en las expresiones de las leyes de Coulomb y Newton, respectivamente:

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

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$F_e = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{d^2}$$

$$F_g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{(9 \cdot 10^{-31})^2}{d^2}$$

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{(1,6)^2}{9 \cdot 6,67} \cdot 10^{44}$$

$$\frac{F_e}{F_g} = 4,2 \cdot 10^{42}$$

El resultado, que es independiente de la distancia, representa una diferencia esencial entre ambos fenómenos. Las interacciones eléctricas son muy intensas en comparación con las gravitatorias.

Por eso, siempre que existan interacciones eléctricas, pueden ser despreciadas las interacciones gravitatorias entre los cuerpos.

## Tareas

14. Enuncia la ley de Coulomb y plantea su expresión cuantitativa.
15. ¿Cuáles son los límites de validez de la ley de Coulomb?
16. Enuncia el principio de superposición.
17. Determina las fuerzas de interacción del electrón con el núcleo en el átomo de hidrógeno, si la distancia entre ellos es igual a  $0,5 \cdot 10^{-8}$  cm.

### 4.3 Campo eléctrico

Ya conocemos que las partículas cargadas interactúan entre sí, y que, debido a esto, también lo hacen los cuerpos electrizados, que tienen exceso o déficit de electrones. Además, mediante la ley de Coulomb se puede calcular el valor de la fuerza en dichas interacciones. Debemos ahora analizar cómo se efectúan estas interacciones.

De nuestra experiencia cotidiana sabemos que si en un árbol hay un fruto que no está al alcance de nuestras manos, podemos usar una varilla larga para tumbarlo; o sea, a través de la varilla se transmite la acción de nuestras manos hacia el fruto. En general, para explicar cómo ocurre la acción de un cuerpo sobre otro, primero averiguamos si entre ellas existe algún enlace, algo así como un hilo, una varilla, etc. Si existen estos enlaces, explicamos que la interacción de los cuerpos se transmiten a través de ellos.

No siempre es posible observar dichos enlaces, pero no por eso debemos admitir que las acciones entre los cuerpos a determinada distancia se realizan sin ellos.

Es posible que una persona que desconozca cómo se propaga el sonido en el aire pudiera admitir que las cuerdas vocales de otra persona, al hablar, actúan directamente sobre sus oídos, considerando que la transmisión del sonido por un medio invisible, como es el aire, es imposible. No obstante, es sabido que a través del aire se propagan las ondas sonoras del cuerpo emisor al cuerpo receptor.

Todos los ejemplos analizados tienen en común que el medio transmisor de las interacciones entre cuerpos distantes, es la sustancia. Además que estas interacciones demoran un tiempo en propagarse por el medio transmisor. Por ejemplo, al escuchar el eco, nos percatamos de que el sonido se mueve con una velocidad finita, al demorar cierto tiempo en ir de un lugar a otro.

De todo lo visto, era de esperar que también entre los cuerpos cargados existiera un medio transmisor de las interacciones.

Un grupo de científicos, al no lograr encontrar el medio a través del cual se transmitían las interacciones eléctricas, llegó a admitir que era totalmente innecesario, que éstas no necesitaban ningún medio. No fue hasta mediados del siglo XIX que el científico inglés Michael Faraday concibió una nueva teoría denominada teoría del campo eléctrico.

De acuerdo con la teoría de Faraday, los cuerpos cargados no actúan directamente unos sobre otros, sino por mediación del campo eléctrico. Cada partícula cargada tiene un campo eléctrico inherente a ella, el cual actúa sobre otras partículas cargadas. Esta teoría ha sido corroborada con múltiples hechos.

El campo eléctrico, al igual que el campo gravitatorio, es un tipo de materia diferente de la sustancia; existe independientemente de nosotros y de nuestros conocimientos acerca de él; posee determinadas propiedades que permiten diferenciarlo y no confundirlo con otras cosas.

La propiedad fundamental del campo eléctrico es su acción sobre las partículas cargadas. Por esta propiedad conocemos de su existencia. Estudiaremos su distribución en el espacio y todas sus propiedades.

El campo eléctrico de las partículas cargadas en reposo no cambia al transcurrir el tiempo y se le llama *campo electrostático*.

## Tareas

18. ¿Pueden existir interacciones entre cuerpos que se encuentren separados, sin mediar entre ellos algún medio transmisor? Ejemplifica tu respuesta.
19. ¿Cómo ocurren las interacciones entre los cuerpos cargados?
20. ¿A qué llamamos campo electrostático?

### 4.4 Intensidad del campo electrostático

Como la propiedad fundamental del campo electrostático es su acción sobre los cuerpos cargados, para su estudio utilizaremos un pequeño cuerpo cargado positivamente que llamaremos *cuerpo de prueba*.

Si en un punto cualquiera de un campo electrostático se colocan sucesivamente cuerpos de pruebas con diferentes cargas eléctricas, se comprueba que la fuerza que ejerce el campo electrostático sobre estos es directamente proporcional a sus respectivas cargas eléctricas. De aquí que la razón entre la fuerza coulombiana y la carga eléctrica ( $F/q$ ) se mantenga constante para cada punto del campo electrostático.

Esta magnitud,  $F/q$ , no depende del valor de la carga del cuerpo de prueba, por lo que puede considerarse como una característica del campo electrostático, denominada *intensidad del campo electrostático*, que se representa como  $\vec{E}$ . Por lo tanto:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (4.3)$$

Entonces, hemos llegado a la conclusión de que *la intensidad del campo electrostático en un punto dado es una magnitud vectorial y repre-*

sa la razón que existe entre la fuerza con la cual el campo electrostático actúa sobre un cuerpo de prueba en dicho punto y la carga eléctrica del cuerpo.

De acuerdo con la ecuación (4.3), la intensidad del campo electrostático se puede expresar, en el SI, en newton/coulomb (N/C).

El vector intensidad del campo  $\vec{E}$  tiene, en un punto, la misma dirección y sentido que la fuerza que actúa sobre un cuerpo de prueba colocado en ese mismo punto. Por ejemplo, en la figura 4.10a aparece la fuerza que ejerce el campo electrostático de un cuerpo puntual, cargado con carga eléctrica  $+q$ , sobre un cuerpo de prueba de carga  $q_0$ ; y la 4.10b representa el vector  $\vec{E}$  en el punto donde estaba el cuerpo de prueba.

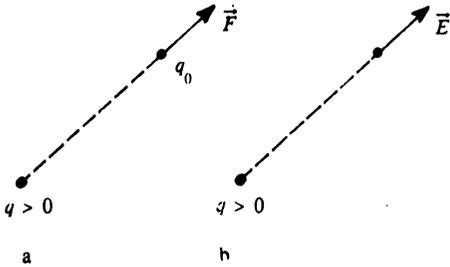


Fig. 4.10

**Tareas**

- 21. ¿A qué se llama intensidad del campo electrostático?
- 22. En la figura 4.11 se representa un cuerpo puntual cargado con  $-q$  y un punto  $A$ . Representa la fuerza que ejerce el campo eléctrico sobre un cuerpo de prueba colocado en dicho punto. Representa, en el punto  $A$ , el vector intensidad del campo electrostático.



Fig. 4.11

- 23. Al colocar un cuerpo de prueba con una carga de  $8 \cdot 10^{-5}$  C en un punto, se ve sometido a una fuerza de 5 N. ¿Cuál es el módulo del vector intensidad del campo en dicho punto?

## 4.5 Representación gráfica del campo electrostático

La representación geométrica del campo electrostático da una imagen visual sencilla, mediante la cual se puede hacer un análisis cualitativo del mismo.

Una forma de representar el campo electrostático en una región del espacio, es utilizando el vector intensidad del campo eléctrico, como aparece representado en la figura 4.12. En esta figura se observa cómo, en las proximidades de los cuerpos puntuales cargados, el vector intensidad del campo es más largo, lo que indica que el campo es más intenso en estos puntos que en los más alejados, donde el vector es más pequeño. Además, para  $+q$  el sentido del vector intensidad del campo en cada punto es alejándose del cuerpo, mientras que para  $-q$ , el sentido de dicho vector está dirigido hacia el cuerpo.

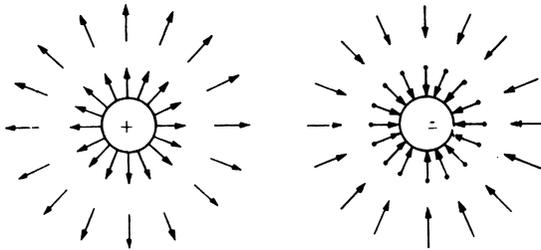


Fig. 4.12

Otro método muy utilizado para representar el campo electrostático es el de *líneas de fuerza*, creado por el genial científico francés Michael Faraday.

Las líneas de fuerza son líneas continuas, cuya tangente en cada punto tiene la dirección del vector intensidad del campo electrostático  $\vec{E}$ .

Para saber el sentido del vector  $\vec{E}$  en cada punto de las líneas de fuerza, a estas se le asigna un sentido. Convencionalmente se supone que las líneas de fuerza salen de la carga positiva y terminan en la negativa o en el infinito.

En la figura 4.13 se presentan las líneas de fuerzas para dos cuerpos puntuales cargados. Como se observa, en las proximidades de los cuerpos las líneas de fuerzas están más unidas, lo que indica que el campo electrostático es más intenso que en puntos alejados, donde las líneas se encuentran más separadas. Para el cuerpo con carga  $+q$ , el sentido de las líneas es saliendo, mientras para el de  $-q$  es entrando desde el infinito.

Como se observa en la figura 4.13, sólo se han trazado algunas líneas de fuerza aunque sabemos que por cada punto del campo electrostático

pasa una línea de fuerza. De trazar todas las líneas de fuerzas, sería imposible obtener información del campo electrostático. No debe pensarse que estas líneas son formaciones realmente existentes, sino que solamente ayudan a tener una imagen cualitativa del campo electrostático.

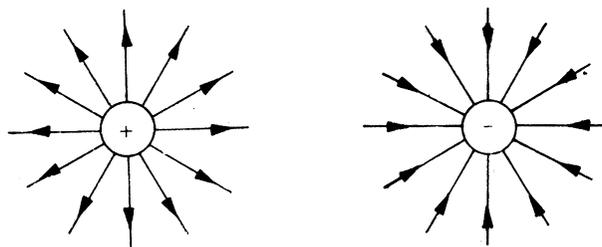


Fig. 4.13

## Tareas

24. ¿A qué llamamos líneas de fuerza del campo electrostático?
25. ¿Qué información brinda una figura donde se observen líneas de fuerza más unidas en unas zonas que en otras?
26. En la figura 4.14 se representan las líneas de fuerza de dos cuerpos puntuales cargados.
  - a) Señala el sentido de las líneas de fuerza.
  - b) Representa el vector intensidad del campo en los puntos *A*, *B*, *C* y *D*.

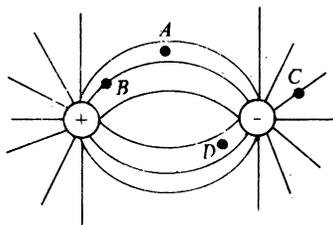


Fig. 4.14

27. ¿Es posible que las líneas de fuerza del campo electrostático de un cuerpo cargado se corten en un punto?

## 4.6 Intensidad del campo electrostático inherente a un cuerpo puntual cargado y a un sistema de cuerpos puntuales cargados

Utilizando un cuerpo de prueba, se puede explorar el campo electrostático alrededor de un cuerpo puntual cargado. Consideremos que el cuerpo de prueba, con carga  $q_0$ , se coloca a una distancia  $r$  de un cuerpo puntual con carga  $q$ .

El módulo de la fuerza que ejerce el campo electrostático del cuerpo puntual sobre el cuerpo de prueba, se puede calcular utilizando la ley de Coulomb:

$$E = k \frac{q q_0}{r^2}$$

El módulo de la intensidad del campo electrostático en el punto donde se sitúa el cuerpo de prueba se obtiene mediante la ecuación:

$$E = \frac{F}{q_0}$$

Sustituyendo en esta ecuación la fuerza coulombiana, se obtiene:

$$E = k \frac{q}{r^2} \quad (4.4)$$

Esta ecuación permite calcular el módulo de la intensidad del campo electrostático en cualquier punto alrededor de un cuerpo puntual cargado, conociendo su carga y la distancia a la que se encuentra el punto del cuerpo.

La dirección del vector  $\vec{E}$  es la línea radial que pasa por el cuerpo puntual cargado. Si la carga es positiva, su sentido apunta hacia afuera del cuerpo, y si la carga es negativa, apunta hacia el cuerpo, tal y como se mostró en la figura 4.12.

Estudiaremos ahora el caso del campo electrostático de un conjunto de cuerpos puntuales con cargas  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . Si situamos un cuerpo de prueba con carga  $q_0$  en dicho campo electrostático, sabemos que sobre este actuará una fuerza que es igual a la resultante de las fuerzas que ejercen cada uno de los cuerpos puntuales sobre él.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

donde  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots, \vec{F}_n$  son las fuerzas que ejercen los campos electrostáticos de los cuerpos puntuales cargados sobre el cuerpo de prueba, por lo que:

$$\frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{\vec{F}_1}{q_0} + \frac{\vec{F}_2}{q_0} + \dots + \frac{\vec{F}_n}{q_0}$$

y entonces:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i$$

A este resultado, que siempre concuerda con los hechos experimentales, se le denomina *principio de superposición de la intensidad del campo electrostático*, y se puede expresar en palabras de la siguiente forma: *La intensidad, en un punto, del campo electrostático inherente a un sistema de cuerpos puntuales cargados, es igual a la suma vectorial de la intensidad del campo electrostático de cada cuerpo puntual cargado, en el punto dado.*

## Problemas resueltos

1. Calcula el valor de la intensidad del campo electrostático en un punto A, situado a 2 m de un cuerpo puntual con una carga de  $4 \cdot 10^{-8}$  C. Representa el  $\vec{E}$  en los puntos A y B (fig. 4.15).

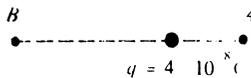


Fig. 4.15

*Solución*

Datos:

$$r = 2 \text{ m}$$

$$q = 4 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

El módulo de la intensidad del campo electrostático se puede calcular con la ecuación:

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

$$E = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-8} \text{ C}}{(2 \text{ m})^2}$$

$$E = 90 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

En la figura 4.16 se representan los vectores  $\vec{E}_A$  y  $\vec{E}_B$ , atendiendo a que la carga es positiva y que el punto  $B$  está más alejado del cuerpo cargado que el punto  $A$ .

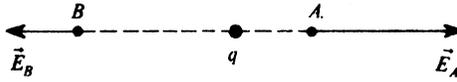


Fig. 4.16

2. En la figura 4.17 se representan dos cuerpos puntuales cargados y un punto  $A$ . Si el valor de la intensidad del campo electrostático en el punto  $A$ , inherente al cuerpo 1, es de  $5 \text{ N/C}$ , y al cuerpo 2, de  $10 \text{ N/C}$ , calcula y representa el vector intensidad del campo electrostático resultante en el punto  $A$ .

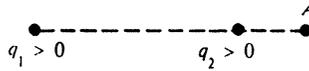


Fig. 4.17

*Solución*

Datos:

$$E_1 = 5 \text{ N/C}$$

$$E_2 = 10 \text{ N/C}$$

Para calcular la intensidad del campo electrostático es necesario aplicar el principio de superposición:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Como las cargas  $q_1$  y  $q_2$  son positivas, los vectores  $\vec{E}_1$  y  $\vec{E}_2$  en el punto  $A$  son colineales y tienen el mismo sentido (fig. 4.18a). Por lo tanto, el módulo de la intensidad del campo electrostático resultante en el punto  $A$  se puede hallar:

$$E = E_1 + E_2$$

$$E = 5 \text{ N/C} + 10 \text{ N/C}$$

$$E = 15 \text{ N/C}$$

El vector  $\vec{E}$  en el punto  $A$  aparece representado en la figura 4.18b, es colineal con  $\vec{E}_1$  y  $\vec{E}_2$  y tiene el mismo sentido que ellos.

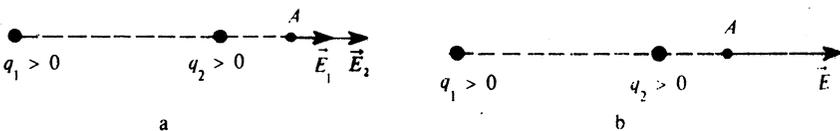


Fig. 4.18

3. Se tienen dos cuerpos puntuales con cargas  $q_1$  y  $-q_2$ , y un punto  $P$  (fig. 4.19). Calcula la intensidad del campo resultante en el punto  $P$ , si la del cuerpo 2 en dicho punto tiene un valor de 8 N/C.

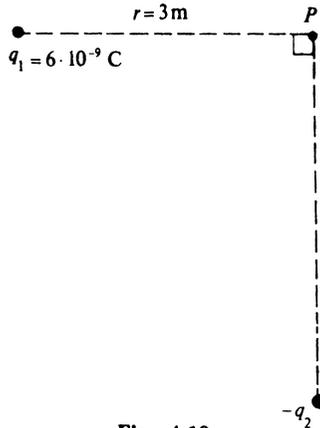


Fig. 4.19

*Solución*

Datos:

$$q_1 = 6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$r = 3 \text{ m}$$

$$E_2 = 8 \text{ N/C}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Para calcular la intensidad del campo electrostático, es necesario aplicar el principio de superposición:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

El valor de  $\vec{E}_1$  en el punto  $P$  hay que calcularlo. Aplicando la ecuación 4.4, obtenemos:

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

$$E_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{(3 \text{ m})^2} = 6 \text{ N/C}$$

Representando gráficamente los vectores  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$  y su resultante, como se observa en la figura 4.20, vemos que el módulo de  $\vec{E}$ , como el ángulo entre  $\vec{E}_1$  y  $\vec{E}_2$  es  $90^\circ$ , se puede calcular como:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$$E = \sqrt{(6 \text{ N/C})^2 + (8 \text{ N/C})^2}$$

$$E = 10 \text{ N/C}$$

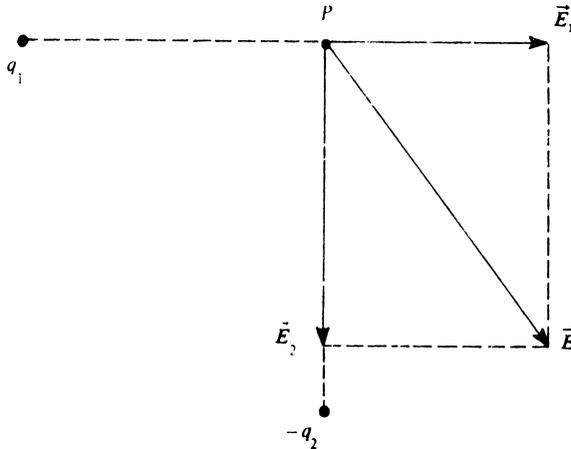


Fig. 4.20

4. En la figura 4.21 se representan los vectores de la intensidad del campo electrostático de dos cuerpos puntuales cargados, en un punto  $P$ . Determina la intensidad del campo electrostático en el punto  $P$ .

Escala:  $1 \text{ cm} = 2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{N}}{\text{C}}$

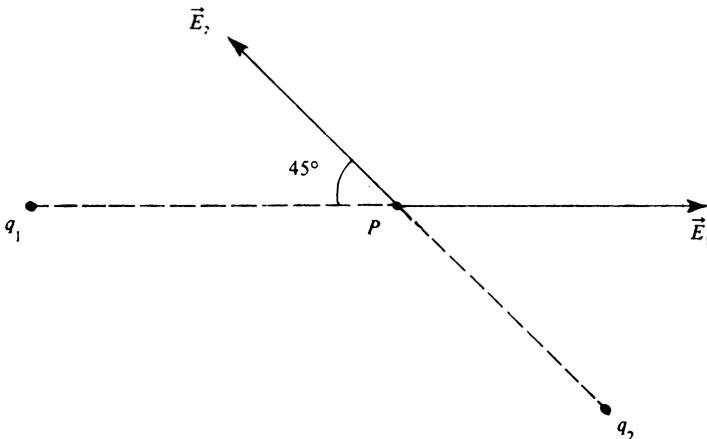


Fig. 4.21

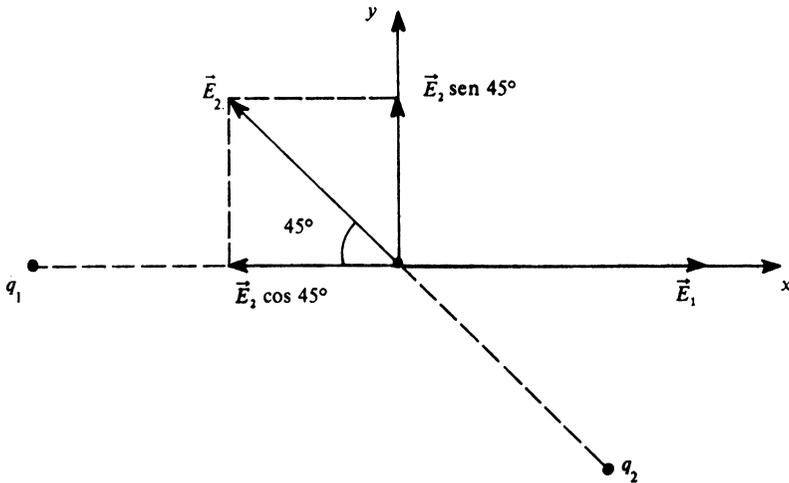
**Solución**

Según la escala:

$$E_1 = 8 \cdot 10^{-9} \frac{N}{C}$$

$$E_2 = 6 \cdot 10^{-9} \frac{N}{C}$$

Para determinar  $\vec{E}$  en el punto  $P$ , se selecciona un sistema coordenado y se representan las componentes de  $E_2$  en los ejes (fig. 4.22).



**Fig. 4.22**

Entonces:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Ahora:

$$E_x = E_1 - E_2 \cos 45^\circ$$

$$E_x = 8 \cdot 10^{-9} \frac{N}{C} - 6 \cdot 10^{-9} \frac{N}{C} \cdot 0,7$$

$$E_x = 8 \cdot 10^{-9} \frac{N}{C} - 4,2 \cdot 10^{-9} \frac{N}{C}$$

$$E_x = 3,8 \cdot 10^{-9} \frac{N}{C}$$

$$E_y = E_2 \sen 45^\circ$$

$$E_1 = 6 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{C}} \cdot 0,7$$

$$E_1 = 4,2 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Ahora, como se ve en la figura 4.23,  $\vec{E}_1$  y  $\vec{E}_2$  forman un ángulo de  $90^\circ$ , por lo que:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$$E = \sqrt{(3,8)^2 + (4,2)^2} \cdot (10^9) \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$E = 5,7 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

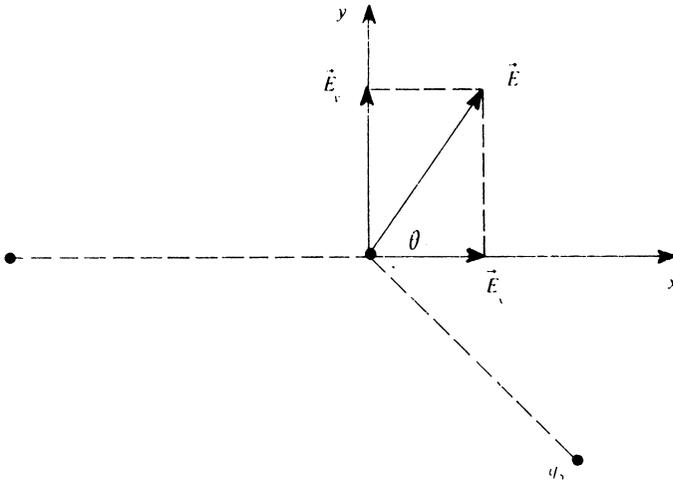


Fig. 4.23

Después de determinar el módulo de  $\vec{E}$  se puede conocer su dirección calculando el ángulo que forma con el eje x, de la siguiente forma:

$$\tan \theta = \frac{E_y}{E_x}$$

$$\tan \theta \approx 1,1$$

$$\theta \approx 48^\circ$$

## Tareas

28. ¿Cuál es la expresión que permite calcular el valor del campo electrostático en un punto, a una distancia  $r$  de un cuerpo puntual con carga conocida?

29. Enuncia el principio de superposición de la intensidad del campo electrostático.
30. Resuelve el problema resuelto 1 suponiendo que la carga es de  $-4 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ .
31. Resuelve el problema resuelto 2 suponiendo que la carga 1 es negativa.
32. Si en el punto  $P$  del ejemplo 3 se sitúa un cuerpo de prueba de  $3 \cdot 10^{-4} \text{ C}$ , calcula el módulo de la fuerza que actúa sobre el mismo.

#### 4.7 Trabajo realizado por el campo electrostático

Vamos aquí a ocuparnos del aspecto energético de las interacciones eléctricas. Conocemos que el campo electrostático ejerce fuerzas sobre los cuerpos cargados y puede provocar su desplazamiento. Entonces, el campo electrostático puede realizar un trabajo mecánico sobre los cuerpos cargados.

Consideremos un cuerpo de prueba, con carga  $q_0$ , que se traslada en una región donde la intensidad del campo electrostático se mantiene constante, es decir, donde el campo electrostático es uniforme. En la figura 4.24 aparecen representadas dos trayectorias por las que llevaremos el cuerpo de prueba, una es  $ab$  y la otra  $acb$ .

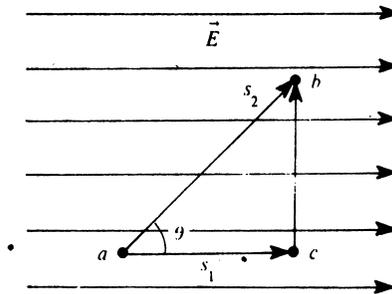


Fig. 4.24

Calculemos el trabajo realizado por el campo electrostático al trasladar al cuerpo de prueba por la trayectoria  $acb$ , que llamaremos  $W_{acb}$ . El trabajo en esta trayectoria lo podemos calcular en dos partes: una de  $a$  hasta  $c$ , que denominaremos  $W_{ac}$  y la otra de  $c$  hasta  $b$ ,  $W_{cb}$ . Es decir:

$$W_{acb} = W_{ac} + W_{cb}$$

Para calcular cada uno de los trabajos, conocemos, según la ecuación 4.3, que  $\vec{F} = q_0 \vec{E}$  y que se mantiene constante, por ser el campo uniforme. Además, en la figura 4.25 podemos observar que el ángulo que forman la fuerza y el desplazamiento es  $0^\circ$  en la trayectoria  $ac$ , y en la trayectoria  $cb$  es de  $90^\circ$ .

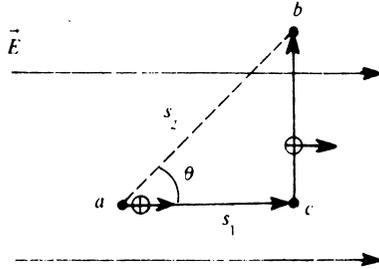


Fig. 4.25

De lo anterior se puede plantear que:

$$W_{ac} = q_0 E s_1$$

$$W_{cb} = 0$$

luego:

$$W'_{ab} = q_0 E s_1$$

Para la trayectoria  $ab$ , se observa en la figura 4.25 que el ángulo entre la fuerza y el desplazamiento es  $\theta$ , por lo tanto:

$$W'_{ab} = q_0 E s_2 \cos \theta$$

como  $s_1 = s_2 \cos \theta$ , se obtiene:

$$W'_{ab} = q_0 E s_1$$

De aquí:

$$W'_{ab} = W_{ac}$$

Esto demuestra que el trabajo realizado por un campo electrostático uniforme es independiente de la trayectoria seguida. Además, se puede demostrar que, para cualquier trayectoria y para cualquier campo no uniforme, también se cumple lo antes expuesto.

Si el valor del trabajo realizado no depende de la trayectoria, entonces sólo depende de sus puntos inicial y final. Esta propiedad del campo electrostático lo clasifica como un *campo de fuerzas conservativo*, al igual que el campo gravitatorio. En décimo grado se demostró que el trabajo realizado por la fuerza de gravedad no depende de la trayectoria.

## Tareas

33. ¿Qué significa que el campo electrostático sea conservativo?
34. Si el cuerpo de prueba en la figura 4.25 es trasladado nuevamente a la posición inicial, ¿cuál es el trabajo total realizado por el campo electrostático?

## 4.8 Energía potencial de un cuerpo cargado en un campo electrostático

Conocemos que para alejar un cuerpo de la superficie de la Tierra es necesario realizar un trabajo, y que dicho trabajo quedará almacenado en forma de energía potencial gravitatoria si despreciamos la fuerza de rozamiento del aire. Con esta energía potencial gravitatoria el cuerpo, al caer, es capaz de comprimir un muelle, poner en movimiento un cuerpo, etc. También puede transformarla en otro tipo de energía.

Análogamente, como el campo electrostático es un campo de fuerzas conservativo, al aproximar dos cuerpos con cargas de igual signo (o alejar dos cuerpos con cargas de signo contrario) hay que realizar un trabajo en contra del campo electrostático, que quedará almacenado en forma de *energía potencial*. Esto lo prueba el hecho de que, al dejarlos libres, los cuerpos se ponen en movimiento adquiriendo una energía cinética a expensas de la energía potencial (los cuerpos con cargas de signos iguales se alejan y los de signos contrarios se aproximan).

Por consiguiente, como un sistema de cuerpos cargados es capaz de realizar un trabajo a causa de sus interacciones, posee energía potencial, la cual se denomina *energía potencial electrostática*. Por ejemplo, los electrones, al interactuar con el núcleo atómico o los átomos que constituyen las moléculas, poseen energía potencial electrostática.

Podemos afirmar que el trabajo del campo electrostático es igual a la variación de la energía potencial electrostática del sistema, tomada con signo contrario, es decir:

$$W = -\Delta E_p = -(E_{p \text{ final}} - E_{p \text{ inicial}}) \quad (4.5)$$

Si el campo electrostático realiza un trabajo positivo, la energía potencial electrostática del sistema disminuye, por lo que  $\Delta E_p < 0$ . Si, al contrario, el trabajo realizado por el campo electrostático es negativo, la energía potencial electrostática del sistema aumenta y  $\Delta E_p > 0$ ; de aquí que en la expresión del trabajo debe aparecer el signo menos.

De todo el análisis desarrollado anteriormente es fácil comprender que tiene un significado físico de interés no la energía potencial electrostática misma, sino la variación de sus valores, que queda determinada por el trabajo del campo electrostático. Por tal motivo, la energía potencial electrostática se da referida a una energía potencial electrostática arbitraria, que generalmente se escoge igual a cero. Esto es posible hacerlo porque la variación de la energía potencial no depende del valor escogido.

### Tareas

35. ¿Qué tipo de energía posee un sistema formado por varios cuerpos cargados que interactúan entre sí por medio de sus campos electrostáticos?

36. Al trasladar un cuerpo puntual cargado, su energía potencial electrostática varió de 50 J hasta 40 J. Calcula el trabajo realizado por el campo electrostático. ¿Aumenta o disminuye la energía potencial electrostática? ¿El cuerpo puntual cargado se movió contra las fuerzas coulombianas o a favor de estas?

#### 4.9 Potencial electrostático

Experimentalmente se puede comprobar que la energía potencial electrostática aumenta proporcionalmente con la carga, para un cuerpo que se encuentre situado en un punto de un campo electrostático. Por consiguiente, la razón entre la energía potencial electrostática y el valor de la carga del cuerpo en un punto ( $E_p/q$ ) permanece constante. Por lo tanto, esta magnitud, que no depende del valor de la carga del cuerpo sino de las características del campo electrostático en sus diferentes puntos, se denomina *potencial electrostático*, se designa con la letra griega  $\varphi$  y se expresa matemáticamente como:

$$\varphi = \frac{E_p}{q} \quad (4.6)$$

Se denomina *potencial electrostático* en un punto de un campo electrostático, a la razón entre la energía potencial electrostática de un cuerpo puntual cargado, colocado en el punto, y el valor de la carga eléctrica.

El potencial electrostático es una magnitud escalar que caracteriza energéticamente el campo electrostático en sus diferentes puntos. En unidades del S.I. se mide en joule/coulomb (J/C), unidad que recibe el nombre de volt (V). Esta unidad recibe este nombre en honor al científico italiano Alejandro Volta.

De igual forma que la energía potencial, el valor del potencial en un punto determinado depende de la elección del nivel de referencia del potencial. El potencial en un punto, como tal, no tiene un significado práctico. El sentido lo tiene la diferencia de potencial, la cual no depende de la elección del nivel de referencia del potencial.

Supongamos que un cuerpo con carga  $q$  se mueve en un campo electrostático, desde la posición 1 hasta la 2. El trabajo del campo electrostático es:

$$W = -(E_{p2} - E_{p1})$$

De la definición de potencial:

$$\varphi_1 = \frac{E_{p1}}{q}$$

$$\varphi_2 = \frac{E_{p2}}{q}$$

Entonces:

$$E = q \varphi_1$$

$$E = q \varphi_2$$

y el trabajo puede expresarse como:

$$W = (q \varphi_2 - q \varphi_1) = -q (\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$W = q (\varphi_1 - \varphi_2)$$

de donde:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{W}{q} \tag{4.7}$$

donde  $\varphi_1 - \varphi_2$  es la diferencia de potencial.

Por lo tanto, *la diferencia de potencial entre dos puntos es igual a la razón entre el trabajo realizado por el campo electrostático al trasladar un cuerpo puntual cargado del punto inicial al final, y la carga de cuerpo.*

En unidades del S.I., la diferencia de potencial se mide en joule/coulomb (J/C) o en volt (V).

Utilizando un electrómetro, es posible determinar la diferencia de potencial entre dos cuerpos. Para esto uno de los cuerpos se conecta a la varilla del electrómetro y el otro a la caja del mismo, como se observa en la figura 4.26a.

En otras ocasiones la caja del electrómetro se conecta a tierra y se supone que el potencial de esta es nulo. De esta forma medimos el potencial de los cuerpos conectados a la varilla del electrómetro con respecto al potencial arbitrario de tierra, como se observa en la figura 4.26b.

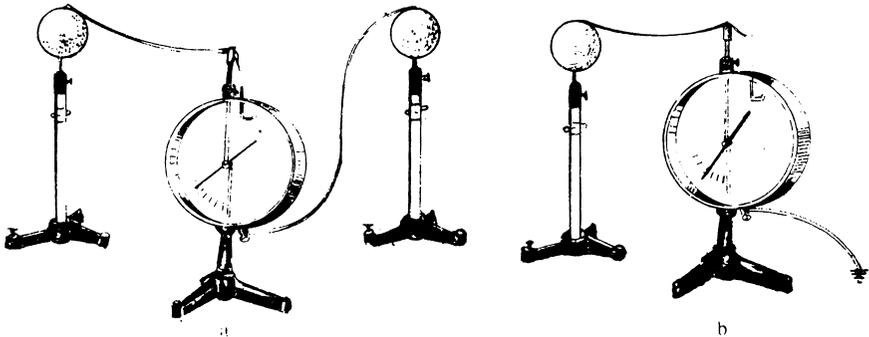


Fig. 4.26

## Tareas

37. ¿A qué se denomina potencial electrostático?
38. ¿A qué se denomina diferencia de potencial?

## 4.10 Superficies equipotenciales y su relación con las líneas de fuerza

Al explorar un campo electrostático, es posible encontrar muchos puntos del mismo que se encuentren a un mismo potencial. El lugar geométrico de los puntos de igual potencial electrostático se llama *superficie equipotencial*. Para dar una descripción del campo electrostático en una cierta región del espacio se puede utilizar una familia de superficies equipotenciales, correspondiendo cada superficie a un valor diferente del potencial. En la figura 4.27 se representan tres superficies equipotenciales, con potenciales  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  y  $\varphi_3$  respectivamente.

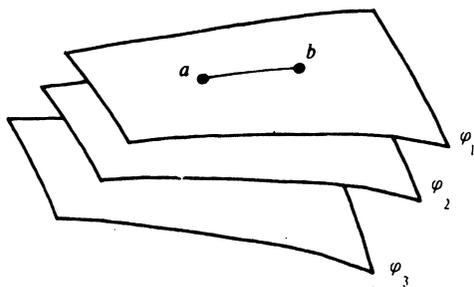


Fig. 4.27

También estudiamos que el campo electrostático se puede describir por medio de las líneas de fuerza. Ahora analizaremos la relación que existe entre las líneas de fuerza y las superficies equipotenciales.

Si consideramos que un cuerpo de prueba con carga  $q_0$  es trasladado por la superficie equipotencial  $\varphi_1$  desde la posición inicial  $a$  hasta la posición final  $b$ , como aparece representado en la figura 4.27, entonces el trabajo realizado por el campo electrostático es nulo, ya que  $\varphi_a = \varphi_b$ .

Como el trabajo también se puede expresar por:

$$W = q_0 E s \cos \theta$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre la superficie y el vector  $\vec{E}$ , y como  $W = 0$ , entonces:

$$q_0 E s \cos \theta = 0$$

lo cual implica que:

$$\cos \theta = 0$$

ya que  $q_0 \neq 0$ ,  $E \neq 0$  y  $s \neq 0$ . Luego  $\theta = 90^\circ$ .

Esto nos indica que la dirección de  $\vec{E}$  es perpendicular a cada punto de la superficie equipotencial. Pero  $\vec{E}$  es tangente a la línea de fuerza, es decir, las líneas de fuerza y  $\vec{E}$  tienen la misma dirección en los puntos de

la superficie equipotencial. Por lo tanto, llegamos a la conclusión de que las líneas de fuerza son perpendiculares a cada punto de las superficies equipotenciales.

Atendiendo a esta relación, para un campo electrostático uniforme donde las líneas de fuerza son paralelas, las superficies equipotenciales son planos paralelos entre sí (fig. 4.28a). En el caso de un cuerpo puntual cargado, la distribución de las líneas de fuerza es radial y las superficies equipotenciales son esferas concéntricas con el cuerpo puntual (fig. 4.28b).

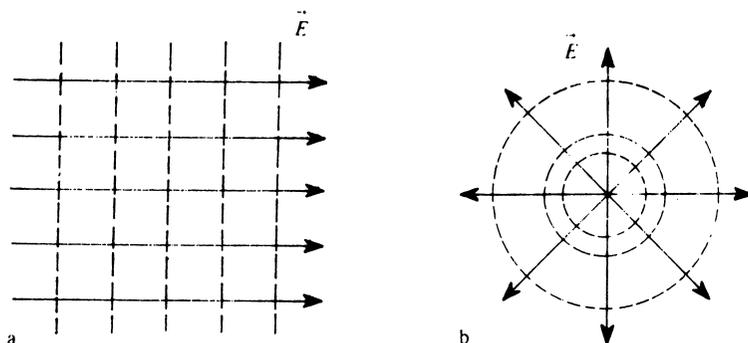


Fig. 4.28

## Tareas

39. ¿Qué son las superficies equipotenciales?
40. ¿Qué relación existe entre las superficies equipotenciales y las líneas de fuerza del campo electrostático?

### 4.11 Relación entre la intensidad del campo electrostático y la diferencia de potencial

Entre la intensidad del campo electrostático y la diferencia de potencial existe una dependencia determinada. Consideremos un cuerpo de prueba con carga  $q_0$  que se traslada en el sentido de la intensidad del campo electrostático uniforme,  $\vec{E}$ , desde un punto 1 hasta otro punto 2. La distancia entre los dos puntos es  $\Delta d$  (fig. 4.29).

El campo electrostático realizará el trabajo:

$$W = q_0 E \Delta d$$

De acuerdo con la ecuación 4.7, este trabajo también puede representarse como:

$$W = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$$

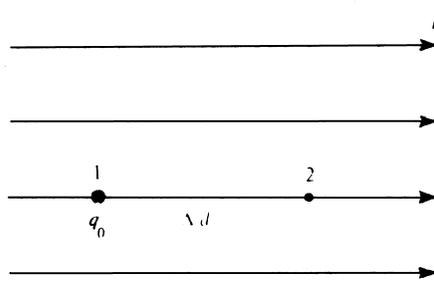


Fig. 4.29

Igualando entre sí las expresiones del trabajo, hallamos el módulo de la intensidad de campo:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta d} \quad (4.8)$$

La ecuación obtenida muestra que, cuanto menos varía el potencial en la distancia  $\Delta d$ , tanto menor es la intensidad del campo electrostático. Si no varía, esta intensidad es nula.

Como, durante la traslación de un cuerpo cargado positivamente en el sentido del vector  $\vec{E}$ , el campo electrostático realiza el trabajo positivo  $W = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2)$ , el potencial  $\varphi_1$  es mayor que el potencial  $\varphi_2$ . Por consiguiente, *la intensidad del campo electrostático está dirigida en el sentido en que disminuye el potencial.*

Todo campo electrostático en una pequeña región del espacio se puede considerar uniforme. Por eso la ecuación:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta d}$$

es válida para cualquier campo eléctrico, si la distancia  $\Delta d$  es tan pequeña que la variación de la intensidad del campo electrostático en esta distancia se puede despreciar.

En unidades del S.I., la intensidad del campo electrostático se puede expresar en volt por metro (V/m). Como ya se ha dicho, la intensidad se puede expresar también en newton por coulomb.

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} \cdot \frac{1}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{C}} \cdot \frac{1}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

## Tareas

41. ¿Cómo está relacionada la diferencia de potencial con la intensidad del campo electrostático?

42. En la figura 4.30 se representan tres superficies equipotenciales. Representa el vector intensidad del campo electrostático en los puntos  $A$ ,  $B$  y  $C$  señalados en la figura.

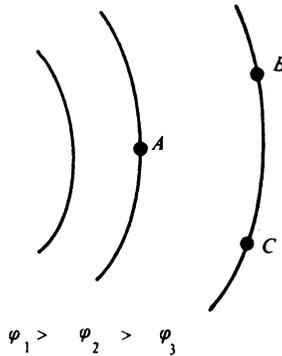


Fig. 4.30

#### 4.12 Potencial en el campo inherente a un cuerpo puntual cargado y a un sistema de cuerpos puntuales cargados

Para determinar el potencial electrostático alrededor de un cuerpo puntual cargado, es posible deducir una ecuación que permite calcular su valor en los diferentes puntos. En nuestro caso sólo vamos a plantearla y analizar su significado físico.

La ecuación del potencial electrostático de un cuerpo puntual cargado es:

$$\varphi = k \frac{q}{r} \quad (4.9)$$

En la deducción de esta ecuación se consideró que el potencial era nulo en los puntos infinitamente alejados del cuerpo puntual cargado. Como recordarás, la elección del nivel cero de potencial es arbitrario. Para este caso en particular resulta conveniente la elección adoptada.

Se conoce que:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{W}{q}$$

Si se escoge el punto 2 infinitamente alejado del cuerpo puntual cargado, entonces  $\varphi_2 = 0$  y se obtiene:

$$\varphi_1 = \frac{W}{q}$$

Por consiguiente, el potencial electrostático a una distancia  $r$  de un cuerpo puntual cargado, será numéricamente igual al trabajo que realiza el campo en trasladar un cuerpo de prueba, con carga unitaria positiva, desde el punto dado del espacio hasta un punto infinitamente alejado.

Es evidente, atendiendo a la ecuación del potencial 4.9, que este tendrá un valor positivo ( $\varphi > 0$ ) cuando la carga del cuerpo puntual es positiva ( $q > 0$ ); si está cargado negativamente ( $q < 0$ ), el potencial es negativo ( $\varphi < 0$ ).

En el caso de un sistema de cuerpos puntuales cargados, el potencial electrostático, en un punto cualquiera, se determina como la suma algebraica de los respectivos potenciales electrostáticos de cada uno de los cuerpos puntuales en dicho punto. Por ejemplo, si en un punto existen los potenciales  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ , inherentes a igual número de cuerpos puntuales cargados, el potencial resultante  $\varphi$  en dicho punto será:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$$

## Problema resuelto

1. En la figura 4.31 se representa un sistema formado por dos cuerpos puntuales cargados. Calcula el potencial en el punto  $a$ , conociendo que en dicho punto el potencial del cuerpo 1 es de 50 V.

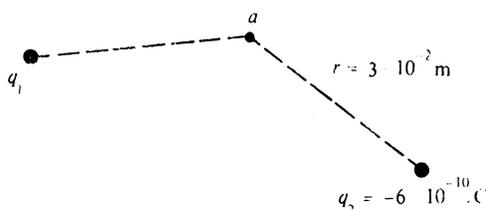


Fig. 4.31

*Solución*

Datos:

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

$$r_2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$\varphi_1 = 50 \text{ V}$$

El potencial en el punto  $a$  se obtiene sumando los potenciales de los dos cuerpos:

$$\varphi_a = \varphi_1 + \varphi_2$$

El valor del potencial  $\varphi_1$  es conocido, pero el valor de  $\varphi_2$  hay que calcularlo:

$$\varphi_2 = k \frac{q_2}{r_2}$$

$$\varphi_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{(-6 \cdot 10^{-10} \text{ C})}{3 \cdot 10^{-2} \text{ m}}$$

$$\varphi_2 = -180 \text{ V}$$

Sustituyendo:

$$\varphi_a = 50 \text{ V} + (-180 \text{ V})$$

$$\varphi_a = -130 \text{ V}$$

## Tareas

43. ¿Cómo se puede determinar el potencial electrostático en un punto que está a una distancia  $r$  de un cuerpo puntual con carga  $q$ ?
44. Si se tiene un sistema de cuerpos puntuales cargados, di cómo se puede determinar el potencial electrostático en un punto cualquiera del espacio.

### 4.13 *Campo electrostático entre dos placas planas paralelas cargadas muy próximas entre sí*

En la práctica, los campos electrostáticos con los cuales se trabaja no están asociados, por lo general, a cuerpos puntuales cargados, sino a cuerpos de determinadas dimensiones donde se encuentra distribuida la carga eléctrica.

Es posible conocer algunas propiedades del campo electrostático de los cuerpos cargados mediante experimentos sencillos. Ciertas sustancias finamente divididas, como por ejemplo, la harina, pueden ser orientadas cuando flotan en un líquido al aplicársele un campo electrostático. De este modo se pueden obtener determinadas figuras, que se pueden tomar como representaciones de las líneas de fuerza del campo electrostático existente en la región dada (fig. 4.32).

Estudiaremos el campo electrostático que existe entre dos placas planas conductoras, cargadas uniformemente con cargas iguales y de signo contrario. Las colocaremos de forma que sus planos queden paralelos y la distancia entre ellos sea despreciable en comparación con las dimensiones lineales de las placas. En la figura 4.32a se puede observar la disposición de las líneas de fuerza en la región próxima al centro de las placas. Podemos decir que en dicha región el campo electrostático es uni-

forme. Esto también se puede comprobar al introducir un cuerpo de prueba en dicha región y observar que la fuerza que actúa sobre él es la misma en los diferentes puntos donde lo situemos.

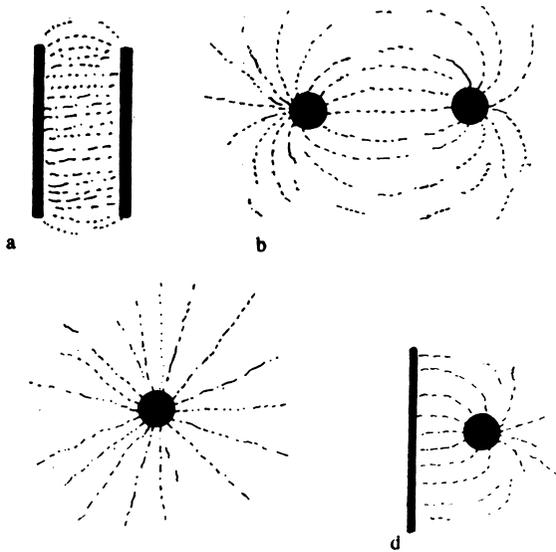


Fig. 4.32

Si medimos la diferencia de potencial que hay entre las placas, utilizando un electrómetro, y medimos la distancia entre ellas, se puede determinar el módulo de la intensidad del campo electrostático utilizando la ecuación:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$$

Experimentalmente se comprueba que el módulo de  $\vec{E}$  se puede variar cambiando la carga en las placas. Si aumentamos la carga sobre las placas, sin alterar la distancia entre ellas,  $E$  aumenta proporcionalmente. Por otro lado, manteniendo la misma carga en las placas y la distancia entre ellas sin alterar,  $E$  varía inversamente proporcional con el área  $S$  de las placas. En conclusión,  $E$  es proporcional a  $\frac{q}{S}$ . A esta razón se le denomina densidad superficial de carga y se la representa con la letra griega  $\sigma$ . El módulo de la intensidad del campo electrostático entre las placas se puede expresar mediante la ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

El potencial electrostático entre las placas disminuye en el sentido de las líneas de fuerza, o sea, el potencial será mayor próximo a la placa cargada positivamente y menor próximo a la placa cargada negativamente (fig. 4.33).

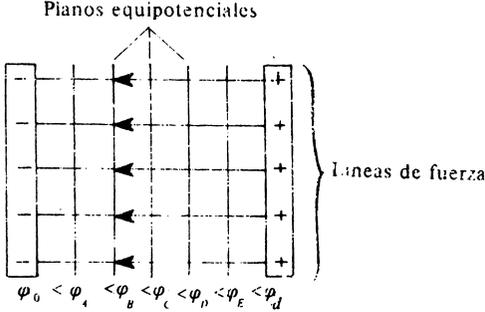


Fig. 4.33

Si se escoge como nivel cero de potencial la placa cargada negativamente, se puede comprobar de forma experimental, con ayuda del electrómetro, que el potencial es proporcional a la distancia que hay a esta misma placa.

El potencial en los puntos entre las placas se puede calcular por la ecuación:

$$\varphi = Er$$

donde  $E$  es módulo de la intensidad del campo electrostático entre las placas y  $r$  es la distancia del punto a la placa cargada negativamente.

En la figura 4.34 se observa la proporcionalidad que existe entre  $\varphi$  y  $r$ , para los puntos entre las placas.

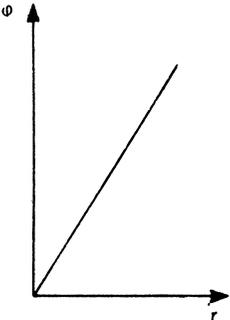


Fig. 4.34

## Tareas

45. ¿A qué se denomina densidad superficial de carga?  
46. ¿Cómo depende el campo electrostático entre dos placas cargadas de la  $\sigma$ ?

### 4.14 Campo electrostático de una esfera metálica cargada

Se ha explorado el campo electrostático alrededor de una esfera metálica cargada y aislada, utilizando un cuerpo de prueba. De los resultados de los experimentos se llegó a la conclusión de que, tanto en la superficie como en puntos exteriores a esta, la intensidad del campo electrostático y el potencial son equivalentes a los de un cuerpo puntual cargado que se encuentre en el centro de la esfera y tenga la misma carga que ella. En la figura 4.35 se representan las líneas de fuerza para la esfera cargada y para la supuesta carga colocada en su centro.

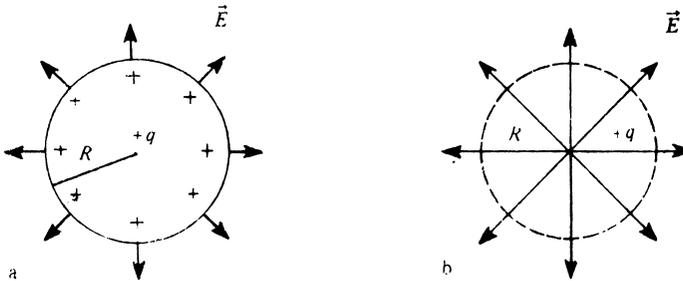


Fig. 4.35

Por consiguiente, si el radio de la esfera es  $a$  y su carga  $q$ , entonces:

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

$$\varphi = k \frac{q}{r} \quad r > a$$

En la superficie de la esfera ( $r = a$ ):

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

$$\varphi = k \frac{q}{a}$$

Para analizar el campo electrostático en el interior de la esfera, primero analizaremos un sencillo experimento, consistente en cargar una esfera metálica hueca  $A$ . Una vez hecho esto, la esfera  $A$  se toca con una pequeña esferita  $C$  por su parte exterior. Después, con la esferita, tocamos un electrómetro y observamos que la aguja de este indica una posición distinta de cero, lo cual significa que  $C$  se carga durante el contacto con  $A$  (fig. 4.36a).

Si se repite el experimento introduciendo la esferita  $C$  en  $A$ , se observa que la aguja del electrómetro se mantiene en el cero de la escala (fig. 4.36b). Esto prueba que  $C$  no está cargada. Podemos concluir entonces que toda la carga de  $A$  está distribuida en su superficie.

Además, no existen corrientes eléctricas en la esfera hueca. Esto demuestra que la intensidad del campo electrostático en el interior de la esfera es nula.

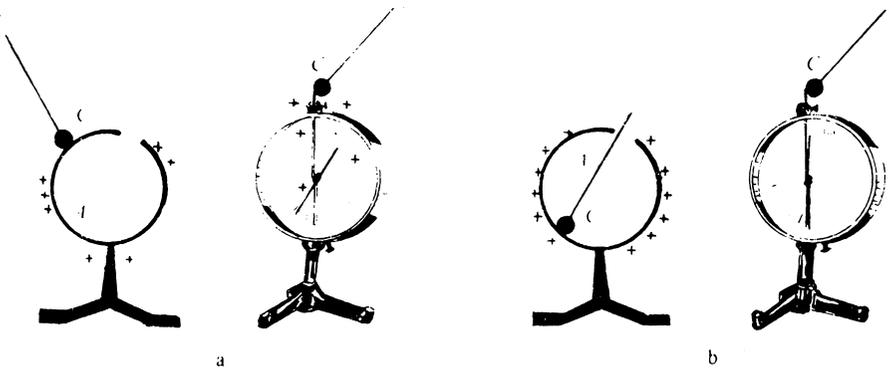


Fig. 4.36

Cuando un cuerpo metálico aislado se carga, se originan campos eléctricos en su interior que actúan sobre los portadores de carga haciendo que se desplacen los que están libres y produciendo corrientes internas, las cuales redistribuyen las cargas, hasta que cesan las corrientes internas cuando  $E$  se anula. De esta forma se alcanza el equilibrio electrostático.

Si la intensidad del campo se anula en el interior de la esfera,  $\varphi$  permanece constante allí, atendiendo a que, según la ecuación 4.8:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$$

y para  $E = 0$ ,  $\varphi_1 = \varphi_2$

El valor del potencial en el interior de la esfera tiene que ser igual al que tiene en la superficie; de lo contrario, existiría una diferencia de po-

tencial que originaría una intensidad de campo diferente de cero, lo que no ocurre. De aquí que:

$$\varphi = k \frac{q}{a} \quad r \leq a$$

En la figura 4.37 aparecen las gráficas  $E = f(r)$  y de  $\varphi = f(r)$  para una esfera cargada y aislada.

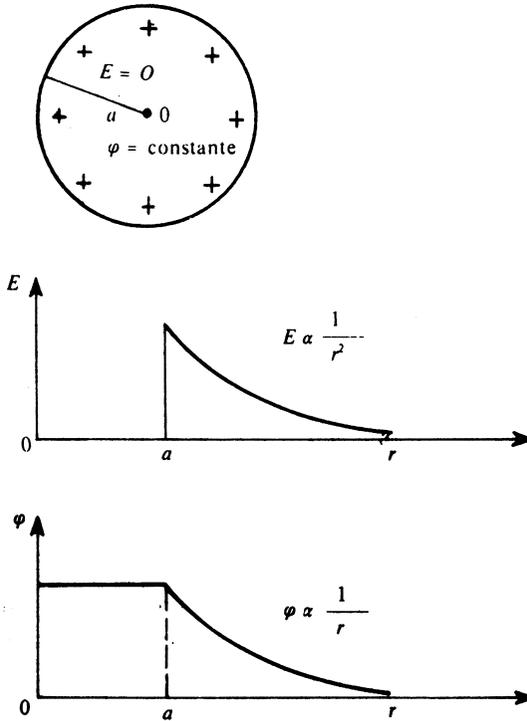


Fig. 4.37

### Poder de las puntas

Conocemos cómo es la intensidad del campo electrostático en la superficie de una esfera metálica cargada y aislada. Ahora, con un sencillo experimento analizaremos la intensidad del campo electrostático de cuerpos metálicos de diversas formas, cargados y aislados. Para este experimento se utiliza una tela metálica, a la que se le pegan tiras ligeras de papel de estaño. Al cargar la tela metálica y darle diferentes formas, las tiras de papel de estaño se despegan de ella formando ángulos mayores o menores en dependencia del lugar donde se encuentren, como se puede observar en la figura 4.38.

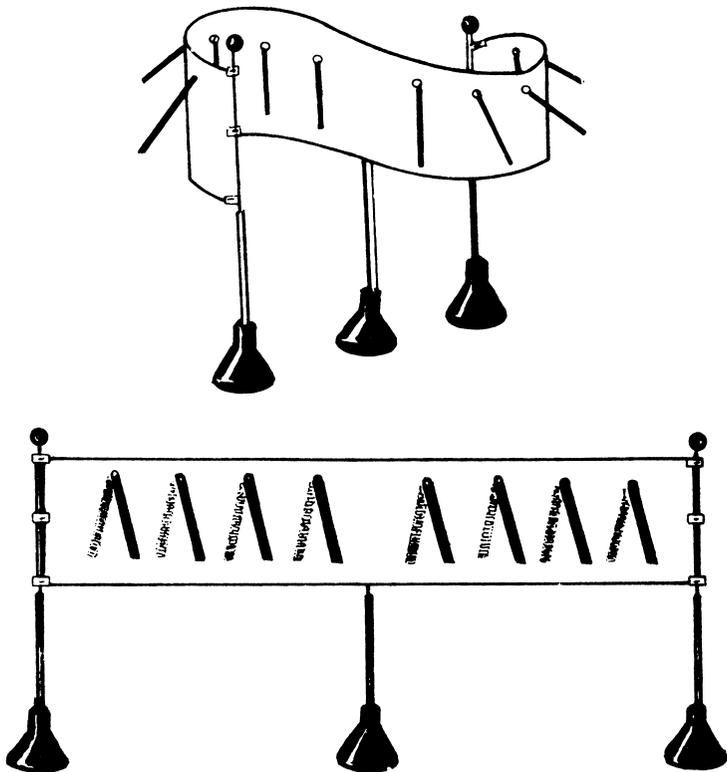


Fig. 4.38

En la figura 4.38 se puede observar que en los lugares donde la curvatura dada a la tela metálica es muy grande, las tiras de papel de estaño se encuentran más separadas. Esto indica que, en estos lugares, la intensidad del campo electrostático es mayor que en otros puntos donde la curvatura es menor. También se puede observar que, en la zona del interior de los cuerpos formados, las tiras no se despegan, lo que indica que la intensidad del campo es nulo.

Para el caso de la esfera metálica cargada de radio  $a$ , el módulo de la intensidad del campo electrostático en todos los puntos de su superficie es:

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

y como:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

queda:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{a^2}$$

la densidad superficial de carga en este caso es:

$$\sigma = \frac{q}{4\pi a^2}$$

donde  $q$  es la carga eléctrica total de la esfera y  $4\pi a^2$  el área de su superficie. Sustituyendo esto en la expresión de  $E$ , se obtiene:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Esto significa que el módulo de la intensidad del campo electrostático en la superficie de la esfera es directamente proporcional a la densidad superficial de carga sobre ella. Para el caso de la esfera, la densidad es constante, por lo que  $E$  es constante.

Esta relación entre  $E$  y  $\sigma$ , obtenida para la esfera, es válida para todos los cuerpos metálicos cargados, cualquiera que sea su forma. Esto explica por qué, en las zonas de mayor curvatura de los cuerpos, la intensidad del campo electrostático es más intenso. En dichas zonas la densidad de carga es mayor. Así, la intensidad del campo, en la superficie de un conductor como el representado en la figura 4.39, es más intensa en el punto C, donde la curvatura de la superficie es muy grande.

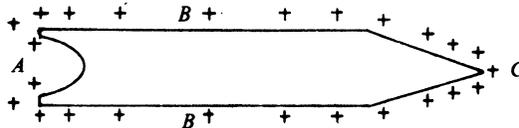


Fig. 4.39

Este resultado tiene mucha importancia en la técnica. Por ejemplo, los pararrayos se construyen terminados en puntas muy finas, para que la intensidad del campo eléctrico allí sea muy grande y se produzcan las descargas de las nubes.

## Tareas

47. ¿Cuál es el valor de la intensidad del campo electrostático en el interior y en la superficie de un cuerpo metálico cargado?

48. ¿Cómo depende la intensidad del campo eléctrico en la superficie de un conductor cargado de su forma?
49. Representa el vector intensidad del campo electrostático en los puntos *A*, *B* y *C* de la superficie del cuerpo de la figura 4.40.

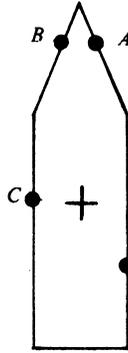


Fig. 4.40

#### 4.15 Conductores dentro del campo electrostático

Estudiaremos ahora la acción del campo electrostático sobre un conductor. Para esto, supongamos que en una región donde existe un campo electrostático, como el representado en la figura 4.41, se coloca un cuerpo metálico descargado.

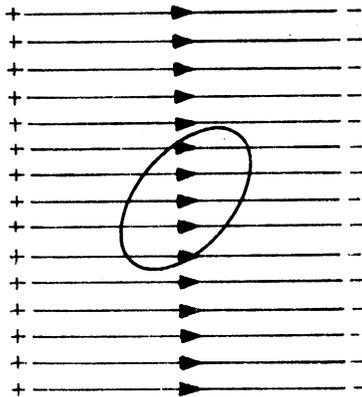


Fig. 4.41

El campo electrostático, al actuar sobre los portadores de carga del cuerpo metálico, hace que los electrones libres se desplacen en sentido contrario del campo. En la zona del cuerpo hacia donde se dirigen los

electrones libres aumenta la concentración de carga negativa, mientras que donde queda déficit de electrones aumenta la concentración de cargas positivas. Esta redistribución de la carga dentro del cuerpo origina un campo eléctrico como el representado en la figura 4.42.

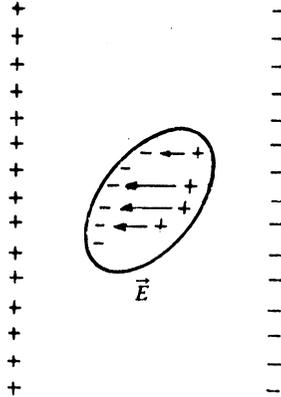


Fig. 4.42

El campo eléctrico originado por la redistribución de las cargas, aumenta en la medida en que aumentan las concentraciones de cargas negativas y positivas por el movimiento de los electrones libres. Este campo eléctrico seguirá aumentando hasta que anule al que existía inicialmente en la zona que ahora ocupa el conductor. Al ocurrir esto, cesa el desplazamiento de los electrones libres, alcanzándose el equilibrio electrostático (fig. 4.43).

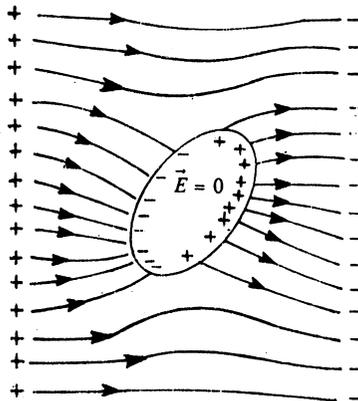


Fig. 4.43

Al observar la figura 4.43, queda por analizar por qué las líneas de fuerza del campo electrostático son perpendiculares a cada uno de los puntos de la superficie del conductor.

Como en el volumen que ocupa el conductor el campo electrostático se anula ( $\vec{E} = 0$ ), el potencial  $\varphi$ , tanto en el interior como en la superficie, tiene igual valor. Por ello, la superficie del cuerpo representa una superficie equipotencial y las líneas de fuerza son perpendiculares a ella, como ya fue mostrado.

### Pantallas eléctricas

Supongamos un conductor hueco  $C$ , en cuyo interior se encuentran los cuerpos  $S_1$  y  $S_2$  (fig. 4.44a). Si se acercan cuerpos cargados, el campo electrostático en el interior del conductor  $C$  permanece nulo, como se representa en la figura 4.44b.

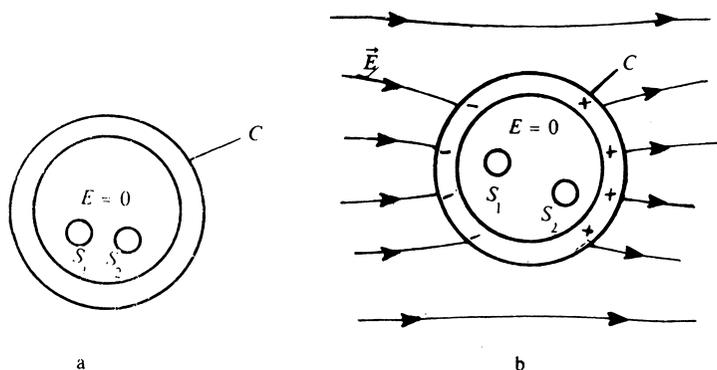


Fig. 4.44

Así, el conductor  $C$  constituye una pantalla eléctrica para los cuerpos situados en su interior, frente a las acciones de campos eléctricos externos. Este efecto es ampliamente utilizado en la práctica, para la protección electrostática de cuerpos que no deben ser afectados por cambios eléctricos externos. Por ejemplo, los electrómetros están protegidos con su caja metálica.

### Tareas

50. Explica los procesos que ocurren al situar un conductor descargado en el interior de un campo electrostático.
51. ¿Por qué las líneas de fuerza del campo electrostático son perpendiculares a la superficie del conductor, como se observa en la figura 4.43?
52. ¿Qué es una pantalla eléctrica?

## 4.16 Dieléctricos en un campo electrostático

Un dieléctrico (o aislante) está constituido por átomos o moléculas neutras. Los electrones en los dieléctricos están ligados al núcleo y no pueden desplazarse bajo la acción de un campo electrostático por todo el volumen de la sustancia; de aquí que sean malos conductores de la corriente eléctrica.

La diferencia entre las estructuras de los conductores y los dieléctricos hace que estos se comporten de formas distintas en un campo eléctrico.

Para poder comprender el comportamiento de los dieléctricos en presencia de campos electrostáticos, es necesario hacer un breve análisis de su estructura interna.

Las moléculas de los dieléctricos pueden clasificarse en polares y no polares. Los dieléctricos, a su vez, adoptan el nombre de las moléculas que los constituyen.

Las moléculas no polares son aquellas en las que los centros de distribución de las cargas positivas y negativas coinciden. El oxígeno, el hidrógeno, los gases inertes, el benzol, el polietileno, entre otras, son sustancias que poseen este tipo de moléculas.

Bajo la influencia de un campo eléctrico, los centros de cargas positivas y negativas en la molécula no polar pueden llegar a desplazarse. Se dice entonces que la molécula se ha polarizado.

En la figura 4.45a se representan moléculas no polares, en las que coinciden los centros de distribución de las cargas positivas y negativas. En la figura 4.45b aparece como, bajo la influencia del campo electrostático externo  $\vec{E}$ , se han polarizado estas moléculas.

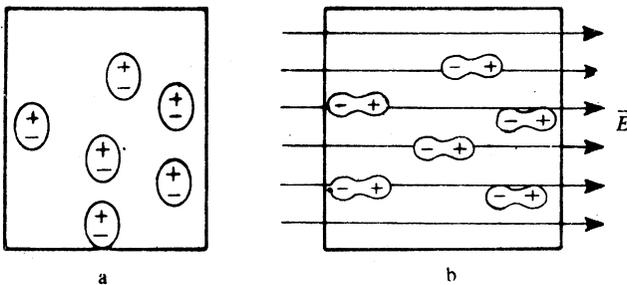


Fig. 4.45

Las moléculas polares son aquellas donde los centros de la distribución de las cargas positivas y negativas no coinciden. Esto se encuentra en el agua, los alcoholes, etcétera.

En la figura 4.46, donde se representa una molécula de agua, se observa la disposición asimétrica de las cargas positivas de los hidrógenos y la negativa del oxígeno.

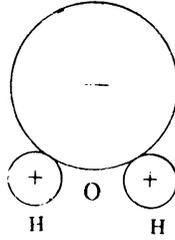


Fig. 4.46

Para el agua, el centro de distribución de las cargas negativas está aproximadamente en el centro del átomo de oxígeno, mientras que el centro de distribución de las cargas positivas está en el punto medio de la línea imaginaria que une los centros de los átomos de hidrógeno.

Las moléculas polares en los dieléctricos están orientadas al azar cuando no existe campo electrostático (fig. 4.47a). Bajo la acción de este, tiene lugar una cierta orientación. Cuanto más intenso es el campo electrostático externo, tanto mayor es el número de moléculas que se orientan en la dirección del mismo, como se representa en la figura 4.47b

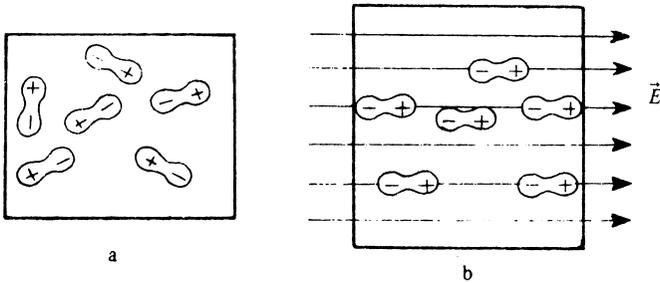


Fig. 4.47

En general, se puede observar de las figuras 4.45 y 4.47 que, independientemente de que los dieléctricos sean polares o no polares, bajo la acción de un campo electrostático externo una de sus superficies queda cargada positivamente y la otra negativamente. En este caso se dice que el dieléctrico se encuentra polarizado. Se origina entonces un campo electrostático en el interior del dieléctrico, orientado de la superficie cargada positivamente a la cargada negativamente. Este campo es contrario al campo electrostático externo. Por lo tanto, el campo electrostático en el interior del dieléctrico se debilita con respecto al exterior (fig. 4.48).

La disminución de la intensidad del campo electrostático en el interior del dieléctrico está en dependencia de sus características. Para caracteri-

zar esta propiedad se introduce una nueva magnitud, cuyo nombre es *permitividad* y se representa con la letra griega  $\epsilon$ .

La permitividad de un medio es la magnitud física que indica cuántas veces es menor la intensidad del campo eléctrico  $\vec{E}$  dentro del dieléctrico homogéneo, con respecto a la intensidad del campo en el vacío  $\vec{E}_0$ .

$$\epsilon = \frac{E_0}{E} \tag{4.10}$$

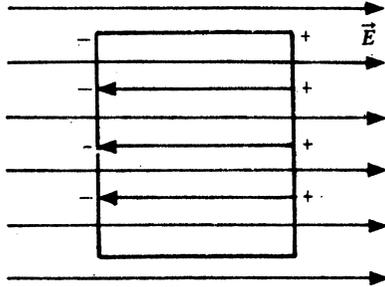


Fig. 4.48

De lo estudiado en este epígrafe se puede concluir que un campo electrostático, al actuar sobre un dieléctrico, lo polariza. Al mismo tiempo, el campo electrostático en la zona donde se encuentra el dieléctrico disminuye su intensidad en  $\epsilon$  veces.

Es evidente que  $\epsilon$  es una magnitud adimensional. La permitividad caracteriza cuantitativamente la propiedad del dieléctrico de polarizarse en el campo electrostático. Sus valores numéricos para distintos dieléctricos se dan en tablas de referencia.

La permitividad de todos los gases es próxima a la unidad (1,000 1-1,01); para la mayoría de los líquidos dieléctricos no polares, se halla dentro de los límites de 2 hasta 2,5; para dieléctricos sólidos, de 2,5 hasta 8; para los fluidos polares, de 10 hasta 81. Para el vacío, según la fórmula 4.10,  $\epsilon = 1$ .

### Tareas

53. ¿En condiciones normales los dieléctricos se encuentran polarizados? Argumenta tu respuesta.
54. ¿Qué indica la permitividad de un dieléctrico?
55. Demuestra que la permitividad de un conductor puede considerarse infinitamente grande.

#### 4.17 Condensadores. Capacidad eléctrica

Si varios conductores cargados están próximos unos a otros, el potencial de uno de ellos está determinado no sólo por sus dimensiones y carga, sino también por el valor y signo de las cargas de los otros conductores, por sus formas, tamaños y posiciones. Por ejemplo, el potencial de una esfera cargada positivamente disminuye si se coloca en sus proximidades una segunda esfera cargada negativamente.

En la técnica, son muy utilizados unos dispositivos constituidos por dos conductores próximos entre sí, cargados con cargas del mismo valor y signo contrario. Se les denomina *condensadores*. Para cargar los conductores de un condensador, se conectan a los bornes de una batería o de una máquina electrostática. Los conductores reciben, en este caso, el nombre de *armaduras del condensador*.

Midiendo la diferencia de potencial entre los conductores del condensador y la carga en uno de ellos (el otro tiene igual carga, pero de signo contrario), se comprueba que existe una proporcionalidad directa entre ambas magnitudes. Por lo tanto, la razón:

$$\frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$$

es una constante para cada par de conductores de un condensador.

A esta magnitud, que es característica para un par de conductores, se les denomina *capacidad eléctrica* de dos conductores y se representa con la letra *C*.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad (4.11)$$

donde *q* siempre es el valor positivo de la carga.

La capacidad de un condensador expresa la carga que puede almacenar, para una determinada diferencia de potencial entre sus armaduras. Por ejemplo, mientras mayor sea la capacidad de un condensador, mayor cantidad de carga eléctrica puede almacenar para una diferencia de potencial dada entre sus armaduras.

La unidad de capacidad eléctrica en el S.I. se deduce de la ecuación 4.11, y es coulomb/volt (C/V). Esta unidad se denomina *farad* y se representa con la letra *F*. La capacidad eléctrica de dos conductores es igual a 1 F si, al comunicárseles una carga +1 C y -1 C, se produce entre ellas la diferencia de potencial de 1 V.

$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{V}}{\text{C}}$$

En la práctica se utilizan los submúltiplos de esta unidad, como el microfarad ( $\mu\text{F}$ ) igual a  $10^{-6}$  F, el picofarad (pF) igual a  $10^{-12}$  F, etcétera.

## Tareas

56. ¿A qué se denomina capacidad eléctrica?
57. ¿Depende la capacidad eléctrica de la carga y de la diferencia de potencial? Argumenta.
58. ¿Qué significa que la capacidad de un condensador sea de  $12 \mu\text{F}$ ?

### 4.18 Condensador plano

El condensador plano se compone de dos láminas conductoras planas y paralelas, muy próximas entre sí para que sea despreciable la dispersión del campo electrostático en sus bordes. Sabemos que, en este caso, el campo electrostático es uniforme y se encuentra confinado entre las placas (fig. 4.49).

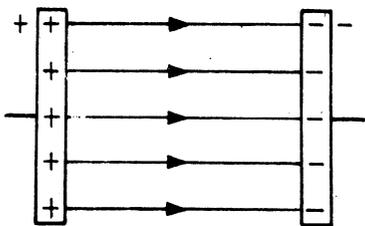


Fig. 4.49

Calculemos la capacidad de un condensador plano para el caso que entre sus placas no exista ningún dieléctrico. Para este caso, la capacidad la representamos por  $C_0$  y, según su definición, ecuación 4.11:

$$C_0 = \frac{q}{\varphi_{01} - \varphi_{02}}$$

Conocemos que para dos placas conductoras planas y paralelas se cumple:

$$\varphi_{01} - \varphi_{02} = E_0 d$$

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

simultaneando estas ecuaciones y sustituyendo en la ecuación de capacidad, se llega a:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$$

Si manteniendo la misma carga en las placas se intercala un dieléctrico entre ellas, la diferencia de potencial disminuye  $\epsilon$  veces. Esto implica que la capacidad del condensador aumente  $\epsilon$  veces:

$$C = \epsilon C_0$$

Sustituyendo  $C_0$  en esta expresión, queda:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

Como puede observarse de esta ecuación, la capacidad del condensador plano depende de sus características geométricas: área de las placas ( $S$ ) y distancia entre ellas ( $d$ ). También está influenciada por las propiedades eléctricas del medio, que vienen dadas por la magnitud  $\epsilon$ . No depende del material de los conductores de la armadura, que puede ser hierro, cobre, aluminio, etcétera.

Los condensadores tienen diferentes estructuras en dependencia de la finalidad a que se destinen. El condensador técnico ordinario de papel, consta de dos tiras de papel de aluminio aisladas, entre sí y del cuerpo metálico, por medio de un dieléctrico constituido por una cinta de papel impregnado en parafina. Las tiras y la cinta están fuertemente enrolladas en forma de un cilindro de pequeñas dimensiones (fig. 4.50).

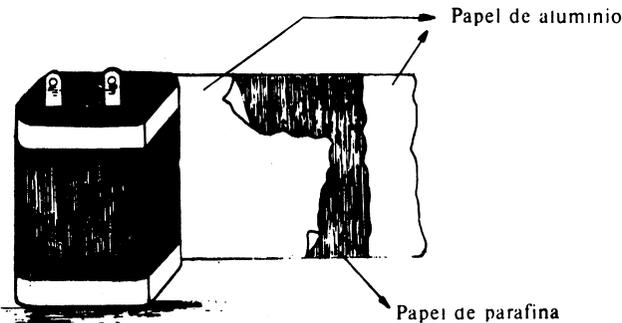


Fig. 4.50

Los condensadores variables, cuya capacidad puede modificarse entre ciertos límites, son muy empleados en la sintonía de los aparatos radio-receptores. Generalmente son condensadores que utilizan el aire como dieléctrico, y su capacidad es pequeña. Están formados por un cierto número de láminas metálicas paralelas y fijas conectadas entre sí, constituyendo una de las armaduras del condensador; un segundo conjunto de placas móviles también conectadas entre sí, forman la otra armadura (fig. 4.51). Haciendo girar un eje sobre el cual están montadas las placas móviles el segundo conjunto se intercala en el primero en una extensión mayor o menor.

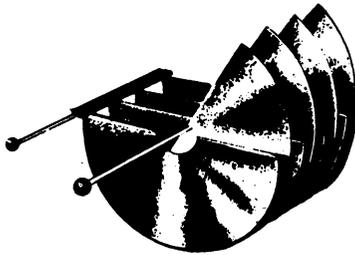


Fig. 4.51

Los condensadores electrolíticos tienen una gran capacidad eléctrica, a expensas de utilizar como dieléctrico una capa muy delgada de óxido (fig. 4.52).

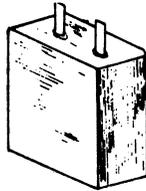


Fig. 4.52

En los diagramas de los circuitos eléctricos, los condensadores se representan mediante los símbolos que se muestran en la figura 4.53.



Fig. 4.53

## Problemas resueltos

1. ¿Cuál debe ser el área de las láminas de un condensador plano de un farad (1 F), si la separación entre ellas es de un milímetro (1 mm) y se encuentra en el vacío?

*Solución*

Datos:

$$C = 1 \text{ F}$$

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

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

$$S = \frac{Cd}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1 \text{ F} \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2} = 1,13 \cdot 10^8 \text{ m}^2$$

Esta área corresponde a un cuadrado de 10 600 m de lado aproximadamente.

2. Un condensador de papel, como el representado en la figura 4.50, puede tener una capacidad de  $10 \mu\text{F}$  y ocupar el volumen de una caja de fósforo. Calcula el radio de una esfera conductora y aislada con igual capacidad.

*Solución*

La capacidad fue definida para dos conductores, pero si suponemos que el otro cuerpo es una esfera de radio infinito, cargada negativamente, entonces su potencial es cero y la diferencia de potencial coincide con el potencial de la esfera de radio finito. Así podemos definir su capacidad.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad \varphi_2 \rightarrow 0$$

Como ya hemos visto, el potencial de una esfera es  $\varphi = k \frac{q}{r}$ , sustituyendo en la expresión de la capacidad, queda:

$$C = \frac{r}{k}$$

$$r = C \cdot k = 10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{C}}{\text{V}} \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} = 90 \ 000 \text{ m} = 90 \text{ km}$$

El radio de la esfera debe ser de 90 km.

## Tareas

59. ¿Cuál es el significado de la expresión:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} ?$$

60. Un condensador plano se carga usando una batería y después se desconecta de la misma. Si en estas condiciones se introduce entre las armaduras una placa de dieléctrico, describe cualitativamente qué le ocurre a la carga eléctrica, la capacidad, la diferencia del potencial y la intensidad del campo electrostático en el condensador.

#### 4.19 Energía almacenada en el campo electrostático

El proceso de carga de un condensador consiste en separar las cargas positivas y negativas en sus armaduras. De acuerdo con la ley de conservación de la energía, el trabajo que se realiza en separar las cargas es igual a la energía que se almacena en el condensador.

El hecho de que un condensador cargado tiene energía es fácil de demostrar. Esto se pone de manifiesto experimentalmente en el circuito de la figura 4.54.

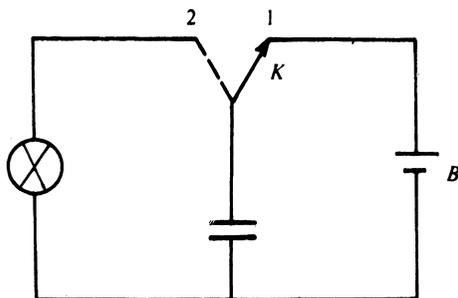


Fig. 4.54

Si el interruptor  $K$  se pone en la posición 1, se cierra el circuito de la batería  $B$  y el condensador se carga a la diferencia de potencial de la batería. Al conmutar el interruptor a la posición 2, se descarga el condensador por el circuito de la lámpara, donde se observa un destello y una elevación de la temperatura.

Deduzcamos la fórmula de la energía que almacena un condensador plano al cargarse con una carga  $q$  a una diferencia de potencial dada.

Durante el tiempo que el condensador se está cargando, su carga aumenta proporcionalmente con la diferencia de potencial entre sus placas. En la gráfica de la figura 4.55 se representan las variaciones de  $q$  y  $\varphi_1 - \varphi_2$  durante la carga del condensador.

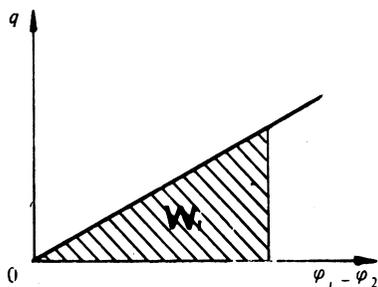


Fig. 4.55

El área sombreada en la figura 4.55 representa la energía almacenada en el condensador que es igual al trabajo que se realizó para cargarlo. Como esta área es la de un triángulo, su valor es:

$$W = \frac{1}{2} q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

como  $q = C(\varphi_1 - \varphi_2)$ , entonces:

$$W = \frac{1}{2} C(\varphi_1 - \varphi_2)^2$$

Si sustituimos en esta expresión:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$$

y

$$\varphi_1 - \varphi_2 = E d$$

se obtiene que:

$$W = \left( \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} \right) S d \quad (4.12)$$

esta es la expresión de la energía que se encuentra en el volumen entre las placas del condensador.

La expresión entre paréntesis representa la energía por unidad de volumen que hay en el campo electrostático, y se designa como:

$$u = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} \text{ J/m}^3$$

La energía que se acumula en el campo electrostático de un condensador no es grande. Además, no se conserva por mucho tiempo a causa de la pérdida de carga que ocurre en este. Sin embargo, los condensadores tienen la propiedad de ceder toda su energía en un tiempo muy corto, en circuitos de poca resistencia. Esta propiedad es muy aprovechada en la práctica.

Las lámparas de destellos o "flash", que se utilizan en las fotografías, se alimentan de la energía desprendida por condensadores previamente cargados.

La mayor aplicación de los condensadores está en la radiotecnica en los diferentes circuitos de los televisores, radios, grabadoras, etcétera.

## Tareas

61. Explica el significado de la expresión:

$$W = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} S d$$

## 4.20 Acoplamiento de condensadores

Los circuitos contienen a menudo dos o más condensadores asociados, que pueden estar conectados en serie, paralelo u otras combinaciones.

En la figura 4.56 se representan tres condensadores asociados en paralelo.

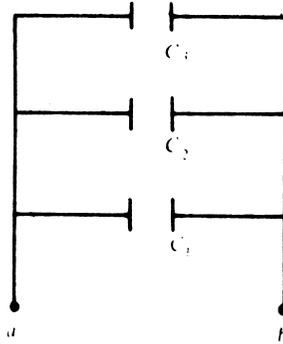


Fig. 4.56

Si entre los puntos  $a$  y  $b$  se aplica una diferencia de potencial, entre las placas de cada uno de los condensadores la diferencia de potencial será la misma. Como la capacidad de cada condensador es diferente, la carga almacenada en cada uno será:

$$q_1 = C_1(\varphi_a - \varphi_b); \quad q_2 = C_2(\varphi_a - \varphi_b); \quad q_3 = C_3(\varphi_a - \varphi_b)$$

y la carga total  $q$ , almacenada por los tres condensadores queda:

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

sustituyendo  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$  en esta expresión, tenemos:

$$q = (C_1 + C_2 + C_3) (\varphi_a - \varphi_b)$$

de donde:

$$\frac{q}{\varphi_a - \varphi_b} = C_1 + C_2 + C_3$$

El primer miembro es, por definición, la capacidad equivalente del grupo de condensadores, que representaremos por  $C$ . Por tanto:

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Entonces, físicamente, el circuito de la figura 4.56 es equivalente a conectar entre los puntos  $a$  y  $b$  un condensador de capacidad  $C$  con un carga  $q$ .

Si en lugar de tres condensadores, hay  $n$  condensadores asociados en paralelo, la capacidad equivalente,  $C$ , es:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i$$

En palabras, esto se puede expresar: *cuando se asocian varios condensadores en paralelo, la capacidad equivalente es igual a la suma de las capacidades de cada uno.*

Consideremos ahora que los condensadores están asociados en serie, como se representa en la figura 4.57.

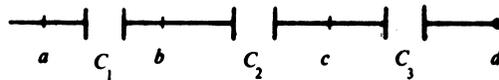


Fig. 4.57

Si entre los puntos  $a$  y  $d$  se establece una diferencia de potencial, cada uno de los condensadores queda cargado con la misma carga, según la ley de conservación de la carga, por lo que podemos escribir:

$$\varphi_a - \varphi_b = \frac{q}{C_1}; \quad \varphi_b - \varphi_c = \frac{q}{C_2}; \quad \varphi_c - \varphi_d = \frac{q}{C_3}$$

La diferencia de potencial entre los puntos  $a$  y  $d$  será la suma de las correspondientes a cada condensador. Por lo tanto:

$$\varphi_a - \varphi_d = q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

de donde:

$$\frac{\varphi_a - \varphi_d}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Por definición de capacidad, el primer miembro es:

$$\frac{\varphi_a - \varphi_d}{q} = \frac{1}{C}$$

donde  $C$  es la capacidad equivalente, y se puede escribir, finalmente, que:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Si hay  $n$  condensadores, entonces:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

por tanto, cuando se asocian varios condensadores en serie se obtiene que el inverso de la capacidad equivalente es igual a la suma de los inversos de las capacidades de cada uno de ellos.

## Tareas

62. ¿Cómo conectarías dos condensadores, en serie o en paralelo, para que la capacidad total sea la mayor posible? Argumenta.

### Tareas generales del capítulo

1. Es conocido que una varilla de vidrio, frotada con un paño de seda, se electriza positivamente. Determina mediante un experimento el signo de la carga que adquiere una varilla plástica frotada con lana.
2. Critica la siguiente afirmación: "La electrización de los cuerpos puede surgir solamente con el estrecho contacto entre dos cuerpos, sin friccionar uno con el otro, por lo que se puede afirmar que los cuerpos pueden ser electrizados sin la realización de trabajo".
3. Cuando una varilla electrizada se aproxima a trocitos de corcho, al principio estos se adhieren a la varilla, pero inmediatamente después son despedidos. Explica la causa.
4. Un electroscopio cargado se descarga al cabo de cierto tiempo. ¿Significa esto que la carga ha desaparecido sin dejar rastro?
5. Calcula la fuerza de repulsión entre dos protones que se encuentran a una distancia de  $10^{-9}$  cm. Representa en un esquema las fuerzas que actúan sobre cada uno de ellos.
6. Supón que el electrón del átomo de hidrógeno describe una circunferencia de radio igual a  $5 \cdot 10^{-9}$  cm alrededor del núcleo. La fuerza centrípeta se debe a la atracción electrostática entre el electrón y el protón contenido en el núcleo. Calcula el número de revoluciones por segundo que da el electrón.
7. Dos esferas de radios y pesos iguales están suspendidas de hilos de seda de 20 cm de longitud, de modo que sus superficies se tocan. Después de electrizarlas con una carga  $q = 4 \cdot 10^{-7}$  C, se separan formando los hilos un ángulo de  $60^\circ$ . Calcula el valor de la fuerza gravitatoria que actúa sobre las esferas.

8. Un alumno ha representado los vectores intensidad de campo electrostático ( $\vec{E}$ ) en los puntos 1, 2 y 3 del campo inherente al cuerpo electrizado y aislado  $A$  (fig. 4.58).

- a) Critica las representaciones realizadas de  $\vec{E}$ .
- b) Representálas según tu criterio.

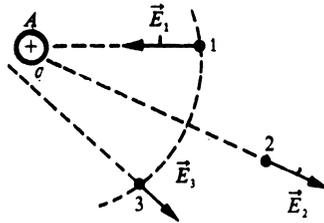


Fig. 4.58

9. En la figura 4.59, los círculos representan partículas electrizadas con cargas de signo desconocido; y las curvas, líneas de fuerza del campo electrostático, algunas de las cuales tienen representados sus sentidos.

- a) Señala el signo de cada partícula electrizada.
- b) Indica el sentido de cada línea de fuerza.

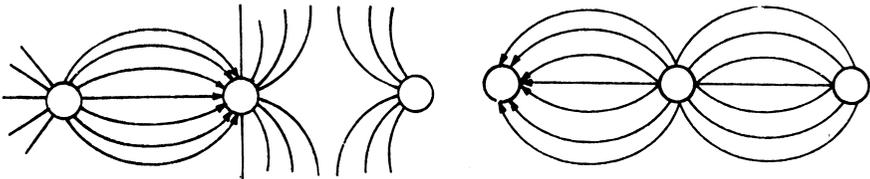


Fig. 4.59

- 10. En los esquemas de la figura 4.60 se han representado diferentes configuraciones de partículas electrizadas. Calcula, donde esto sea posible, el valor de la intensidad del campo electrostático en el punto  $P$ . En los que no lo sea, explica por qué.
- 11. En los esquemas de la figura 4.61 se han representado diferentes configuraciones de partículas electrizadas. Representa, a escala, las intensidades del campo electrostático inherente a cada partícula cargada de esas configuraciones, en el punto  $P$ , conociendo que la relación entre los valores de  $\vec{E}$ , son los que se indican en cada cuadro.

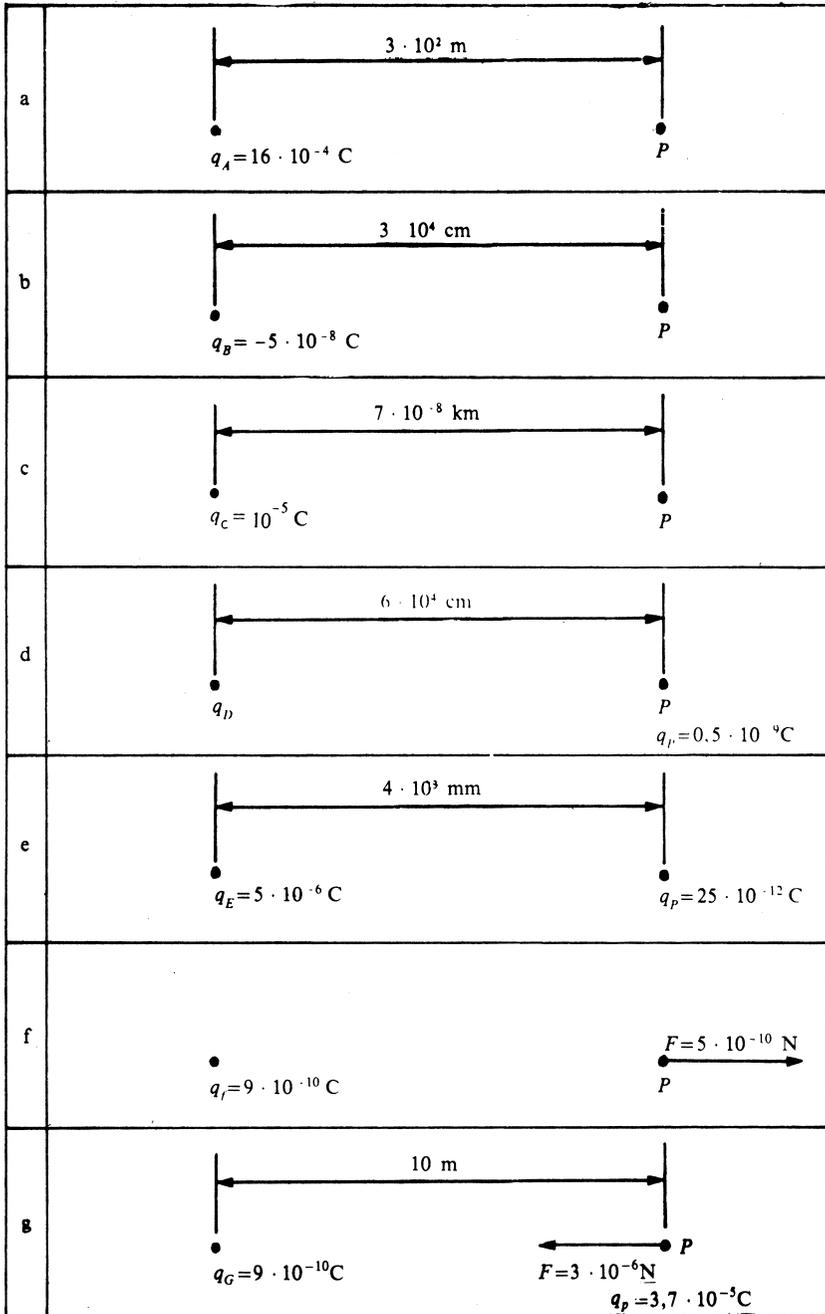


Fig. 4.60

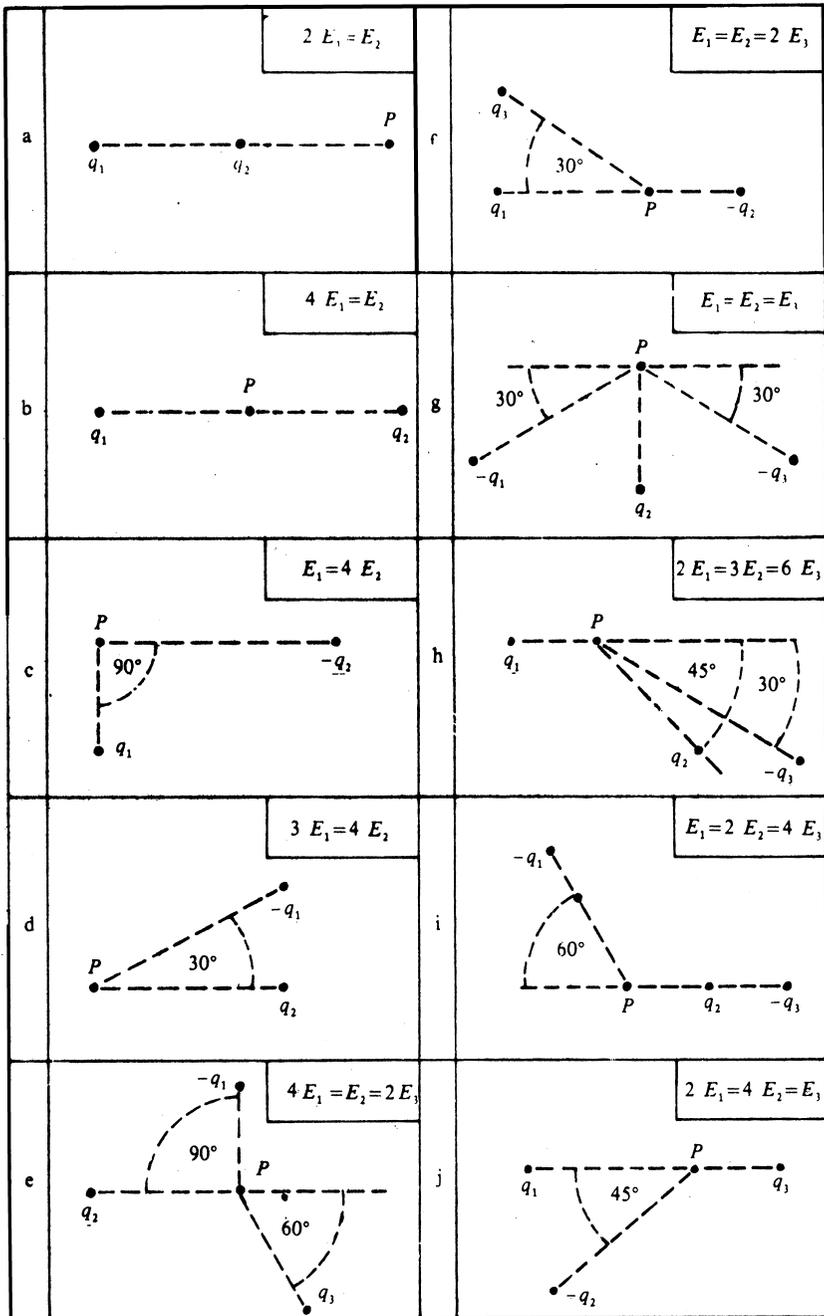


Fig. 4.61

12. En los esquemas de la figura 4.62 se representan los vectores intensidad del campo electrostático debido a diversas configuraciones de partículas electrizadas (las que no se han representado). Determina analítica y gráficamente la intensidad del campo  $\vec{E}$  en el punto  $P$  (escala:  $1 \text{ cm} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ N/C}$ ).

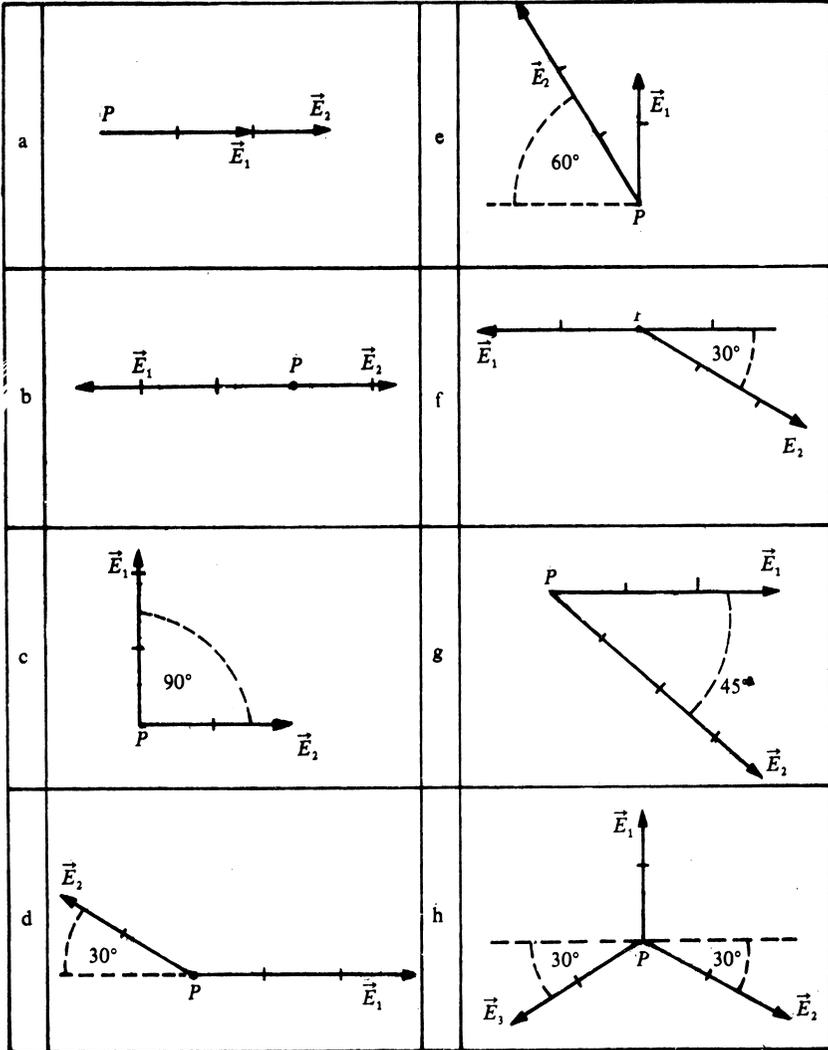


Fig. 4.62

13. Si en un punto determinado de una región del espacio, el vector intensidad del campo electrostático es nulo, ¿quiere decir que no existe campo electrostático? Explica.
14. En los esquemas de la figura 4.63 se representan cuerpos puntuales cargados y un punto  $P$ . Determina gráfica y analíticamente la intensidad del campo electrostático en el punto  $P$  en cada caso.

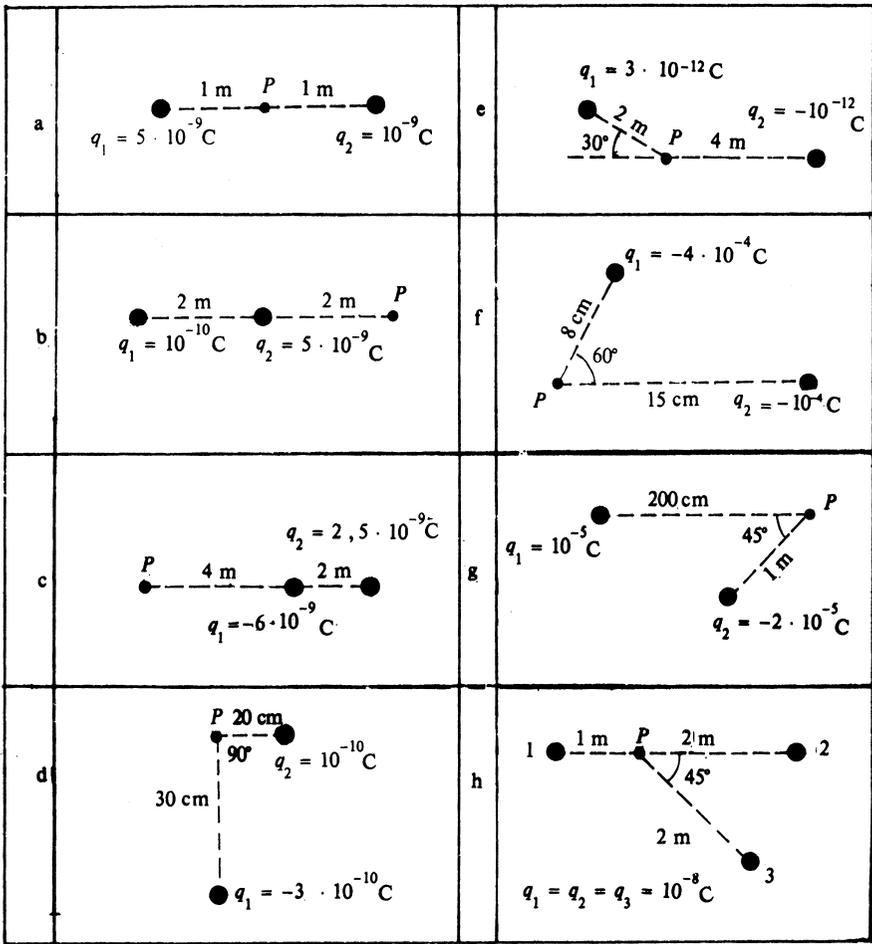


Fig. 4.63

15. En la figura 4.64 se representan cuatro cuerpos puntuales cargados y un punto  $P$ . Determina el potencial electrostático en el punto, donde  $\varphi_1 = 8 \text{ V}$ ,  $\varphi_2 = 9 \text{ V}$  y  $\varphi_3 = 10 \text{ V}$  son los potenciales electrostáticos inherentes a los cuerpos 1, 2 y 3 en este punto.

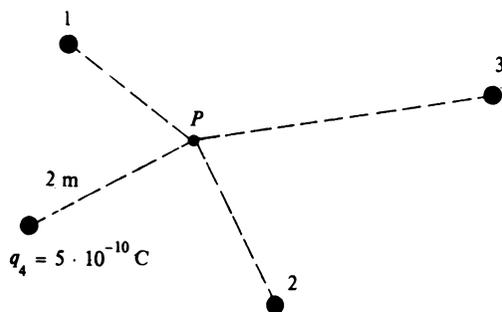


Fig. 4.64

16. En los esquemas de la figura 4.65 se representan cuerpos puntuales cargados y un punto  $P$ . Determina en cada caso el potencial en este punto.

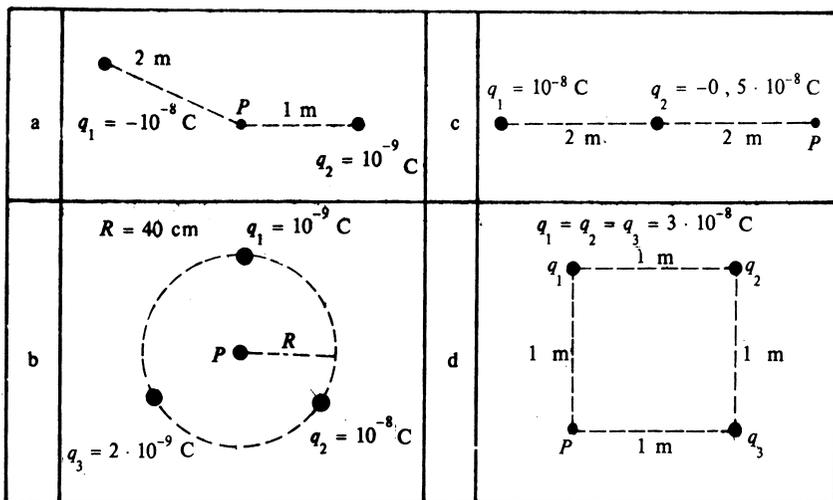


Fig. 4.65

17. Determina a qué distancia se encuentra un cuerpo puntual cargado, cuya carga es de  $-3 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ , de un punto  $P$  donde el potencial es nulo. Se conoce que a 2 m de dicho punto hay otro cuerpo puntual que tiene una carga de  $6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ .
18. Un cuerpo puntual tiene una carga eléctrica de  $8 \cdot 10^{-9} \text{ C}$  y se estudia su campo electrostático en los puntos  $A$ ,  $B$  y  $C$ . Completa el cuadro

con los valores correspondientes de  $r$ ,  $E$  y  $\varphi$ . Construye las graficas de  $E = f(r)$  y  $\varphi = f(r)$ .

Puntos	Distancia del cuerpo al punto $r$ (m)	Módulo del vector intensidad de campo $E$ (N/C)	Potencial $\varphi$ (V)
A	1		
B			36
C		8	

19. Las sustancias que constituyen los cuerpos se encuentran entre límites definidos. ¿Se puede decir lo mismo del campo electrostático de un cuerpo puntual cargado? Argumenta tu respuesta.
20. Se tienen dos cuerpos puntuales cargados y un punto  $P$  a cierta distancia de cada uno de ellos (fig. 4.66a). Si cambiamos de posiciones los cuerpos cargados, de forma que se mantengan a la misma distancia del punto  $P$  (fig. 4.66b), ¿varian la intensidad del campo electrostático y el potencial en el punto  $P$ , o se mantienen constantes? Explica tu respuesta.

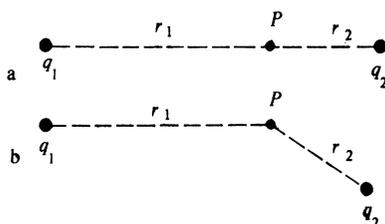


Fig. 4.66

21. El potencial de un campo eléctrico crece de abajo hacia arriba. ¿Cuál es la dirección y sentido del vector intensidad de campo eléctrico?
22. Una partícula electrizada ( $q_1 > 0$ ) se traslada por un contorno cerrado  $ABCD$ , situado en el campo de una esfera electrizada ( $q_2 > 0$ ), como se indica en la figura 4.67.
- ¿En qué parte del recorrido sobre el contorno, el trabajo realizado por el campo es positivo, negativo y cero?
  - ¿Cómo varía la energía potencial del sistema?
  - ¿Cuánto vale el trabajo para el recorrido completo?

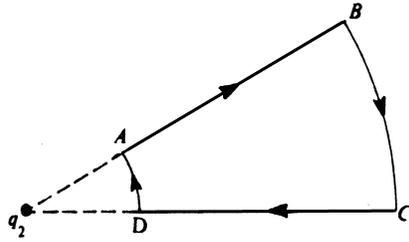


Fig. 4.67

23. Moviéndose en un campo eléctrico, un electrón pasa de un punto a otro cuyo potencial es superior en 1 V. ¿En cuánto varió su energía potencial? ¿En cuánto varió la energía cinética?
24. Dos partículas electrizadas, cuyas cargas son  $q_1 = 0,7 \cdot 10^{-8} \text{ C}$  y  $q_2 = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ , se hallan a la distancia de 40 cm. ¿Qué trabajo hay que realizar para acercarlas hasta la distancia de 25 cm?
25. Representa las intensidades del campo electrostático,  $\vec{E}$ , en los puntos 1, 2 y 3 entre las láminas electrizadas y aisladas que representa la figura 4.68.

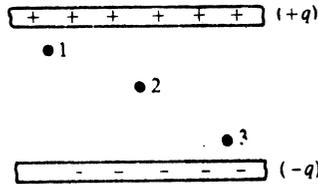


Fig. 4.68

26. A una esfera conductora de 70 cm de diámetro se le aplica una carga de  $10^{-6} \text{ C}$ . Calcula la densidad superficial de carga en dicha esfera.
27. ¿Qué carga, en coulomb, hay que transmitir a una esfera de 1 dm de diámetro para que su densidad superficial de carga sea de  $1 \text{ C/m}^2$ ?
28. Una esfera metálica tiene una carga  $q$ . ¿Cómo se puede dividir su carga en 2, 3 y 4 partes iguales?
29. Determina el potencial electrostático:
  - a) a una distancia  $R = 0,04 \text{ m}$  de una partícula electrizada (fig. 4.69 a);
  - b) en el campo inherente a una esfera electrizada de radio  $R = 10 \text{ cm}$  y carga  $q_H = 8,3 \cdot 10^{10} \text{ C}$  (fig. 4.69b);  
para  $r = 4,6 \text{ m}$ ,  
para  $r = 5 \text{ cm}$
  - c) en un punto intermedio entre dos esferas electrizadas (fig. 4.69c).

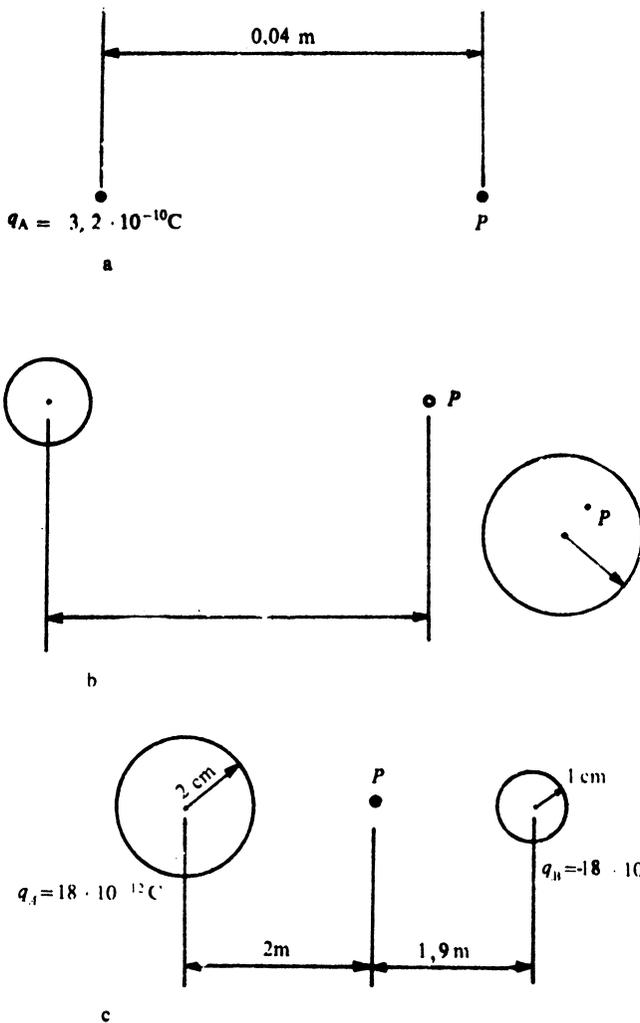


Fig. 4.69

30. Caracteriza gráficamente el campo electrostático uniforme entre dos láminas y el no uniforme de una esfera electrizada y aislada, atendiendo a la intensidad del campo en los puntos numerados del espacio, a las líneas de fuerza y a las superficies equipotenciales entre las cuales la diferencia de potencial sea constante (fig. 4.70).
31. Escribe, en el cuadro que se presenta (fig. 4.71), las expresiones de  $E=f(r)$ ,  $F=f(r)$  y  $\varphi=f(r)$ , según corresponda, para una esfera conductora y una partícula, ambas electrizadas con carga  $q$  en el vacío.

		Intensidad de campo	Líneas de fuerza	Superficies equipotenciales
a	Uniforme			
b	No uniforme			

Fig. 4.70

	$E$	$F_v$	$\varphi$
<p>Esfera conductora electrizada <math>A = q_0(+)</math></p>	<p>Para <math>r &lt; R</math></p> <p>Para <math>r = R</math></p> <p>Para <math>r &gt; R</math></p>		<p>Para <math>r &lt; R</math></p> <p>Para <math>r = R</math></p> <p>Para <math>r &gt; R</math></p>
<p>Partícula electrizada</p>			

Fig. 4.71

32. Formula la relación que permite calcular:
- la intensidad del campo  $E$  en 1 y 2 (fig. 4.72a);
  - la fuerza eléctrica que actúa sobre una carga de prueba  $q_0$  (fig. 4.72b);
  - el trabajo de un agente externo para mover una partícula electrizada  $q$ , según la trayectoria 1-2-3 (fig. 4.72c);
  - la diferencia de potencial entre los puntos 1 y 2; y luego entre 1 y 3 (fig. 4.72d).

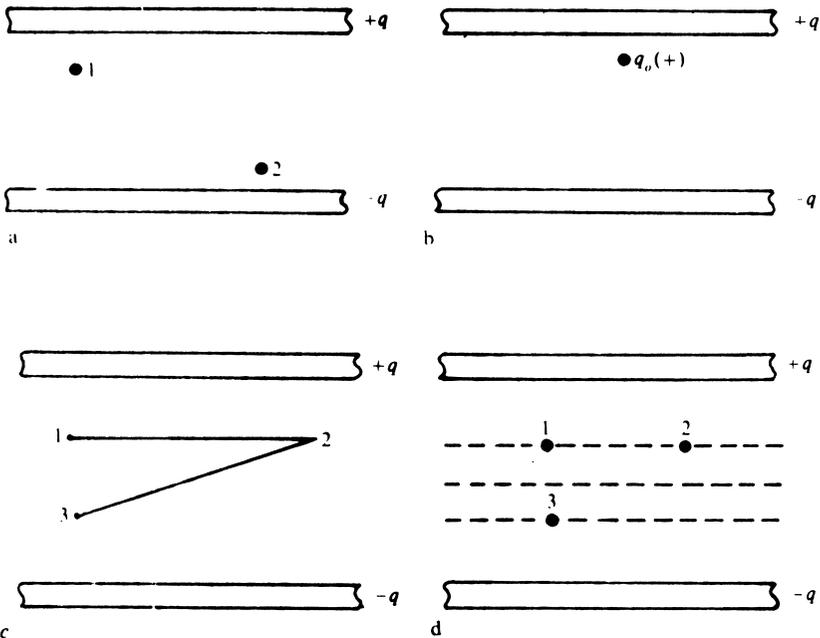


Fig. 4.72

- Construye las gráficas de  $E = f(r)$  y  $\varphi = f(r)$  para los casos de cuerpos electrizados y aislados que aparecen en la figura 4.73.
- Una esfera de cobre de 1 cm de diámetro se halla sumergida en aceite, cuya densidad es  $800 \text{ kg/m}^3$ . Calcula la carga de la esfera si un campo electrostático de  $36 \cdot 10^5 \text{ V/m}$  dirigido verticalmente hacia arriba la mantiene en suspensión dentro del aceite.
- En una esfera conductora introducida en queroseno hay distribuida uniformemente una carga de  $7,0 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ . El potencial de la esfera es 1 500 V. Halla la capacidad de la esfera y su radio.

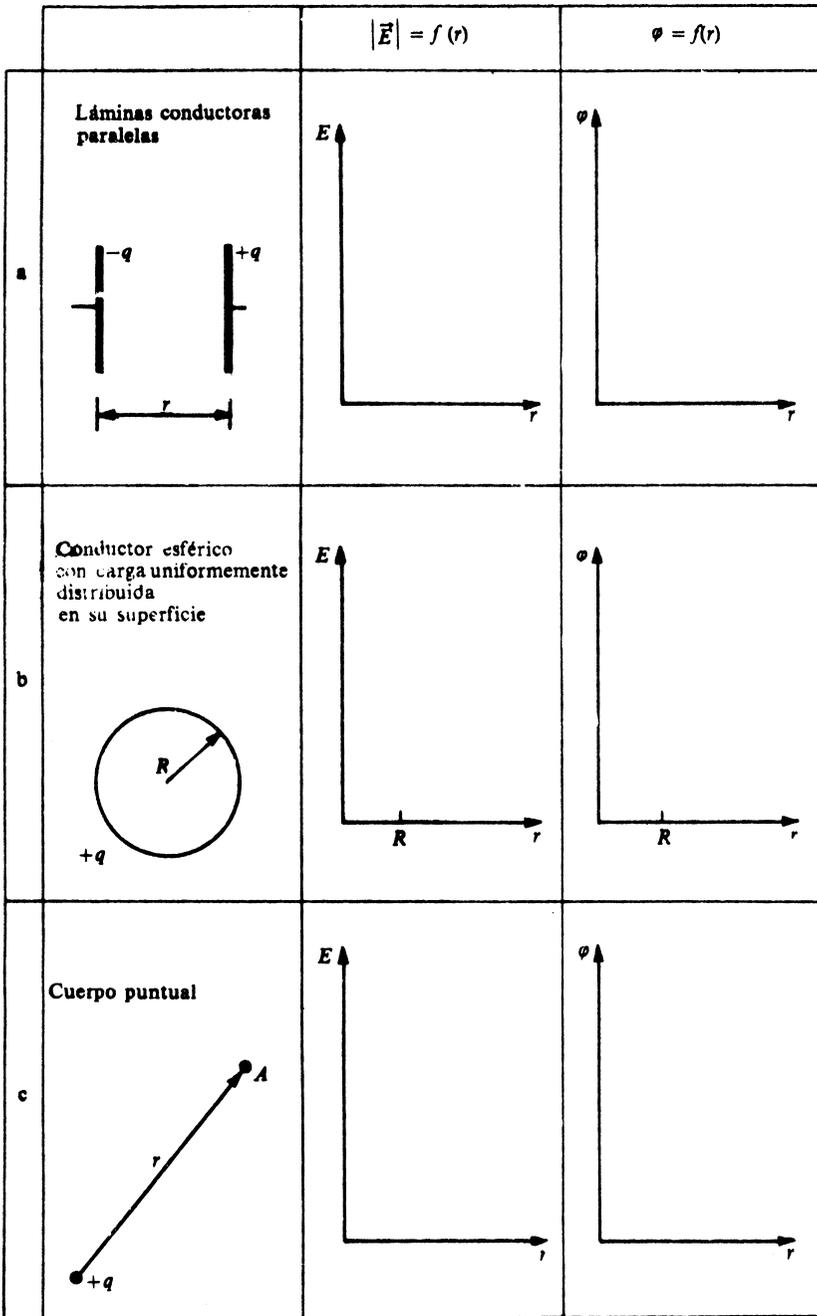


Fig. 4.73

36. Determina, analizando la figura 4.74, qué relaciona la diferencia de potencial entre las placas y la carga en tres condensadores *A*, *B* y *C*, la capacidad de cada condensador. Calcula la energía de cada uno.

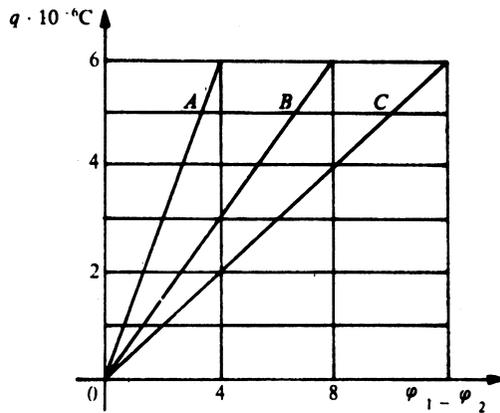


Fig. 4.74

37. En la figura 4.75 se han representado un conjunto de condensadores, en los que el área de sus placas se ha dibujado proporcionalmente a la longitud del segmento que las representa, y de igual forma se ha representado la distancia entre ellas. El instrumento de medición conectado entre las placas de cada condensador se supone capaz de medir la capacidad de cada uno. Compara las capacidades de cada condensador y escríbelas en orden decreciente. Debes comenzar por las filas *a*, *b* y *c*. Después, las columnas *A*, *B* y *C*. A continuación las diagonales I y II. Como ejemplo se ha resuelto la fila *a*.
38. La diferencia de potencial entre las láminas de un condensador plano es de 90 V. El área de cada lámina es de 60 cm<sup>2</sup>, y la carga de 10<sup>-9</sup> C. ¿Cuál es la distancia que separa las láminas?
39. La carga de un condensador plano con un dieléctrico de cerámica es igual a 4,7 · 10<sup>-5</sup> C. El área de cada lámina es 2 500 cm<sup>2</sup>. La permitividad de la cerámica es igual a 7. Halla la intensidad del campo en el dieléctrico.
40. El espacio entre las placas de un condensador plano está ocupado con una lámina de mica ( $\epsilon = 6$ ). La distancia entre las placas es de 4 · 10<sup>-3</sup> m y se aplica una diferencia de potencial de 1 200 V. Calcula:  
a) la intensidad del campo en la mica;  
b) la densidad superficial de carga en las placas.
41. Dos condensadores de diferentes capacidades ( $C_1 > C_2$ ) están conectados en paralelo. ¿Cuál de los dos posee mayor energía si se conectan a una batería de diferencia de potencial dada?

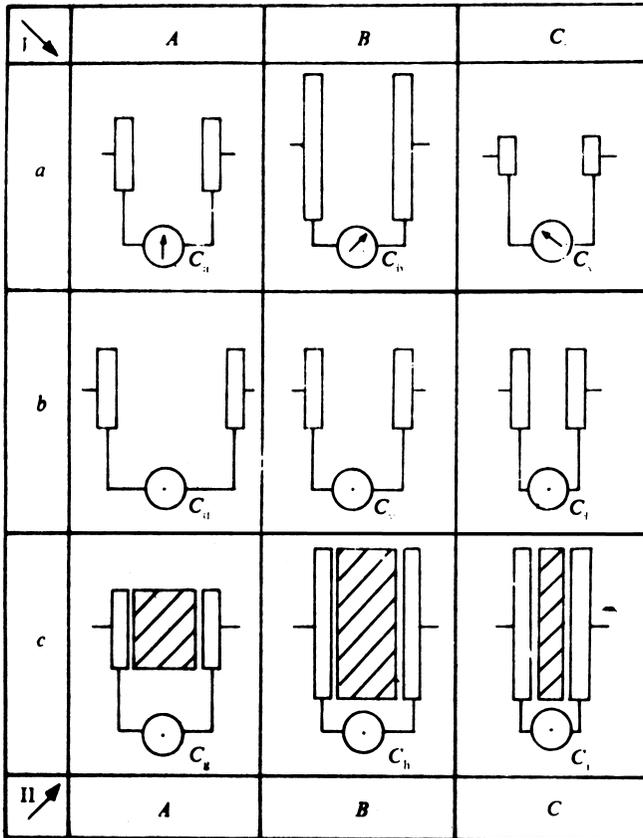


Fig. 4.75

42. Se aplica una diferencia de potencial de 300 V a dos capacitores asociados en serie. Uno de ellos tiene una capacidad de  $2 \mu\text{F}$  y el otro de  $8 \mu\text{F}$ .
- ¿Cuál es la carga y la diferencia de potencial para cada condensador?
  - Si los condensadores electrizados se conectan uniendo las placas del mismo signo entre sí, ¿cuál es la carga y la diferencia de potencial en cada uno?
  - Calcula la energía almacenada en cada condensador.
43. ¿A qué es igual la capacidad de la batería de condensadores representada en la figura 4.76?

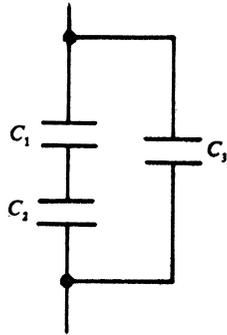


Fig. 4.76

44. En la asociación de condensadores representada en la figura 4.77, calcula:
- la carga en cada condensador;
  - la diferencia de potencial en cada uno;
  - la energía total.

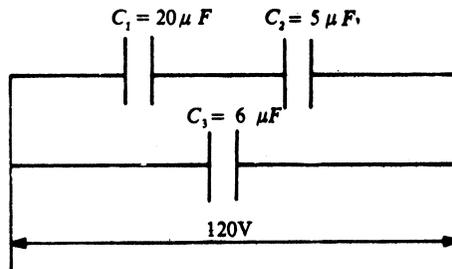


Fig. 4.77

# Respuestas

## *Tareas de final de epígrafe*

### *Capítulo 4*

- 17.  $F = 9,2 \cdot 10^8 \text{ N}$
- 23.  $E = 6,2 \cdot 10^4 \text{ N/C}$
- 30.  $E = 90 \text{ N/C}$
- 31.  $E = 5 \text{ N/C}$
- 32.  $F = 3 \cdot 10^8 \text{ N}$
- 36.  $W = 10 \text{ J}$

## *Tareas generales del capítulo*

### *Capítulo 1*

- 1.  $3,98 \cdot 10^{-20} \text{ kg}$
- 2.  $1/8$  moles;  $N = 7,525 \cdot 10^{22}$  moléculas
- 3.  $1,505 \cdot 10^{23}$  moléculas
- 4.  $2,66 \cdot 10^{-20} \text{ kg}$

### *Capítulo 2*

- 6.  $P_2 = 5,05 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$
- 7.  $P_2 = 1,24 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
- 8.  $V_1 = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$
- 9.  $T_2 = 295,7 \text{ K}$
- 10.  $V_2 = 387 \text{ m}^3$
- 11.  $\Delta T = 83,3 \text{ K}$
- 12.  $T_2 = 72,5 \text{ K}$
- 13.  $\Delta T = 67,57 \text{ K}$
- 14.  $T_2 = 242,4 \text{ K}$  o  $-30,6 \text{ }^\circ\text{C}$
- 15.  $V_2 = 1,45 \cdot 10^3 \text{ m}^3$
- 16.  $\Delta P = -9,09 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$
- 17.  $\Delta T = 145 \text{ K}$
- 18.  $V_2 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

19.  $T_2 = 586 \text{ K}$
20.  $V = 2.328 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
21.  $n = 0.039 \text{ moles}$
22.  $N = 2.4 \cdot 10^8 \text{ moléculas}$
23. a)  $E_i = 4.62 \cdot 10^{21} \text{ J}$ ; b)  $E_i = 5.65 \cdot 10^{21} \text{ J}$ ;  
c)  $E_i = 2.64 \cdot 10^{21} \text{ J}$
24. a)  $E_i = 2\ 781 \text{ J}$ ; b)  $E_i = 3\ 401 \text{ J}$ ; c)  $E_i = 15\ 893 \text{ J}$
25.  $T = 0.079 \text{ K}$
26.  $T = 9\ 703 \text{ K}$
27.  $V_2 = 8.39 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$
30.  $P = 2.324 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$
35. a) Isotérmico, isobárico, isotérmico, isobárico.
- b) a) ( $1 \text{ m}^3, 8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, 200 \text{ K}$ ); b) ( $4 \text{ m}^3, 2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, 200 \text{ K}$ ); c) ( $8 \text{ m}^3, 2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, 400 \text{ K}$ ); d) ( $2 \text{ m}^3, 8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2, 400 \text{ K}$ )
- c)  $481.35 \text{ moles}$ .
43.  $74 \%$
44.  $13 \text{ }^\circ\text{C}$
45.  $18 \text{ }^\circ\text{C}$
46. Se eleva hasta el  $83 \%$ .
47.  $4.2 \text{ g/m}^3$

### Capítulo 3

1. No
2. No
3. Adiabática; la temperatura disminuye.
4. No
5. Sí
7.  $\Delta U = 680 \text{ J}$
8.  $\Delta U = 11\ 900 \text{ J}$
10. Se expande realizando un trabajo de  $20\ 950 \text{ J}$ .
11.  $W = 2.95 \cdot 10^5 \text{ J}$
12.  $W = 5 \cdot 10^4 \text{ J}$
13.  $W = -8 \cdot 10^5 \text{ J}$
14. No
15.  $\Delta V = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
16.  $W = 6 \cdot 10^4 \text{ J}$
18.  $\Delta U = 157\ 500 \text{ J}$
19. a)  $W = 400 \text{ J}$ ; b)  $P = 400 \text{ N/m}^2$
20. a)  $W = 2.5 \cdot 10^5 \text{ J}$ ; b)  $\Delta U = -6.25 \cdot 10^5 \text{ J}$ ; c)  $Q = -6.25 \cdot 10^5 \text{ J}$

21. Desprende calor.
24. a)  $Q = 2\,077.5\text{ J}$ ; b)  $Q = 1\,246.5\text{ J}$
25. a)  $Q = 3.07 \cdot 10^6\text{ J}$ ; b)  $W = 168.67\text{ J}$ ; c)  $\Delta U = 3.069 \cdot 10^{16}\text{ J}$
26. En el primer caso.
28. a) En el proceso isobárico; b) Absorbe.
29.  $\eta = 0.25$
30. a)  $t = 0.6\text{ s}$ ; b)  $Q = 12 \cdot 10^5\text{ J}$
31. a)  $\eta_{\max} = 0.6$ ; b)  $W = 6 \cdot 10^3\text{ J}$ ; c)  $P = 2.4 \cdot 10^4\text{ W}$ ; d) La rapidez con que cede calor es  $1.6 \cdot 10^4\text{ W}$
32. Absorbe  $4\,909.02\text{ cal/s}$ ; entrega  $3\,482.68\text{ cal/s}$ .
33.  $W = 4 \cdot 10^3\text{ J}$ ;  $Q = -4 \cdot 10^3\text{ J}$
34. Debe comer  $15\text{ g}$  de pan.
35.  $m = 2.2\text{ g}$
36.  $Q = 1\,600\text{ J}$
38. La temperatura disminuye en  $80\text{ K}$
39. Disminuye.

#### Capítulo 4

5.  $F = 2.3 \cdot 10^{11}\text{ N}$
6.  $\nu = 7.2 \cdot 10^{15}\text{ Hz}$
7.  $F_g = 1.6 \cdot 10^2\text{ N}$
12. a)  $E = 10^8\text{ N/C}$ ; b)  $E = 4 \cdot 10^9\text{ N/C}$ ; c)  $E = 5.6 \cdot 10^9\text{ N/C}$ ;  
d)  $E = 3.2 \cdot 10^9\text{ N/C}$ ; e)  $E = 9.7 \cdot 10^9\text{ N/C}$ ; f)  $E = 3.3 \cdot 10^9\text{ N/C}$ ;  
g)  $E = 12.9 \cdot 10^9\text{ N/C}$ ; h)  $E = 0$
14. a)  $E = 54\text{ N/C}$ ; b)  $E = 11.31\text{ N/C}$ ; c)  $E = 2.8\text{ N/C}$ ;  
d)  $E = 3.75 \cdot 10^3\text{ N/C}$ ; e)  $E = 7.2 \cdot 10^3\text{ N/C}$ ; f)  $E = 5.8 \cdot 10^8\text{ N/C}$ ;  
g)  $E = 16.3 \cdot 10^4\text{ N/C}$ ; h)  $E = 84.8\text{ N/C}$
15.  $\varphi_p = 29.3\text{ V}$
16. a)  $\varphi_p = -36\text{ V}$ ; b)  $\varphi_p = 0\text{ V}$ ; d)  $\varphi_p = 460\text{ V}$
17.  $r = 1\text{ m}$
23.  $E_c = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$  (aumenta);  $E_p = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$  (disminuye)
24.  $W = 1.3 \cdot 10^{-6}\text{ J}$
26.  $\sigma = 6.5 \cdot 10^7\text{ C/m}^2$
27.  $q = 0.03\text{ C}$
29. a)  $\varphi_p = 72\text{ V}$ ;  $\varphi_i = 1.6\text{ V}$  (fuera);  $\varphi_i = 747\text{ V}$  (interior); c)  $\varphi_p = 0.17\text{ V}$
34.  $q = 1.2 \cdot 10^{-5}\text{ C}$
35.  $C = 4.67\text{ pF}$ ;  $r = 2.1\text{ cm}$
38.  $d = 4.8 \cdot 10^{-3}\text{ m}$
39.  $E = 3 \cdot 10^6\text{ N/C}$

40. a)  $E = 3 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ ; b)  $\sigma = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$

42. a)  $q = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ ;  $\varphi_1 - \varphi_2 = 240 \text{ V}$ ;  $\varphi_1 - \varphi_2 = 60 \text{ V}$ ; b)  $\varphi_1 - \varphi_2 = 96 \text{ V}$ ;  
 $q_1 = 7,68 \cdot 10^{-4} \text{ C}$ ;  $q_2 = 1,92 \cdot 10^{-4} \text{ C}$ ;

En serie

$$W = 576 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (C_1)$$

$$W = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (C_2)$$

En paralelo

$$W = 36,8 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (C_1)$$

$$W = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (C_2)$$

**Este libro forma parte del conjunto de trabajos dirigidos al Perfeccionamiento Continuo del Sistema Nacional de Educación en la Educación General Politécnica y Laboral. Ha sido elaborado por un colectivo de autores integrado por metodólogos, profesores y especialistas y revisado por la subcomisión correspondiente de la Comisión Nacional Permanente para la Revisión de Planes, Programas y Textos de Estudios del Instituto Central de Ciencias Pedagógicas.**



