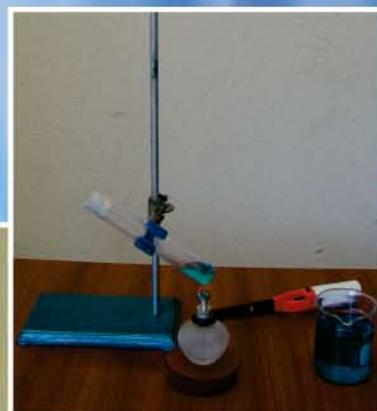
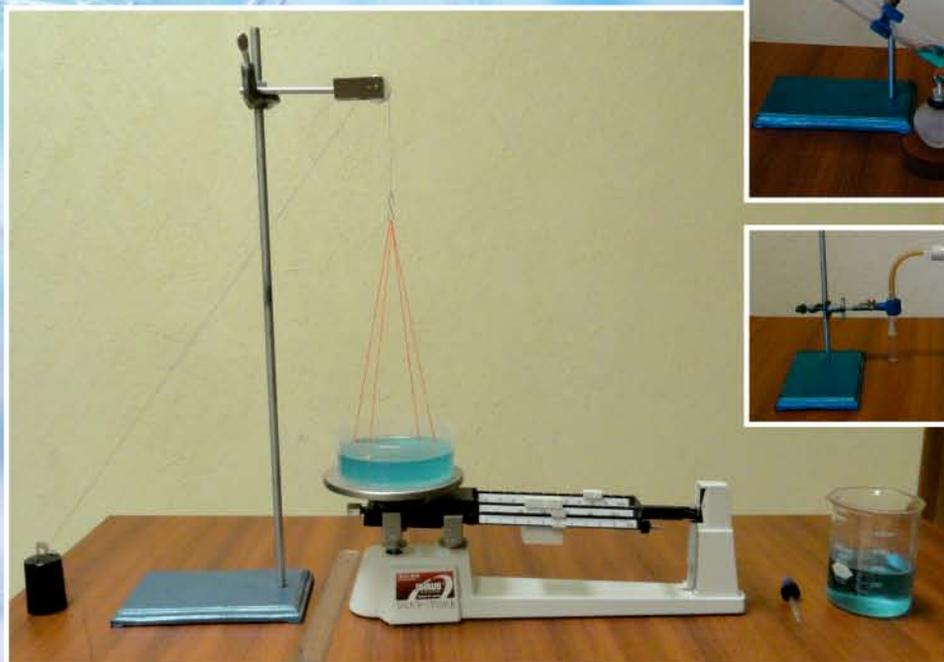


Propiedades de la **Materia**

Bachillerato universitario



José Alberto Alvarado Lemus
Pablo Valdés Castro
José Bibiano Varela Nájera





DIRECTORIO

Dr. Víctor Antonio Corrales Burgueño
Rector

DR. José Alfredo Leal Orduño
Secretario General

LAE y MA Manuel de Jesús Lara Salazar
Secretario de Administración y Finanzas

Q.F.B. Ofelia Loaiza Flores
Director de Servicios Escolares

Dr. Armando Flórez Arco
Director de DGE

Dr. José Alberto Alvarado Lemus (Coord.)

**Dr. Pablo Valdés Castro
Dr. José Bibiano Varela Nájera**

Propiedades de la Materia

Bachillerato Universitario

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin autorización escrita del autor.

Diseño de Portada: Dr. José Alberto Alvarado Lemus
Diseño de interiores: Dr. José Alberto Alvarado Lemus
Revisión Técnica: Dr. José Biviano Varela Nájera

Edición 2010
Reimpresión 2012
Servicios Editoriales Once Ríos, S.A. de C.V.
Río Usumacinta 821 Col. Industrial Bravo
Culiacán, Sinaloa, México

3000 ejemplares

Impreso en México
Printed in Mexico

ÍNDICE

Introducción

1. Estructura interna y propiedades de los cuerpos

1.1. Importancia de conocer las propiedades y estructura interna de los cuerpos.	21
1.2. Ideas básicas de la teoría cinético-molecular.	24
1.2.1. Pequeñez de las moléculas.	25
1.2.2. Interacción entre las moléculas.	30
1.2.3. Movimiento constante de las moléculas.	31
1.3. Estructura y propiedades de sólidos, líquidos y gases.	36
1.3.1. Sólidos.	37
1.3.2. Líquidos.	39
1.3.3. Gases.	41
1.4. Actividades de sistematización y consolidación.	47
1.4.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo.	47
1.4.2. Conexión de conceptos e ideas.	48
1.4.3. Crucigrama.	49
1.4.4. Actividades de repaso.	50
1.4.5. Ejercicios de repaso.	51

2. Propiedades y leyes en los fluidos

2.1. Fluidos en reposo.	56
2.1.2. Conceptos de fluido y presión.	56
2.1.2.1. Concepto de fluido.	57
2.1.2.2. Concepto de presión.	60
2.1.3. Ley de Pascal.	64
2.1.4. Distribución de la presión en líquidos y gases.	68
2.1.5. Ley de Arquímedes.	77
2.2. Fluidos en movimiento.	82
2.2.1. Tipos de movimiento de los fluidos.	83
2.2.2. Ecuación de continuidad.	84
2.2.3. Ecuación de Bernoulli. Aplicaciones.	88
2.3. Actividades de sistematización y consolidación.	99
2.3.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo.	99
2.3.2. Conexión de conceptos e ideas.	100
2.3.3. Crucigrama.	101
2.3.4. Actividades de repaso.	102
2.3.5. Ejercicios de repaso.	105

3. Propiedades de las superficies de los líquidos

3.1. Tendencia a reducir la superficie.	111
3.2. Fuerza de tensión superficial.	116
3.3. Fenómenos de mojado y no mojado.	121
3.4. Capilaridad.	127
3.5. Actividades de sistematización y consolidación.	133
3.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo.	133
3.5.2. Conexión de conceptos e ideas.	134
3.5.3. Crucigrama.	135
3.5.4. Actividades de repaso.	136
3.5.5. Ejercicios de repaso.	138

4. Teoría cinético-molecular y leyes de los gases

4.1. Ecuación básica de la teoría cinéticomolecular de los gases.	142
4.1.1. Modelo de gas ideal.	142
4.1.2. Relación entre la presión de un gas y la velocidad de sus moléculas.	145
4.2. Temperatura y energía cinética media de las moléculas.	153
4.3. Ecuación de estado del gas ideal.	157
4.4. Leyes de los gases.	161
4.5. Actividades de sistematización y consolidación.	167
4.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo.	167
4.5.2. Conexión de conceptos e ideas.	168
4.5.3. Crucigrama.	169
4.5.4. Actividades de repaso.	170
4.5.5. Ejercicios de repaso.	171

5. Nociones de Termodinámica

5.1. Energía interna.	178
5.2. Trabajo en Termodinámica.	183
5.3. Cantidad de calor. Calor específico.	187
5.4. Calores específicos de vaporización y de fusión.	193
5.5. Primera ley de la Termodinámica.	195
5.6. Procesos irreversibles.	199
5.7. Máquinas térmicas. Eficiencia energética.	203
5.8. Máquinas térmicas y preservación del medio ambiente.	211
5.9. Actividades de sistematización y consolidación.	215
5.9.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo.	215
5.9.2. Conexión de conceptos e ideas.	216
5.9.3. Crucigrama.	217
5.9.4. Actividades de repaso.	218
5.9.5. Ejercicios de repaso.	220

Actividades prácticas

6.1. Actividades prácticas para la casa o el aula.	225
6.2. Prácticas de laboratorio.	239
6.2.1. Estimación del tamaño de una molécula.	240
6.2.2. Estimación de la presión atmosférica.	243
6.2.3. Estudio de la fuerza de empuje de un líquido.	246
6.2.4. Determinación del coeficiente de tensión superficial de un líquido.	250
6.2.5. Comprobación de la ley de Boyle-Mariotte.	253
6.2.6. Comprobación de la ley de Charles.	256
6.2.7. Transmisión de energía térmica.	258

A estudiantes y profesores

Este libro, *Propiedades de la Materia*, forma parte de los materiales curriculares preparados para apoyar la introducción del Plan 2009 en el bachillerato de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Está dedicado al análisis de una serie de propiedades de los cuerpos, de gran interés en la tecnología y la vida cotidiana, y al estudio de nociones de dos ramas fundamentales de la ciencia, la Teoría Cinético-Molecular y la Termodinámica.

Durante el estudio de esta asignatura, los alumnos amplían la visión del mundo que poseen. En particular, interpretan los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos como sistemas formados por una enorme cantidad de moléculas que interactúan entre sí y están en constante movimiento desordenado; amplían y profundizan el concepto de energía; se familiarizan con la idea de la irreversibilidad de todos los procesos naturales; explican numerosos fenómenos y propiedades del mundo que los rodea; analizan el principio de funcionamiento de las máquinas térmicas y las implicaciones que para el medio ambiente ha tenido la intensiva utilización de ellas.

Propiedades de la Materia contribuye, pues, a ampliar la cultura general básica de los alumnos y a prepararlos para continuar carreras universitarias de diversos perfiles.

El enfoque didáctico del libro es consecuente con la etapa por la que actualmente está transitando la Universidad Autónoma de Sinaloa, de reestructurar el currículo del bachillerato en base a competencias. El propósito es que los alumnos alcancen un nivel de integración de conocimientos, procedimientos, actitudes y valores, que les permita desempeñarse eficazmente en la vida social y en sus estudios futuros.

Esto requiere que a lo largo del curso, realicen una serie de actividades especialmente concebidas para lograr las competencias previstas. Por eso, acompañando al texto del libro, se ha incluido un gran número de preguntas, actividades a realizar y ejercicios resueltos. Luego, al final de cada capítulo, aparecen otras actividades que complementan a las anteriores y ayudan a consolidar y sistematizar lo estudiado. Se ha incluido además un apartado dedicado a actividades prácticas, el cual debe facilitar la labor de los maestros en esa dirección, y ayudar así a revitalizar un aspecto esencial de la formación de los alumnos, lamentablemente descuidado en los últimos años. La idea central es que el libro sea, más allá de un libro de texto, un material de trabajo, pues solo reflexionando profundamente sobre lo leído, planteándose interrogantes y realizando numerosas actividades teóricas y prácticas alrededor del material, es decir, trabajando conscientemente, podrán los alumnos adquirir las competencias que se esperan.

Por último, nos parece necesario subrayar, que realizar con efectividad un enfoque del proceso de enseñanza-aprendizaje dirigido a la formación de competencias, no será posible si dicho proceso no es acompañado por un sistema de evaluación que esté en plena correspondencia con las competencias declaradas y las actividades desarrolladas.

Los autores

Introducción





Introducción

Como sabes, la Física investiga **sistemas** y **cambios** fundamentales, que están en la base de otros más complejos, estudiados por diversas ramas de la ciencia y la tecnología.

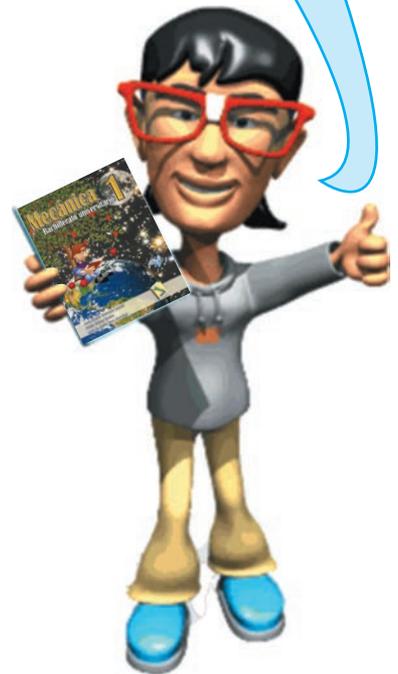
En el segundo año centramos la atención en un cambio sumamente importante, el movimiento mecánico. El presente libro está dedicado a examinar **propiedades esenciales de ciertos sistemas con los cuales nos relacionamos cotidianamente: cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos** (Fig.1). Una peculiaridad de tales sistemas es que **están constituidos por una enorme cantidad de partículas que interactúan entre sí**, lo cual determina sus propiedades.



Fig.1. Las propiedades de los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos son esenciales en nuestra vida. Ellos son sistemas constituidos por una enorme cantidad de partículas.

El modo de vida de los seres humanos ha estado estrechamente vinculado al conocimiento y utilización de las propiedades de los cuerpos. Diferentes períodos de la historia humana han sido incluso denominados según los materiales cuyas propiedades resultaban decisivas para elaborar herramientas y otros útiles: edad de **pedra**, edad del **bronce**, edad del **hierro**. A la creación del primer plástico en 1856, el celuloide, le ha seguido la invención de una inmensa lista de ellos, y desde mediados del siglo XX se han estado produciendo infinidad de nuevos materiales electrónicos. Ambos, plásticos y materiales electrónicos, ejercen nota-

Sintetiza en pocas palabras lo que estudia la Física (consulta la unidad I de Mecánica1). ¿Qué parte de ello has estudiado hasta ahora?



¿Por qué los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos que nos rodean representan sistemas?





Se habla de tres períodos del desarrollo de la humanidad denominados edad de piedra, edad del bronce y edad del hierro. Ubícalos en una línea de tiempo. Auxíliate de una enciclopedia o Internet.



ble influencia en la vida moderna. Éstos y otros muchos ejemplos muestran la importancia que tiene el estudio de las **propiedades de la materia**.



Ilustra mediante ejemplos la afirmación del texto acerca de que las propiedades de los cuerpos están determinadas por la estructura interna de ellos.

Pero para poder explicar las propiedades de la materia, las diferencias entre un material y otro y, sobre todo, diseñar materiales con propiedades deseadas, se requiere conocer la estructura interna de los cuerpos, conocer las características de los componentes que los forman y de las interacciones entre ellos. Es que **las propiedades de los sistemas, en particular de los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos, están determinadas por la estructura de ellos**. Por eso el curso comenzará con una primera unidad, **Estructura interna y propiedades de los cuerpos**, cuyo objetivo es que amplíes el conocimiento ya adquirido en el curso de Química acerca de la estructura molecular de los cuerpos y la relación que tiene con las propiedades de ellos. Luego utilizarás estos conocimientos al estudiar el resto de las unidades. Cabe precisar que en este curso, al considerar la estructura de los cuerpos nos limitaremos al nivel molecular, no examinaremos el interior de las moléculas ni de los átomos.



En la segunda unidad, **Propiedades y leyes en los fluidos**, combinarás los conocimientos que ya tienes de los cursos de Mecánica con las ideas introducidas en la unidad precedente, a fin de explicar importantes propiedades de líquidos y gases, como las de fluir, presionar sobre los cuerpos con que entran en contacto, el empuje que ejercen sobre los cuerpos sumergidos en ellos y otras. El conocimiento de tales propiedades es indispensable para entender numerosos fenómenos de la vida cotidiana, y también cuando se consideran aspectos como el almacenamiento de líquidos y gases, su transportación por tuberías, el flujo sanguíneo en el organismo humano, los mecanismos hidráulicos y neumáticos, la navegación marítima y aérea, etc. (Fig. 2).

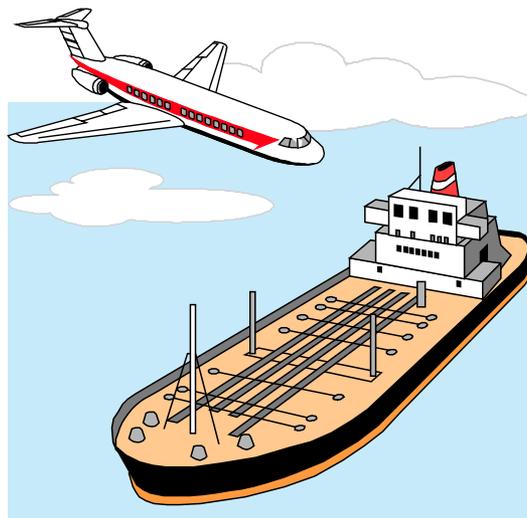


Fig.2. El conocimiento de las propiedades de los fluidos (líquidos y gases) es indispensable para entender numerosos fenómenos y desarrollos tecnológicos.

En la tercera unidad, **Propiedades de las superficies de los líquidos**, analizarás una serie de fenómenos debidos a las propiedades especiales que poseen sus superficies, entre ellos, la formación de gotas, el mojado o no de ciertas superficies y la capilaridad (Fig. 3), presentes todos en la vida diaria y esenciales en las ciencias de la naturaleza y la ingeniería.

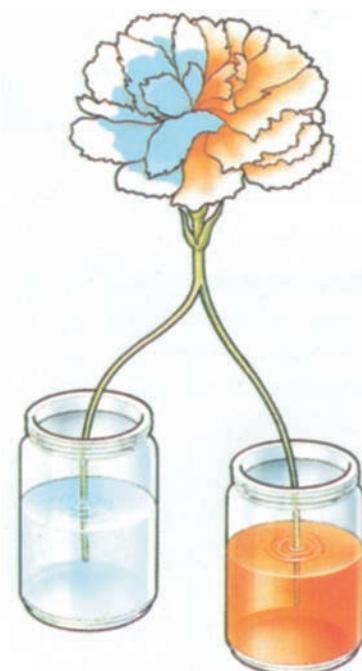


Fig.3. Las propiedades especiales de las superficies de los líquidos dan lugar a fenómenos de gran importancia en la vida diaria, las ciencias de la naturaleza y la ingeniería.

Si bien en las unidades anteriores se emplean las ideas acerca de la estructura interna de los cuerpos para explicar varias propiedades y leyes desde el punto de



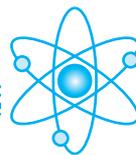
Fig.4. La comprensión de los gases como sistemas de partículas (moléculas) que se mueven a grandes velocidades, chocando entre sí y con las paredes del recipiente que los contiene, permite llegar a conclusiones cuantitativas acerca de la presión, la temperatura y otras propiedades de los gases.

vista microscópico, ello se hace principalmente de modo cualitativo. Es en la cuarta unidad, **Teoría cinético-molecular y leyes de los gases**, que aplicarás dichas ideas para llegar a conclusiones cuantitativas (Fig. 4), en particular, para interpretar los conceptos de temperatura y presión y obtener teóricamente cómo se relacionan entre sí la presión, la temperatura y el volumen de los gases. Esto te permitirá apreciar mejor la importancia que tiene el conocimiento teórico, en este caso de la estructura de los cuerpos, para llegar a conclusiones acerca de la realidad. Por otra parte, la Teoría cinético-molecular constituye el fundamento microscópico de la Termodinámica, una rama de la Física cuyas nociones estudiarás en la última unidad.

En la quinta y última unidad, **Nociones de Termodinámica**, te relacionarás con algunos elementos básicos de esa rama de la ciencia. La Termodinámica fue la primera teoría científica que se elaboró acerca de los fenómenos térmicos. Surgió y se estableció como rama de la ciencia hacia mediados del siglo XIX, durante la búsqueda de las mejores condiciones para transformar energía térmica en mecánica mediante máquinas (Fig. 5). En esta unidad profundizarás en los procesos de transformación y transmisión de energía, ya examinados en Mecánica 2. Pero mientras que la Mecánica considera sistemas aislados, es decir, que no intercambian energía con el exterior, la Termodinámica centra su atención precisamente en ese intercambio con el exterior. Aquí ampliarás el concepto de trabajo, te

Fig.5. La Termodinámica surgió y se estableció como rama de la ciencia durante la búsqueda de las mejores condiciones para transformar energía térmica en mecánica mediante máquinas.





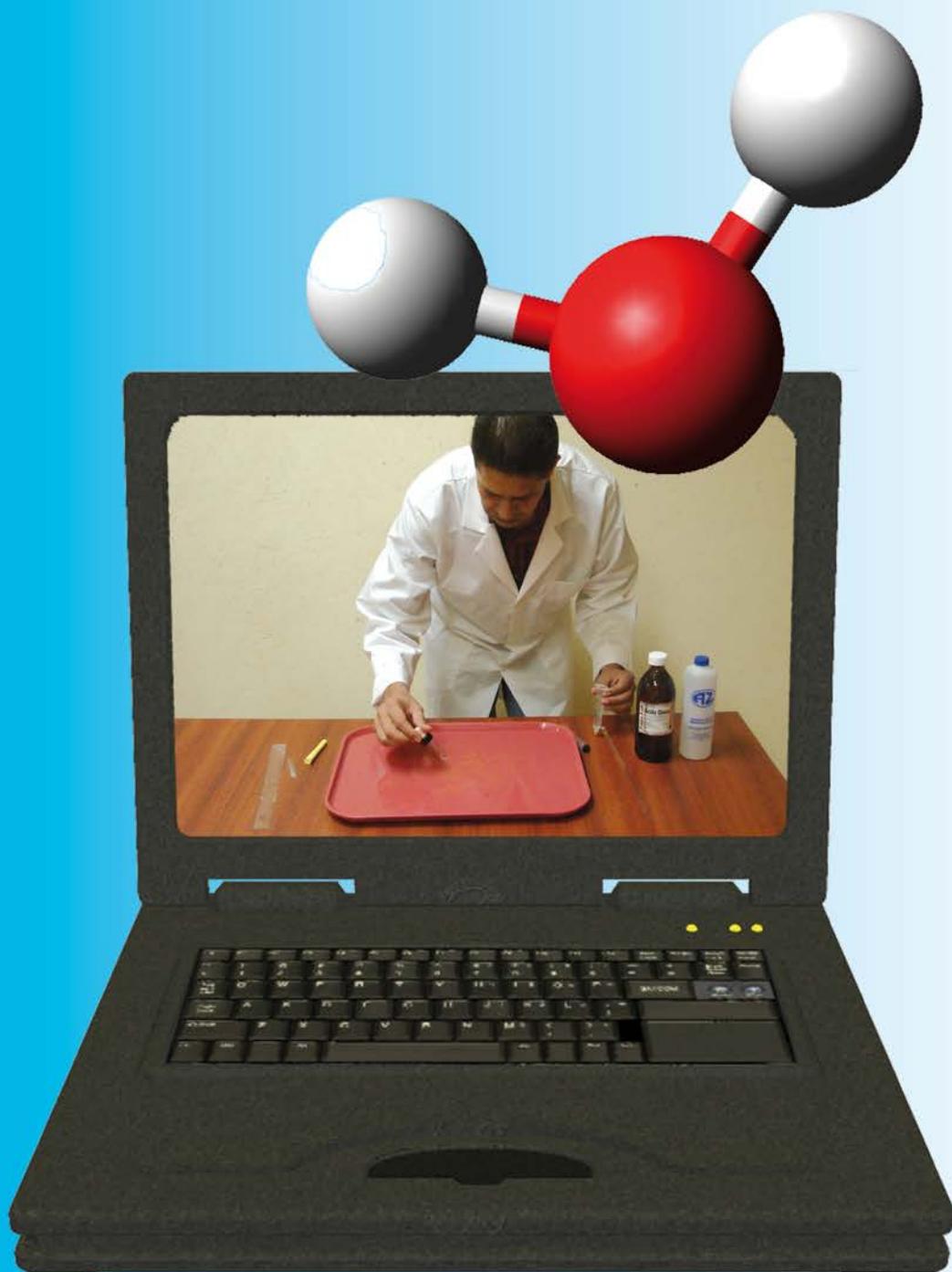
familiarizarás con otro proceso de transmisión de energía, el calor, y ahondarás en el principio de funcionamiento de las máquinas térmicas, el concepto de eficiencia energética y en cuestiones relativas a la preservación del medio ambiente.

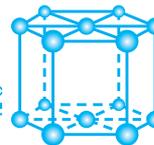
De este modo, en el presente curso estudiarás un conjunto de propiedades y fenómenos relativos principalmente a los gases y líquidos, así como nociones de las dos teorías que junto a la Mecánica permiten entender tales propiedades y fenómenos: la Teoría Cinético-Molecular y la Termodinámica. Esto te preparará no solo para comprender numerosos fenómenos que tienen lugar en nuestro entorno, sino también para enfrentar diversas materias durante tu formación profesional.

Resume con tus palabras las cuestiones fundamentales de que tratará este curso.



1 Estructura interna y propiedades de los cuerpos





1. Estructura interna y propiedades de los cuerpos

1.1. Importancia de conocer las propiedades y estructura interna de los cuerpos

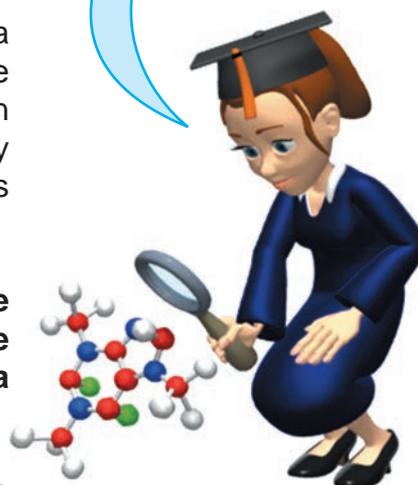
La Física, conjuntamente con la Química y ciertas ramas de la tecnología, estudia las propiedades de los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos y la estructura interna de ellos.

Los **cuerpos** son porciones de algún material, cierta cantidad de él confinada en el espacio. En el curso de Química aprendiste que todos los cuerpos que nos rodean están constituidos por átomos, que al agruparse de muy diversos modos originan la enorme variedad de propiedades que apreciamos en ellos.

Las propiedades de los cuerpos dependen del tipo de átomos que se agrupan, del modo en que lo hacen y de las interacciones entre ellos, es decir, de la estructura interna.

El origen de los seres humanos y, como señalamos en la Introducción al curso, el desarrollo de su modo de vida, están estrechamente vinculados al conocimiento de las propiedades de los cuerpos. Los útiles más antiguos que se han hallado son de piedra y fueron fabricados por los antecesores del hombre hace alrededor de 2.5 millones de años. La gran dureza de piedras como el sílex y el pedernal y su facilidad para ser fragmentadas mediante la talla en láminas cortantes, las hizo particularmente idóneas para la fabricación de instrumentos y armas. Más tarde, además de las piedras, el hombre utilizó el hueso, el marfil y la madera. Hace unos 10 000 años comenzó a emplear troncos de madera y cerámica a base de arcilla para la construcción de viviendas, así como cobre para la decoración y fabricación de utensilios. Alrededor de 4 000 años después, el empleo del cobre empezó a ser sustituido por el del bronce (aleación de cobre y estaño) y hace unos 3 000 mil años la tecnología del hierro se hizo predominante. Desde esa época se utilizaba el vidrio para la fabricación

Ilustra mediante ejemplos del curso de Química la idea de que las propiedades de los cuerpos dependen de su estructura interna.



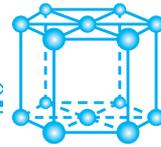
de recipientes domésticos y también, junto al oro y la plata, para la ornamentación.

La canoa más vieja que se conoce data de unos 9 000 años y los primeros barcos de vela de alrededor de 5 000. La utilización de estos antiguos medios de navegación marítima supuso ciertos conocimientos, aunque simples, de propiedades esenciales del agua y el aire. Unos 200 años antes de nuestra era los griegos construían ya máquinas de extraer agua para regadío y bombas de pistón para lanzallamas que empleaban en las batallas. De esa época es también la ley de Arquímedes (287-212 a.n.e) acerca de la fuerza de empuje ejercida por los líquidos sobre todo cuerpo que se sumerge en ellos.

Lo que hemos descrito en los dos párrafos anteriores muestra, que desde épocas muy remotas se tenían conocimientos elementales, pero decisivos, de muchas propiedades de los sólidos y de algunas de los líquidos y gases, en particular del agua y del aire (Fig. 1.1).



Fig. 1.1. El conocimiento de ciertas propiedades de los sólidos, líquidos y gases ha determinado el modo de vida de los seres humanos desde que aparecieron en la Tierra.



Sin embargo, fue solo cuando la ciencia -en especial la Física y la Química- profundizó en las propiedades de los cuerpos, y sobre todo en el conocimiento de la estructura interna de ellos, que la tecnología progresó aceleradamente (Fig. 1.2): se perfeccionó la máquina de vapor y se inventó el motor de combustión interna; se crearon numerosos tipos de plásticos, aleaciones metálicas con propiedades deseadas y materiales para la electrónica; se elaboraron innumerables productos y medicamentos sintéticos; se desarrollaron diversas tecnologías nucleares. Esa profundización en el conocimiento de la estructura de los cuerpos se inició en el siglo XIX y se ha ido intensificando hasta nuestros días.



Fig.1.2. Fue solo cuando la ciencia profundizó en el conocimiento de la estructura interna de los cuerpos, que se crearon numerosas nuevas sustancias y materiales.

En esta unidad intentaremos responder preguntas como las siguientes:

¿Cómo es la estructura interna de los cuerpos? ¿Qué relación tiene con sus propiedades? ¿En qué épocas surgieron y se desarrollaron las principales ideas acerca de la estructura de los cuerpos y cuáles fueron algunos de los pensadores que contribuyeron a ellas?

¿Qué otras preguntas, además de las planteadas en el texto, consideras de interés responder en esta primera unidad?

Cita ejemplos concretos de la repercusión de creaciones de la tecnología que se basan en el conocimiento de la estructura interna de los cuerpos.



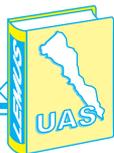


Fig. 1.3. Demócrito (460-370 a.n.e), filósofo griego que desarrolló la idea de que todo está formado por pequeñísimas partículas, las cuales llamó átomos.

1.2. Ideas básicas de la teoría cinético-molecular

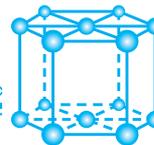
Hace cerca de 2 500 años, el sabio griego **Demócrito** (Fig. 1.3) llegó a la conclusión de que todo en la naturaleza está formado por pequeñísimas partículas, las cuales llamó **átomos**, que en griego quiere decir “no divisibles” (En la palabra átomo la “a” significa no, o sin, y “tomo” sección o parte, de modo que la palabra significa “sin partes”). Siguiendo al sabio griego, **los científicos denominaron átomo a la menor porción en que puede ser dividido un elemento químico**. Éstos fueron considerados indivisibles hasta fines del siglo XIX, sin embargo, como sabes, en realidad son auténticos sistemas, constituidos por electrones, protones y neutrones.

Los cuerpos están formados directamente por átomos o por agrupaciones de éstos que representan unidades relativamente independientes. **Se denomina molécula a la menor porción de sustancia que conserva sus propiedades químicas**.

¡Y yo que pensaba que las moléculas siempre son agrupaciones de átomos!



Pues ya ves, los cuerpos metálicos por ejemplo, están formados directamente por átomos. Estos conservan las propiedades químicas del metal y en tal sentido pueden ser considerados moléculas.



La **teoría cinética-molecular** consta de tres ideas fundamentales: 1) los cuerpos están formados por porciones muy pequeñas (denominadas moléculas), 2) las moléculas interactúan entre sí y 3) están en constante movimiento desordenado. A continuación profundizamos en cada una de estas ideas.

1.2.1. Pequeñez de las moléculas

Para convencerse plenamente de que los cuerpos están compuestos por moléculas es preciso medir algunas magnitudes básicas que las caracterizan. Entre esas magnitudes están el **tamaño**, la **masa** y el **número de ellas** en el cuerpo.

Algunos hechos de la vida cotidiana nos proporcionan ya una idea de lo pequeñas que pueden ser las moléculas: el lento desgaste de ciertos cuerpos sólidos a consecuencia del roce, como por ejemplo las monedas; la evaporación de los líquidos; el desgaste relativamente pequeño de la punta de un lápiz luego de haber realizado una cantidad considerable de trazos con él y, por tanto, haber dejado infinidad de porciones suyas en el papel; la disolución de un granito de colorante en agua, lo cual evidencia que a través de todo el volumen del agua hay porciones de él todavía muchísimo más pequeñas.

Una evaluación de las dimensiones de ciertas moléculas puede ser obtenida a partir de un experimento relativamente simple. Si se deja caer una pequeña gota de aceite sobre la superficie de agua, se extiende en forma de una delgada película circular (Fig. 1.4). Conociendo el volumen de la gota y el diámetro de la superficie circular, puede determinarse el espesor de la película. Es de suponer que el tamaño de la molécula de aceite sea menor que dicho espesor. En el siguiente ejemplo ilustramos esto en detalle.

Observa lo que se gasta de la mina de un lápiz cada vez que se escribe una palabra con él. ¿Por qué ello da idea de la pequeñez de las partículas que componen la mina del lápiz?



Fig. 1.4. Al dejar caer una gotita de aceite sobre la superficie de agua, se extiende en forma de una delgada película circular.

Ejemplo 1.1. Se prepara una disolución de ácido oleico (ácido graso abundante en el aceite de oliva) en alcohol y se deja caer una gota sobre la superficie de agua. Previamente se determinó que el volumen de ácido oleico en la gota era de 1 mm^3 . Cuando la gota de la disolución cae en el agua, el alcohol se disuelve en ella y el ácido oleico se extiende en su superficie, formando una película circular de diámetro medio 0.74 m . Calcula el espesor de la película. ¿Qué sugiere esto acerca del tamaño de las moléculas de ácido oleico?



La película circular de aceite puede considerarse un cilindro, cuya altura h es el espesor de la película. El volumen del cilindro, que coincide con el de la pequeña gota, es:

$V = Ah$, donde A es el área de la base circular y h la altura.

De aquí que: $V = \pi r^2 h$ donde $V = 1 \text{ mm}^3$
 $r = 0.37 \text{ m} = 0.37 \times 10^3 \text{ mm}$

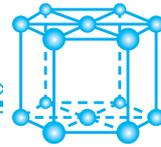
Despejando h y sustituyendo los datos se tiene:

$$h = \frac{V}{\pi r^2} = \frac{1 \text{ mm}^3}{\pi (0.37 \times 10^3 \text{ mm})^2} = 2 \times 10^{-6} \text{ mm}$$

$$h = 2 \times 10^{-9} \text{ m}$$

Ése es el espesor de la película de aceite. Esto sugiere que la dimensión de la molécula de ácido oleico en la dirección vertical es igual o menor que dicho valor.

Cabe precisar que, en realidad, la molécula de ácido oleico es alargada, asemejándose a un cilindro. En la película de aceite tales "cilindros" se disponen inclinados respecto a la superficie del agua. La longitud de ellos es algo mayor de $2 \times 10^{-9} \text{ m}$ y el diámetro, aproximadamente $5 \times 10^{-10} \text{ m}$. Es de suponer que el tamaño de los átomos que forman la molécula de ácido oleico sea inferior a $5 \times 10^{-10} \text{ m}$.



El diámetro de los átomos es alrededor de 1×10^{-8} cm, o lo que es lo mismo, 1×10^{-10} m. Esta cifra debes memorizarla, es tan importante que ha recibido un nombre especial, **ángstrom** (Å), denominada así en honor del físico y astrónomo sueco Anders Jonas Ångström (1814-1874). En la figura 1.5 se muestra una foto tomada con un microscopio especial de los átomos en la punta de una aguja de tungsteno.

Referirse al tamaño de las moléculas con un valor único es imposible, pues sus dimensiones y formas varían mucho, según la molécula de que se trate, los átomos que la integran. Unas son relativamente pequeñas y aproximadamente esféricas, como por ejemplo las del hidrógeno y el oxígeno, las cuales están compuestas de solo dos átomos; otras alargadas y formadas por muchos átomos, como las del ácido oleico (Fig. 1.6a), al cual nos hemos referido en el ejemplo 1.1, y otras más son enormes (Fig. 1.6b), están compuestas por miles de átomos.

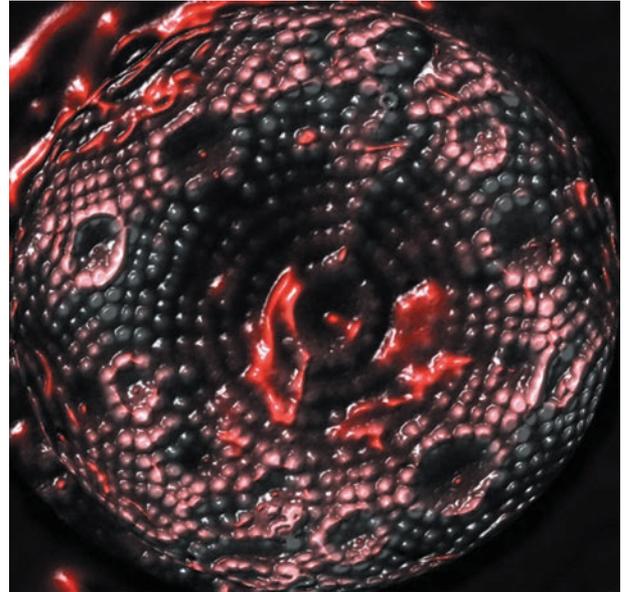
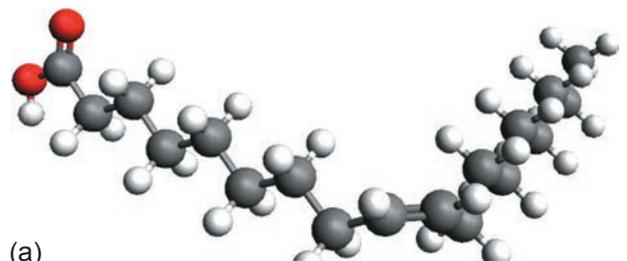
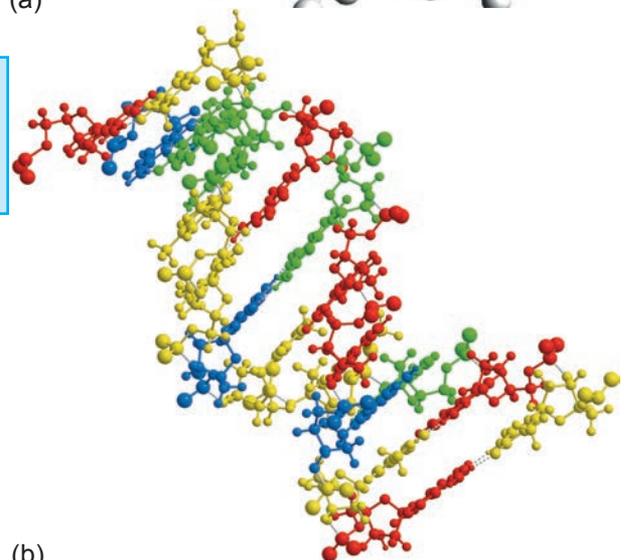


Fig.1.5. El diámetro de los átomos es de alrededor de 1×10^{-10} m, o sea 1 Å (ángstrom). En la foto, átomos de tungsteno en la punta de una fina aguja.



(a)



(b)

Fig.1.6 Modelos de las moléculas de: (a) ácido oleico, componente de muchas grasas, (b) ADN, portadora de los genes.

Indaga acerca de la molécula de ácido oleico y los átomos de que consta.





¿De qué orden de magnitud consideras que es el tamaño de las moléculas de los gases que forman el aire que nos rodea? Argumenta tu respuesta.

Debido a su extrema pequeñez, es difícil representarse el tamaño de los átomos individuales, e incluso el de grandes moléculas formadas por muchos de ellos, pero la siguiente comparación da una idea. Imagina que se amplifica el tamaño de todo lo que nos rodea alrededor de un millón de veces. En tal caso la estatura de un hombre sería solo algo menor de 2000 km, aproximadamente el doble de la distancia entre Culiacán y Ciudad de México. A pesar de ello, una molécula grande, por ejemplo la de ADN, portadora de los genes, tendría una longitud de unos pocos milímetros y los átomos habrían alcanzado un tamaño de tan solo 0.1 mm.

Como las moléculas son tan diminutas, el número de ellas en cualquier cuerpo común es inmenso. En el ejemplo siguiente evaluamos el número de moléculas en 1 mm³ de ácido oleico.

Ejemplo 1.2. Considera que en el experimento descrito en el ejemplo 1.1 las moléculas de ácido oleico son cilindros de diámetro 5×10^{-10} m, que se disponen unos juntos a los otros transversalmente a la superficie del agua. Estima el número de total de moléculas que hay en: a) 1 mm³ de ácido oleico, b) 1 cm³.

a) Una estimación del número de moléculas que hay en la película de ácido oleico del ejemplo anterior, y por tanto en 1 mm³ de él, viene dada por la razón entre el área de la película y aquella parte del área ocupada por una molécula.

El radio de la película es $R = 37$ cm.

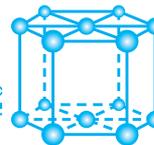
El de la molécula cilíndrica $r = 2.5 \times 10^{-10} = 2.5 \times 10^{-8}$ cm.

Por consiguiente, el número de moléculas es:

$$\frac{\pi R^2}{\pi r^2} = \frac{R^2}{r^2} = \left(\frac{R}{r}\right)^2 = \left(\frac{37 \text{ cm}}{2.5 \times 10^{-8} \text{ cm}}\right)^2 = 2.2 \times 10^{18} \approx 2 \times 10^{18} \text{ moléculas}$$

b) Como 1 cm³ es 10³ veces mayor que 1 mm³, la cantidad de moléculas que hay en 1 cm³ es ese mismo número de veces mayor:

$$2.2 \times 10^{18} \times 10^3 \approx 2 \times 10^{21} \text{ moléculas}$$



Como sabes del curso de Química, la **cantidad de sustancia** contenida en un cuerpo se mide por el número de moléculas que posee. Pero como en los cuerpos habituales dicho número es muy grande, lo habitual es utilizar una unidad especial para medir la cantidad de sustancia, el **mol**, que equivale a 6.0×10^{23} moléculas. Esta cantidad de moléculas se denomina **número**, o **constante**, **de Avogadro** (N_A).

Ejemplo 1.3. Expresa en mol la cantidad de sustancia que hay en 1 cm^3 de ácido oleico. Para ello utiliza el resultado obtenido en el ejemplo 1.2.

En 1 cm^3 de ácido oleico hay 2.2×10^{21} moléculas. Esto equivale a:

$$\frac{2 \times 10^{21} \text{ moléculas}}{6.0 \times 10^{23} \frac{\text{moléculas}}{\text{mol}}} = 3.7 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Las masas de las moléculas, aún cuando se trate de las más grandes, son muy pequeñas. En el siguiente ejemplo evaluamos la masa de una molécula de ácido oleico.

Ejemplo 1.4. La densidad del ácido oleico es 0.89 g/cm^3 . Teniendo en cuenta los datos de los ejemplos resueltos anteriormente, evalúa la masa de una molécula de esta sustancia.

La masa M de 1 mm^3 de ácido oleico, y por tanto de las 2×10^{18} moléculas en dicho volumen, es:

$$M = \rho V = \left(0.89 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) (1 \times 10^{-3} \text{ cm}^3) = 8.9 \times 10^{-4} \text{ g}$$

Dividiendo este resultado entre el número de moléculas que hay en 1 mm^3 , encontramos la masa de una de ellas:

$$m = \frac{8.9 \times 10^{-4} \text{ g}}{2.2 \times 10^8} = 4 \times 10^{-22} \text{ g}$$



Muchas moléculas tienen masas similares a la calculada en el ejemplo anterior para la de ácido oleico. Las moléculas de las sustancias inorgánicas, comúnmente constituidas por un reducido número de átomos, poseen masas más pequeñas. Por ejemplo, la masa de la molécula de agua es 2.7×10^{-23} g. Por su parte, las masas de las grandes moléculas orgánicas son mucho mayores. Así, las de proteínas pueden tener masas decenas de miles de veces mayores que la de ácido oleico.

1.2.2. Interacción entre las moléculas

¿Por qué si los cuerpos están formados por moléculas, los sólidos y líquidos no se desintegran espontáneamente, e incluso para dividir la mayoría de los sólidos se requieren grandes esfuerzos?

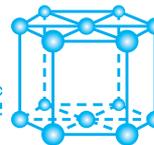
Describe hechos de la vida cotidiana que revelen la existencia de fuerzas de atracción entre las porciones de sólidos, líquidos, así como entre sólidos y líquidos.



La respuesta a la pregunta anterior parece obvia: entre las moléculas se ejercen **fuerzas de atracción** que mantienen a las porciones de los líquidos y sólidos cohesionadas. Si no existieran tales fuerzas todos los cuerpos se encontrarían en estado gaseoso. Al propio tiempo, si solo actuaran fuerzas de atracción, las moléculas penetrarían unas en otras. En realidad, cuando las distancias entre ellas son muy pequeñas aparecen **fuerzas de repulsión**. Esto es lo que explica la enorme dificultad que representa comprimir, por ejemplo, el agua contenida en una jeringa.

La naturaleza de estas fuerzas de atracción y repulsión entre las moléculas no es gravitatoria, pues, como sabes, éstas son únicamente apreciables cuando se trata de la interacción entre cuerpos que poseen masas relativamente grandes, y las masas de las moléculas son insignificantes. Además, las fuerzas gravitatorias solo son de atracción y, como acabamos de señalar, las fuerzas entre moléculas pueden ser tanto de atracción como de repulsión. **Las fuerzas de interacción entre las moléculas tienen una naturaleza electromagnética.**

Las fuerzas de atracción o repulsión entre las moléculas se deben a las cargas eléctricas de los átomos que las forman. Las fuerzas de atracción no actúan a grandes distancias, son de corto alcance. En el caso de moléculas



aproximadamente esféricas, cuando se acercan a distancias entre sus centros unas tres veces mayores que sus diámetros, surgen las fuerzas de atracción entre ellas. Al disminuir más la distancia, la fuerza primeramente aumenta, pero luego decrece, hasta hacerse cero cuando las envolturas electrónicas de los átomos que componen las moléculas comienzan a coincidir. La posterior disminución de las distancias entre las moléculas provoca fuerzas de repulsión.

La dependencia de las fuerzas de interacción entre las moléculas con la distancia entre ellas es lo que origina la fuerza elástica durante la compresión y alargamiento de ciertos cuerpos sólidos. Al comprimir un cuerpo elástico, las distancias entre sus moléculas disminuye y aparecen fuerzas de repulsión. Por su parte, al alargar el cuerpo aumenta la distancia entre las moléculas y surgen fuerzas de atracción. La interacción entre las moléculas también da lugar a la fuerza de rozamiento al tratar de deslizar un cuerpo que está en contacto con otro.

Las fuerzas de atracción entre los átomos que componen las moléculas pueden ser cientos y miles de veces mayores que entre las propias moléculas. A esto se debe que, en general, sea más fácil separar una molécula de otra que los átomos que las constituyen. Por ejemplo, al evaporarse el agua, o disolverse el azúcar, las moléculas de estas sustancias no se desintegran en átomos, sino que se siguen comportando como unidades independientes.

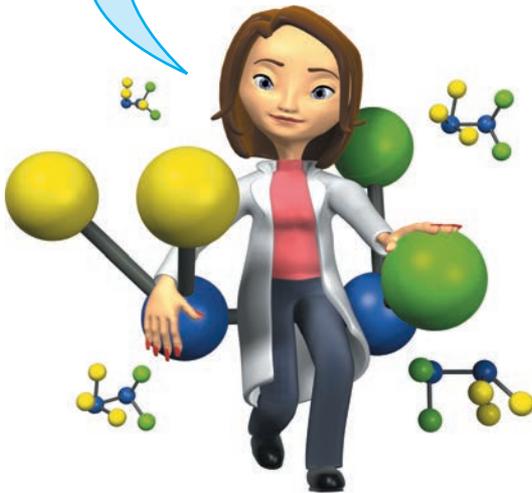
1.2.3. Movimiento constante de las moléculas

Cuando se mezcla una gota de acuarela con agua, por todo el volumen de ésta se distribuyen pequeñísimas partículas de la pintura. Si observamos la mezcla con ayuda de un microscopio, advertiremos que las partículas de acuarela con dimensiones algo menores de 0.001 mm están en constante movimiento desordenado. Algo similar ocurre al observar, también mediante un microscopio, partículas de ese tamaño que forman parte del humo. Tales partículas y el movimiento que realizan se denominan **“brownianos”**, en honor al botánico británico Robert Brown, quien fue el

Si dividimos un trozo de tiza, madera o metal en dos partes, luego no podremos volver a unir dichas partes como antes; sin embargo, dos gotas de agua o dos trozos de plastilina pueden unirse fácilmente. ¿Cómo explicarías esto?



En tu opinión, ¿por qué la suposición inicial de que el movimiento browniano es originado por ciertos microorganismos pronto fue desechada?



primero en advertir este sorprendente hecho. En 1827 Brown observó al microscopio que diminutas partículas del polen de una flor suspendidas en agua, se movían de modo permanente y errático. Inicialmente se supuso que dicho movimiento era originado por ciertos microorganismos, no obstante, pronto esta idea fue desechada. Entonces se supuso que era producido por determinadas corrientes en el líquido, pero esta explicación tampoco se consideró satisfactoria.

En 1905 Albert Einstein elaboró la teoría del movimiento browniano. Basándose en la idea de que **el movimiento de las partículas brownianas” se debe a que las moléculas están en constante movimiento y chocan con ellas**, dedujo una ecuación que relaciona sus desplazamientos con: los intervalos de tiempo considerados, el número de Avogrado, la temperatura y la viscosidad de la sustancia en que se encuentran las partículas. A partir de

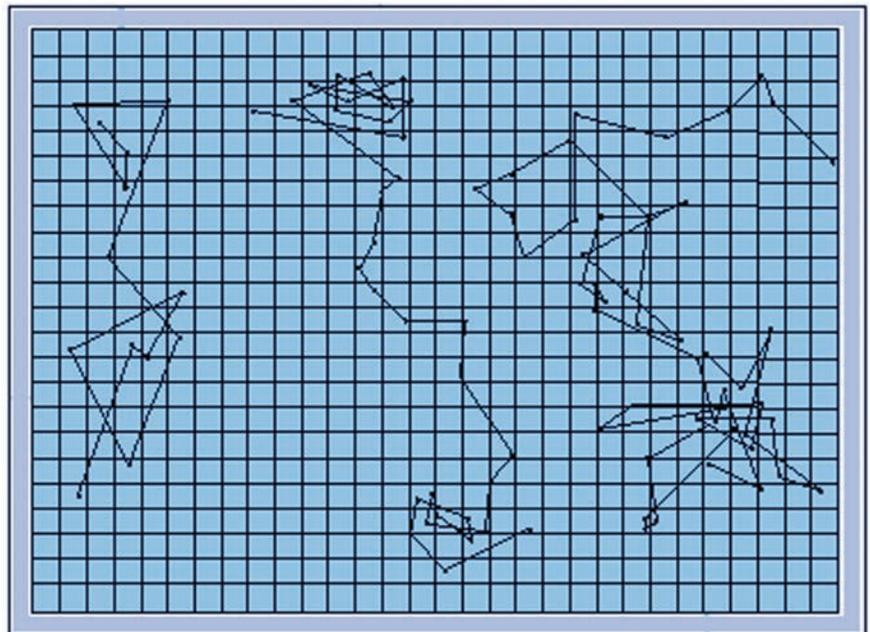
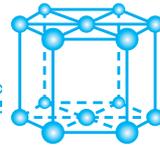


Fig. 1.7. Lámina con trayectorias de tres partículas brownianas vistas al microscopio, tomada del libro de J. Perrin *Les atomes*. Se señalan las posiciones de las partículas cada 30 s. Si se señalaran a intervalos más pequeños, por ejemplo de 0.30 s, cada segmento sería sustituido por poligonales tan complejas como las mostradas en la figura.



1908 Jean Perrin, mediante una serie de experimentos realizó detalladas mediciones de los desplazamientos de las partículas brownianas (Fig. 1.7) y comprobó la fórmula de Einstein. Tales investigaciones le valieron a Perrin el premio Nobel de Física en 1926. Los trabajos de Einstein y Perrin constituyeron una prueba irrefutable de la existencia de las moléculas y del movimiento constante de ellas. En aquella época no existía la posibilidad que hoy se tiene de fotografiar las moléculas, e incluso los átomos (Fig. 1.5).

La explicación cualitativa del movimiento browniano consiste en lo siguiente. La partícula "browniana" está rodeada por miles de moléculas en movimiento, las cuales la golpean constantemente, sin embargo, el número de moléculas que la golpea cada segundo no es el mismo en todas direcciones, lo que provoca el movimiento desordenado de la partícula.

Explica con tus palabras, ayudándote de un esquema, la causa del movimiento constante y desordenado de las partículas brownianas.



¿Por qué las partículas suspendidas en un líquido o gas con tamaños mucho mayores que 0.001 mm apenas se mueven?

Indaga acerca del movimiento browniano en Internet.

La noción de **movimiento browniano** se ha extendido a otros fenómenos. Así, las insignificantes vibraciones de la aguja de instrumentos de medición muy sensibles, originadas por los constantes choques de las moléculas de las piezas de los instrumentos y del medio circundante, se consideran un movimiento browniano. Incluso se consideran como tal las variaciones de ciertas magnitudes que describen fenómenos económicos.





Gracias al movimiento constante de las moléculas es que tiene lugar el fenómeno de la **difusión**. La **difusión de dos sustancias entre sí consiste en la mezcla de ellas, debida al movimiento molecular, al ponerlas en contacto mutuo.**

Una disolución de agua con azúcar tiene mayor densidad que el agua. ¿Cómo se explica que en el experimento descrito en la Fig 1.8, el agua con azúcar ascienda?



Es posible ilustrar la difusión mediante el siguiente experimento (Fig. 1.8). Se vierte en un vaso hasta su mitad, una disolución coloreada de agua con azúcar. Luego se añade encima agua clara, con sumo cuidado para que los líquidos no se mezclen. Al principio entre la solución coloreada y el agua clara se observa una nítida línea de separación, pero ella va desapareciendo en el transcurso de los días. Poco a poco el agua clara desciende y la solución coloreada asciende, pese incluso a la acción de la gravedad. Al cabo de unas dos semanas las disoluciones ya no pueden distinguirse una de la otra: en el vaso se observa una solución única.

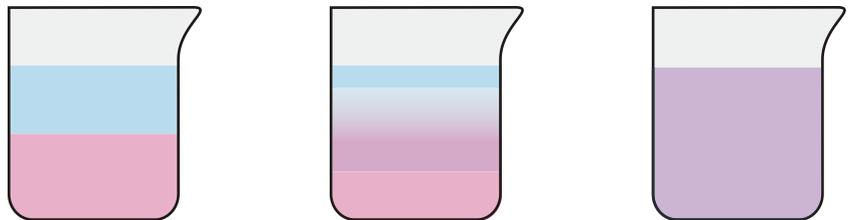
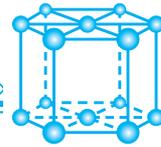


Fig. 1.8. Inicialmente el vaso contiene una disolución de agua con azúcar coloreada y encima otra de agua clara. A los pocos días la línea de separación entre ellas ha desaparecido y al cabo de varias semanas se observa una solución única.

La difusión puede ocurrir entre líquidos, gases, sólidos y también entre sustancias en estados de agregación diferentes. Ella tiene excepcional importancia en el mundo que nos rodea y para los organismos vivos. Por ejemplo, sin el fenómeno de la difusión no podríamos siquiera respirar. Como sabes, cerca de la superficie de la Tierra la atmósfera es una mezcla de Nitrógeno, Oxígeno, Dióxido de Carbono y otros gases, pero si no fuera por la difusión, dichos gases estarían distribuidos en zonas situadas a diferentes alturas, según su mayor o menor densidad. En la zona inferior, donde nos encontramos, estaría el gas más denso, el Dióxido de Carbono, con lo cual sería imposible la respiración. Por



otra parte, cuando respiramos, el intercambio de oxígeno y de dióxido de carbono en nuestros pulmones se realiza por difusión a través de ininidad de vasos capilares.

Sin la difusión los gases no se disolverían en los líquidos y, en consecuencia, los peces no podrían respirar; sería imposible la elaboración de dispositivos semiconductores y, por tanto, no contaríamos con muchos de los equipos electrónicos que hoy utilizamos. En resumen, sin el movimiento constante de los átomos y moléculas y la difusión que él origina, el mundo sería muy distinto.

La experiencia muestra que cuando la temperatura es más elevada, la mezcla de dos sustancias transcurre con mayor rapidez. Así, todos sabemos que la sal o el azúcar se disuelven más rápidamente en agua caliente que fría. Esto sugiere que **la temperatura de los cuerpos y la velocidad del movimiento de sus moléculas están relacionadas**. El aumento de la velocidad de las partículas brownianas con la temperatura y otros muchos hechos confirman la idea anterior. Es por eso que **al movimiento constante de las moléculas se le llama *movimiento térmico***.

Esa relación entre la temperatura y la velocidad del movimiento de las moléculas es aprovechada en la tecnología. Así, para la difusión de ciertos átomos en materiales semiconductores sólidos se emplean hornos a elevadas temperaturas (Fig. 1.9), de lo contrario el proceso podría demorar años.

Con ayuda de Internet, profundiza en el fenómeno de la difusión, su importancia para los seres vivos y sus aplicaciones tecnológicas.



Fig. 1.9. Difusión para obtener la unión PN, elemento fundamental de la mayoría de los componentes electrónicos modernos.



Planifica y lleva a cabo algún experimento para apoyar la idea de que la temperatura de los cuerpos y la velocidad de sus moléculas están relacionadas.



No todas las moléculas de un cuerpo tienen la misma energía de movimiento, es decir, energía cinética. Por eso, al referirse a ella es necesario hablar de la **energía promedio**. Aunque la mayoría de las moléculas posee energías cercanas al valor promedio, cierto número de ellas tiene energías cinéticas pequeñas, o grandes, comparadas con dicho valor.

Entre la temperatura de un cuerpo y la energía cinética promedio de traslación de sus moléculas existe una relación muy estrecha. En esto profundizaremos en el tercer capítulo.

1.3. Estructura y propiedades de sólidos, líquidos y gases

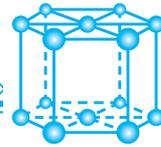
Una de las ideas fundamentales de la ciencia es que las propiedades de los sistemas (y en el caso de los organismos vivos y de los sistemas creados por el hombre, también sus funciones) dependen de la estructura interna de ellos.

Apoya mediante ejemplos la idea de que las propiedades de los sistemas dependen de la estructura interna de ellos.



En lo que se refiere a la estructura de los cuerpos, lo anterior se pone de manifiesto desde los niveles atómico y molecular. En efecto, como sabes del curso de Química, las propiedades de los átomos dependen de la cantidad de protones, neutrones y electrones que los integran y, especialmente, del número de electrones asociados a su capa más externa. A su vez, las propiedades de las moléculas están determinadas por el número y tipo de átomos que las constituyen.

Dos ejemplos concretos de la conexión entre propiedades y estructura molecular de los cuerpos son los de la **masa** y la **temperatura** de ellos. La relación de la primera con la estructura interna es obvia: la masa depende del número y tipo de moléculas que forman el cuerpo. En lo que respecta a la temperatura, en el apartado anterior acabamos de señalar su estrecha relación con la energía cinética promedio de las moléculas. A continuación examinamos la conexión que hay entre algunas propiedades esenciales



de los diferentes estados de agregación de los cuerpos -sólido, líquido, gaseoso- y la estructura de ellos.

Señalemos, en primer lugar, que **el estado de agregación en que se encuentra una sustancia depende de la combinación de dos aspectos esenciales de su estructura interna: la atracción de las moléculas y la energía cinética promedio de ellas.** Sin atracción, como ya hemos dicho, las moléculas no podrían cohesionarse para formar líquidos y sólidos. A su vez, la permanente agitación térmica de las moléculas impide que se reúnan en un todo compacto. Así, pues, lo que determina que a una misma temperatura (y por tanto igual energía cinética promedio de sus moléculas) los cuerpos que nos rodean sean unos sólidos, otros líquidos y otros gaseosos, son las fuerzas de atracción entre las moléculas.

1.3.1. Sólidos

Las fuerzas de atracción entre las moléculas de los cuerpos sólidos son lo suficientemente grandes como para que, pese al constante movimiento de ellas, se mantengan muy juntas (Fig. 1.9a y 1.9b). **Las distancias entre moléculas son del orden de sus dimensiones.** Ellas se limitan a vibrar alrededor de determinadas posiciones de modo desordenado y solo de vez en cuando se trasladan a una nueva posición. Esto explica por qué los cuerpos sólidos conservan su volumen y su forma.

Pero la gran cohesión entre las moléculas de la mayoría de los sólidos se debe no solo a las fuerzas entre ellas, sino también a las estructuras regulares que forman.

En la mayoría de los sólidos, los átomos, o moléculas, se disponen ordenadamente, según determinadas estructuras geométricas que se repiten (Fig. 1.10). Las formas regulares que apreciamos en pequeñas porciones de ciertos sólidos cristalinos (por ejemplo, los granitos de sal común y azúcar) son reflejo de esa disposición ordenada interior.

Un vaso, el agua que contiene y el aire que los rodea tienen aproximadamente la misma temperatura ¿Qué podrías decir acerca de las fuerzas de atracción entre sus moléculas?



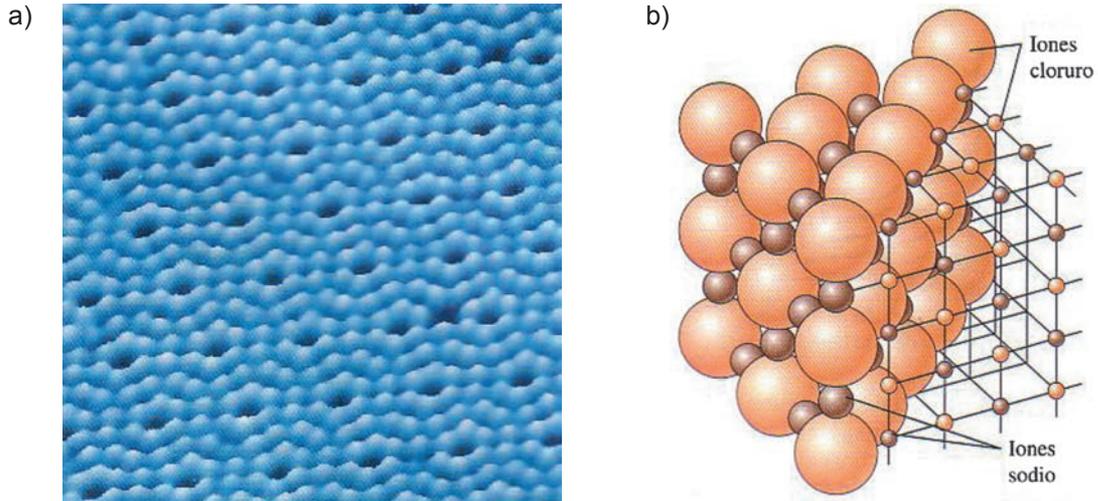


Fig. 1.10. Estructura interna de sólidos cristalinos. a) Imagen de la superficie de un cristal de silicio obtenida con un microscopio especial. Los átomos están organizados en una red de hexágonos. b) Esquema de la estructura cúbica de un cristal de cloruro de sodio (sal común). La parte izquierda ilustra la estructura real, la derecha solo pretende esclarecer la disposición ordenada de los iones cloro y sodio.



Las estructuras geométricas que forman los átomos o moléculas determinan no solo las características de los cristales, sino también otras propiedades. Un ejemplo notable de ello son el diamante y el grafito (Fig. 11). Ambos están constituidos por átomos de carbono y no obstante,

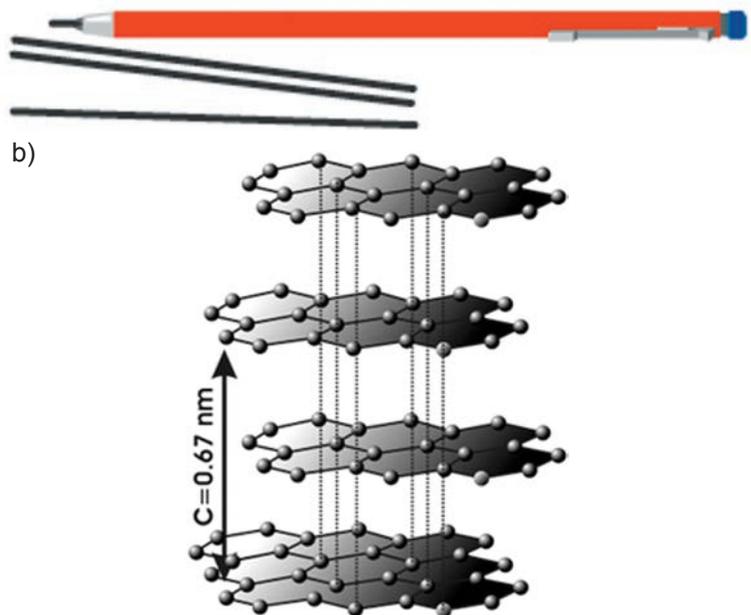
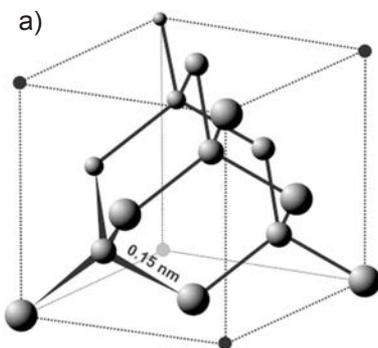
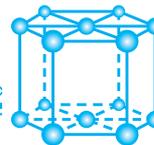


Fig. 1.11. Las notables diferencias entre las propiedades del diamante y el grafito se deben al modo en que están dispuestos y enlazados sus átomos. (a) Diamante y disposición de los átomos en él, (b) minas de grafito y disposición de los átomos en éste.





el diamante es una de las sustancias más duras que se conocen, mientras que el grafito es blando; el diamante no conduce la electricidad y el grafito sí. Esas notables diferencias entre el diamante y el grafito, aún estando constituidos por idénticos átomos, se deben a las diferencias en sus estructuras internas.

Tanto en el diamante como en el grafito, cada átomo de carbono está enlazado con otros cuatro, sin embargo, mientras que en el diamante las distancias entre los átomos y la fortaleza de sus enlaces son iguales, en el grafito no (Fig. 1.11b). En éste los átomos se distribuyen en capas, de tal modo que cada uno se enlaza fuertemente con otros tres de la misma capa, pero débilmente con un cuarto átomo situado en una capa vecina, a una distancia mucho mayor. Como resultado de esto, las capas quedan débilmente cohesionadas entre sí.

Si calentamos un cuerpo sólido elevando su temperatura, entonces la energía cinética de sus moléculas aumenta y, por tanto, también la amplitud de sus movimientos y la distancia promedio entre ellas. El cuerpo se dilata. A determinada temperatura (temperatura de fusión), el cuerpo comienza a pasar del estado sólido al líquido.

1.3.2. Líquidos

Las separaciones entre las moléculas en el estado líquido son similares que en el estado sólido, del orden de las dimensiones de las moléculas.

Aunque en los líquidos las moléculas también se agrupan en ciertas estructuras, en éstas intervienen solo unas cuantas moléculas. **En los líquidos no se forman las estrictas estructuras geométricas que se forman en los sólidos cristalinos.** Esto explica por qué, siendo las separaciones entre sus moléculas similares que en los sólidos, la cohesión entre sus porciones es mucho menor.

En el caso de muchos materiales orgánicos, el paso de sólido a líquido no tiene lugar de una vez, sino a través de una serie de transiciones en su estructura, proceso durante el cual es imposible decir si el material está en



Profundiza con ayuda de una Enciclopedia o Internet en las características de los cristales líquidos y sus aplicaciones.



estado sólido o líquido. Los materiales que se encuentran en tales estados intermedios son denominados **cristales líquidos**. Las moléculas de éstos poseen un ordenamiento intermedio entre el de los sólidos cristalinos y el de los líquidos. También tienen propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas características de los primeros y, al propio tiempo, propiedades mecánicas típicas de los segundos, como por ejemplo la de fluir.

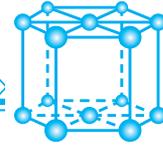
Debido a las diferencias de estructura interna entre los líquidos y sólidos, en los primeros las moléculas pueden trasladarse de un lugar a otro con mucha mayor facilidad que en los segundos. Por ejemplo, a temperatura ambiente las moléculas del agua líquida se mantienen oscilando en torno a determinada posición tan solo unos 10^{-11} s y después se desplazan a una nueva posición, proceso que se repite una y otra vez. El tiempo que dura una oscilación (su período) está entre 10^{-12} s y 10^{-13} s, por lo que antes de cada desplazamiento realizan decenas o centenares de oscilaciones. Con la elevación de la temperatura aumentan la energía cinética promedio de las moléculas y la frecuencia de sus oscilaciones, con lo cual disminuye el tiempo que permanecen oscilando alrededor de cierta posición.



Cómo promedio, ¿cuántas veces por segundo cambia la posición alrededor de la cual oscila una molécula de agua que se encuentra a temperatura ambiente?

Como ya hemos dicho, no todas las moléculas de un cuerpo poseen la misma energía cinética. Esto explica la evaporación de los líquidos: moléculas de su superficie con grandes energías cinéticas logran vencer las fuerzas de atracción de sus vecinas, “escapando” del líquido.

Las moléculas de los líquidos se encuentran unas tan juntas de las otras que al intentar comprimirlos aparecen intensas fuerzas de repulsión entre ellas. Esto permite comprender por qué es tan difícil variar su volumen, aunque sea en una ínfima cantidad.



Debido a la gran movilidad de sus moléculas, las porciones de los líquidos se desplazan fácilmente al actuar fuerzas externas sobre ellas, por pequeñas que éstas sean. Por eso las superficies de los líquidos contenidos en los recipientes no pueden estar inclinadas, siempre son horizontales, y en ellas tampoco puede haber montículos, son planas.

A medida que elevamos la temperatura del líquido, la energía cinética de sus moléculas aumenta y, a cierta temperatura (temperatura de ebullición), gran cantidad de moléculas comienza a vencer los enlaces entre ellas, iniciándose el rápido paso al estado gaseoso.

1.3.3. Gases

Las fuerzas de atracción entre las moléculas de los gases son sumamente pequeñas. A temperatura y presión normales, las separaciones entre ellas son, por término medio, más de 10 veces superiores que sus propias dimensiones (Fig. 1.12) y, por tanto, también más 10 veces mayores que sus separaciones en los sólidos y líquidos.

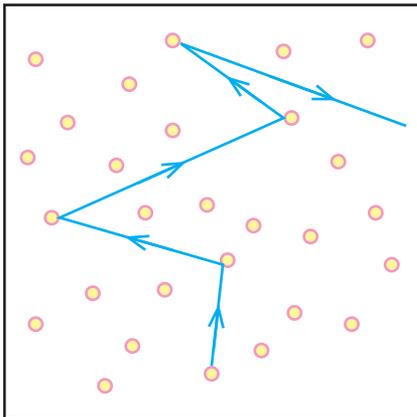


Fig. 1.12. A temperatura y presión normales, las separaciones entre las moléculas de los gases son, por término medio, más de 10 veces mayores que sus propias dimensiones.

Las moléculas de los gases chocan continuamente unas con otras de las más variadas formas, lo que da lugar a un movimiento totalmente desordenado. Entre un choque y otro el movimiento es prácticamente rectilíneo y uniforme y las distancias que por término medio recorren, denominada

Al mojar nuestra piel con alcohol sentimos que disminuye la temperatura. ¿Cómo se explica esto desde el punto de vista de la teoría cinético-molecular?





recorrido libre medio, son, a temperatura y presión normales más de 40 veces la separación media entre ellas, es decir, más de 400 veces sus dimensiones.

Considera que el tamaño de las moléculas de los gases del aire que nos rodea es del orden de 1 Å. Teniendo en cuenta la información del texto, ¿de qué orden de magnitud será la separación media entre ellas?, ¿y el recorrido libre medio?

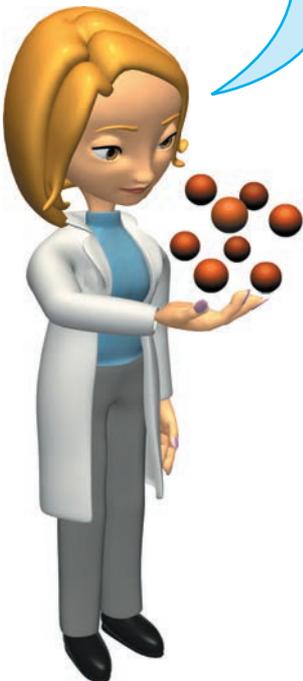
Esclarece por qué las velocidades de las moléculas del hidrógeno del aire circundante son, en promedio, mayores que las del oxígeno. ¿Cómo serán las velocidades de las moléculas del dióxido de carbono en comparación con las del oxígeno y el hidrógeno?

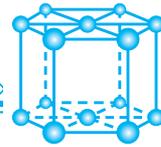


No todas las moléculas de una misma sustancia en estado gaseoso tienen igual energía cinética, ni se mueven con la misma velocidad, sus valores se distribuyen en un rango. Pero el valor promedio de esas velocidades puede sorprender a cualquiera. Por ejemplo, a temperatura ambiente la velocidad que en promedio poseen las moléculas de hidrógeno del aire que nos rodea es próxima a 1.6 km/s.

Las moléculas de otros gases que componen el aire poseen la misma energía cinética promedio que las del hidrógeno, pero como sus masas son mayores, se mueven con menores velocidades. Así, las velocidades de la mayoría de las moléculas de oxígeno son cercanas a 0.45 km /s, valor que de todos modos es muy grande.

Cuando en la segunda mitad del siglo XIX se calcularon por primera vez tales valores de velocidades para las moléculas de los gases, muchos científicos quedaron atónitos, e incluso pusieron en duda la ideas fundamentales de la teoría cinético-molecular de la materia. ¡Los valores obtenidos eran superiores a las velocidades de los proyectiles artilleros de aquella época!





Ejemplo 1.5. a) Compara la velocidad promedio de las moléculas del hidrógeno del aire que nos rodea con la de un avión que vuela a la velocidad de crucero (9×10^3 km/h). b) ¿Qué tiempo demoraría una molécula con tal velocidad en ir de Culiacán a la Ciudad de México si se moviera sin chocar?



a) La velocidad promedio de las moléculas de hidrógeno del aire que nos rodea es 1.6 km/s. Como una hora equivale a 3600 segundos, dicha velocidad expresada en km/h es:

$$v = 1.6 \frac{\text{km}}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 5.76 \times 10^3 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 5.8 \times 10^3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Esa velocidad es $\frac{5.8 \times 10^3 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{9 \times 10^2 \frac{\text{km}}{\text{h}}} = 6.4 \approx 6$ veces mayor que la velocidad de crucero del avión.

b) La distancia entre Culiacán y Ciudad de México es, aproximadamente, 1.0×10^3 km y el tiempo para recorrer dicha distancia:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{1.0 \times 10^3 \text{ km}}{5.8 \times 10^3 \frac{\text{km}}{\text{h}}} = 0.17 \text{ h} = 10 \text{ min}$$



Ejemplo 1.6. ¿De qué orden de magnitud es el número de choques por segundo que como promedio realiza una molécula de hidrógeno con el resto de las moléculas del aire que nos rodea?

El recorrido libre medio de las moléculas de aire a temperatura y presión normales es, como se dice en el texto, más de 400 veces las dimensiones de las moléculas. Si consideramos dichas dimensiones 3×10^{-10} m, entonces el recorrido libre medio es:

$$(3 \times 10^{-10} \text{ m})(400) = 1 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Puesto que entre un choque y otro las moléculas de los gases se mueven aproximadamente con movimiento rectilíneo y uniforme, la velocidad con que por término medio recorren dicha distancia es:

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

donde d es la distancia promedio que viajan entre un choque y otro, o sea el recorrido libre medio y t el tiempo promedio entre dos choques. Según el texto, la velocidad media de las moléculas del hidrógeno del aire que nos rodea es 1.6 km /s. Por consiguiente:

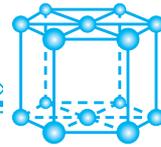
$$t = \frac{d}{v} = \frac{1 \times 10^{-7} \text{ m}}{1.6 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 6 \times 10^{-11} \text{ s} \approx 10^{-10} \text{ s}$$

El orden de magnitud del tiempo promedio entre un choque y otro es 10^{-10} s.

Y el orden de magnitud del número de choques promedio por segundo, es decir, de la frecuencia promedio de los choques:

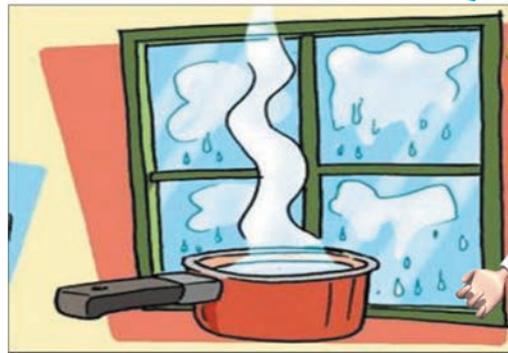
$$f = \frac{1}{t} = 10^{10} \frac{\text{choques}}{\text{s}}$$

Las características de la estructura interna de los gases permiten explicar una serie de propiedades. Así, la presión que ejercen sobre los cuerpos con los que entran en contacto se explica por los continuos choques de sus moléculas a enormes velocidades. Las diferentes densidades de los gases según la sustancia de que se trate, por las masas moleculares de dichas sustancias. La gran facilidad para ser comprimidos en comparación con los líquidos y sólidos, por las grandes separaciones entre sus moléculas. Esto



último también permite comprender por qué las densidades de los gases son tan pequeñas respecto a las de los líquidos y sólidos.

Teniendo en cuenta la estructura interna de los cuerpos, ¿qué otro procedimiento, además de la disminución de temperatura, pudiera emplearse para hacer pasar a los gases al estado líquido?



A igual temperatura, la densidad del oxígeno es unas 16 veces mayor que la del hidrógeno. ¿Cómo explicas esto?



Ejemplo 1.7. La densidad del agua líquida a 100 °C es 0.96 g/cm³ y, sin embargo, la del vapor de agua a esa misma temperatura tan solo 0.00060 g/cm³. ¿Cuántas veces mayor es la separación promedio de las moléculas en el vapor que en el agua líquida?

La densidad de un cuerpo es: $\rho = \frac{m}{V}$, de donde: $m = \rho V$

Por consiguiente, para una misma masa de agua en estado líquido y luego en estado gaseoso:

$\rho_L V_L = \rho_g V_g$, de donde el cociente entre sus volúmenes es:

$$\frac{V_g}{V_L} = \frac{\rho_L}{\rho_g} = \frac{0.96 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}{0.00060 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 1.6 \times 10^3$$





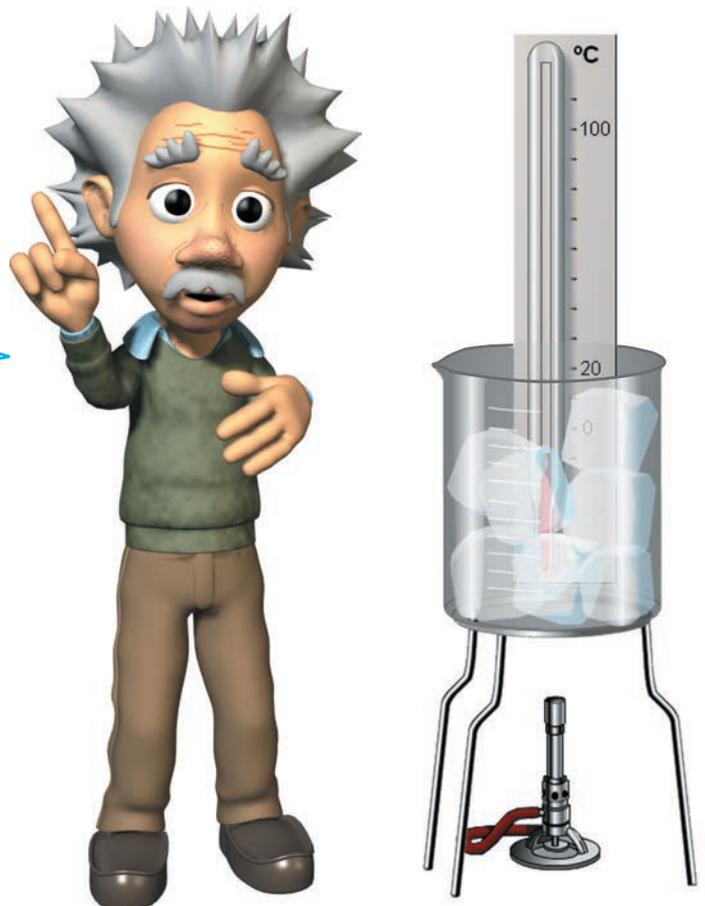
Si imaginamos los volúmenes del agua líquida y del vapor como cubos, entonces no es difícil entender que para tal aumento de volumen las dimensiones lineales del cubo (sus aristas) deben haber aumentado en:

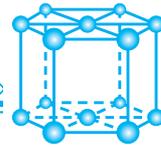
$$\sqrt[3]{1.6 \times 10^3} = 11.7$$

En consecuencia, la separación promedio de las moléculas es unas 12 veces mayor.

En este capítulo primeramente examinamos las ideas fundamentales de la teoría cinética molecular y luego las utilizamos para explicar propiedades esenciales de los sólidos, líquidos y gases, pero esto lo hemos hecho solo cualitativamente. En el cuarto capítulo emplearemos dichas ideas para dar una interpretación cuantitativa de la temperatura, la presión y otras características de los gases.

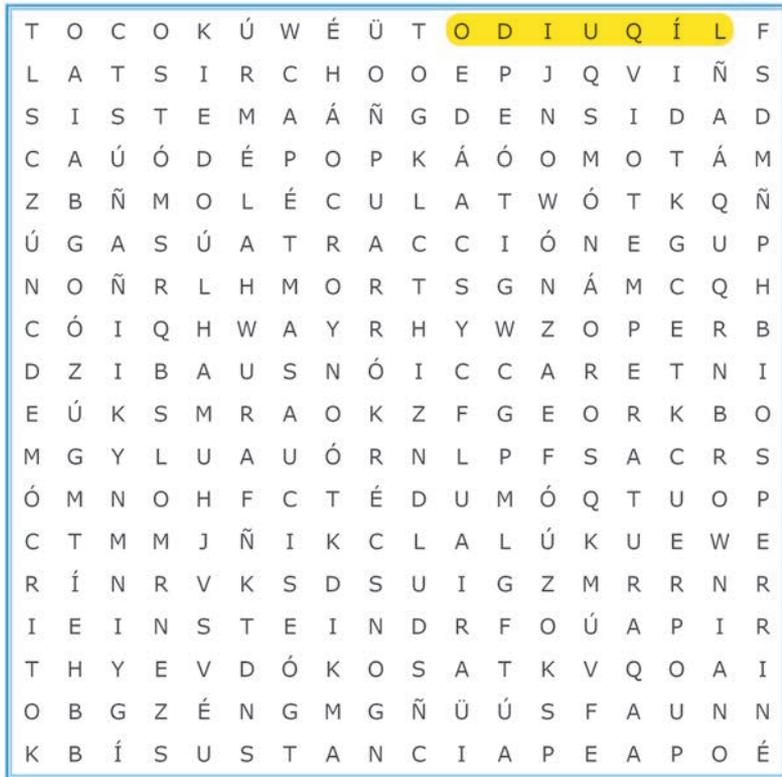
En la situación de esta figura, describe la relación que hay entre la temperatura y la estructura molecular del agua al prender el mechero, así como los cambios de estado que ocurren.





1.4. Actividades de sistematización y consolidación

1.4.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo



Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.



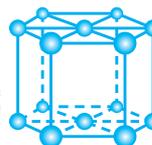
- | | |
|------------|-------------|
| Ángstrom | Gas |
| Átomo | Interacción |
| Atracción | Líquido |
| Avogadro | Masa |
| Browniano | Mol |
| Cambio | Molécula |
| Cristal | Perrin |
| Cuerpo | Repulsión |
| Demócrito | Sistema |
| Densidad | Sólido |
| Difusión | Sustancia |
| Einstein | Temperatura |
| Estructura | |



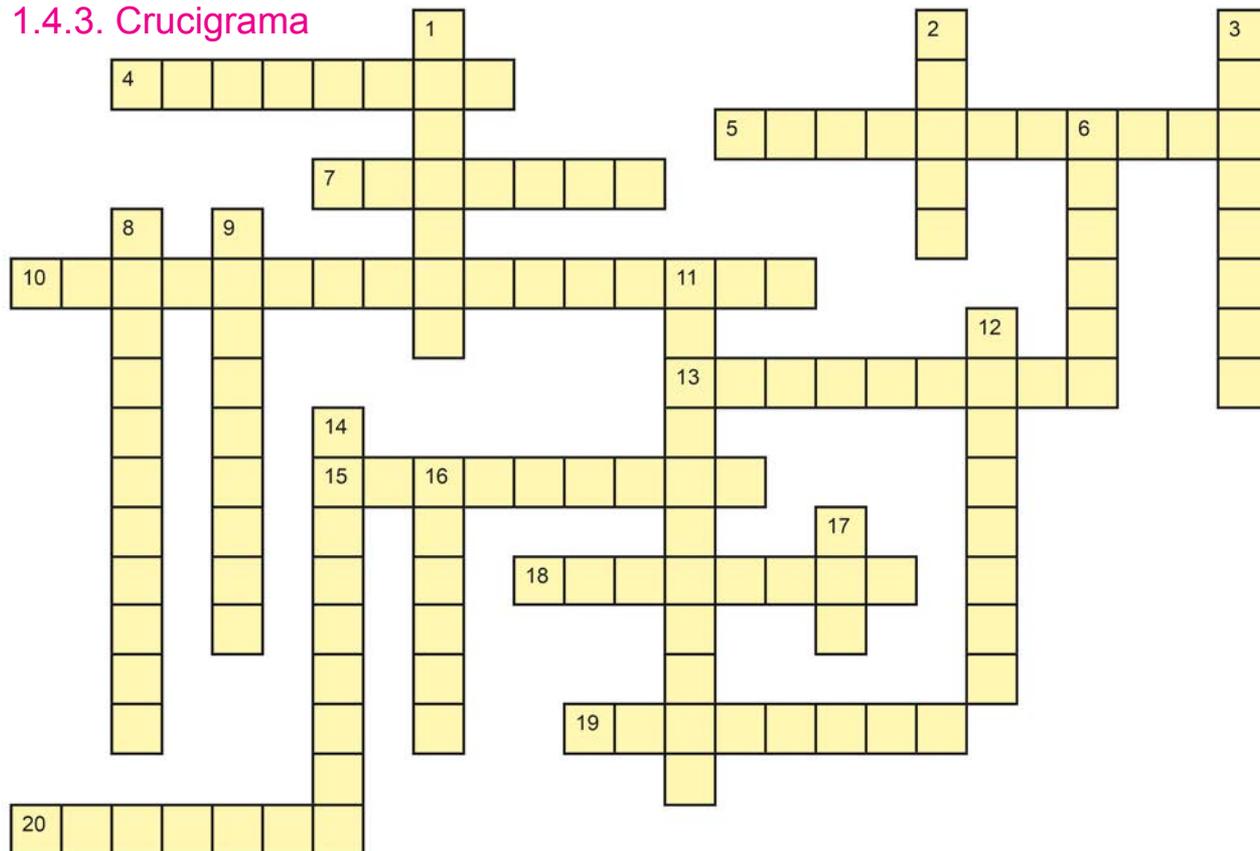


1.4.2. Conexión de conceptos e ideas

1. Período de la historia humana del cual proceden los útiles más antiguos conocidos. () 7 000 años a.n.e.
2. Época a la que pertenece la canoa más antigua que se conoce. () Cantidad de sustancia.
3. Época en que surgió la idea de que todo en el universo está constituido por pequeñísimas porciones, las cuales se denominaron átomos. () Choques constantes de las moléculas.
() Cristales líquidos.
4. Época en que se creó el primer plástico, el celuloide. () Edad de piedra.
5. Época a partir de la cual comenzaron a producirse materiales electrónicos. () Energía cinética de las moléculas.
6. Una de las ideas fundamentales de la ciencia. () Fuerzas de atracción entre las moléculas y energía cinética de ellas.
7. Una de las ideas básicas de la teoría cinético-molecular. () Fuerzas de atracción entre las moléculas.
8. Significado de la palabra "átomo". () Fuerzas de repulsión entre sus moléculas.
9. Característica de la estructura molecular de los sólidos que explica por qué conservan su volumen y forma. () Gran movilidad de sus moléculas.
10. Magnitud que caracteriza el número de moléculas que posee un cuerpo. () Grandes separaciones entre sus moléculas.
11. Cantidad de moléculas que hay en un mol de sustancia. () Interacción entre las moléculas.
12. Origen de las fuerzas de elasticidad y de rozamiento. () Las moléculas de los cuerpos están en permanente movimiento desordenado.
13. Origen del movimiento browniano de pequeñas partículas suspendidas en líquidos o gases. () Las propiedades y funciones de los sistemas están determinadas por la estructura ellos.
14. Magnitud estrechamente relacionada con la temperatura de los cuerpos. () Medios del siglo XIX.
15. Distancia que en promedio viajan las moléculas de los gases entre un choque y otro. () Medios del siglo XX.
16. Causa de la gran dificultad que existe para comprimir los líquidos. () No divisible.
17. Factores que determinan el estado de agregación en que se encuentra una sustancia. () Número de Avogadro.
18. Denominación de los materiales que se encuentran en un estado de agregación intermedio entre el sólido y el líquido. () Recorrido libre medio.
19. Característica de la estructura interna de los gases que permite comprender por qué tienen pequeñas densidades y pueden ser comprimidos fácilmente. () Siglos IV-V a.n.e.
20. Característica de la estructura interna de los líquidos que explica por qué adquieren la forma del recipiente que los contiene.



1.4.3. Crucigrama

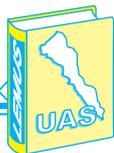


Horizontales

4. Nombre de científico utilizado para expresar el número de moléculas que hay en un mol.
5. Fenómeno en el cual las moléculas más veloces de la superficie de un líquido escapan de la atracción del resto.
7. Estado de agregación en que a temperatura y presión normales las separaciones entre las moléculas son, en promedio, más de diez veces superiores que sus propias dimensiones.
10. Naturaleza de las fuerzas de interacción entre las moléculas que forman los cuerpos.
13. Filósofo griego que desarrolló la idea de que todo está formado por pequeñísimas partículas, las cuales denominó átomos.
15. Tipo de fuerza que se manifiesta entre las moléculas cuando las distancias entre ellas son aproximadamente iguales a sus diámetros.
18. Unidad de longitud equivalente a 1×10^{-10} m y que es aproximadamente igual al diámetro de los átomos.
19. Menor porción de sustancia que conserva sus propiedades químicas.
20. Adjetivo utilizado para caracterizar el movimiento constante de las moléculas.

Verticales

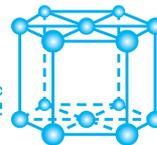
1. Cuerpo en el que sus moléculas se disponen según estructuras geométricas bien definidas.
2. Menor porción en la que puede ser dividido un elemento químico.
3. Científico que en 1905 elaboró la teoría del movimiento browniano.
6. Cierta cantidad de material confinada en el espacio.
8. Magnitud física estrechamente relacionada con la energía cinética de traslación de las moléculas.
9. Tipo de fuerza que se manifiesta entre las moléculas cuando las distancias entre ellas son 2-3 veces mayores que sus diámetros.
11. Significado de la palabra átomo.
12. Nombre que recibe el fenómeno de mezcla de dos sustancias entre sí, debido al movimiento molecular.
14. Nombre que recibe el movimiento de partículas suspendidas en líquidos o gases, debido a los continuos choques de las moléculas con ellas.
16. Científico que por primera vez realizó detalladas mediciones de los desplazamientos de las partículas brownianas.
17. Unidad de cantidad de sustancia en el Sistema Internacional de Unidades.



1.4.4. Actividades de repaso

1. Comenzando con el concepto “sistema”, confecciona un diagrama que conecte y ramifique conceptos e ideas como los siguientes: cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos; estructura y propiedades; separaciones, interacciones y movimiento de las moléculas.
2. A modo de síntesis del capítulo intenta responder, resumidamente, las preguntas clave planteadas al iniciarlo: ¿Cómo es la estructura interna de los cuerpos? ¿Qué relación tiene con sus propiedades? ¿En qué épocas surgieron y se desarrollaron las principales ideas acerca de la estructura de los cuerpos y cuáles fueron algunos de los pensadores que contribuyeron a ellas?
3. En tu opinión, ¿en cuáles de las preguntas clave anteriores sería de interés profundizar?
4. Expón e ilustra mediante ejemplos los conceptos de: a) sistema, b) cuerpo, c) átomo, d) molécula, e) movimiento browniano, f) difusión, g) sólido, h) líquido, i) gas, j) cristal, k) cristal líquido, h) evaporación.
5. ¿Cuántas moléculas hay en dos moles de agua?
6. La masa atómica del uranio es bastante mayor que la del oro (238 u y 197 u, respectivamente). Sin embargo, las densidades de estas sustancias son muy parecidas, incluso la del uranio es un poco menor. ¿Qué indica esto acerca de las separaciones promedio entre sus átomos? Argumenta.
7. La densidad del estaño sólido es 7.3 g/cm^3 , mientras que la del estaño líquido es 6.8 g/cm^3 . ¿Cómo se explica esto desde el punto de vista de la estructura interna?
8. Como sabes, el aire es una mezcla de gases. Intenta relacionar todos los factores que determinan su densidad.
9. ¿Cuando el agua hierve y pasa a vapor continúa siendo agua? Representa mediante un esquema las moléculas de agua con los átomos que la forman en los estados líquido y gaseoso.
10. La densidad del agua pura líquida a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ es 0.96 g/cm^3 y, sin embargo, la del vapor de agua a esa misma temperatura 0.00060 g/cm^3 . ¿Qué indica esto acerca de las separaciones entre sus moléculas?
11. ¿Por qué crees tú que a los sólidos, líquidos y gases, usualmente se les denomina “estados de agregación” de la sustancia?





12. ¿Por qué dos trozos de parafina no se adhieren entre sí, pero si se funden sus bordes, entonces pueden unirse fuertemente?
13. ¿Por qué la difusión transcurre con mucha mayor rapidez entre gases que entre líquidos? ¿Por qué con mucha mayor rapidez entre líquidos que entre sólidos?
14. ¿Cómo pudiera explicarse desde el punto de vista de la estructura interna, la dilatación de los cuerpos al calentarse?



15. ¿Cómo se explica desde el punto de vista de la estructura molecular el secado de la ropa mojada que se tiende al aire libre?

1.4.5. Ejercicios de repaso

1. El ancho de la foto de los átomos de silicio mostrada en la figura 1.10a corresponde en la realidad a 9.0×10^{-9} m. Estima el diámetro de un átomo de silicio en metro y en ángstrom.

Respuesta: 3×10^{-10} m, 3 Å

2. Considera que el diámetro de una molécula de agua es 3×10^{-8} cm y el de un granito de arena 0.3 mm. Si las moléculas de agua tuviesen el tamaño del granito, ¿cuál sería el diámetro de éste?

Respuesta: 3×10^2 m

3. Conociendo que el diámetro de la molécula de agua aproximadamente es 3×10^{-8} cm, estima el número de ellas en 1 cm^3 de agua.

Respuesta: $3.7 \times 10^{22} \approx 4 \times 10^{22}$ moléculas



4. Si durante la evaporación de 1 cm^3 de agua escaparan a la atmósfera un millón de millones de moléculas cada segundo, ¿qué tiempo demoraría en completarse la evaporación? Considera que el número de moléculas en 1 cm^3 de agua es 3.7×10^{22} moléculas.

Respuesta: 1×10^3 años

5. Estima la masa de una molécula de agua. Considera que el número de ellas en 1 cm^3 de agua es 3.7×10^{22} y la densidad del agua 1.0 g/cm^3 .

Respuesta: $3 \times 10^{-23} \text{ g}$

6. La densidad del dióxido de carbono a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es $1.84 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ y la del hidrógeno $8.37 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$. ¿Coincide el cociente de ellas con el de sus masas moleculares? ¿Qué significa esto acerca de las separaciones medias entre sus moléculas?

Respuesta: Sí

7. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad básica de cantidad de sustancia es el mol. Éste se define como aquella cantidad de sustancia que contiene el mismo número de moléculas que átomos en 12 g de carbono. Si la masa de un átomo de carbono es $2.0 \times 10^{-26} \text{ kg}$, ¿cuál es el número de moléculas equivalente a 1 mol (o sea el número de Avogadro)?

Respuesta: 6.0×10^{23}

8. Calcula la cantidad de sustancia que hay en un litro de agua. Considera que el número de moléculas de ella en 1 cm^3 es 3.7×10^{22} .

Respuesta: 62 moles

9. Por el orificio de una jeringa donde usualmente se coloca la aguja se introduce una gotita de agua a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. La jeringa se calienta y el agua pasa a vapor a $100 \text{ }^\circ\text{C}$. a) ¿Cuántas veces mayor será el volumen del vapor que el de la gotita? b) Si el volumen de la gotita es 8.0 mm^3 , ¿cuál es el del vapor? La densidad del agua a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ es 1.0 g/cm^3 y la del vapor a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, $6.0 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$.

Respuesta: a) 1.7×10^3 veces, b) 13 cm^3

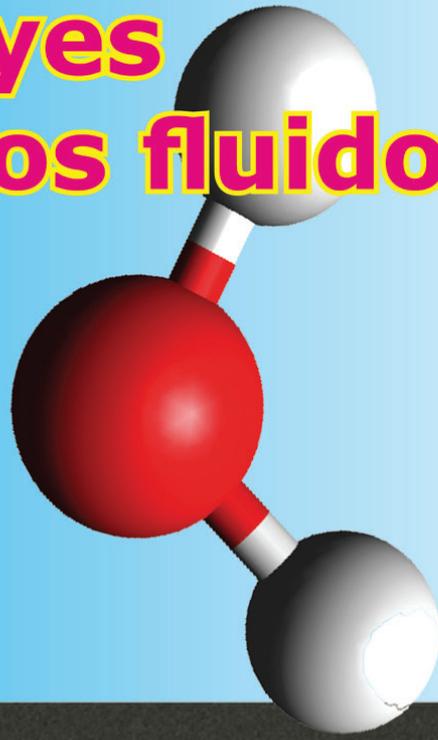
10. a) El volumen de la gotita de agua del problema anterior (8.0 mm^3) equivale al de un cubito de arista 2.0 mm . Argumenta esta afirmación, b) ¿Qué tamaño tiene la arista del cubo al que equivale dicho volumen transformado en vapor? c) ¿Cuántas veces mayor es la separación promedio de las moléculas en la gotita y en el vapor?

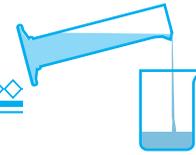
Respuesta: b) 2.4 cm , c) 12 veces mayor



2

Propiedades y leyes en los fluidos





2. Propiedades y leyes en los fluidos

En este curso estamos examinando los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos, que son **sistemas de partículas**. Ya en Mecánica consideramos un tipo particular de tales sistemas, los **cuerpos rígidos**, cuya característica distintiva es que **no se deforman**. Ahora iremos al extremo opuesto y estudiaremos los **fluidos**, los cuales son sistemas de partículas no solo que se deforman, sino que **la deformación constituye una de sus propiedades esenciales**.

Los fluidos desempeñan un importantísimo papel en nuestras vidas: los respiramos y bebemos, circulan por nuestro organismo, navegamos en ellos, utilizamos su energía cinética y potencial, así como otras muchas propiedades que poseen.

Describe ejemplos de tu vida diaria que ilustren la importancia de los fluidos.



Fig.2.1. Los fluidos desempeñan un importantísimo papel en nuestras vidas.



En la primera parte del capítulo examinaremos los fluidos en **reposo**, o tal vez sería mejor decir, prácticamente en reposo, pues al ejercer presión sobre ellos y transmitirse, tienen lugar pequeños desplazamientos entre sus porciones, aunque sea por muy breve tiempo. El estudio de los fluidos en reposo se denomina **Estática de los Fluidos** (a veces Hidrostática). En la segunda parte del capítulo consideraremos algunas nociones simples de la **Dinámica de los Fluidos** (a veces llamada Hidrodinámica), es decir del **movimiento de los fluidos**. La Estática y la Dinámica de los fluidos conforman una rama de la Física denominada **Mecánica de los Fluidos**.

Durante el estudio de los fluidos, tanto en reposo como en movimiento, utilizaremos conceptos y leyes de la Mecánica para obtener ciertas ecuaciones, y también tendremos en cuenta conocimientos introducidos en la unidad anterior acerca de la estructura interna de los cuerpos. Ello te permitirá comprender diversos hechos y fenómenos de la naturaleza, la vida diaria y la ingeniería.

Entre las cuestiones clave que analizaremos están las siguientes:

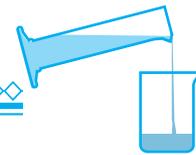
¿Cómo se explica la propiedad de fluir que poseen líquidos y gases? ¿Cómo se transmite la presión ejercida sobre un fluido? ¿Cuál es la dependencia entre la presión en un fluido en reposo y la profundidad? ¿Cómo depende la velocidad de un fluido del área de la sección transversal de la tubería por la que fluye? ¿Cómo se relacionan la presión y la velocidad en un fluido en movimiento?



Fig.2.2. La Mecánica de los Fluidos estudia a los fluidos en reposo (Estática de los Fluidos) y en movimiento (Dinámica de los Fluidos).

2.1. Fluidos en reposo

Antes de comenzar el estudio de los fluidos en reposo, examinaremos los conceptos de **fluido** y **presión**. Luego responderemos las tres primeras preguntas formuladas anteriormente.



2.1.2. Conceptos de fluido y presión.

2.1.2.1. Concepto de fluido

Se denominan fluidos a los líquidos y gases.

Como ya sabes, entre ellos existen notables diferencias, incluso en muchos aspectos los líquidos se parecen más a los sólidos que a los gases: las separaciones medias de las moléculas de líquidos y sólidos son similares y mucho menores que las de los gases; entre las porciones de líquidos y sólidos actúan fuerzas de cohesión, mientras que entre las de los gases no; los líquidos y los sólidos conservan el volumen, pero que los gases no.

Pese a las notables diferencias que hay entre líquidos y gases, ellos **tienen en común la propiedad de fluir**, que no poseen los sólidos. Los dos se adaptan a los contornos de los recipientes en que se colocan, sus partes se desplazan dejando lugar para los cuerpos que se sumergen en ellos, pueden moverse con facilidad a través de tuberías.

¿Cómo se explican estas características de líquidos y gases, es decir, la propiedad de fluir?

Contrariamente a los sólidos, **los líquidos y gases no soportan fuerzas que tiendan a desplazar unas porciones suyas en relación a otras.**

Entre sus porciones no surgen fuerzas de rozamiento estático, por eso, bajo la acción de una pequeña fuerza externa, por mínima que sea, se desplazan unas en relación a otras. Así, en la experiencia representada en la figura 2.3a, al tirar del cuerpo que flota en el agua, comenzará a moverse, por pequeña que sea la fuerza aplicada. Algo similar sucede con un globo ligero sujeto del extremo de un hilo (Figura 2.3b): al ejercer una fuerza lateral sobre él, iniciará su desplazamiento, por imperceptible que sea la fuerza. Desde el punto de vista microscópico la no aparición de rozamiento estático entre las porciones de los fluidos se explica, como ya señalamos en la unidad anterior para el caso de los líquidos, por la facilidad que tienen sus moléculas para desplazarse de un lugar a otro.

Ciertamente, en muchos aspectos los líquidos se parecen más a los sólidos que a los gases, ¡pero en lo que respecta a la propiedad de fluir, son muy parecidos a los gases!



Inmediatamente que los cuerpos comienzan a moverse en un fluido, aparece ya cierta fuerza de rozamiento, la cual aumenta al incrementarse la velocidad del cuerpo.

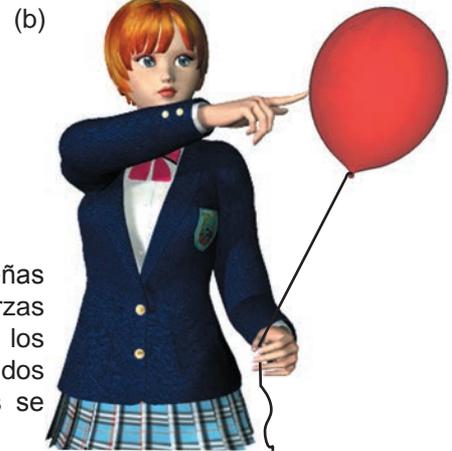
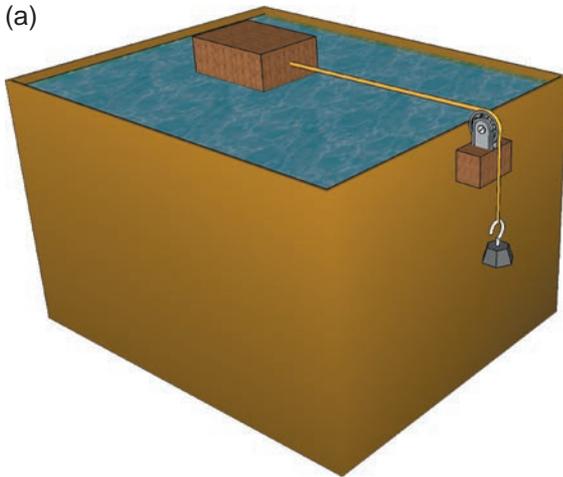


Fig. 2.3. Por pequeñas que sean las fuerzas aplicadas sobre los cuerpos sumergidos en un fluido, ellos se desplazan.

La ausencia de rozamiento estático entre las porciones de los fluidos explica por qué la superficie libre de un líquido siempre es horizontal lejos de la pared del recipiente. Un bloque puede mantenerse en reposo en un plano inclinado, gracias a que la componente de la fuerza de gravedad en la dirección del plano es compensada por la fuerza de rozamiento estático, pero como éste no surge entre las porciones de líquido, ninguna parte de su superficie libre puede estar inclinada (Fig. 2.4). Esto explica además por qué los líquidos se adaptan al contorno del recipiente.

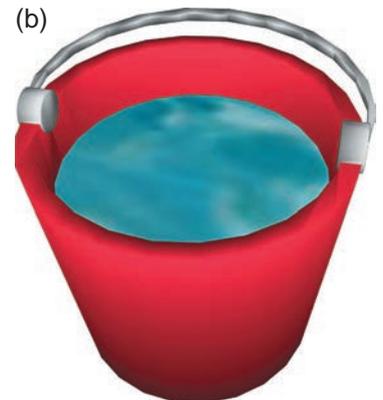
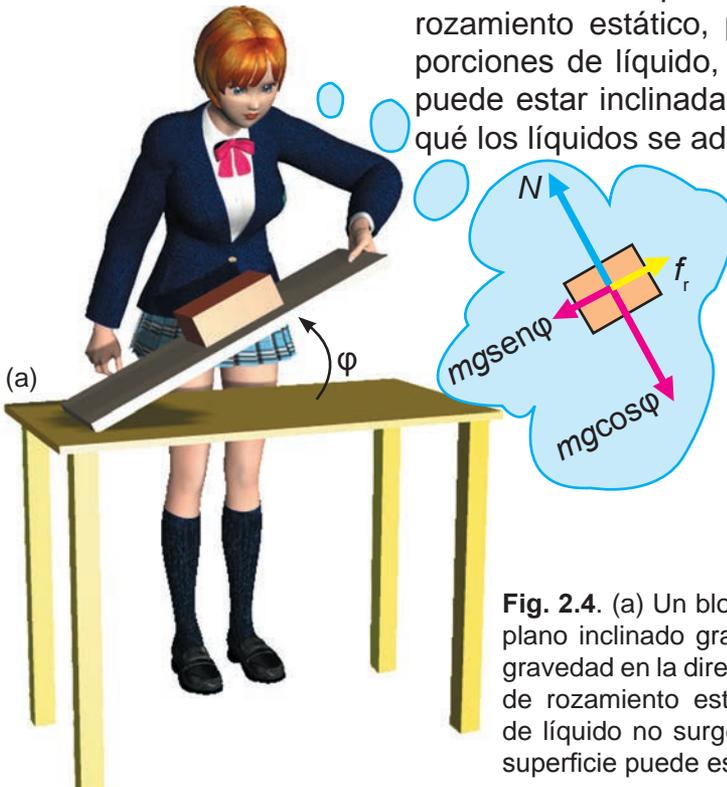
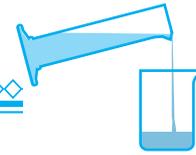


Fig. 2.4. (a) Un bloque puede mantenerse en reposo sobre un plano inclinado gracias a que la componente de la fuerza de gravedad en la dirección del plano es compensada por la fuerza de rozamiento estático. (b) Puesto que entre las porciones de líquido no surge rozamiento estático, ninguna parte de su superficie puede estar inclinada.



La ausencia de rozamiento estático entre las porciones de los fluidos también conduce a que las fuerzas ejercidas por ellos sobre los cuerpos con los que entran en contacto no tengan componente tangencial a las superficies de los cuerpos. En consecuencia:

Las fuerzas ejercidas por un fluido sobre los cuerpos con los que entran en contacto son siempre perpendiculares a las superficies de éstos en todos los puntos.

Argumenta por qué lejos de las paredes de los recipientes; aún cuando estos se inclinen, las superficies de los líquidos son siempre horizontales.



Fig.2.5. La fuerza ejercida por un fluido sobre la superficie de un cuerpo sumergido en él, y también sobre las paredes del recipiente que lo contiene, es perpendicular a la superficie de éstos en todos los puntos.

Algunos materiales muy viscosos, como por ejemplo el alquitrán o la resina de pino, demoran cierto tiempo en formar una superficie horizontal plana o adaptarse a la forma del recipiente en que se colocan, sin embargo, al final lo hacen, por lo que clasifican como fluidos. Aunque entre las porciones de tales fluidos tampoco surgen fuerzas de rozamiento estático, una vez que comienzan a deslizar unas respecto a otras, las fuerzas de rozamiento son mucho mayores que en los fluidos habituales, lo que hace que el proceso, hasta llegar a adquirir su forma definitiva, sea muy lento.

La fluidez de líquidos y gases se explica desde el punto de vista microscópico por la gran libertad que, a diferencia de los sólidos, tienen sus moléculas para desplazarse. Es cierto que en los líquidos se mueven con mucha menos libertad que en los gases, pero de todos modos, cada molécula se desplaza del punto alrededor del cual oscila a otro



una enorme cantidad de veces por segundo, como promedio unas 10^{11} veces. Cualquier porción de fluido, ya sea gas o líquido, consta así de gran cantidad de moléculas desplazándose constantemente de un lugar a otro de forma caótica. Cuando la porción está en reposo, el desplazamiento neto del conjunto de moléculas es nulo. Sin embargo, si sobre las moléculas actúa una fuerza externa, por ejemplo la de gravedad, al movimiento desordenado de cada una de ellas se añade una componente en dirección de la fuerza, dando por resultado el desplazamiento de la porción.

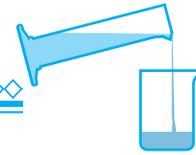
2.1.2.2. Concepto de presión.

Estamos acostumbrados a representar las fuerzas ejercidas sobre los cuerpos aplicadas en puntos únicos, sin embargo, en realidad ellas **siempre están distribuidas en alguna porción suya**. Por ejemplo, las fuerzas de rozamiento, tracción o empuje entre dos cuerpos están distribuidas en la superficie de contacto entre ellos (Fig. 2.6).

Ilustra mediante ejemplos concretos el hecho de que toda fuerza aplicada es una fuerza distribuida en determinada área.



Fig. 2.6. La fuerza con que la mano empuja la caja, la reacción normal del piso y la de rozamiento con él, están en realidad distribuidas a través de las superficies de contacto.



En los cuerpos auténticamente rígidos, considerar la fuerza aplicada en un solo punto generalmente no trae inconveniente, sin embargo, en los sólidos que no son totalmente rígidos, sino que se deforman (tierra, arena, madera, nieve, etc.) y en los fluidos, **es de gran importancia el área en que está distribuida la fuerza**. Mientras menor sea el área mayor será su efecto, y a la inversa.

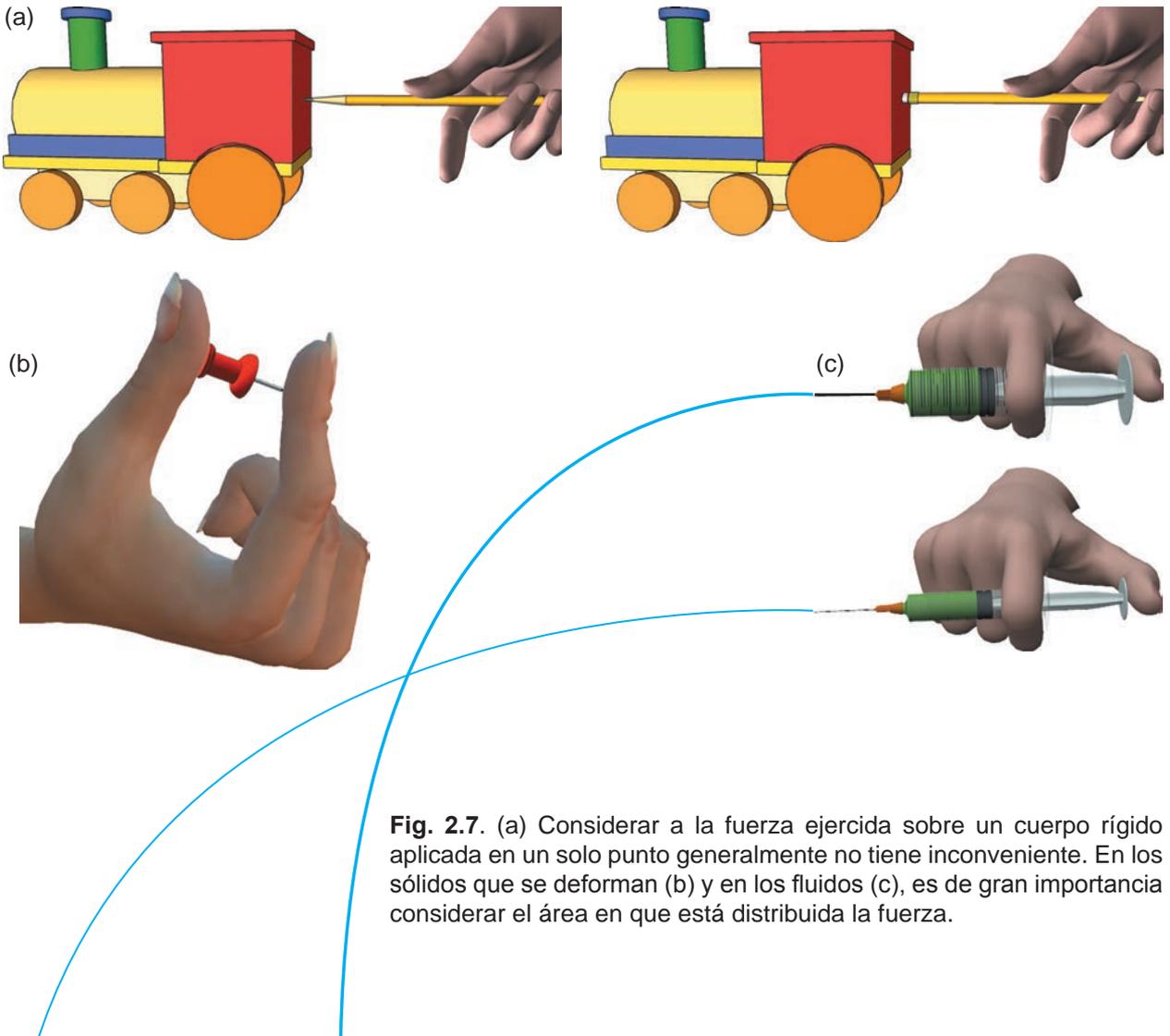


Fig. 2.7. (a) Considerar a la fuerza ejercida sobre un cuerpo rígido aplicada en un solo punto generalmente no tiene inconveniente. En los sólidos que se deforman (b) y en los fluidos (c), es de gran importancia considerar el área en que está distribuida la fuerza.



Anteriormente vimos que **la fuerza ejercida por los fluidos sobre los cuerpos con los que entran en contacto es perpendicular a la superficie de éstos** y ahora acabamos de ver que **su efecto depende del área en la que se distribuye**. Estos dos elementos se consideran en el concepto de **presión**:



Presión es la magnitud que caracteriza la **fuerza distribuida** sobre determinada superficie, **ejercida perpendicularmente** a ella. Cuanto mayor sea la fuerza y menor el área en que se distribuye mayor será la presión, y a la inversa. **Si la fuerza está uniformemente distribuida, entonces la presión se calcula como el cociente entre la fuerza y el área:**

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

Utiliza el concepto de presión para analizar las situaciones representadas en la figura 2.7.

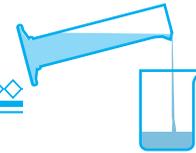
A diferencia de la fuerza, **la presión ejercida por los fluidos no es una magnitud vectorial, sino escalar**, ya que no posee dirección propia, siempre es perpendicular a la superficie con la que entra en contacto y ésta puede tener cualquier orientación.



Blaise Pascal (1623-1662). Eminente matemático y físico francés, entre cuyas contribuciones a la ciencia se encuentran la invención de la primera máquina mecánica de calcular, precursora de las calculadoras y computadoras, y la denominada ley de Pascal, de gran importancia en Mecánica de los Fluidos.

La unidad básica de presión es 1 N/m^2 , lo que corresponde a una fuerza de 1 N ejercida perpendicularmente y distribuida sobre una superficie de 1 m^2 . Dicha unidad se denomina **pascal (Pa)**, en honor a Blaise Pascal (1623-1662).

Una presión de 1 Pa es relativamente pequeña, algunos ejemplos te darán una idea de lo que representa: es aproximadamente igual a la producida por una hoja de papel corriente sobre la superficie horizontal en que está apoyada; la presión atmosférica normal a nivel del mar es $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, o sea, cien mil veces mayor, aunque comúnmente no nos percatamos de ello, pues vivimos permanentemente bajo su acción; en una goma de auto sin inflar la presión del aire es la atmosférica, pero al añadirle aire, la presión adicional es alrededor de $2 \times 10^5 \text{ Pa}$.



Si la presión de cierta hoja de papel A4 (624 cm² de área) sobre la superficie en que se apoya es 1 Pa, ¿cuál será la presión ejercida por un cuadradito de 1 cm de lado recortado de dicha hoja?



Los dispositivos empleados para medir la presión se denominan **manómetros**. Se han inventado manómetros basados en diversos principios físicos, pero uno de los más comunes es el manómetro de Bourdon (Fig. 2.8). Consta de una cinta metálica hueca enrollada en forma de espiral. Al aumentar la presión dentro de la cinta, tiende a estirarse, desviando una aguja indicadora unida a ella.

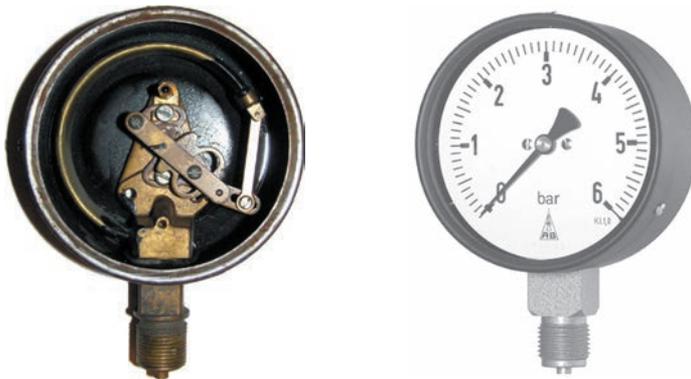
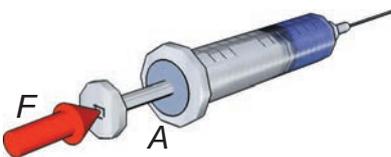


Fig. 2.8. Manómetro de Bourdon utilizado para medir la presión del gas de un balón. El aumento de presión en el interior de la cinta hueca en espiral, tiende a estirla, desviando la aguja indicadora unida a ella.

Ejemplo 2.1. Considera que en la experiencia de la figura 2.7c el diámetro del émbolo de la jeringuilla mayor es 1.24 cm y la fuerza aplicada sobre él 1.0 N, ¿cuál es la presión ejercida sobre el fluido?



La presión es $P = \frac{F}{A}$

donde F es la fuerza aplicada sobre el fluido y A el área en que se distribuye dicha fuerza, es decir, el área de la superficie de contacto entre el émbolo y el fluido.

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{1.24 \times 10^{-2} \text{ m}}{2} \right)^2 = 1.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Por tanto:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1.0 \text{ N}}{1.21 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 8.3 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 8.3 \times 10^3 \text{ Pa}$$



Fig. 2.9. La experiencia con la “esfera de Pascal” ilustra que la presión ejercida sobre líquidos y gases se transmite en todas direcciones.

2.1.3. Ley de Pascal

Ya sabes que el efecto producido por la fuerza aplicada sobre un fluido depende del área en que se distribuye, como por ejemplo en la situación representada en la figura 2.7c. Pero, *¿cómo se transmite la presión ejercida sobre él?*, *¿lo hace en la misma dirección que la fuerza aplicada?*

Analicemos una sencilla experiencia con una “esfera de Pascal”, dispositivo denominado así en honor a Blaise Pascal. El dispositivo consiste en un cilindro, uno de cuyos extremos termina en una esfera que tiene numerosos orificios (Fig. 2.9). Si lo llenamos con líquido o humo y ejercemos presión mediante un émbolo, de los orificios salen chorros en todas direcciones, y no sólo en aquella en que se ha aplicado la presión.

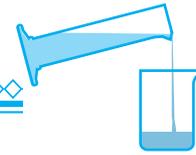
Describe algún hecho común que muestre que los líquidos transmiten la presión ejercida sobre ellos en diferentes direcciones.

Numerosas experiencias confirman que, a diferencia de los sólidos, los líquidos y gases **transmiten la presión ejercida sobre ellos en todas direcciones**, y no solo en la dirección que se aplica la fuerza.

Esta propiedad de líquidos y gases es ampliamente utilizada para transmitir presiones, y por tanto fuerzas, de unos lugares a otros a través de tubos y mangueras, como por ejemplo en los frenos de muchos medios de transporte, los martillos neumáticos, etc. Independientemente de la trayectoria que sigan los tubos y mangueras, la presión se transmite por medio de ellos a los lugares requeridos y en las direcciones deseadas.

Considera la salida de gas en una hornilla. ¿Estará presente la ley de Pascal en este fenómeno? Argumenta tu respuesta.





La propiedad de los líquidos de transmitir la presión en todas direcciones también es aprovechada para velar por nuestra salud. La presión sanguínea se ejerce no sólo en la dirección que circula la sangre en arterias y venas, sino además sobre las paredes de éstas. En este hecho se apoyan el conteo de las pulsaciones y la medición de la presión arterial.

Tal vez más sorprendente aún que la propiedad de los fluidos de transmitir la presión en todas direcciones, sea la capacidad que tienen para “amplificar” las fuerzas. Esto se pone de manifiesto en la situación representada en la figura 2.10. Mediante una pequeña fuerza ejercida sobre el émbolo de la jeringuilla menor, es posible obtener una fuerza mucho mayor en el émbolo de la jeringuilla mayor. Este asombroso resultado es consecuencia de que al aplicar fuerzas sobre los fluidos, lo que **transmiten íntegramente es la presión** y no la fuerza.



Fig. 2.10. Una pequeña fuerza aplicada sobre el émbolo de la jeringuilla menor da lugar a otra mayor en el émbolo de la jeringuilla mayor. Ello es consecuencia de que los fluidos lo que transmiten íntegramente es la presión y no la fuerza.

En la figura 2.11 se ha representado un experimento que ilustra, en el caso de los líquidos, la propiedad de transmitir íntegramente en todas direcciones la presión ejercida sobre ellos. Inicialmente el nivel del líquido es el mismo en el frasco y en los tubos de vidrio. Al insuflar aire a través de la manguera, aumenta la presión sobre la superficie del líquido y su nivel en los tubos se eleva. El hecho de que el líquido ascienda por igual en todos los tubos, independientemente del lugar en que se encuentren sus extremos y de la orientación que tengan, indica que la presión ejercida se transmite por igual en todas direcciones y a todos los puntos. En conclusión:



Fig. 2.11. La presión adicional ejercida sobre la superficie del líquido se transmite por igual en todas direcciones, lo cual ratifica la ley de Pascal.



Explica en detalle por qué la experiencia descrita en la figura 2.11 ratifica la ley de Pascal.



(a)



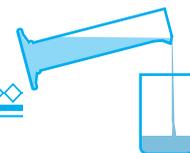
La presión ejercida sobre un fluido encerrado se transmite íntegramente en todas direcciones y a todos sus puntos. Dicha conclusión se denomina **Ley de Pascal**.

Desde el punto de vista microscópico la ley de Pascal puede ser interpretada del siguiente modo. Al ejercer presión sobre un fluido encerrado (Fig. 2.11), inicialmente disminuyen las separaciones de las moléculas en la zona que se ha aplicado la presión. Sin embargo, con gran rapidez (a la velocidad de propagación de las ondas mecánicas en el fluido) la separación promedio de las moléculas se iguala a través de todo su volumen, por lo que el aumento de presión resulta el mismo en todos los puntos.

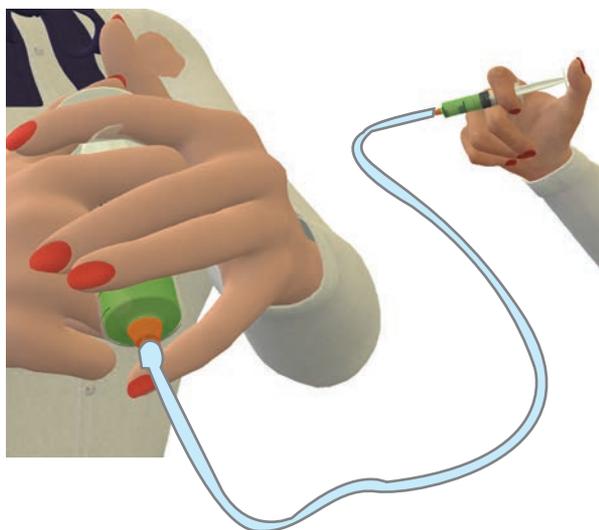
La ley de Pascal es aprovechada en mecanismos como el elevador hidráulico (Fig. 2.12a) y la prensa hidráulica (Fig. 2.12b). Con la prensa hidráulica es posible aplicar presiones que superan miles de veces la presión atmosférica. El principio físico de funcionamiento de estos mecanismos es el mismo que el del dispositivo mostrado en la figura 2.10.



Fig. 2.12. Dos importantes aplicaciones de la ley de Pascal: (a) el elevador hidráulico y (b) la prensa hidráulica, inventada en 1796.



Ejemplo 2.2. Supongamos que en la experiencia de la figura 2.10 el diámetro del émbolo de la jeringuilla mayor es 1.2 cm, el del menor 0.47 cm y la fuerza aplicada sobre éste último 1.0 N, ¿qué fuerza hay que ejercer sobre el émbolo mayor para que no se desplace? Desprecia el rozamiento en los émbolos.



La presión ejercida sobre el líquido por el émbolo menor es:

$$P_1 = \frac{F_1}{A_1}$$

Según la ley de Pascal, esa presión se transmite por igual a todas las partes del líquido. Por consiguiente, la presión P_2 ejercida sobre el émbolo mayor tendrá ese mismo valor, es decir:

$P_2 = P_1$, de donde:

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1}$$

De aquí que la fuerza ejercida por el líquido sobre el émbolo mayor es:

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 = \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} F_1 = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 F_1, \text{ donde } d_1 \text{ y } d_2 \text{ son los diámetros de los émbolos.}$$

Sustituyendo los datos en la ecuación anterior:

$$F_2 = \left(\frac{1.2 \text{ cm}}{0.47 \text{ cm}} \right)^2 (1.0 \text{ N}) = 6.5 \text{ N}$$

Ésa es la fuerza del líquido sobre el émbolo mayor. La que hay que ejercer sobre él para que no se desplace es numéricamente igual y de sentido contrario.



Ejemplo 2.3. En cierta planta de servicio de autos el mecanismo para elevarlos (Fig. 2.12a) utiliza un gran émbolo, de radio 15 cm, y otro menor, de radio 5.0 cm. a) ¿Qué presión debe transmitirse al pistón mayor para poder elevar un auto cuya masa es alrededor de 1 500 kg ? b) ¿Qué fuerza se requiere ejercer para ello sobre el pistón menor?

a) La presión que el líquido debe ejercer sobre el pistón mayor para elevar el auto es:

$$P_2 = \frac{F_2}{A_2} = \frac{mg}{A_2} = \frac{mg}{\pi r_2^2}, \text{ donde } m \text{ es la masa del auto.}$$

Por tanto:

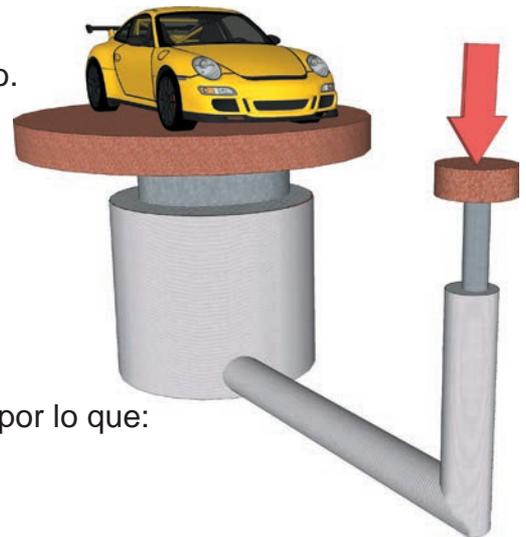
$$P_2 = \frac{mg}{\pi r_2^2} = \frac{(1500 \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right)}{\pi (15 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 2.1 \times 10^5 \text{ Pa}$$

b) Esa presión es transmitida por el pistón menor, por lo que:

$$\frac{F_1}{A_1} = 2.1 \times 10^5 \text{ Pa, de donde:}$$

$$F_1 = (2.1 \times 10^5 \text{ Pa}) A_1 = (2.1 \times 10^5 \text{ Pa}) (\pi r_1^2) = (2.1 \times 10^5 \text{ Pa}) (\pi (5 \times 10^{-2} \text{ m})^2)$$

$$F_1 = 1.6 \times 10^3 \text{ N} = 1.6 \text{ kN}$$



¿Has percibido alguna vez el aumento de la presión ejercida por un líquido con la profundidad? ¿Y la disminución de la presión atmosférica con la altura? Describe tu experiencia sobre esto.

2.1.4. Distribución de la presión en líquidos y gases

Por experiencia propia sabemos que la presión ejercida por un líquido sobre un cuerpo sumergido en él aumenta con la profundidad. Es posible que también hayas percibido alguna vez la disminución de la presión atmosférica con la altura. A continuación obtenemos la ecuación de dependencia de la presión de un líquido con la profundidad.

Consideremos un vaso de precipitado con líquido, e imaginemos una porción cilíndrica del líquido como la representada en la figura 2.13. Sean A - el área de la sección transversal de la porción cilíndrica, y - la profundidad a que se encuentra su cara inferior, P_0 - la presión atmosférica ejercida sobre su cara superior y P - la ejercida por el resto del líquido sobre la cara inferior. La fuerza sobre la cara superior es P_0A y sobre la inferior PA . Puesto que la porción cilíndrica está en reposo, la suma de todas las fuerzas ejercidas sobre ella es cero. Eligiendo el sentido positivo hacia abajo se tiene:

$$mg + P_0A - PA = 0$$

Podemos considerar que la densidad de los líquidos no depende de la profundidad, por lo que la masa de la porción representada es:

$m = \rho V = \rho Ay$, donde ρ es la densidad del líquido y V el volumen de la porción.

Sustituyendo esa expresión en la ecuación inicial:

$$\rho Ayg + P_0A - PA = 0$$

Dividiendo la ecuación entre A y reagrupando los términos queda:

$$P = P_0 + \rho yg$$

En esta ecuación P_0 es la presión ejercida por la atmósfera y ρgy la debida al propio líquido. La presión total a la profundidad y es la suma de ambas.



Fig. 2.13. Puesto que la porción de líquido delimitada está en reposo, la suma de las fuerzas ejercidas sobre ella es cero.



¿Por qué al deducir la ecuación $p = p_0 + \rho gy$ a partir de la situación de la figura 2.13 no se tuvo en cuenta la presión ejercida sobre la pared lateral de la porción cilíndrica?



Detalla de qué factores depende la presión ejercida sobre un cuerpo sumergido en un líquido.



Los fondos de los recipientes de la figura tienen igual área, pero el peso del agua en cada uno de ellos es diferente. ¿Serán iguales o diferentes las fuerzas ejercidas por el agua sobre los fondos? Argumenta.

Ejemplo 2.4. a) Compara la presión que ejerce el agua sobre una persona sumergida a 10 m de profundidad con la presión atmosférica en la superficie de la Tierra. b) ¿Cuál es la presión total que se ejerce sobre la persona?

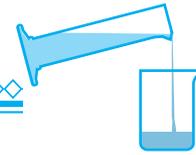
La presión debida al agua que la persona tiene encima es: $p = \rho gy$

Sustituyendo los valores:

$$P = \left(1.0 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}}\right) (10 \text{ m}) = 9.8 \times 10^4 \text{ Pa} \approx 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Como la presión atmosférica cerca de la superficie de la Tierra es $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, esto significa que la presión ejercida por los 10 m de agua sobre la persona es aproximadamente igual a la presión atmosférica, o sea, una atmósfera.

b) La presión total sobre la persona es la suma de las ejercidas por la atmósfera y por el agua, o sea, alrededor de 2 atmósferas, o $2 \times 10^5 \text{ Pa}$.



En el experimento de la figura 2.11 se utilizó la elevación del nivel del líquido como indicador de la presión aplicada sobre él. Ahora podemos incluso calcular dicha presión. Inicialmente es la atmosférica, pero al insuflar aire (Fig. 2.11), el nivel del líquido en los tubos asciende hasta que la presión debida a la columna líquida en ellos equilibra a la ejercida al insuflar aire. Esto significa que cuando el nivel de líquido en los tubos asciende una altura h la presión aplicada es $p = \rho gh$. Puesto que el dispositivo de la figura 2.11 puede ser utilizado para medir presiones, constituye un **manómetro**, de líquido.

Si en el experimento de la figura 2.11 el agua se elevó en los tubos 8.0 cm, ¿cuál era la presión ejercida al insuflar aire por la manguera?

Especial interés para los seres humanos tiene la medición de la presión arterial (tensión arterial). Esto se hace mediante manómetros de aguja, de líquido, o electrónicos. En la figura 2.14 se muestra un **esfigmomanómetro** (o esfigmómetro) que utiliza un manómetro de mercurio. La presión se mide en “milímetros de mercurio” leyendo la altura a que se eleva éste en el manómetro. Al rodear el antebrazo con el brazalete e insuflar aire (Fig. 2.14), aumenta la presión ejercida sobre cierta arteria, interrumpiendo la circulación de la sangre. A continuación se deja salir aire del brazalete poco a poco. Cuando mediante el estetoscopio comienzan a detectarse las pulsaciones, se lee en el manómetro la presión sistólica (“máxima”) y al dejar de escucharse, se lee la presión diastólica (“mínima”). La presión arterial se considera normal cuando la presión sistólica es de 120 milímetros de mercurio y la diastólica de 80 milímetros.



Fig. 2.14. Esfigmomanómetro de mercurio: (1) brazalete, (2) pera para insuflar aire, (3) manómetro de mercurio con escala graduada en milímetros.





¿Por qué en los manómetros de líquido suele utilizarse mercurio y no agua?



Con ayuda de una enciclopedia o de Internet profundiza en la presión arterial y el proceso de su medición.

Ejemplo 2.5. Si en un esfigmomanómetro del tipo de la figura 2.14 se utilizara agua en lugar de mercurio, ¿qué altura debería tener el tubo del manómetro para poder medir una presión arterial de 220 mm de mercurio? La densidad del mercurio es 13.6 g/cm^3 .

Una presión de 220 mm de mercurio corresponde a esa elevación del nivel del mercurio en el manómetro. Por consiguiente, la presión ejercida en ese caso es:

$P = \rho_m g h_m$, donde ρ_m es la densidad del mercurio y h_m la altura a que se eleva en el manómetro.

Si en lugar de mercurio se utilizara agua, como la densidad de ésta es mucho menor ($\rho_a = 1.0 \text{ g/cm}^3$), para igual presión la elevación h_a de su nivel en el manómetro sería mucho mayor. En ecuaciones:

$$\rho_m g h_m = \rho_a g h_a$$

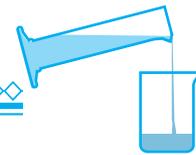
Dividiendo la ecuación entre g :

$$\rho_m h_m = \rho_a h_a$$

Por tanto:

$$h_a = \frac{\rho_m h_m}{\rho_a} = \frac{\left(13.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)(22 \text{ cm})}{1.0 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 3.0 \times 10^3 \text{ cm} = 3.0 \text{ m}$$

De modo que si en el manómetro del esfigmómetro se utilizara agua en lugar de mercurio, su tubo tendría que tener al menos 3.0 m de altura. ¡Semejante esfigmómetro sería bastante difícil de manipular!



En el análisis de varias situaciones ya hemos tenido en cuenta la presión de la atmósfera ejercida cerca de la superficie de la Tierra, pero ¿cómo explicar la existencia de ella?

Como conoces, la atmósfera consiste en una capa de aire de decenas de kilómetros de espesor que rodea a la Tierra. Por consiguiente, todos los cuerpos cerca de la superficie de ésta, incluidos nosotros mismos, están sumergidos en la atmósfera. Y de modo similar que en los líquidos, mientras mayor sea la profundidad a la que se encuentra un cuerpo en la atmósfera (es decir, mientras más cerca esté de la superficie de la Tierra), mayor será la presión y, por el contrario, mientras más alejado esté, menor.

Aunque comúnmente no pensamos en la presión atmosférica, ella es la que hace posibles numerosos hechos que observamos en la vida diaria (Fig. 2.15): la adhesión de ventosas, el funcionamiento de una jeringuilla, la utilización de una pajilla para beber líquido, el empleo del sifón, el uso de bebederos de aves, y muchos más.



Fig. 2.15. Algunos hechos que son posibles gracias a la acción de la presión atmosférica: (a) adhesión de ventosas, (b) funcionamiento de una jeringuilla, (c) utilización de una pajilla para beber, (d) empleo del sifón, (e) uso del bebedero de aves.

Como prueba irrefutable de la presión ejercida por la atmósfera, en 1654 Otto Guericke, mediante una bomba neumática (equipo utilizado para extraer o comprimir aire), extrajo aire de la cavidad formada por dos hemisferios huecos de bronce unidos entre sí. Ocho pares de caballos no pudieron separar los hemisferios (Fig. 2.16). No obstante, cuando se dejó entrar el aire, se desunieron libremente. Este experimento evidencia que la presión atmosférica y la fuerza que ella ocasiona, son relativamente grandes.

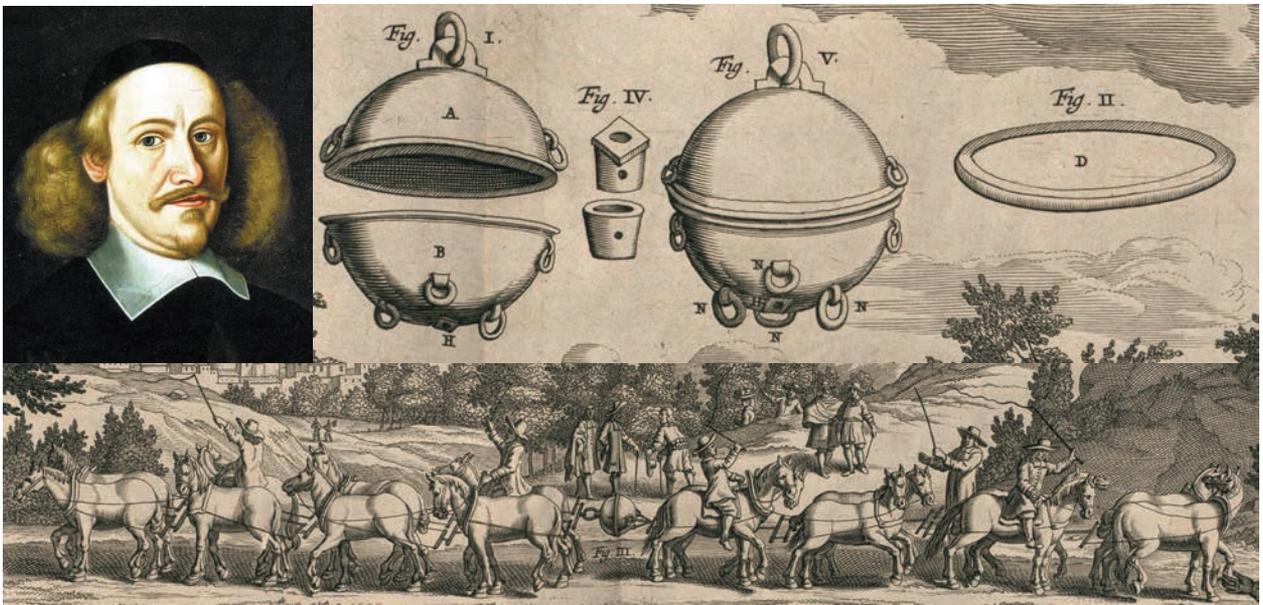
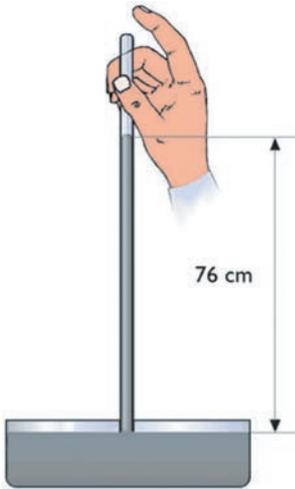
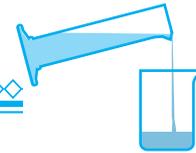


Fig. 2.16. Experimento realizado en Magdeburgo por Otto Guericke. Después de extraer el aire de la cavidad formada por los hemisferios, ocho pares de caballos no pudieron separarlos.

¿Te atreverías a estimar la fuerza total sobre nuestro cuerpo debida a la presión atmosférica? En la persona adulta, la piel cubre un área de unos 2 m^2 .



En 1643 Evangelista Torricelli (1608-1647) inventó el primer instrumento para medir la presión atmosférica, el **barómetro de mercurio**. Éste consiste en un tubo largo, de alrededor de un metro de longitud, cerrado por un extremo. El tubo se llena de mercurio y, luego de tapar con un dedo su extremo abierto, se introduce en una vasija que también contiene mercurio (Fig. 2.17). Al nivel del mar y en condiciones normales de presión, la superficie del mercurio en el tubo queda 760 mm por encima de su nivel en la vasija. Si la presión atmosférica disminuye, el nivel del mercurio en el tubo desciende y si aumenta, asciende.



¿Cómo interviene la ley de Pascal en el funcionamiento del barómetro de mercurio?

Indaga en una enciclopedia o Internet acerca de algún otro tipo de barómetro diferente al de mercurio.



Fig. 2.17. Esquema de un barómetro de mercurio. La altura del mercurio en el tubo varía según varía la presión atmosférica.

Ejemplo 2.6. Una ventosa de 2.0 cm de diámetro se presiona contra una pared lisa, quedando adherida a ella. a) ¿Qué fuerza es necesario ejercer para separarla de la pared? b) ¿Cuál es la masa de un cuerpo sobre el que se ejerce una fuerza de gravedad de ese valor? Considera que entre la ventosa y la pared no queda aire alguno.

a) La fuerza que mantiene a la ventosa adherida a la pared se debe a la presión atmosférica.

Puesto que $P = \frac{F}{A}$, se tiene: $F = PA$

En el caso que analizamos, P es la presión atmosférica, A el área de la ventosa y F la fuerza que la mantiene adherida a la pared. La fuerza necesaria para separarla es numéricamente igual a la que la mantiene adherida a la pared, o sea:

$$F = PA = P\pi r^2 = P\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2, \text{ donde } d \text{ es el diámetro de la ventosa.}$$

Por consiguiente:

$$F = (1.0 \times 10^5 \text{ Pa})\pi \left(\frac{2.0 \times 10^{-2} \text{ m}}{2}\right)^2 = 31 \text{ N}$$





- b) Como sabes, la fuerza de gravedad que actúa sobre un cuerpo de masa m es $F_g = mg$. Por consiguiente la masa de un cuerpo sobre el que se ejerce una fuerza de gravedad de 31 N es:

$$m = \frac{F_g}{g} = \frac{31 \text{ N}}{9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}}} = 3.2 \text{ kg}$$

De este modo, la fuerza que se necesita para separar la ventosa es considerable, numéricamente igual a la requerida para sostener un cuerpo de 3.2 kg.



A diferencia de los líquidos, en los cuales la densidad ρ puede considerarse la misma a diferentes profundidades, la densidad de la atmósfera varía, disminuye a medida que aumenta la altura sobre la superficie de Tierra. Esto hace que la ecuación de dependencia de la presión con la altura no sea tan simple como en el caso de los líquidos, ni tan fácil de deducir. Nos limitaremos, pues, a mostrar el gráfico de dicha dependencia (Fig. 2.18).

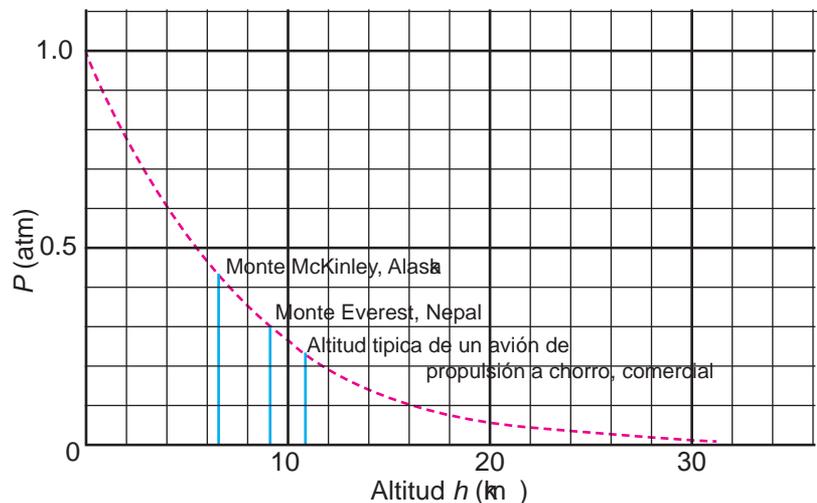
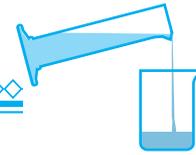


Fig. 2.18. El decrecimiento de la presión atmosférica con la altura sobre la superficie de la Tierra es aproximadamente exponencial.

Utilizando el gráfico de la figura 2.18 determina, aproximadamente, la presión atmosférica en: a) el Monte Everest, b) la altura a que vuelan los aviones de propulsión a chorro, c) Ciudad de México.

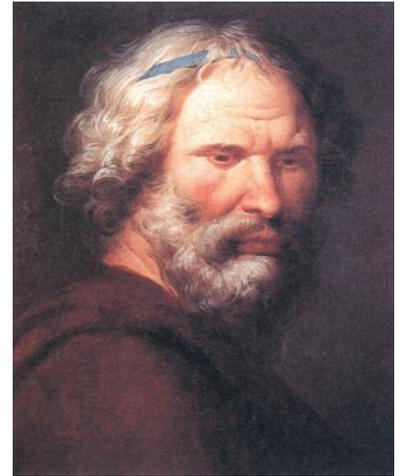


2.1.5. Ley de Arquímedes.

Todos sabemos que para hundir en agua una pelota de playa o un bloque de “frigolit” se requiere esfuerzo, y que es más fácil sostener en nuestros brazos a una persona dentro del agua que fuera de ella. Tales hechos indican que los líquidos empujan hacia la superficie con cierta fuerza a los cuerpos que se sumergen en ellos. Esta fuerza se conoce como **fuerza de empuje**, o de Arquímedes, pues fue este sabio de la antigua Grecia el primero en estudiar los factores de que dependía en el caso de los líquidos, hace más de 2 200 años.

¿Cuál es el origen de la fuerza de empuje de los fluidos sobre los cuerpos sumergidos en ellos?

Como conoces, **la presión en el interior de un fluido aumenta con la profundidad**. Por tanto, sobre un cuerpo sumergido en él será mayor cerca de su porción inferior que cerca de la superior (Fig. 2.19). El resultado es una fuerza dirigida de abajo hacia arriba que actúa sobre el cuerpo: la **fuerza de empuje**. En el caso del cuerpo de la figura 2.19, la diferencia de presión entre su cara inferior y su cara superior es ρgh , donde ρ es la densidad del fluido. Como la densidad de los gases es mucho menor que la de los líquidos, esta diferencia de presión, y en consecuencia la fuerza de empuje, es mucho menor cuando el fluido es un gas.



Arquímedes (Siracusa, Sicilia, 287 - 212 a.c.). Entre otros aportes a la ciencia, estableció la ley de la palanca y la denominada “Ley de Arquímedes” acerca de la fuerza de empuje ejercida por los fluidos.

La densidad del aire es unas 800 veces menor que la del agua. ¿Cuántas veces mayor es la fuerza de empuje sobre un mismo cuerpo sumergido en agua que sumergido en aire?

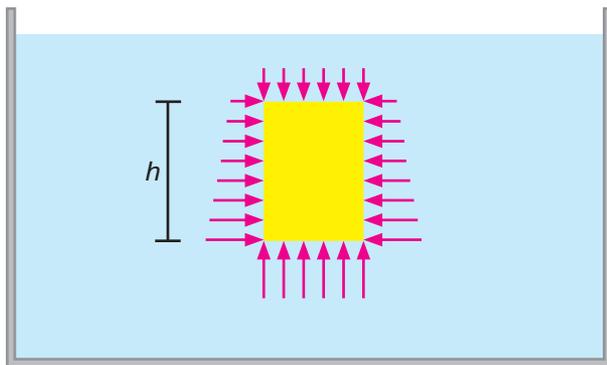


Fig. 2.19. La presión sobre un cuerpo en un fluido es mayor cerca de su porción inferior que de la superior. Esto es lo que determina la fuerza de empuje.





Argumenta por qué el experimento de la figura 2.20 confirma que el aire que nos rodea ejerce una fuerza de empuje sobre los cuerpos sumergidos en él.



Pese a su pequeñez, la fuerza de empuje que ejercen los gases puede hacerse evidente mediante un sencillo experimento. En una pequeña balanza se equilibra un cuerpo ligero, digamos de “frigorit” (Fig. 2.20), y luego el conjunto se coloca debajo de una campana de vacío. Al extraer aire de la campana, la balanza se desequilibra y al dejarlo entrar, vuelve a equilibrarse.

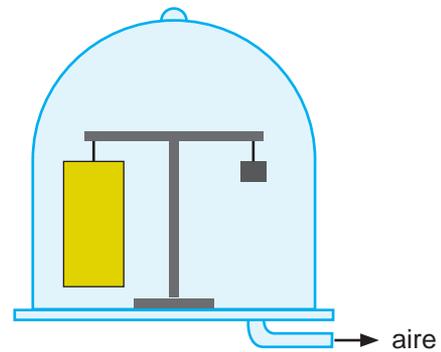


Fig. 2.20. Debajo de una campana de vacío se coloca una pequeña balanza en la que se ha equilibrado un cuerpo ligero. Al extraer aire de la campana, la balanza se desequilibra.

Pero, ¿cómo determinar la fuerza de empuje? Un simple razonamiento nos permite obtener una ecuación para ello.

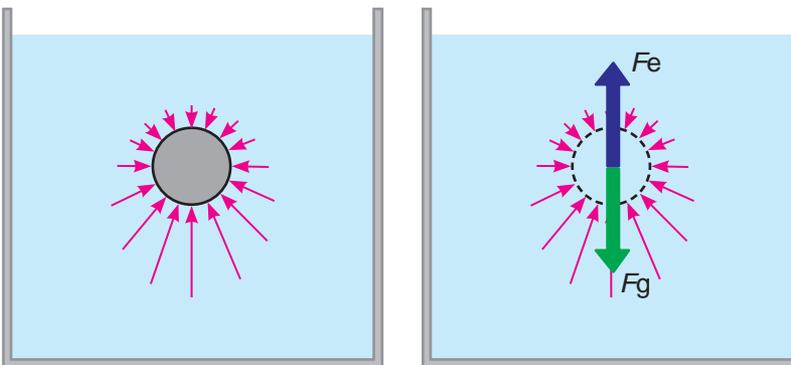
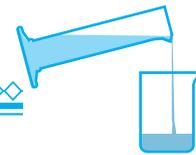


Fig. 2.21. (a) La fuerza de empuje que actúa sobre un cuerpo sumergido en un fluido es el resultado de la acción del fluido que lo rodea. (b) Ella es igual a la ejercida sobre la porción de fluido antes de ser desplazada por el cuerpo, de ahí que: $F_e = F_g$.

Cuando un cuerpo se introduce en un fluido, desaloja cierta porción de éste, ocupando su lugar (Fig. 2.21a). La fuerza de empuje sobre el cuerpo es el resultado de la acción del fluido que lo rodea. Por eso, es igual a la ejercida sobre la porción de fluido antes de ser desplazada por el cuerpo (Fig. 2.21b). Pero como la porción estaba en equilibrio, dicha fuerza es numéricamente igual y de sentido contrario a la fuerza de gravedad que actúa sobre ella:



$$F_e = F_g = mg$$

donde m es la masa de fluido antes de ser desplazada por el cuerpo (Fig. 2.21b).

Pero $m = \rho V$, donde ρ es la densidad del fluido y V el volumen desalojado por el cuerpo que, por supuesto, coincide con el de su parte sumergida.

De ahí que la fuerza de empuje, tanto sobre la porción de líquido antes de ser desalojada como sobre el cuerpo, es:

$$F_e = \rho Vg$$

Cuando utilices esta ecuación debes prestar especial atención a que ρ es la densidad del fluido, no la del cuerpo.

El resultado anterior constituye la **ley de Arquímedes**, que en palabras puede formularse del modo siguiente:

La fuerza de empuje ejercida sobre un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido es numéricamente igual al peso de la porción de fluido desplazada por el cuerpo.

Es posible comprobar la ley de Arquímedes en el caso de los líquidos mediante un sencillo experimento (Fig. 2.22), el cual analizamos en el ejemplo siguiente. Al sumergir el cuerpo que cuelga del dinamómetro en el líquido, su peso disminuye (Figura 2.22). La fuerza de empuje del líquido F_e viene dada por la diferencia entre el peso del cuerpo antes y después de sumergirlo. Por su parte, el peso w del volumen de líquido desplazado puede determinarse a partir de dicho volumen y la densidad del líquido: $w = \rho Vg$. En el experimento se encuentra que, en efecto, $F_e = w$.

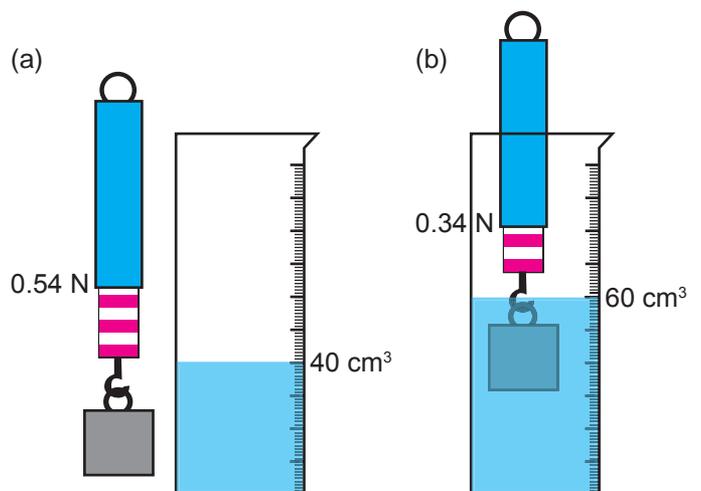


Fig. 2.22. (a) La fuerza de empuje ejercida por el líquido es igual a la diferencia entre el peso del cuerpo antes y después de sumergirlo. (b) Midiendo el volumen de líquido desplazado por el cuerpo, se comprueba que el resultado anterior coincide con el peso del líquido desplazado.





Ejemplo 2.7. Utiliza los datos del experimento representado en la figura 2.22 para verificar el cumplimiento de la ley de Arquímedes. Considera que el líquido de la probeta es agua.

Primeramente determinamos la fuerza de empuje:

$$F_e = 0.54 \text{ N} - 0.34 \text{ N} = 0.20 \text{ N}$$

Ahora determinemos el peso de agua desplazada:

el volumen de agua desplazada es:

$$V = 60 \text{ cm}^3 - 40 \text{ cm}^3 = 20 \text{ cm}^3 = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

De donde la masa de agua desplazada es $m = \rho_a V$, y su peso:

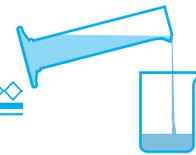
$$w = mg = \rho_a Vg = \left(1.0 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(20 \times 10^{-6} \text{ m}^3\right) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}}\right) = 0.20 \text{ N}$$

Observa que el valor obtenido para la fuerza de empuje F_e coincide con el del peso w de la porción de agua desplazada por el cuerpo.

¿Cómo se explica que un pequeño clavo se hunda en agua, mientras que un barco de gran tonelaje flote en ella?
¿Por qué una lata de refresco vacía flota en agua pero al aplastarla se hunde?

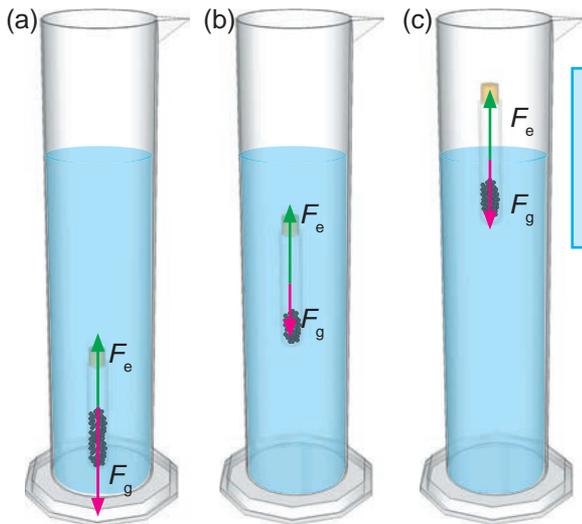


Fig. 2.23. (a) Un pequeño clavo se hunde en agua, mientras que un gran barco flota en ella. (b) Una lata de refresco vacía flota en agua pero aplastada se hunde.



Que un cuerpo se hunda, ascienda o flote en un líquido, depende de la relación entre las fuerzas de empuje y de gravedad que actúan sobre él. Si la fuerza de empuje es menor que la de gravedad, el cuerpo se hunde (Fig. 2.24a), si es mayor asciende (Fig. 2.24b) y si es igual flota (Fig. 2.24c).

Luego de analizar por qué un cuerpo flota o se hunde (Fig 2.24), ¿puedes ya explicar las situaciones aparentemente contradictorias de la figura 2.23?



Indaga en una enciclopedia o en Internet acerca de cómo los submarinos pueden descender y ascender en el agua.



Fig. 2.24. Que el tubo de ensayos se hunda, ascienda o flote en el agua de la probeta depende de la relación entre las fuerzas de empuje y gravedad: (a) $F_e < F_g$, (b) $F_e > F_g$, (c) $F_e = F_g$.

En los gases, en particular en el aire que nos rodea, los cuerpos también pueden hundirse, ascender o flotar. Los cuerpos habituales se “hunden” en el aire, ya que en estos casos la fuerza de empuje es mucho menor que la de gravedad. Pero por ejemplo, para globos llenos de hidrógeno o helio la fuerza de gravedad es menor que la de empuje, y ascienden. Diariamente en el planeta se sueltan miles de tales globos equipados con instrumentos, a fin de obtener datos de la atmósfera sobre presión, temperatura, humedad y la velocidad del viento.

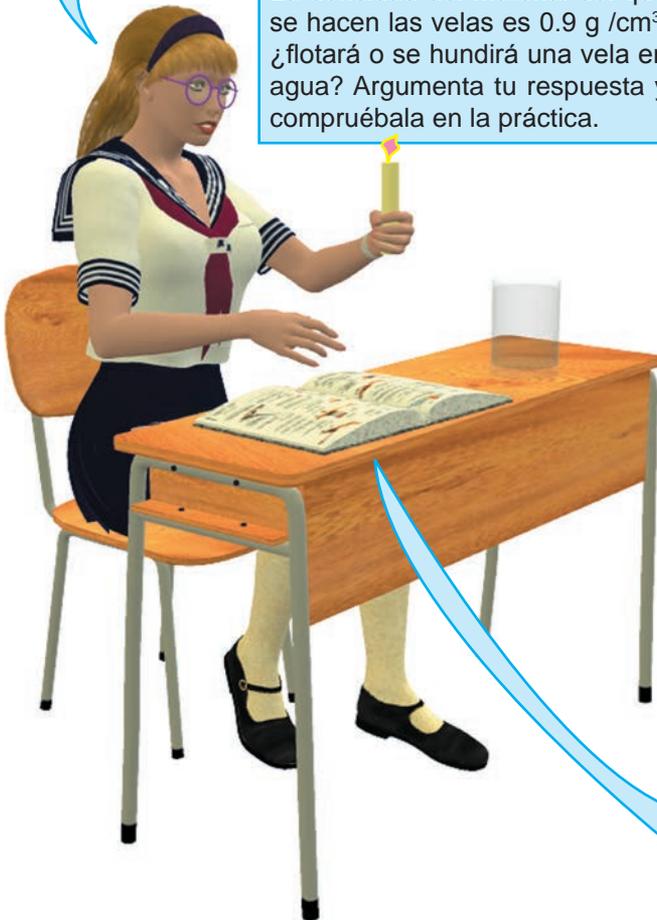
Indaga en una enciclopedia o en Internet, sobre los globos que se envían a la atmósfera.

Ciertos globos de investigación de la atmósfera ascienden hasta cierta altura y quedan flotando. ¿Cómo se explica esto?





La densidad del material del que se hacen las velas es 0.9 g/cm^3 , ¿flotará o se hundirá una vela en agua? Argumenta tu respuesta y compruébala en la práctica.



Comparando la densidad de un cuerpo con la del fluido en que se coloca es posible conocer de antemano si el cuerpo se hundirá en él o ascenderá. Esto se hace evidente del siguiente razonamiento.

La fuerza de gravedad sobre el cuerpo es $F_g = \rho_c Vg$, y la de empuje cuando está totalmente sumergido $F_e = \rho_f Vg$. Como V y g son los mismos en ambas ecuaciones, esto significa que si la densidad del cuerpo es mayor que la del fluido, es decir si $\rho_c > \rho_f$, entonces $F_g > F_e$ y el cuerpo se hunde. Y por el contrario, si $\rho_c < \rho_f$, entonces $F_g < F_e$ y el cuerpo asciende en el fluido y flota. En otras palabras, **si la densidad de un cuerpo es mayor que la del fluido en que se coloca, se hunde y si es menor, asciende y flota.**

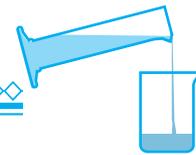
¿Dónde flota más fácilmente una persona, en agua de mar o dulce? Explica por qué.

2.2. Fluidos en movimiento.

En esta segunda parte del capítulo examinaremos el **movimiento de los fluidos**. El movimiento de líquidos y gases por tuberías es muy común: en la industria, la vida diaria y en los organismos de los animales y seres humanos, incluso los cauces de los ríos representan especies de tuberías. Pero no solo es de interés el flujo de ellos por tuberías, sino también, simplemente el movimiento relativo entre los fluidos y los cuerpos que se encuentran en ellos. Así, por ejemplo, el paso de aire a gran velocidad sobre techos ligeros provoca el levantamiento de éstos durante los huracanes, y el movimiento relativo entre el aire y las alas de los aviones origina una fuerza ascensional.



Menciona ejemplos concretos de movimiento de fluidos en los seres humanos.



Lo anterior muestra la importancia que tiene el estudio del movimiento de los fluidos. Sin embargo dicho movimiento puede ser muy complejo, lo que hace que el estudio profundo de la **Dinámica de los Fluidos** presente notables dificultades. Por eso nosotros nos limitaremos a estudiar solo algunas nociones muy elementales de esta rama de la Física.

En el siguiente apartado precisamos el tipo de movimiento de los fluidos que tendremos en cuenta y luego, en los otros apartados, examinaremos las dos últimas cuestiones planteadas al inicio del capítulo: *¿cómo depende la velocidad de un fluido del área de la sección transversal de la tubería por la que fluye?*, *¿cómo se relacionan la presión y la velocidad en un fluido en movimiento?*

2.2.1. Tipos de movimiento de los fluidos.

Para percatarse de lo complejo que puede ser el movimiento de los fluidos, basta observar el agua en los “rápidos” de algunos ríos (Fig. 2.25a), o el humo de un cigarrillo al alejarse de éste (Fig. 2.25b). El flujo de tales fluidos se denomina **turbulento**.



Fig. 2.25. El movimiento de los fluidos puede ser irregular, turbulento, como por ejemplo, en los “rápidos” de algunos ríos (a) o el humo de un cigarrillo al alejarse de él (b).

Nosotros solo consideraremos flujos de líquidos y gases, **regulares** y **estables**, cuyas características no cambian con el tiempo. Más aún, el movimiento de los fluidos será tan simple que **sus porciones solo se trasladan, no rotan**. En estos casos las porciones describen trayectorias bien definidas, llamadas **líneas de corriente** y el flujo se



Fig. 2.26. Flujo laminar de aire durante una prueba de las características aerodinámicas de un automóvil.

denomina **laminar**, porque parece formar capas o láminas. En la foto de la figura 2.26 se visualiza mediante humo el flujo laminar del aire durante una prueba de las características aerodinámicas de un automóvil. El flujo del humo del cigarrillo de la figura 2.25b puede considerarse laminar cerca de él, aunque luego se torna turbulento.

Otra suposición que haremos al examinar a los fluidos en movimiento es que **la densidad de ellos es la misma en todos los puntos**, lo cual significa que en una parte del flujo no están más comprimidos que en otra. Esto es correcto para flujos de líquidos, pero no siempre para flujos de gases, sin embargo, existen muchos casos en que también puede aceptarse tal suposición.

Por último, generalmente despreciaremos la fuerza de rozamiento al examinar el movimiento relativo entre un cuerpo y un fluido, aunque al explicar ciertos fenómenos nos veremos obligados a tomarla en cuenta.

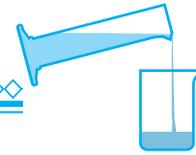


Resume las características del tipo de movimiento de fluidos que examinaremos.

2.2.2. Ecuación de continuidad.

¿Cómo depende la velocidad de un fluido del área de la sección transversal de la tubería por la que fluye?

Consideremos un líquido o gas que fluye de izquierda a derecha por una tubería como la esquematizada en la figura 2.27, de sección transversal variable. Si en el intervalo de tiempo Δt un volumen ΔV_1 de fluido atraviesa la sección de área A_1 , entonces en ese mismo



intervalo un volumen igual de fluido debe atravesar la sección de área A_2 . Si no fuese así y, digamos, por la primera sección pasara un volumen mayor de fluido que por la segunda, entonces éste debería ir acumulándose entre las secciones. Pero recuerda que estamos considerando flujos simples, entre cuyas propiedades están la de no modificar sus características a través del tiempo y la de no estar más comprimidos en una parte que en otra.

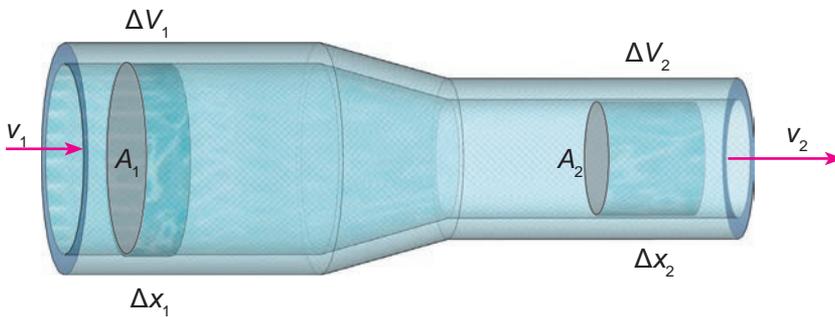


Fig. 2.27. El volumen de fluido que pasa en determinado intervalo de tiempo por la sección de área A_1 es igual al que pasa por la sección de área A_2 . Ello implica que en la parte de la tubería con menor sección transversal su velocidad es mayor.

¿Cómo puede entonces el fluido atravesar la sección menor en el mismo tiempo que la mayor? Obviamente, aumentando su velocidad. Mientras menor sea el área de la sección transversal, mayor será su velocidad.

¡Ah, ahora comprendo porqué en los lugares donde los ríos se estrechan la velocidad de la corriente es mayor!

Sí, y también por qué el chorro de agua que sale de un grifo (llave) se estrecha a medida que cae.





Encontremos cuál es la ecuación que relaciona la velocidad del fluido con el área de la sección transversal de la tubería por la que fluye.

En la figura 2.27, el volumen de fluido que pasa por la sección de área A_1 en el intervalo de tiempo Δt es:

$$\Delta V_1 = A_1 \Delta x_1 = A_1 v_1 \Delta t$$

Por su parte, el volumen de fluido que en ese mismo intervalo atraviesa la sección de área A_2 es:

$$\Delta V_2 = A_2 \Delta x_2 = A_2 v_2 \Delta t$$

Y puesto que $\Delta V_1 = \Delta V_2$, se tiene:

$$A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t$$

Dividiendo esta ecuación entre Δt queda:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Esta ecuación corresponde al caso en que el área de la sección transversal de la tubería tiene solo dos valores, A_1 y A_2 (Fig. 2.27), sin embargo, ella puede generalizarse a una tubería cuya sección varía arbitrariamente:

$$Av = \text{constante}$$

donde A es el área de una sección cualquiera de la tubería y v la velocidad del fluido al atravesar dicha sección.

Comúnmente cualquiera de las dos ecuaciones anteriores se conoce como **ecuación de continuidad para un fluido incompresible**.

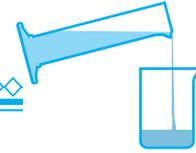
El volumen de fluido $\Delta V = Av\Delta t$ que atraviesa la sección de una tubería en cierto intervalo de tiempo Δt se denomina **flujo de volumen**. De aquí que la magnitud:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta t} = Av$$

representa la **rapidez del flujo de volumen**, a veces también denominada **flujo de volumen, gasto, o consumo**.



Indaga en un diccionario acerca de la palabra "gasto".



La ecuación de continuidad puede expresarse en palabras diciendo que **la rapidez del flujo de volumen en una tubería es la misma a lo largo de toda ella, independientemente de su sección transversal.**

Ejemplo 2.8. Un estudiante tiene curiosidad por conocer la velocidad con que sale el agua de cierto grifo. Mide el tiempo que demora en llenarse un recipiente de 1.0 L y encuentra que es 10 s. También determina que el diámetro interior de la salida del grifo es 1.5 cm. ¿Cómo a partir de tales datos puede hallar la velocidad del agua?



La rapidez del flujo de volumen, o gasto, de agua es:

$$R = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1.0 \text{ L}}{10 \text{ s}} = \frac{1.0 \times 10^3 \text{ cm}^3}{10 \text{ s}} = 1.0 \times 10^2 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

El área de la sección transversal de la salida del grifo:

$$A = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{1.5 \text{ cm}}{2} \right)^2 = 1.77 \text{ cm}^2$$

Y como $R = Av$, se tiene:

$$v = \frac{R}{A} = \frac{1.0 \times 10^2 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}}{1.77 \text{ cm}^2} = 57 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 0.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$





Ejemplo 2.9. El estudiante del ejemplo anterior quiere comprobar si efectivamente funciona lo estudiado en el curso de Física y decide calcular la velocidad del agua a cierta distancia debajo de la salida del grifo a partir del resultado anterior, pero empleando dos procedimientos diferentes, a) las ecuaciones de la cinemática y b) la ecuación de continuidad, para después comparar los resultados. Si el estudiante determinó que el diámetro del chorro 5.0 cm debajo de la salida del grifo era 1.2 cm, ¿qué resultados obtuvo? Considera que el grifo termina en una porción vertical.

a) Suponiendo que el agua desciende con aceleración g , su velocidad 5.0 cm debajo del grifo puede calcularse mediante la ecuación:

$$v^2 = v_0^2 + 2g\Delta y$$

De aquí que:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2g\Delta y} = \sqrt{\left(0.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 + 2\left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)(0.050 \text{ m})} = 1.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) Según la ecuación de continuidad, si A_1 es el área de la sección transversal del chorro a la salida y A_2 la de su sección a cierta distancia debajo de ella, entonces:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

De donde:

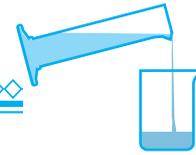
$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{\pi r_1^2}{\pi r_2^2} v_1 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 v_1 = \left(\frac{1.5 \text{ cm}}{1.1 \text{ cm}}\right)^2 \left(0.57 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 1.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

De este modo, el valor obtenido utilizando la ecuación de la cinemática es el mismo, hasta la segunda cifra significativa, que el hallado mediante la ecuación de continuidad.

2.2.3. Ecuación de Bernoulli. Aplicaciones.

¿Cómo se relacionan la presión y la velocidad en un fluido en movimiento?

Obviamente, para que en la situación de la figura 2.27 el fluido incremente su velocidad al pasar de la parte izquierda de la tubería a la derecha, la presión en esta segunda parte debe ser menor que en la primera. Esto supone que **donde la velocidad del fluido es mayor la presión es menor, y a la inversa**. Tal vez esta conclusión te parezca contradictoria, pero algunos hechos simples pueden convencerte de ella.



Uno de esos hechos es bien conocido de la vida cotidiana. Cuando se tapa con un dedo parte de la salida de una manguera, el agua comienza a salir a gran velocidad (Fig. 2.28). Al disminuir el tamaño de la abertura, aumenta la velocidad con que sale el agua, y también la presión que es necesario ejercer con el dedo. Esto último evidencia que la presión del agua ha aumentado en el interior de la manguera. A mayor diferencia entre la presión del agua en el interior y el exterior de la manguera, mayor diferencia entre sus velocidades dentro y fuera de ella.



Fig. 2.28. Al disminuir el tamaño de la abertura por donde sale el agua, aumenta su presión en el interior de la manguera, y también la velocidad con que sale.

Ciertos dispositivos permiten visualizar la relación entre la presión en el fluido y su velocidad. En la figura 2.29a se muestra el esquema de uno que puede ser utilizado para los líquidos y en la figura 2.29b la foto de otro similar para los gases. En el caso de la figura 2.29a, donde la tubería es más estrecha y por tanto la velocidad del líquido mayor, la altura de la columna en los tubitos es menor, lo que indica que en esos lugares la presión es mayor. Semejantes dispositivos pueden ser incluso utilizados para medir la velocidad de los fluidos.

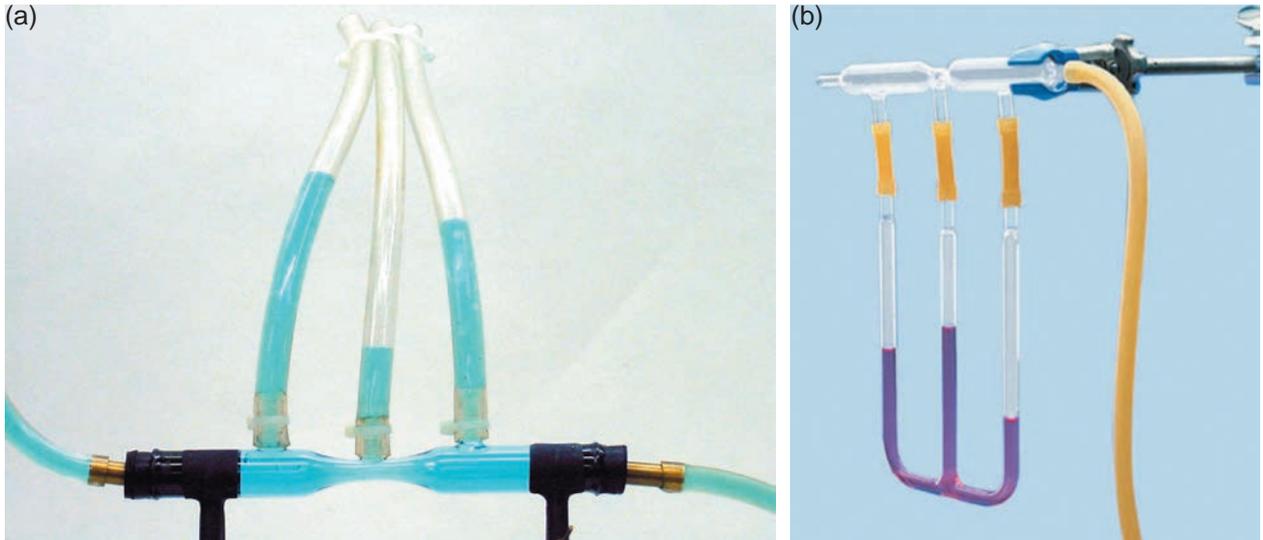


Fig. 2.29. Dispositivos que permiten visualizar la relación entre la velocidad y la presión de un fluido que se mueve en una tubería: (a) para líquidos, (b) para gases.

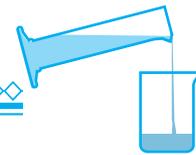
¿Por qué en la figura 2.29b, donde el tubo es más estrecho y por tanto la velocidad del flujo mayor, la columna líquida asciende a mayor altura?



En 1738 Daniel Bernoulli (Fig. 2.30) estableció la relación entre velocidad y presión para un fluido en movimiento como el que estamos considerando, regular, incompresible, sin fricción entre sus porciones. Esa relación es expresión de la conservación de la energía mecánica, por lo que la obtendremos a partir del **teorema del trabajo y la energía cinética** ($W = \Delta E_c$).



Fig. 2.30. Daniel Bernoulli (1700-1782). Científico suizo nacido en Holanda. En 1738 publicó Hidrodinámica, donde expuso la ley que más tarde llevaría su nombre. También hizo importantes contribuciones a la teoría de probabilidades.



Consideremos el caso simple de una tubería horizontal como la representada en la figura 2.31a, y cierta porción de fluido de volumen ΔV que está a punto de pasar de la parte de mayor sección transversal a la de menor. Al fluir por el estrechamiento, la porción está sometida a las fuerzas F_1 y F_2 por parte del resto del fluido (Fig. 2.31b). Cabe notar que hasta ahora hemos determinado el trabajo de fuerzas ejercidas sobre cuerpos que solamente se trasladan, mientras que en este caso la porción de fluido no solo se traslada sino que también se deforma. No obstante, el trabajo se calcula del mismo modo, multiplicando la magnitud de cada fuerza por el desplazamiento de su punto de aplicación. Evidentemente, el desplazamiento Δx_2 del punto de aplicación de F_2 es mayor que el desplazamiento Δx_1 del punto de aplicación de F_1 .

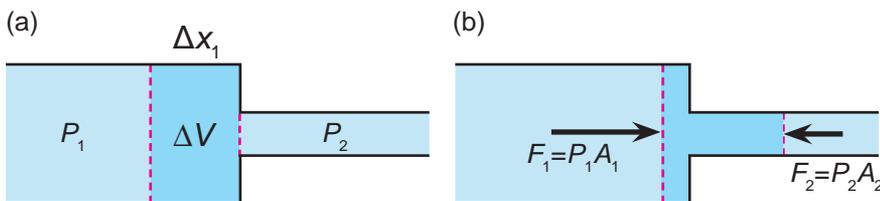


Fig. 2.31. (a) Cierta porción de fluido a punto de pasar por un estrechamiento en una tubería. (b) La porción está sometida a las fuerzas F_1 y F_2 por parte del resto del fluido. El trabajo neto de dichas fuerzas es igual al incremento de energía cinética de la porción.

Los trabajos de las fuerzas son:

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 \quad \text{y} \quad W_2 = -F_2 \Delta x_2$$

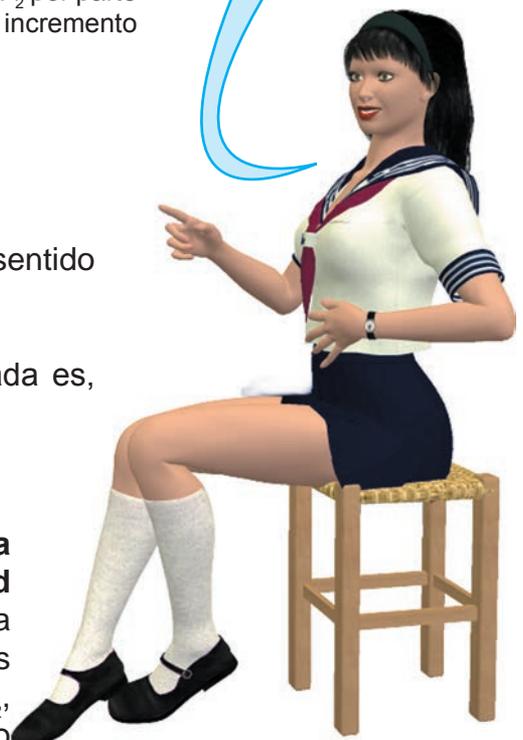
Observa que el trabajo de F_2 es negativo, ya que su sentido es opuesto al del desplazamiento.

El trabajo neto sobre la porción de fluido examinada es, pues:

$$W = F_1 \Delta x_1 - F_2 \Delta x_2$$

Si el tubo es tan estrecho como para que la dependencia de la presión con la profundidad pueda despreciarse (lo cual es exacto cuando la tubería tiende a ser una línea de corriente), entonces las fuerzas ejercidas son $F_1 = P_1 A_1$ y $F_2 = P_2 A_2$, donde P_1 y P_2 representan las presiones del fluido

Explica con tus propias palabras, por qué en la tubería representada en la figura 2.31 el desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza F_2 es mayor que el de la fuerza F_1 .





respectivamente en las partes izquierda y derecha de la tubería, las cuales actúan a cada lado de la porción. El trabajo neto puede escribirse:

$$W = P_1 A_1 \Delta x_1 - P_2 A_2 \Delta x_2 = P_1 \Delta V - P_2 \Delta V$$

$$W = (P_1 - P_2) \Delta V$$

Determinemos ahora la variación de la energía cinética de la porción de fluido que estamos considerando. Sea Δm su masa, entonces el incremento de su energía cinética es:

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 = \frac{1}{2} \Delta m (v_2^2 - v_1^2)$$

Pero $\Delta m = \rho \Delta V$, donde ρ es la densidad del fluido.

De ahí que:

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$

Y puesto que $W = \Delta E_C$, se tiene:

$$(P_1 - P_2) \Delta V = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$

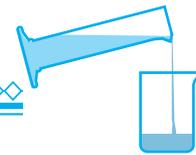
Dividiendo la ecuación entre ΔV se simplifica:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Lo usual es reordenar los términos y escribir la ecuación del modo siguiente:

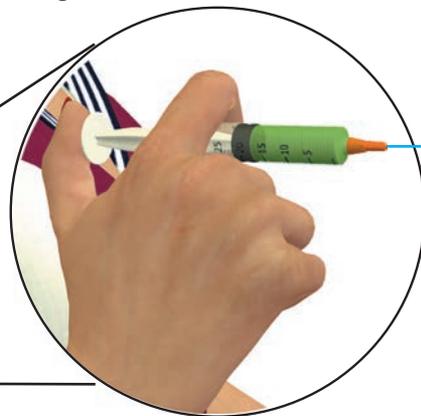
$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Cualquiera de las dos ecuaciones anteriores constituye la **ecuación (o ley) de Bernoulli, para lugares del flujo a una misma altura o nivel**. La ecuación a que llegó Bernoulli, que es la más utilizada, considera la posible variación de la altura de la tubería, debido a lo cual incluye otros términos. Éstos no aparecen en las expresiones obtenidas



por nosotros, porque para hacer más sencilla la deducción, analizamos el caso particular de una tubería horizontal.

Ejemplo 2.10. Se tiene una jeringuilla, sin aguja, con diámetro de su émbolo de 1.2 cm y del orificio de 2.0 mm. La jeringuilla se llena de agua, se coloca en posición horizontal y se empuja su émbolo con una fuerza de 1.0 N. a) ¿Cuál es la presión ejercida sobre el agua debida a la fuerza aplicada sobre el émbolo? b) ¿Cuántas veces mayor es la velocidad del agua al salir de la jeringuilla que su velocidad dentro de ella? c) ¿Con qué velocidad sale? ¿A qué velocidad se mueve el émbolo? Desprecia el rozamiento durante el desplazamiento del émbolo y la salida del agua a través del orificio. La densidad del agua es $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.



a) La presión sobre el agua debida a la fuerza aplicada sobre el émbolo es:

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

donde A_1 es el área de la sección transversal del émbolo y F la fuerza con que se empuja. Por consiguiente:

$$P = \frac{F}{\pi r^2} = \frac{F}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{1.0 \text{ N}}{\pi \left(\frac{1.2 \times 10^{-2} \text{ m}}{2}\right)^2} = 8.8 \times 10^3 \text{ Pa}$$

b) Si v_1 y v_2 son las velocidades del agua, respectivamente dentro de la jeringuilla y en el estrecho conducto por donde sale, y A_1 y A_2 las áreas de las secciones transversales de dichas partes, entonces según la ecuación de continuidad:

$A_1 v_1 = A_2 v_2$, de donde:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\pi r_1^2}{\pi r_2^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \left(\frac{12 \text{ mm}}{2.0 \text{ mm}}\right)^2 = 36$$



- c) La jeringuilla con su estrecho conducto representa una especie de tubería similar a la esquematizada al deducir la ecuación de Bernoulli. De modo que es posible plantear:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

donde P_1 y P_2 son las presiones del agua respectivamente en la jeringuilla y en su conducto. Presta atención a que sobre el émbolo no solo actúa una fuerza al empujarlo, en realidad todo el tiempo está actuando cierta fuerza a causa de la presión atmosférica. Por eso, la presión P_1 que ejerce el émbolo sobre el agua es la suma de la presión P debida a la fuerza aplicada y la presión atmosférica P_{atm} :

$$P_1 = P + P_{\text{atm}}$$

Te dejamos como tarea la siguiente cuestión: Los émbolos de las jeringuillas suelen terminar en la parte que da al exterior en una porción de mayor sección transversal que el resto del émbolo. No obstante, la fuerza ejercida sobre él a causa de la presión atmosférica es independiente del tamaño de dicha terminación, solo depende del área de la sección del resto del émbolo. Argumenta por qué.

Por su parte, P_2 es la presión atmosférica ejercida sobre el agua a la salida del conducto de la jeringuilla. De aquí que la ecuación de Bernoulli queda:

$$P + P_{\text{atm}} - P_{\text{atm}} = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad \text{de donde:} \quad P = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

En el apartado (b) encontramos que v_2 es 36 veces mayor que v_1 . Esto significa que v_2^2 es alrededor de 36^2 veces mayor que v_1^2 , o sea, unas 1300 veces, por lo que en la ecuación anterior v_1 puede despreciarse:

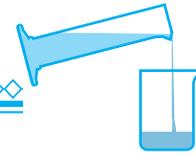
$$P = \frac{1}{2} \rho v_2^2, \text{ resolviendo para } v_2:$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(8.8 \times 10^3 \text{ Pa})}{1 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}}}} = 4.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

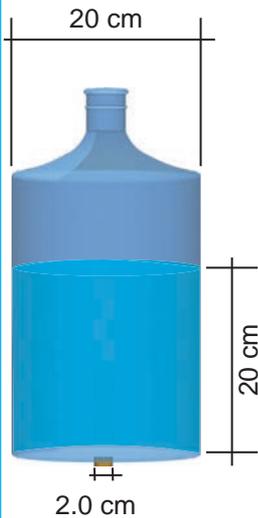
Calculemos ahora la velocidad v_1 del agua en la jeringuilla. Puesto que $v_2/v_1 = 36$, entonces:

$$v_1 = \frac{v_2}{36} = \frac{4.2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{36} = 0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 12 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Esta velocidad del agua en la jeringuilla es, por supuesto, también la velocidad con que se desplaza el émbolo.



Ejemplo 2.11. Un pequeño tinaco con agua, abierto por arriba, tiene en su fondo un orificio cerrado con un tapón. El diámetro del tinaco es 20 cm y el del orificio 2.0 cm. El tapón se retira. a) ¿Con qué velocidad sale el agua cuando su nivel en el tinaco se encuentre a 20 cm del orificio? b) ¿Con qué velocidad desciende el nivel?



a) Observa que el tinaco conjuntamente con el chorro de agua que sale de él puede considerarse una tubería similar a las examinadas anteriormente, con dos secciones transversales diferentes, solo que ahora la “tubería” está en posición vertical. En consecuencia, la presión del agua en esta “tubería” no es la misma en todos los lugares, depende de la profundidad. En tales casos es esencial tener en cuenta que en la ecuación $P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho(v_2^2 - v_1^2)$ las presiones se refieren a lugares del fluido con una misma altura o nivel.

Por eso consideraremos que P_1 es la presión dentro del tinaco y P_2 fuera de él, pero ambas junto al orificio. De aquí que:

$P_1 = P_{atm} + \rho gh$, donde h es la altura a que se encuentra la superficie del agua sobre el orificio.

Y $P_2 = P_{atm}$

La ecuación de Bernoulli queda:

$$P_{atm} + \rho gh - P_{atm} = \frac{1}{2} \rho(v_2^2 - v_1^2)$$

$$gh = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2)$$

No es difícil intuir que la velocidad v_2 con que sale el agua del orificio es mucho mayor que la velocidad v_1 con que desciende en el tinaco, es decir, con que desciende su nivel (¡puedes comprobar que unas 100 veces mayor!). Por consiguiente, en la ecuación anterior v_1 puede despreciarse:

$$gh = \frac{1}{2}v_2^2$$

De ahí que:

$$v_2 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2\left(9.8 \frac{m}{s^2}\right)(0.20 m)} = 2.0 \frac{m}{s}$$



Nota que esta velocidad es la que tiene el agua a la salida del orificio cuando su nivel en el tinaco está a 20 cm de él. Obviamente, la velocidad de salida disminuye con el descenso del nivel del agua en el tinaco. Ello se aprecia claramente de la ecuación obtenida anteriormente:

$$v_2 = \sqrt{2gh}$$

Esta dependencia entre la velocidad con que sale líquido por el orificio de un tinaco y la altura h de su nivel sobre el orificio, se conoce como **ley de Torricelli**, en honor a Evangelista Torricelli. Cabe señalar que la ley es válida no solo para orificios en el fondo de un tinaco, sino también en su pared. Por supuesto, en ese caso la velocidad de salida es horizontal.

b) Según la ecuación de continuidad:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

donde A_1 y A_2 son las áreas de las secciones transversales del tinaco y del chorro junto al orificio.

De la ecuación anterior:

$$v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2 = \frac{\pi r_2^2}{\pi r_1^2} v_2 = \frac{d_2^2}{d_1^2} v_2 = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 v_2 = \left(\frac{2.0 \text{ cm}}{20 \text{ cm}}\right)^2 \left(2.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 2.0 \times 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 2.0 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

O sea, la velocidad con que sale el agua es unas 100 veces mayor que la velocidad con que desciende su nivel en el tinaco.

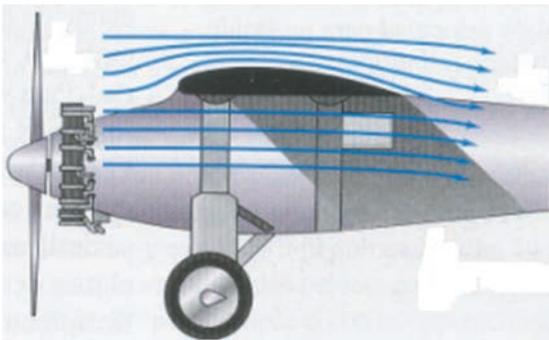
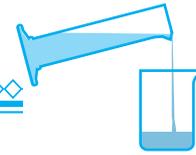


Fig. 2.32. Debido a la peculiar forma de las alas de los aviones, la velocidad del viento es mayor en la parte superior de ellas que en la inferior y por tanto la presión menor, lo cual origina una fuerza ascensional. Este efecto puede incrementarse inclinando las alas hacia arriba.

En el caso de los gases, aún cuando no fluyan por tuberías es posible utilizar la ley de Bernoulli para explicar una serie de interesantes fenómenos. Uno de esos fenómenos es la sustentación de los aviones. Debido a la forma especial de las alas (Fig. 2.32), la velocidad del aire en la parte superior de ellas es mayor que en la inferior y por tanto la presión es menor. Ello origina una **fuerza ascensional** sobre las alas. Inclinando éstas hacia arriba puede aumentarse la diferencia de velocidades entre la parte superior y la inferior y con esto la diferencia de presión y la fuerza ascensional sobre ellas, la cual durante el despegue llega a superar al peso del avión.



Otros interesantes fenómenos relacionados con la ley de Bernoulli son los llamados “efectos”, provocados en pelotas de ping-pong, tenis, béisbol y otras, al imprimirles rotación. Para explicar esos efectos es necesario tener en cuenta el rozamiento entre los cuerpos y el aire a través del cual se mueven, así como entre las capas del propio aire. Este rozamiento se hace evidente en una experiencia como la representada en la figura 2.33. Al poner a girar rápidamente el disco inferior, el superior también comienza a hacerlo, aunque muy lentamente. Ello evidencia el rozamiento entre los discos y el aire y entre las capas del propio aire.

Explica con tus propias palabras el origen de la fuerza ascensional que actúa sobre las alas de los aviones.

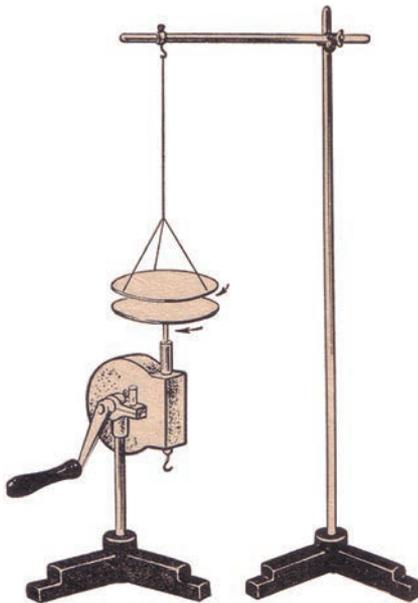


Fig. 2.33. Al hacer girar rápidamente el disco inferior, el superior también comienza a girar, aunque lentamente. Ello evidencia el rozamiento del aire y los cuerpos que se mueven en él, así como entre las capas del propio aire.

Consideremos ahora una pelota que se lanza de izquierda a derecha, rotando. En la figura Fig. 2.34a se ha representado una visa lateral de la pelota en vuelo. La situación es equivalente a considerar la pelota sin movimiento de traslación y el aire moviéndose en sentido contrario (Fig. 2.34b). A causa del rozamiento entre la pelota en rotación y el aire, la velocidad de éste en la parte inferior de la pelota resulta mayor que en la superior. Según la ecuación de Bernoulli, esto origina una diferencia de presión entre ambas partes. En la inferior, donde la velocidad del aire es mayor, la presión es menor. Debido a ello la pelota realiza una curva hacia abajo. La aparición de fuerzas a causa de la rotación de los cuerpos durante el movimiento en un fluido se conoce como **efecto Magnus**.



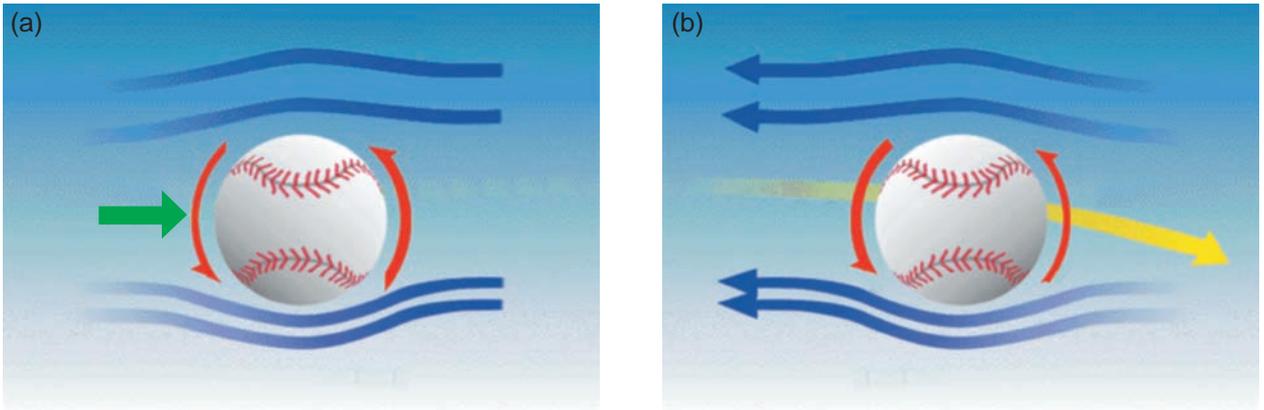
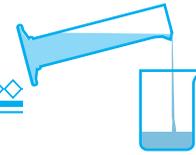


Fig. 2.34. (a) Vista lateral de una pelota lanzada de izquierda a derecha, rotando. (b) la situación equivale a considerar la pelota sin movimiento de traslación y el aire moviéndose en sentido contrario. Debido al efecto Bernoulli, surge una fuerza que desvía la pelota hacia abajo.

¿Cómo habría que hacer rotar una pelota de béisbol para que el lanzamiento sea una curva hacia la izquierda?





2.3. Actividades de sistematización y consolidación

2.3.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo



Escribe cada palabra en Wik pedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.

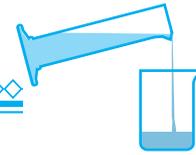
- Arquímedes
- Ascencional
- Atmósfera
- Barómetro
- Bernoulli
- Continuidad
- Densidad
- Dinámica
- Energía
- Esfigmómetro
- Estática
- Fluido
- Gas
- Gasto
- Laminar
- Líquido
- Magnus
- Manómetro
- Pascal
- Presión
- Sección
- Sifón
- Torricelli
- Trabajo
- Velocidad



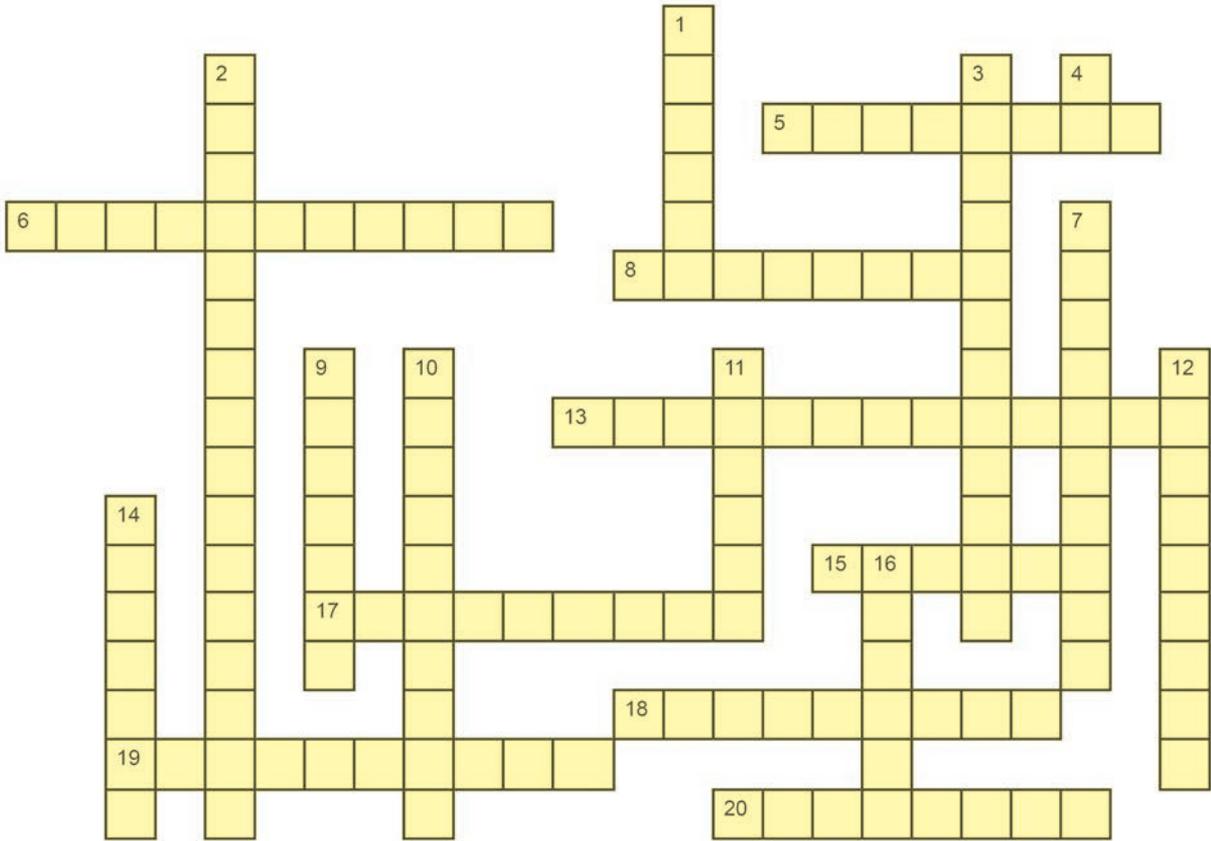


2.3.2. Conexión de conceptos e ideas

1. Parte de la Física que estudia los fluidos en reposo. () Blaise Pascal.
2. Parte de la Física que estudia los fluidos en movimiento. () Dinámica de los fluidos.
3. Estados de agregación de los cuerpos considerados fluidos. () Ecuación de Bernoulli.
4. Tipo de fuerza de rozamiento que no surge entre las porciones de los fluidos. () Ecuación de continuidad.
5. Característica de las moléculas de los gases y líquidos que explica la fluidez de ellos. () Efecto Magnus.
6. Magnitudes que intervienen en el cálculo de la presión. () Elevador hidráulico.
7. Científico a quien se debe el nombre de la unidad fundamental de presión en el sistema internacional de unidades. () Estática de los fluidos.
8. Mecanismo cuyo funcionamiento se basa en la ley de Pascal. () Facilidad para desplazarse.
9. Una de las magnitudes de las que depende la presión en el interior de los fluidos en reposo. () Fuerza ascensional.
10. Nombre de la fuerza ejercida por los fluidos sobre los cuerpos que se sumergen en ellos. () Fuerza de empuje.
11. Una de las magnitudes de la que depende la fuerza de empuje. () Fuerza de gravedad y fuerza de empuje.
12. Fuerzas de las que depende que un cuerpo se hunda o flote en un fluido. () Fuerza y área.
13. Nombre de las trayectorias definidas que siguen las porciones de un fluido en movimiento regular y estable. () Ley de Torricelli.
14. Nombre que recibe la relación entre la velocidad de un fluido que fluye por una tubería y el área de la sección transversal de ésta. () Líquido y gaseoso.
15. Tipo de relación entre la velocidad de un fluido que fluye por una tubería y el área de la sección transversal de ésta. () Líneas de corriente.
16. Tipo de relación entre la fuerza de empuje que actúa sobre un cuerpo que se sumerge en un fluido y la densidad de éste. () Profundidad.
17. Nombre que recibe la relación entre la velocidad y la presión para un fluido en movimiento. () Proporcionalidad directa.
18. Nombre que recibe la relación entre la velocidad con que sale líquido por el orificio de un tinaco y la altura a que está la superficie del líquido sobre el orificio. () Proporcionalidad inversa.
19. Nombre de la fuerza que actúa sobre las alas de los aviones debido a la diferencia de velocidades del aire entre sus partes superior e inferior. () Rozamiento estático.
20. Nombre que recibe el fenómeno de aparición de fuerzas a causa de la rotación de los cuerpos durante el movimiento en un fluido. () Volumen de fluido desplazado.



2.3.3. Crucigrama



Horizontales

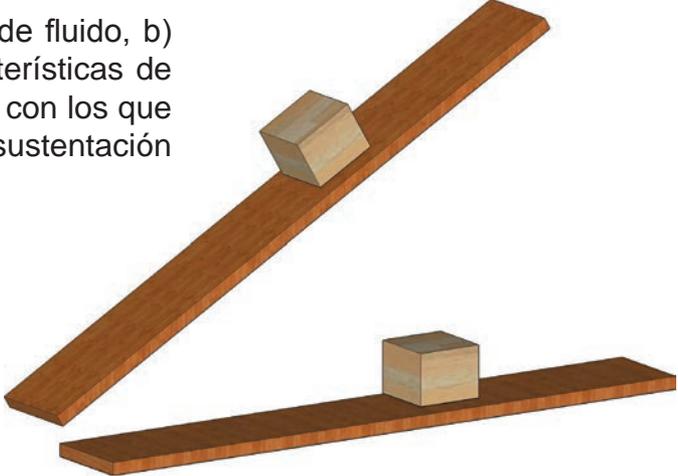
- 5. Una de las magnitudes de las que depende la presión en el interior de un fluido.
- 6. Tipo de variación de la presión de un fluido al pasar de un lugar con cierta velocidad a otro con mayor velocidad.
- 8. Tipo de rozamiento que no surge entre las porciones de los fluidos.
- 13. Nombre que a veces se le da a la Dinámica de los Fluidos.
- 15. Científico a quien debe su nombre la ley que dice que la presión ejercida sobre un fluido encerrado se transmite íntegramente en todas direcciones y a todos sus puntos.
- 17. Capa de aire que rodea nuestro planeta.
- 18. Científico a quien se debe el establecimiento de la relación entre la velocidad y la presión para un fluido en movimiento.
- 19. Adjetivo que caracteriza a flujos como el de los "rápidos" de los ríos.
- 20. Tipo de relación entre la magnitud de las fuerza de gravedad y la de empuje cuando un cuerpo flota en un fluido.

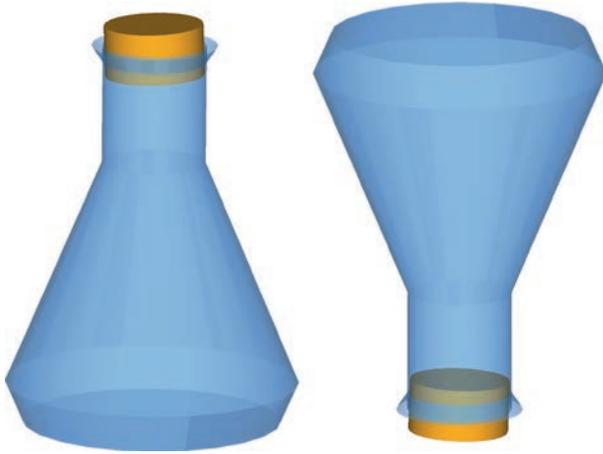
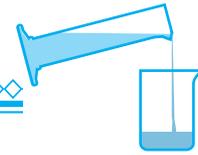
Verticales

- 1. Nombre del efecto que consiste en la aparición de fuerzas a causa de la rotación de los cuerpos durante el movimiento en un fluido.
- 2. Aparato utilizado para medir la tensión arterial.
- 3. Modo en que a veces se llama a la Estática de los Fluidos.
- 4. Símbolo de la unidad fundamental de presión en el sistema internacional de unidades.
- 7. Científico que inventó el primer barómetro.
- 9. Adjetivo que califica a un flujo de fluido cuando sus porciones describen trayectorias bien definidas y estables.
- 10. Sabio de la antigua Grecia que fue el primero en estudiar los factores de que depende la fuerza de empuje.
- 11. Máquina hidráulica cuyo funcionamiento se basa en la ley de Pascal.
- 12. Nombre de los dispositivos utilizados para medir la presión de los fluidos.
- 14. Tipo de variación de la velocidad de un líquido que fluye por una tubería al pasar de una parte con determinada sección transversal a otra parte de menor sección.
- 16. Una de las magnitudes de las que depende la presión en la atmósfera.



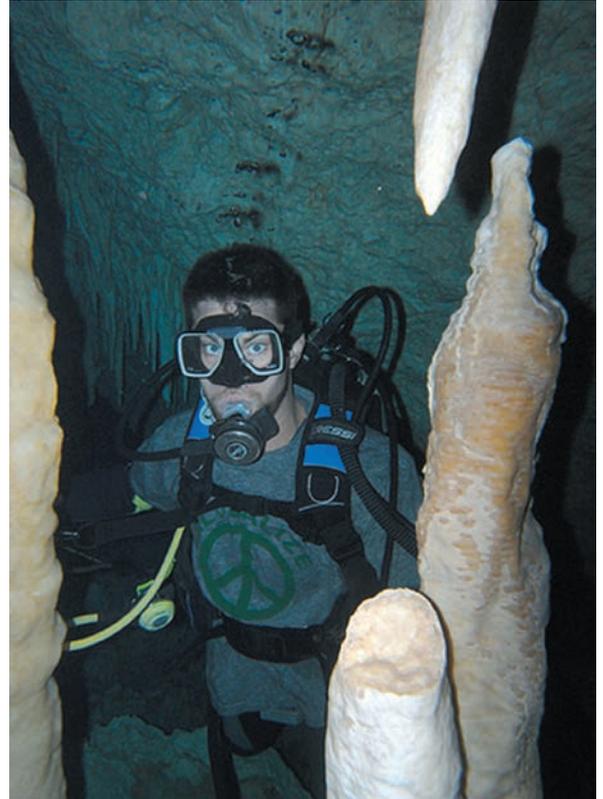
2.3.4. Actividades de repaso

1. Comenzando con el concepto de fluido, confecciona un diagrama que conecte y ramifique frases como las siguientes: estática de los fluidos, dinámica de los fluidos, ley de Pascal, presión en el interior de líquidos y gases, ley de Arquímedes, tipos de movimiento de los fluidos, ecuación de continuidad, ley de Bernoulli, fuerza de sustentación, efecto Magnus.
2. A modo de síntesis del capítulo intenta responder, resumidamente, las preguntas clave planteadas al iniciarlo: ¿Cómo se explica la propiedad de fluir que poseen líquidos y gases? ¿Cómo se transmite la presión ejercida sobre un fluido? ¿Cuál es la dependencia entre la presión en un fluido en reposo y la profundidad? ¿Cómo depende la velocidad de un fluido del área de la sección transversal de la tubería por la que fluye? ¿Cómo se relacionan la presión y la velocidad en un fluido en movimiento?
3. Comenta acerca de: a) el concepto de fluido, b) el concepto de presión, c) las características de la presión ejercida sobre los cuerpos con los que entran en contacto, d) la fuerza de sustentación en los aviones, e) el efecto Magnus.
4. En la figura se muestra un mismo bloque apoyado sobre una superficie horizontal y otra inclinada. ¿En cuál de los casos es mayor la presión ejercida por el bloque sobre la superficie en que se apoya? Argumenta tu respuesta.
 
5. Utiliza el concepto de presión para argumentar por qué mientras más grande sea una edificación, mayor deberá ser el área de sus cimientos.
6. Utilizando el concepto de presión explica por qué es más cómodo sentarse o acostarse sobre superficies blandas que, por ejemplo, en el suelo.
7. Seguramente has advertido que mientras menor sea la presión en un neumático, mayor es su área de contacto con el pavimento. ¿Cómo explicar esto?
8. ¿Dónde será mayor la presión ejercida sobre un cuerpo sumergido a una misma profundidad, en alcohol o en agua? Argumenta tu respuesta.
9. ¿Dónde sería mayor y dónde menor la presión sobre un cuerpo sumergido en agua a una misma profundidad, en la Tierra, la Luna o Júpiter? Argumenta tu respuesta.

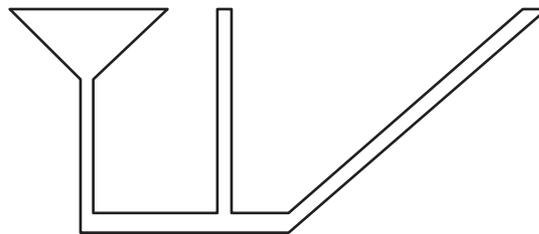


10. En la figura se muestra un mismo recipiente lleno de agua en dos posiciones. ¿Dónde es mayor la presión, sobre el tapón o sobre su fondo?

11. A un buzo le están molestando los oídos debido a la presión del agua. De pronto ve una especie de cueva y decide dirigirse a ella, pues razona que como ésta tiene “techo”, allí la presión del agua será menor. ¿Es correcto su razonamiento? Argumenta.



12. Si en el dispositivo de la figura se vierte agua por el embudo hasta su mitad, ¿hasta dónde subirá en los otros tubos? Argumenta tu respuesta.

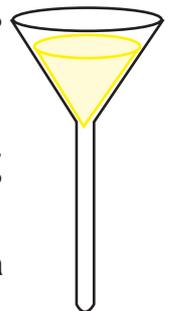


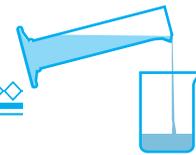
13. Teniendo en cuenta la acción de la presión atmosférica y la ley de Pascal, explica los siguientes hechos: a) al introducir una jeringuilla por el extremo donde se coloca la aguja en el agua de una vasija y extraer poco a poco su émbolo, el agua penetra tras él; b) al introducir una pajilla en un vaso con refresco y “aspirar”, el agua asciende por la pajilla.





14. ¿Podría utilizarse una pajilla de beber en la Luna? Argumenta.
15. ¿Cómo podría determinarse la altura de una montaña o de un avión en vuelo, a partir de la medición de la presión atmosférica?
16. Cuándo será mayor la fuerza de empuje sobre una persona que está flotando verticalmente en el mar, ¿al inhalar aire o exhalarlo?
17. Se tiene una varilla suspendida por su punto medio. De sus extremos se cuelgan idénticos cuerpos, de modo que la varilla queda equilibrada. ¿Se alterará el equilibrio si uno de los cilindros se sumerge en agua y el otro en alcohol? Argumenta tu respuesta.
18. De los extremos de la misma varilla de la pregunta anterior se cuelgan ahora un cuerpo de plomo y otro de aluminio, de iguales masa, de modo que la varilla queda equilibrada. ¿Se alterará el equilibrio si los cuerpos se sumergen en agua? Argumenta tu respuesta.
19. Un cuerpo flota en agua con la mitad de su volumen fuera de ella. ¿Qué sucedería en la Luna, donde la intensidad de la gravedad es alrededor de la sexta parte que en la Tierra?
20. El aceite de oliva flota en agua, ¿qué conclusión pudiera extraerse de ello acerca de su densidad?
21. Un globo cuyo volumen no varía se eleva hasta cierta altura donde queda flotando, sin embargo, si un submarino comienza a descender continuará haciéndolo hasta el fondo, si no se realiza alguna maniobra. ¿Cómo se explica esta diferencia?
22. Serán iguales o diferentes las cantidades de medicamento por unidad de tiempo que atraviesan la secciones transversales del interior de una jeringuilla y del interior de la aguja por donde sale? Argumenta tu respuesta.
23. ¿Será válida la ecuación de Bernoulli en el caso de un flujo de fluido cuyo rozamiento entre sus porciones (viscosidad), no puede despreciarse? Argumenta tu respuesta.
24. Un papel de filtro se coloca en un embudo como se muestra en la figura. ¿Por qué no es posible expulsarlo soplando aire por el tubo del embudo?
25. ¿Cómo hay que hacer rotar una pelota de ping-pong para que dé una curva hacia la izquierda? Argumenta tu respuesta.





2.3.5. Ejercicios de repaso.

1. Considera que en la experiencia de la figura 2.4c el diámetro del émbolo de la jeringuilla menor es 0.47 cm y la fuerza aplicada sobre él 1.0 N, ¿cuál es la presión ejercida sobre el fluido?

Respuesta: 5.8×10^4 Pa

2. ¿Cuál es la fuerza ejercida por el aire sobre el piso de una habitación de 4.0 m de largo y 4.0 m de ancho?

Respuesta: 1.6×10^6 N

3. El émbolo mayor de cierto gato hidráulico tiene un diámetro de 5.0 cm y el menor de 2.0 cm. a) ¿Qué presión se requiere transmitir al émbolo mayor para que ejerza una fuerza de 2.0×10^3 N? b) ¿Qué fuerza se necesita ejercer para ello sobre el pistón menor?

Respuesta: a) 1.0×10^6 Pa, b) 3.2×10^2 N

4. La mayor profundidad en el mar (unos 11 km) se encuentra en la fosa de las Marianas, en el océano Pacífico. ¿Cuántas veces mayor que la presión atmosférica es la presión del agua en la fosa de las Marianas?

Respuesta: 1.1×10^3 veces mayor

5. Estima la fuerza ejercida sobre la membrana del tímpano de un nadador en el fondo de una alberca de 5.0 m de profundidad. Considera que la membrana tiene un área de 1 cm^2 .

Respuesta: 5 N

6. Se pretende inyectar un suero medicinal a un paciente a través de una vena de su brazo. Si la presión en el interior de la vena es de 6.0×10^3 Pa por encima de la atmosférica, ¿a qué altura mínima sobre el brazo debe estar la superficie del suero en el depósito para que comience a entrar en la vena? Considera que el depósito está abierto por arriba y que la densidad del suero es la misma que la del agua.

Respuesta: 61 cm

7. En la cima de una montaña la presión atmosférica es 0.40 atmósfera. Según el gráfico de la figura 2.18, ¿alrededor de qué altura sobre el nivel del mar se encuentra la cima?

Respuesta: a unos 7 km

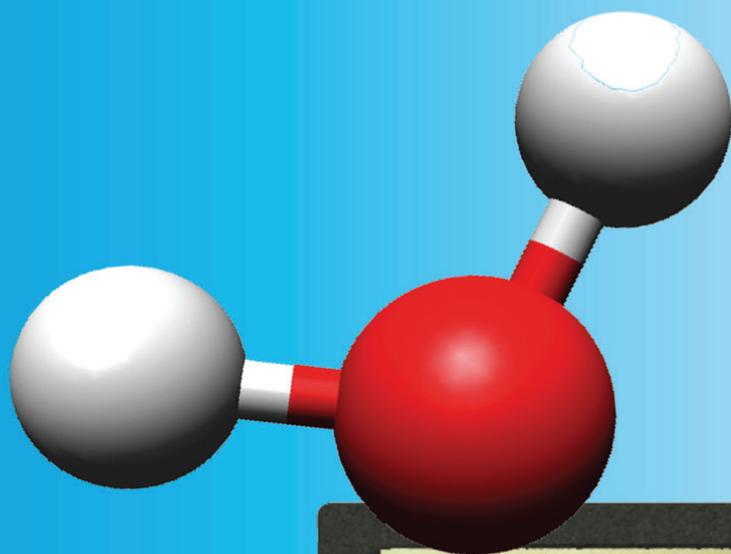
8. Comprueba que cuando en el barómetro de mercurio el nivel de éste se encuentra 76 cm por encima de su nivel en el recipiente (Fig. 2.17), entonces la presión atmosférica es 1.0×10^5 Pa. Considera la densidad del mercurio 13.6 g/cm^3 .





9. Si en el barómetro de Torricelli se utilizara agua en lugar de mercurio, ¿qué longitud como mínimo debería tener el tubo? Considera la densidad del agua 1.0 g/cm^3 y la del mercurio 13.6 g/cm^3 .
- Respuesta:** 10 m
10. ¿Cuál debe ser el área de contacto entre una ventosa y una superficie horizontal contra la que se presiona para que soporte a un estudiante de 60 kg? ¿Qué diámetro tendría la ventosa? Considera que entre la ventosa y la pared no queda aire.
- Respuesta:** 59 cm^2 , 8.6 cm
11. Una balsa de 20 m de largo y 5.0 m de ancho flota en un río. Cuando sobre ella se coloca un tractor, desciende 10 cm en el agua. Determina la masa del tractor. Considera la densidad del agua $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.
- Respuesta:** $1.0 \times 10^4 \text{ kg}$
12. Supuestamente a Arquímedes se le pidió determinar si una corona hecha para el rey era maciza y de oro puro, o no. La leyenda dice que resolvió este problema pesándola primero en el aire y luego sumergida en agua. Imagina que su peso en el aire fue 7.8 N y en el agua 6.7 N. ¿Cuál sería en ese caso la densidad de la corona? ¿Y la respuesta de Arquímedes?
- Respuesta:** 7.1 g/cm^3 , No
13. El agua sale de cierta manguera de bomberos de 6.0 cm de diámetro a razón de 15 L/s. La manguera termina en un estrechamiento de 2.0 cm de diámetro. a) ¿A qué velocidad sale el agua de la manguera? b) ¿Qué velocidad tiene dentro de ella?
- Respuesta:** a) 48 m/s, b) 5.3 m/s
14. Durante cierto huracán las ráfagas de viento encima del techo de una casa alcanzan 210 km/h . a) ¿Cuál es la diferencia de presión entre el interior y el exterior del techo? b) ¿Cuál es la fuerza ascensional que actúa sobre el techo si tiene 10 m de largo y 8.0 m de ancho? Considera la densidad del aire 1.2 kg/m^3 .
- Respuesta:** a) $2.0 \times 10^3 \text{ Pa}$, b) $1.6 \times 10^5 \text{ N}$
15. La velocidad del aire relativa a las alas de cierta avioneta es de 80 m/s encima de ellas y 70 m/s debajo. La masa de la avioneta es 1 270 kg, sus alas están horizontales y tienen un área de 16 m^2 . a) ¿Cuál es la fuerza ascensional que actúa sobre las alas? b) ¿Cuál es la fuerza neta sobre la avioneta? Considera la densidad del aire 1.2 kg/m^3 .
- Respuesta:** a) $14 \times 10^3 \text{ N}$, b) $2.0 \times 10^3 \text{ N}$ hacia arriba

3 Propiedades de las superficies de los líquidos



3. Propiedades de las superficies de los líquidos

Ya estás familiarizado con una serie de fuerzas que intervienen en los sistemas y fenómenos del mundo que nos rodea: la fuerza de gravedad, de rozamiento, de elasticidad, de empuje, eléctrica, magnética. En ciertos fenómenos participa además otra fuerza a la que no solemos prestar atención, la **de tensión superficial**. Como en los casos de las fuerzas de rozamiento, elasticidad y empuje, ella tiene su origen en la interacción entre las moléculas, su naturaleza es por tanto también electromagnética. La tensión superficial está relacionada con fenómenos y tecnologías que tienen gran importancia en la vida diaria, la ciencia y la ingeniería, como por ejemplo, el uso de **tensoactivos**, el **mojado** o no de cierta superficie por un líquido y el fenómeno de la **capilaridad**. En este capítulo centraremos la atención en preguntas como las siguientes:

¿En qué fenómenos se hace notar la fuerza de tensión superficial? ¿Cómo se origina dicha fuerza? ¿Qué son los tensoactivos? ¿De qué depende el mojado o no de cierta superficie por un líquido? ¿En qué consiste el fenómeno de la capilaridad?

Indaga en un diccionario o enciclopedia acerca del significado de las palabras “tensoactivo” y “capilaridad”.

Comenzaremos con la respuesta a la primera pregunta. Para percatarnos de la presencia de la tensión superficial, basta analizar algunos hechos simples.

Llena un plato con agua y procura una navaja de afeitar y una aguja de coser. Según lo aprendido en la unidad anterior, estos cuerpos deben hundirse en el agua, pues la densidad del acero, que es el material de que están hechos, es muy superior a la del agua, casi ocho veces mayor. Y en efecto, al sumergirlos, caen hasta el fondo. No obstante, si los colocas con cuidado en la superficie del agua, ¡flotan! (Fig. 3.1). La navaja simplemente puedes





dejarla caer desde cerca de la superficie del agua, pero la aguja debes colocarla con ayuda de una pinza para cejas, o sostenerla apoyada sobre la yema de un dedo y luego sumergir éste lentamente en el agua. ¿Por qué estos cuerpos no se hunden en el agua?



Fig. 3.1 (a) Una navaja y una aguja se colocan cuidadosamente sobre la superficie del agua (b) La navaja y las agujas flotan pese a que la densidad de ellas es muy superior a la del agua.

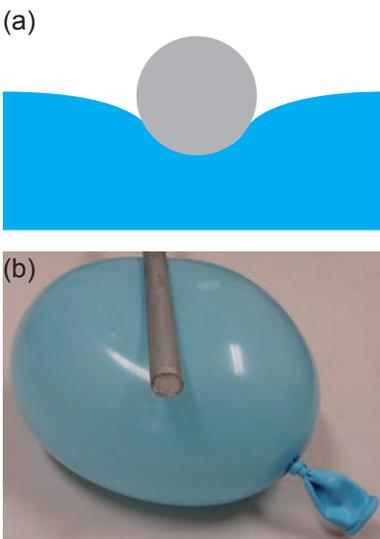


Fig. 3.2. (a) Diagrama que muestra la sección transversal de una aguja en la superficie del agua. (b) La superficie del agua se comporta de modo parecido a la membrana de goma de un globo lleno de agua.

Al observar atentamente la superficie del agua junto a los bordes de la navaja o la aguja, notarás que se curva ligeramente hacia abajo (Fig. 3.2a), comportándose como una especie de membrana de goma flexionada ante el peso de los cuerpos, similar a lo que ocurre en la experiencia representada en la Fig. 3.2b. La fuerza de gravedad que actúa sobre la navaja o la aguja es equilibrada por la fuerza producida por la deformación de la “membrana” que constituye la superficie del agua. Esta característica especial de la superficie de los líquidos hace posible, por ejemplo, que los zancudos acuáticos se desplacen por la superficie del agua sin hundirse (Fig. 3.3).

Pero, ¿cómo se origina esa peculiar característica de la superficie de los líquidos?



Fig. 3.3. Zancudo acuático desplazándose por el agua gracias a la tensión superficial.

3.1. Tendencia a reducir la superficie

La similitud entre la superficie de los líquidos y una membrana elástica se hace muy evidente en los experimentos representados en la figura 3.4. Se atan los extremos de un hilo a un aro de alambre, de modo que el hilo no quede tenso, y luego el aro se sumerge en una solución jabonosa y se extrae (Fig. 3.4a). Si a continuación la película jabonosa formada se destruye en uno de los lados del hilo, el resto de ella se contraerá, tirando del hilo con cierta fuerza. Por supuesto, que esta fuerza ya actuaba sobre el hilo antes de que la porción de película fuera destruida, pero era equilibrada por la fuerza que dicha porción ejercía. Una variante del experimento consiste en colocar un bucle de hilo en la película jabonosa del aro (Fig. 3.4b). Al destruir la porción de película del interior del bucle, el hilo queda sometido solo a la acción de la porción exterior, adoptando una forma próxima a la de una circunferencia.

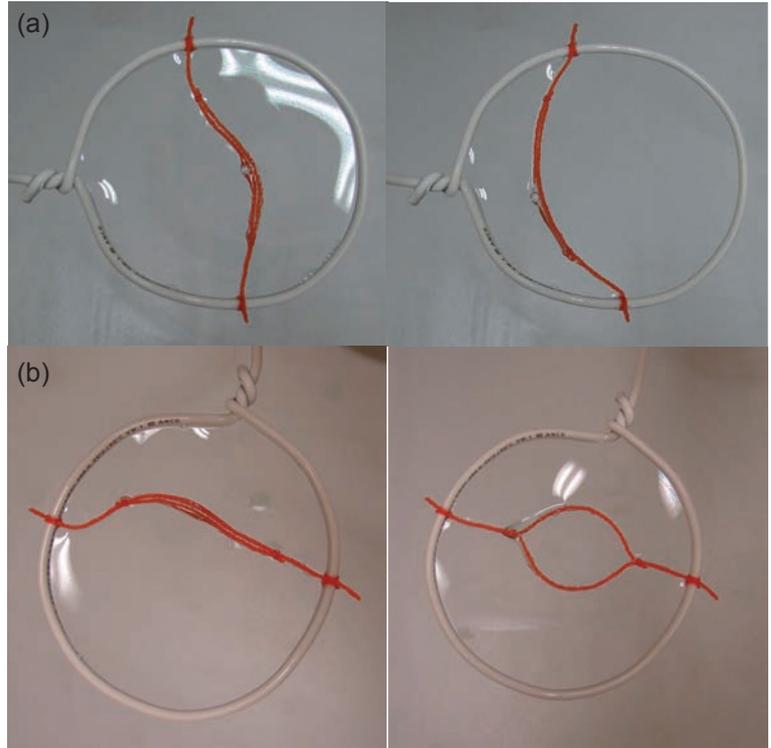


Fig. 3.4. Un aro con una película jabonosa y un hilo en dos casos: (a) Al destruir la película en uno de los lados del hilo el resto se contrae, tirando del hilo, (b) si se destruye la película del interior del bucle, el hilo forma una circunferencia.

Seguramente que en los experimentos de la figura 3.4 se emplea agua jabonosa porque su tensión superficial es mayor que la del agua.

Los experimentos anteriores muestran que **la tensión de la superficie libre de un líquido es originada por su tendencia a reducirse.**

Pues no, en realidad la tensión superficial del agua jabonosa es menor, pero a diferencia del agua limpia forma películas extensas estables.



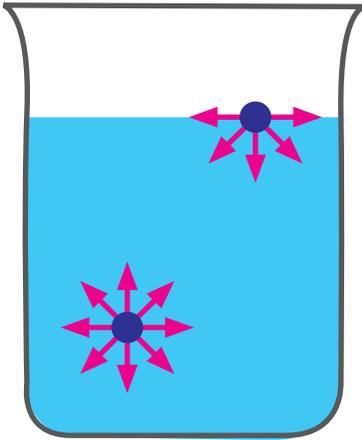


Fig. 3.5. Esquema de las fuerzas ejercidas sobre una molécula del interior del líquido y sobre otra en la superficie. En el primer caso la resultante de las fuerzas es nula, pero en el segundo está dirigida hacia abajo.

¿Como se explica esa tendencia de los líquidos a reducir su superficie libre?

Ya sabes que cuando las distancias entre las moléculas son de 1-2 diámetros moleculares, entre ellas actúan fuerzas de atracción. Precisamente eso es lo que mantiene cohesionadas entre sí las porciones de los líquidos. Pero **las moléculas de la superficie libre tienen una situación diferente a las del resto del líquido**. La figura 3.5 muestra un esquema simplificado de las fuerzas ejercidas por las moléculas vecinas sobre una del interior del líquido y sobre otra de su superficie libre. En el primer caso la resultante de las fuerzas es nula, pero en el segundo está dirigida hacia abajo. Debido a esto, las moléculas se desplazan más fácilmente de la superficie del líquido a su interior que a la inversa. Se forma así **una capa en la superficie** donde la concentración de moléculas es menor que en el resto del líquido. Esa capa es sumamente delgada, tiene un espesor cercano al tamaño de las moléculas.



Argumenta por qué la fuerza neta sobre la molécula de la superficie del líquido representada en la figura 3.5 está dirigida hacia abajo.

Como resultado, **las moléculas de la capa superficial están más separadas que en el resto del líquido, lo que origina una mayor fuerza de atracción entre ellas y la tensión superficial.**

En una membrana de goma en cierto modo ocurre algo parecido, al estirla aumentan las separaciones entre sus moléculas y la atracción entre ellas, lo que explica la aparición de la fuerza elástica. No obstante, entre la capa superficial de un líquido y una membrana elástica hay una diferencia esencial, que esclareceremos en el próximo apartado.

Un fenómeno muy conocido, que también se debe a la tensión superficial, es la formación de gotas a la salida de un gotero medicinal o de un grifo que no está completamente cerrado. El agua no sale como finísimo chorro, sino en forma de sucesivas gotas. Una observación detenida

muestra que la gota crece, luego su cuello se estrecha y finalmente se desprende (Fig. 3.6). Su fina capa superficial es como un saquito elástico que se va llenando y se rompe cuando ya no es capaz de soportar el peso. El parecido de la superficie de la gota con una membrana elástica que presiona el contenido que envuelve permite comprender su forma aproximadamente esférica mientras cae.



Fig. 3.6. La formación de una gota a la salida de un grifo transcurre como si el agua se acumulara en saquito elástico, que se rompe cuando ya no soporta el peso.

Es frecuente ver gotas pequeñas sobre las hojas de las plantas y la superficie de ciertos frutos (Fig. 3.7). Pero en esas mismas hojas y frutos las gotas grandes no tienen forma esférica. Ello se debe a la acción de la fuerza de gravedad y la ejercida por el apoyo. En una gota grande la cantidad de moléculas en su interior es muchísimo mayor que en su superficie y el papel de la fuerza de gravedad predomina frente al de la tensión superficial. Al reducirse el tamaño de la gota, la cantidad de moléculas disminuye más en su interior que en su superficie y el efecto de “membrana elástica” de esta se hace más notable.

¿Cómo explicarías, desde el punto de vista molecular, el hecho de que la gota que sale de un grifo tienda a adoptar una forma esférica?



Fig. 3.7. En ciertas hojas y frutos las pequeñas gotas de agua adoptan una forma esférica porque el efecto de “membrana elástica” de su superficie predomina frente al de las fuerzas de gravedad y del apoyo.





¡Ya sé! Con la gota de agua sucede algo parecido que con una bolsita elástica llena de agua colocada en una mesa. Si la bolsita es pequeña se deforma mucho menos que si es grande.

De este modo, contrariamente a lo que comúnmente se piensa, los líquidos sí tienen una forma natural o propia: la esférica (Fig. 3.7). Solo que cuando el volumen de ellos es considerable, la acción de la fuerza de gravedad hace que pierdan dicha forma.

¡Entonces en una nave que orbita alrededor de la Tierra las porciones de líquido debieran adquirir forma esférica!

Sí, los astronautas han constatado que en la nave los líquidos forman bolas de considerable tamaño.

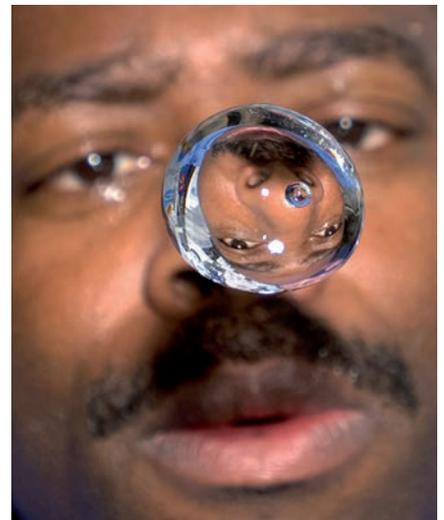


Fig. 3.8. Una gota de agua "flota" libremente frente al astronauta de la NASA Leland Melvin, en el Atlantis.

Ejemplo 3.1. La magnitud de la fuerza de gravedad que actúa sobre una gota, y por tanto la de la fuerza ejercida por el cuerpo en que se apoya, depende de su volumen. Demuestra que al reducirse el tamaño de la gota, su superficie decrece menos que su volumen.

El área de la superficie de una gota esférica de diámetro d es: $A = 4\pi \left[\frac{d}{2} \right]^2$

y su volumen: $V = \frac{4}{3} \pi \left[\frac{d}{2} \right]^3$

Por tanto, el cociente entre esas dos magnitudes es: $\frac{A}{V} = \frac{4\pi \left[\frac{d}{2} \right]^2}{\frac{4}{3} \pi \left[\frac{d}{2} \right]^3} = \frac{6}{d}$

De aquí se ve que con la disminución del diámetro d de la gota aumenta el cociente A/V , es decir, su superficie disminuye menos que su volumen.

Debido a lo anterior, al disminuir el tamaño de la gota, el papel de las fuerzas de gravedad y del apoyo disminuye en mayor medida que el de la tensión de la superficie. Esto permite comprender por qué las gotas pequeñas se aproximan más a la forma esférica que las grandes.

La tendencia de la superficie libre de un líquido a reducir su superficie (Fig. 3.4) puede ser interpretada desde el punto de vista de la energía. Puesto que en la superficie las moléculas están más separadas, la energía de interacción entre ellas es mayor que en el resto del líquido. Y como **todo sistema que se deja libre tiende a disminuir su energía potencial**, entonces la superficie libre tiende a reducirse, pues de ese modo disminuye la energía potencial de interacción entre las moléculas del líquido.

La caída de un cuerpo cuando se suelta en el aire y el regreso de un péndulo que luego de desviarlo de su posición de equilibrio se libera, ilustran la tendencia de los sistemas a disminuir su energía potencial.

La energía potencial de una membrana elástica estirada también disminuye cuando se suelta.



Algo similar es lo que sucede con la superficie libre de los líquidos.

La tendencia de las gotas a adquirir una forma esférica (Fig. 3.6 y 3.7) también puede ser interpretada desde la perspectiva de la energía. Resulta que para un volumen dado de líquido la figura geométrica a que corresponde menor superficie, y en consecuencia menor energía de interacción molecular, es la esfera.

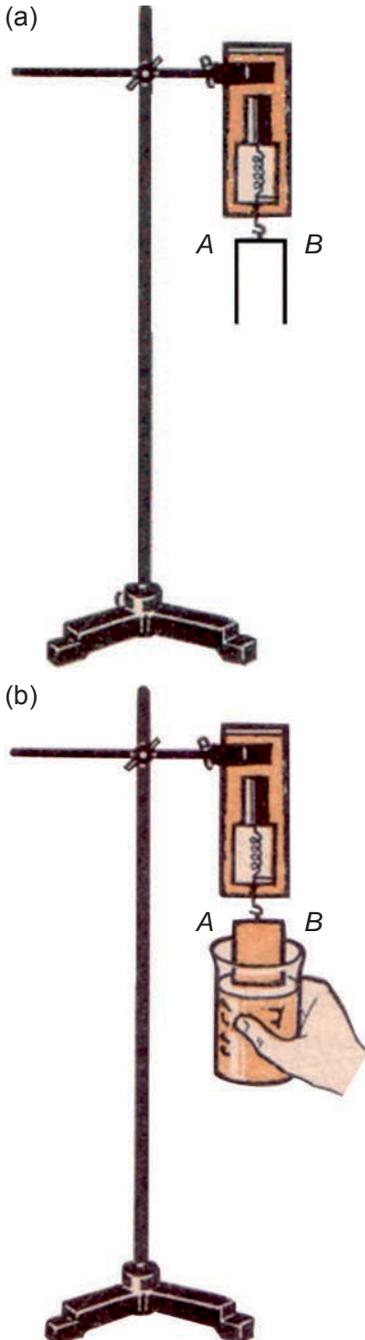


Fig. 3.9. (a) Un marco rectangular de alambre cuelga de un dinamómetro. (b) Se sitúa un recipiente con una solución jabonosa de modo que el marco quede sumergido en ella y luego se baja el recipiente poco a poco.

3.2. Fuerza de tensión superficial.

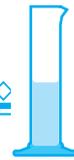
La figura 3.9 ilustra un experimento simple que permite medir la fuerza de tensión superficial de agua jabonosa. Un marco rectangular de alambre, sin lado inferior, cuelga de un dinamómetro sensible (Fig. 3.9a). Debajo del marco se coloca un recipiente con la solución jabonosa, de tal modo que el lado superior del marco, AB , quede sumergido. Si a continuación se hace descender lentamente el recipiente (Fig. 3.9b), en el marco se forma una película de la solución jabonosa y el dinamómetro indica cierta fuerza. La película jabonosa se comporta como una especie de membrana elástica estirada que actúa sobre el lado AB del marco con una fuerza hacia abajo, **la fuerza de tensión superficial**. Sobre el lado AB también se ejerce el peso de la película jabonosa, pero este es despreciable en comparación con la fuerza de tensión superficial. Las películas jabonosas son extremadamente delgadas, ¡pueden ser cinco mil veces más delgadas que un cabello!

Ensayando con marcos de diferentes tamaños es posible comprobar que **la fuerza de tensión ejercida por la película es directamente proporcional a la longitud del lado AB** . Como la película tiene dos capas en contacto con la atmósfera (dos caras), a cada una corresponde la mitad de la fuerza que ella ejerce. Si F es la fuerza de tensión de una de las capas, entonces:

$$F = \sigma L$$

donde σ es una constante de proporcionalidad denominada **coeficiente de tensión superficial**, y L es la longitud del lado AB del marco rectangular.

El experimento de la figura 3.9 revela otro interesante resultado: **la fuerza de tensión superficial no depende del alargamiento de la película jabonosa**. Ella se alarga al hacer descender el recipiente, pero la fuerza que indica el dinamómetro continúa siendo la misma (como la película jabonosa es tan fina su peso tampoco influye en la indicación del dinamómetro). Ésa es una diferencia esencial entre la capa superficial de los líquidos y una membrana elástica: al



estirar ésta crece la fuerza de tensión, mientras que cuando se alarga la superficie libre de un líquido no. ¿Cómo se explica esta diferencia desde el punto de vista molecular?

Al estirar una membrana elástica aumentan las separaciones de sus moléculas y por tanto las fuerzas de atracción entre ellas, lo que explica el crecimiento de la fuerza elástica. En la capa superficial de un líquido, como ya sabes, las moléculas están más separadas que en el resto de él, es como si dicha capa tuviera cierto estiramiento inicial. Sin embargo, su posterior alargamiento no se efectúa a cuenta de una mayor separación de sus moléculas, sino de nuevas moléculas que ingresan a la superficie. Las separaciones entre las moléculas de la capa superficial siguen siendo en promedio las mismas, por lo que la fuerza de tensión no varía.

La ecuación $F = \sigma L$ permite determinar el coeficiente de tensión superficial. Veamos un ejemplo que ilustra esto a partir de un experimento como el de la figura 3.9.

Ejemplo. 3.2. Imagina que en el experimento de la figura 3.9 la fuerza ejercida por la película jabonosa, medida mediante el dinamómetro, resultó equivalente al peso de 0.35 g. Si el lado AB del marco tenía una longitud de 5.0 cm, ¿cuál era el coeficiente de tensión superficial del agua jabonosa?

Para cada una de las dos capas de la película jabonosa:

$$F = \sigma L$$

Y para las dos:

$2F = \sigma 2L$, donde $2F$ es la fuerza medida mediante el dinamómetro.

De aquí que:

$$\sigma = \frac{F_{\text{din}}}{2L} = \frac{(0.35 \times 10^{-3} \text{ kg}) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right)}{2(5.0 \times 10^{-2} \text{ m})} = 3.4 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$





Apoyándote en un esquema, explica con tus propias palabras por qué el coeficiente de tensión superficial aumenta con las fuerzas de atracción entre las moléculas.



El coeficiente de tensión superficial obviamente depende de la naturaleza del líquido (Tabla 3.1). **Mientras más grandes sean las fuerzas de atracción entre sus moléculas, mayores serán la fuerza de tensión y el coeficiente de tensión superficial**, pues mayor es la fuerza con que son atraídas las moléculas de la superficie hacia el interior del líquido (Fig. 3.5).

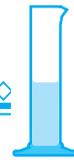
Tabla 3.1. Coeficiente de tensión superficial de algunos líquidos.

Líquido	σ (10^{-2} N/m)
Oro (1 130° C)	110
Mercurio (20° C)	49
Cloruro de sodio (sol. acuosa 6 M, 20° C)	8.3
Agua (20° C)	7.3
Agua (50° C)	6.8
Agua (100° C)	5.9
Glicerina (20° C)	5.9
Aceite de oliva (20° C)	3.3
Petróleo (20° C)	2.6
Alcohol etílico (20° C)	2.3
Éter etílico (20° C)	1.7

¿Por qué será que en la tabla 3.1 el coeficiente de tensión superficial del oro se reporta para una temperatura tan elevada?



El coeficiente de tensión superficial del oro líquido es muy grande (Tabla 3.1) ¿Qué indica esto acerca de las fuerzas de interacción entre sus moléculas (átomos)? Argumenta.



Para determinar el coeficiente de tensión superficial del agua se emplean otros procedimientos distintos al de la figura 3.9, ya que como hemos dicho, a diferencia del agua jabonosa el agua limpia no forma en el marco una película delgada estable. La causa de esto no es que su coeficiente de tensión superficial sea menor que el del agua jabonosa, sino diferencias en sus estructuras moleculares. Para convencerte de que el coeficiente de tensión superficial del agua jabonosa es menor que el del agua limpia, ensaya el efecto de “membrana elástica” que presenta su superficie repitiendo el experimento de la figura 3.1, pero ahora con agua bien jabonosa.

Cuidadosas mediciones muestran que a 20° C el coeficiente de tensión superficial del agua limpia es 7.3×10^{-2} N/m, mientras que al añadirle jabón, o detergente, puede disminuir a 2.4×10^{-2} N/m, es decir unas tres veces. Los valores de los coeficientes de tensión superficial de los líquidos orgánicos, así como los de las soluciones acuosas, generalmente son cercanos a los anteriores (Tabla 3.1). Sin embargo, los correspondientes a los metales líquidos son mucho mayores (Tabla 3.1). Así, el del mercurio es 49×10^{-2} N/m, o sea, es casi 7 veces mayor que el del agua.

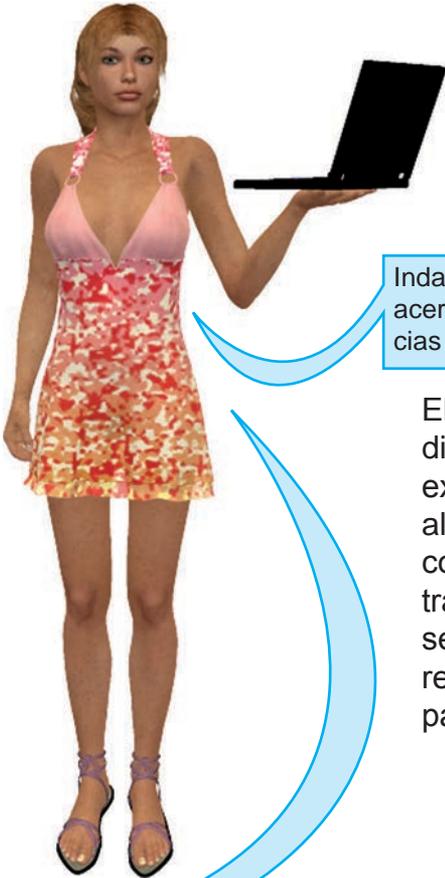
Utiliza los datos del texto y verifica, realizando el cálculo necesario, que el coeficiente de tensión superficial del mercurio es casi 7 veces mayor que el del agua.

¿Qué indica acerca de las fuerzas de interacción molecular el hecho de que el coeficiente de tensión superficial del mercurio sea mucho mayor que el del agua?

La explicación molecular (Fig. 3.5) de la tensión superficial permite comprender su disminución, y la del coeficiente de tensión superficial, con la temperatura. Al elevarse la temperatura aumenta la agitación térmica de las moléculas y disminuye la fuerza de atracción entre ellas. También aumenta la evaporación y, por tanto, la concentración de moléculas en el vapor que está en contacto con la superficie libre. Ambos factores hacen que se reduzca la fuerza neta sobre las moléculas de la superficie hacia el interior del líquido. La tabla 3.1 muestra valores del coeficiente de tensión superficial del agua para varias temperaturas.

Explica con tus propias palabras por qué a mayor temperatura, menor coeficiente de tensión superficial.





Indaga en Internet acerca de las sustancias tensoactivas.

Es posible disminuir el coeficiente de tensión superficial de los líquidos agregándole ciertas sustancias. Tales sustancias se denominan **tensoactivas**. El jabón y otros detergentes disminuyen el coeficiente de tensión superficial del agua, por lo que son sustancias tensoactivas.

El hecho de que el coeficiente de tensión superficial del agua disminuya al añadirle jabón y al aumentar su temperatura explica, en parte, la mayor facilidad del lavado de la ropa al utilizar detergente y calentar el agua. El tejido de la ropa constituye una especie de malla con diminutos orificios a través de los cuales pasa el agua (Fig. 3.9). Mientras menor sea el coeficiente de tensión superficial de esta, menos resistente será su capa superficial y con mayor facilidad pasará a través de los pequeños orificios.



Profundiza con ayuda de alguna enciclopedia o Internet acerca de las propiedades de ciertas moléculas de los detergentes, gracias a las cuales desprenden las partículas de suciedad.

Fig.3.10. El tejido constituye una malla con diminutos orificios a través de los cuales pasa el agua. Mientras menor sea su coeficiente de tensión superficial, menos resistente será su capa superficial y con mayor facilidad pasará a través de los orificios.

Hasta ahora hemos centrado la atención en la **superficie libre** de los líquidos, es decir, aquella en contacto con la atmósfera. En condiciones habituales las fuerzas ejercidas por las moléculas del vapor del propio líquido y el aire sobre las de la superficie tienen un efecto muy pequeño (Fig. 3.5). Pero si el medio que hace contacto con el líquido es un sólido, u otro líquido, la situación es diferente. La atracción de sus moléculas reduce la fuerza neta sobre las moléculas de la superficie del líquido dirigida hacia su interior, e incluso puede hacer que dicha fuerza resulte dirigida hacia el medio.

Por eso, la tensión superficial y el coeficiente de tensión superficial están determinados no solo por la naturaleza del líquido, sino también por la del medio con que hace contacto.

El coeficiente de tensión superficial es en realidad una característica de la superficie de separación entre dos medios y depende de ambos. Así, mientras que el coeficiente para el agua en contacto con su vapor es 7.3×10^{-2} N/m, el de la superficie divisoria de agua y éter es 1.2×10^{-2} N/m (unas 6 veces menor) y el de la superficie entre agua y mercurio 43×10^{-2} N/m (casi 6 veces mayor que el del agua y algo inferior al del mercurio). Cuando se da el coeficiente de tensión superficial de un líquido sin especificar el medio con que hace contacto, como se hizo en la tabla 3.1, se asume que ese medio es su vapor.

¿Cómo explicar, desde el punto de vista molecular, el hecho de que el coeficiente de tensión superficial del agua en contacto con éter sea menor que el del agua en contacto con su vapor?

La superficie de separación entre un líquido y un sólido, u otro líquido, también se diferencia de la que está en contacto con la atmósfera desde el punto de vista de la energía. Hemos visto que en el caso de contacto con la atmósfera las moléculas de la superficie tienen cierto exceso de energía potencial en comparación con las del resto del líquido, sin embargo, si el contacto es con un sólido u otro líquido, dicho exceso de energía es menor, e incluso puede desaparecer.

El coeficiente de tensión superficial constituye un indicador del exceso de energía potencial de interacción de las moléculas de la capa superficial entre dos medios. A mayor coeficiente, mayor exceso de dicha energía.

3.3. Fenómenos de mojado y no mojado

Las situaciones en que un líquido además de estar en contacto con la atmósfera hace contacto con un sólido u otro líquido, son muy frecuentes: al extender líquidos sobre superficies sólidas; cuando se vierte líquido sobre otro en que flota y no se disuelve, digamos aceite en agua o en vinagre; en la zona de la superficie libre junto a las paredes del recipiente. Sin embargo, en unos casos el líquido se extiende sobre la superficie, es decir, la moja, mientras que en otros no.



¿De qué depende el mojado o no de cierta superficie?

Examinemos primero el significado que tienen los conceptos de mojado y no mojado en la ciencia y la tecnología.

Consideremos una gota de líquido que se coloca sobre la superficie horizontal de un sólido (Fig. 3.11). Comúnmente adopta una forma curva, denominada **menisco**, palabra que procede del griego y significa “media luna”.

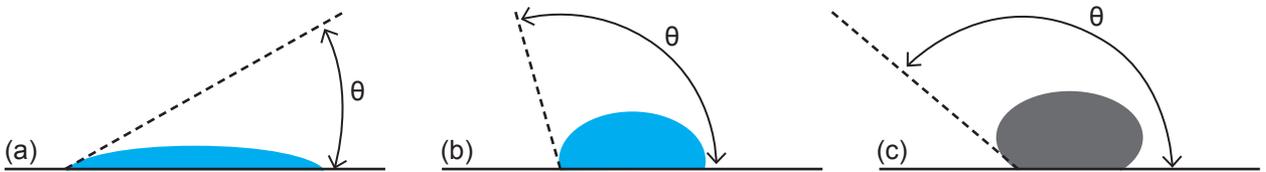


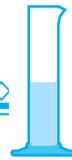
Fig. 3.11. Esquema de gotas con distintos ángulos de contacto: (a) agua sobre vidrio no limpio; (b) agua sobre vidrio engrasado, o sobre parafina; (c) mercurio sobre vidrio.

El ángulo θ formado entre el menisco y la superficie sólida (Fig. 3.11) se llama **ángulo de contacto**, o **interfacial**, y depende del líquido y el sólido que hacen contacto. Así, para una gota de agua común colocada sobre una superficie de vidrio dicho ángulo es agudo. Para una de agua situada sobre una superficie engrasada o sobre parafina, el ángulo aumenta y puede incluso ser mayor de 90° y para una de mercurio sobre vidrio puede ser de 140° . Si el **ángulo de contacto** es agudo (Fig. 3.11a) se dice que **el líquido moja** al sólido y si es obtuso (Fig. 3.11 b y c), que **no lo moja**. En el caso límite que el ángulo es 0° se dice que el líquido **moja perfectamente**, o **completamente**, lo cual significa que se extiende por la superficie sólida en forma de una delgada película. El tetracloruro de carbono, por ejemplo, moja perfectamente al vidrio. El ángulo de contacto entre el **agua pura** y el **vidrio bien limpio** no es 0° , pero es próximo a dicho valor.



¿Por qué el tetracloruro de carbono resulta un líquido conveniente para limpiar las lentes de vidrio de los microscopios ópticos?

¿Cómo se explican las diferencias en las situaciones anteriormente descritas desde el punto de vista de las fuerzas intermoleculares?



Ya sabes que la fuerza neta sobre las moléculas de la superficie de un líquido en contacto con la atmósfera está dirigida hacia el interior (Fig. 3.5) y que esto da lugar a la formación de una capa que se comporta como una especie de membrana de goma estirada, la cual tiende a contraerse y darle al líquido forma esférica. Por su parte, la fuerza neta sobre las moléculas de la capa de la gota en contacto con el sólido puede estar dirigida tanto hacia el interior de la gota como hacia el sólido.

Si la atracción de las moléculas del líquido es mayor que las del sólido, entonces la fuerza neta sobre las moléculas de la capa entre ellos está dirigida hacia el interior del líquido y, similarmente a la que hace contacto con la atmósfera se comporta como una membrana elástica estirada que tiende a contraerse y **el líquido no moja**. Ése es el caso de una gota de mercurio situada sobre vidrio (Fig. 3.11c). Pero si por el contrario, **la atracción de las moléculas del sólido resulta mayor que la de las del propio líquido**, entonces la capa de contacto entre ellos tiende a extenderse y **el líquido moja**. Ése es el caso de una gota de agua colocada sobre vidrio (Fig. 3.11a).

El ángulo de contacto entre la superficie de una pequeña gota de agua colocada sobre parafina es 105° , ¿qué fuerzas de atracción serán mayores, entre las moléculas de agua, o entre ellas y las de parafina?

Algo parecido sucede cuando se vierte un líquido sobre otro en el que flota. Así, una gotita de aceite de oliva dejada caer sobre la superficie de agua jabonosa o vinagre adquiere forma de lenteja, pero en agua pura se extiende en forma de una mancha circular.

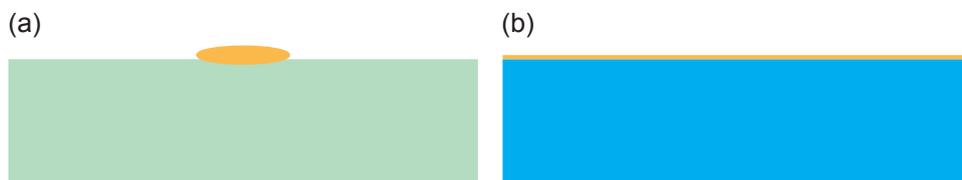


Fig. 3.12. Una gotita de aceite de oliva adquiere forma de lenteja en agua jabonosa o vinagre (a), pero se extiende sobre la superficie de agua pura (b).





En los apartados anteriores vimos que la superficie de los líquidos en contacto con la atmósfera tiende a reducirse y que desde el punto de vista de la energía esto puede ser interpretado como una **tendencia a disminuir la energía potencial de interacción entre las moléculas del líquido**. Sin embargo, cuando una gotita de líquido se extiende sobre un sólido u otro líquido (Fig. 3.12a), crece su área de contacto con ellos y con la atmósfera, por lo que aumenta la energía potencial de interacción de buena parte de sus moléculas. ¿Cómo explicar ese aumento de energía potencial?

Profundiza en Internet acerca de las sustancias humectantes.

Debes tener en cuenta que las superficies del sólido o el otro líquido con los que está en contacto el líquido dado, tienen una parte en contacto con la atmósfera. Las moléculas de esa parte poseen mayor energía de interacción que el resto. Por eso, cuando el líquido dado se extiende, crece la energía potencial de interacción de sus moléculas, pero disminuye la del sólido o el otro líquido sobre el que se extiende.

El mojado es de gran importancia en la técnica y la vida diaria. En la propiedad que tiene el estaño de mojar al cobre se basa la soldadura con él de alambres y piezas de cobre y latón. La imposibilidad de soldar aluminio empleando estaño se debe a que éste no lo moja.

Se requiere de un buen mojado durante el revelado de fotografías, el barnizado de superficies, el encolado de piezas, la extinción de incendios y, por supuesto, durante el lavado de la ropa, a lo cual ya nos hemos referido en el apartado 3.2. Agregando al líquido dado la sustancia tensoactiva adecuada se reduce su coeficiente de tensión superficial y se logra un mejor mojado. Las sustancias que agregadas a otra hacen que ésta moje mejor, se denominan **humectantes**.



Probablemente has observado que la superficie libre del agua contenida en un recipiente de vidrio se curva junto a la pared. Puesto que el agua moja la pared tiende a extenderse por ella, aún cuando sea vertical. Claro está, debido a la fuerza de gravedad, la extensión se ve muchísimo más limitada que cuando la superficie es horizontal. El efecto de subida del agua por la pared, combinado con el peso de la porción que asciende y tira hacia debajo de la “membrana” que representa la superficie libre, provoca la curvatura de ésta.

Si un líquido moja la pared del recipiente (por ejemplo, en un recipiente de vidrio), la curvatura del menisco es hacia dentro (Fig. 3.13a) y si no la moja (por ejemplo, mercurio en un recipiente de vidrio), entonces la curvatura es hacia fuera (Fig. 3.13b).

Cuando el mojado es perfecto, el menisco es paralelo a la pared en los puntos de contacto con ella (Fig. 3.14). Muy próxima a esa situación es la del agua pura en un recipiente de vidrio bien limpio.

La curvatura de los líquidos junto a las paredes de los recipientes debe ser tenida en cuenta al medir sus volúmenes mediante probetas y vasos graduados (Fig. 3.15). De lo contrario, si el líquido moja la pared pudiera reportarse un resultado mayor que el real y si no la moja, menor.

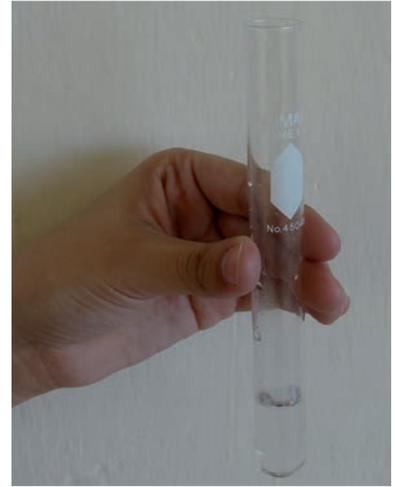
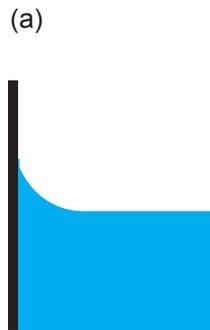


Fig. 3.13. (a) Cuando un líquido moja la pared del recipiente (como el agua), su superficie libre se curva hacia dentro junto a la pared, (b) cuando no la moja (como el mercurio) se curva hacia fuera.

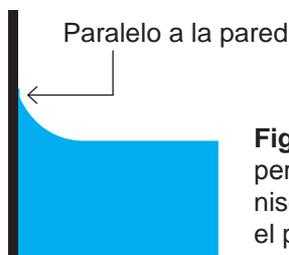


Fig. 3.14. Cuando el mojado es perfecto, la superficie del menisco es paralelo a la pared en el punto de contacto con ella.

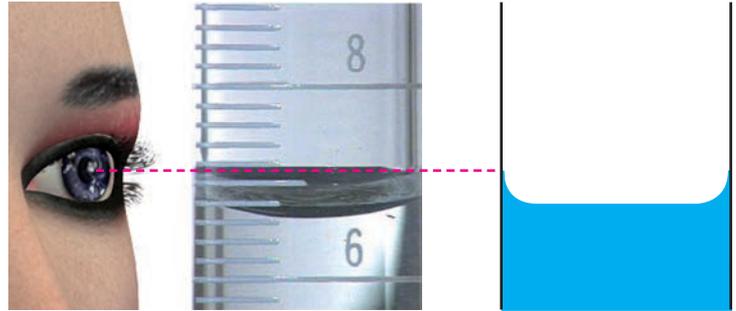


Fig. 3.15. Al leer en una probeta el volumen de un líquido como en la figura, se reportaría un resultado mayor que el real.

Argumenta la afirmación del texto de que el ascenso del líquido por la pared, aumenta su área de contacto con la atmósfera y la pared.

El ascenso de cierta porción de líquido por la pared del recipiente (Fig. 3.15a) no solo significa que aumenta su área de contacto con otros medios (atmósfera y pared) y, por tanto, su energía de interacción molecular, sino además su energía potencial gravitatoria. ¿Cómo es posible esto?

¿Por qué en el texto se afirma que cuando un líquido se curva junto a la pared, aumenta su energía potencial gravitatoria?



Para comprender lo que sucede, nuevamente debes tener en cuenta al otro medio en contacto con el cuerpo, además de la atmósfera, en este caso la pared. Cuando el líquido se extiende por la pared, hace que disminuya la energía de interacción molecular de su superficie en contacto con la atmósfera. Es precisamente a cuenta de esa disminución que tienen lugar los aumentos de la energía potencial gravitatoria y de la energía de interacción molecular del líquido.

En un recipiente de vidrio con mercurio, la superficie libre de éste se curva como se muestra en la figura 3.10b. ¿Qué sucede en este caso con la energía potencial gravitatoria y la energía potencial de interacción molecular?

3.4. Capilaridad.

¿En qué consiste el fenómeno de la capilaridad?

Si el recipiente que contiene líquido es estrecho, entonces el menisco formado junto a las paredes puede abarcar toda la superficie libre (Fig. 3.16).

Si el recipiente estrecho es un **tubo**, entonces el menisco tiene forma esférica. Cuando el tubo es tan estrecho que su radio es comparable con el del menisco se denomina **capilar**, término que proviene del latín “capillus” y que significa pelo, o cabello.

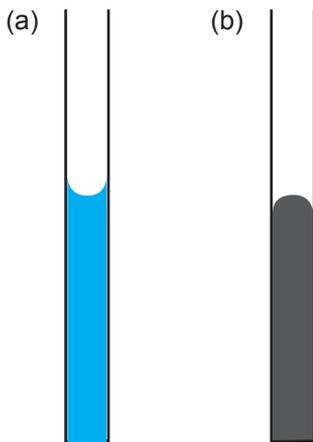


Fig. 3.16. Cuando el tubo es estrecho, el menisco que se forma junto a las paredes puede abarcar toda su superficie libre: (a) líquido que moja, (b) líquido que no moja.

¡Ah, entonces los “capilares” del sistema circulatorio se denominan de ese modo debido a que son muy estrechos!

En efecto, el diámetro de ellos está entre 0.2 mm y 0.01 mm.



Al introducir un capilar en un líquido que lo moja (por ejemplo un tubo de vidrio estrecho en agua), el líquido tiende a ascender por la pared, elevándose por encima de su nivel en el exterior (Fig. 3.17a). Si el líquido no moja el capilar (por ejemplo un tubo de vidrio estrecho en mercurio), entonces queda por debajo de su nivel en el exterior (Fig. 3.17b). Mientras menor sea el radio del tubo, mayor es la altura, o descenso, del líquido en el capilar.



Se denomina capilaridad al fenómeno de ascenso o descenso de los líquidos en tubos, y en general, cavidades estrechas.

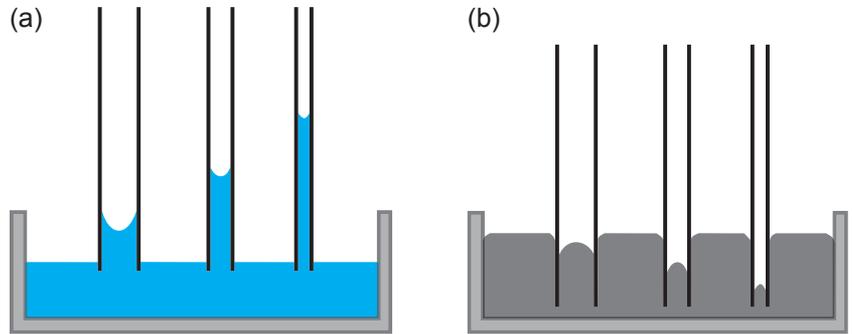


Fig. 3.17. Capilares de vidrio (a) en un líquido que lo moja, por ejemplo agua y (b) en un líquido que no lo moja, por ejemplo mercurio.

Como ya sabes, el menisco del líquido se comporta como una especie de membrana elástica. Cuando el líquido moja el capilar, el menisco sostiene el peso del líquido que se ha elevado (Fig. 3.17a) y cuando no lo moja, presiona al líquido hacia abajo haciendo que su nivel descienda. Si el líquido moja perfectamente, entonces el menisco en los puntos de contacto con la pared es paralelo a ella. En ese caso el peso de la columna líquida equivale a una fuerza paralela a la pared, distribuida en toda la circunferencia del borde del menisco (\vec{F}) y que tira de él hacia abajo (Fig. 3.18). Esta fuerza es equilibrada por la tensión de la capa superficial del menisco, también distribuida a través de su borde (\vec{T}).



Fig. 3.18. Si el líquido moja perfectamente la pared, el peso del líquido que se ha elevado equivale a una fuerza paralela a la pared, distribuida por todo el borde del menisco (\vec{F}). Esta fuerza es equilibrada por la tensión de la capa superficial del menisco, también distribuida a través de su borde (\vec{T}).

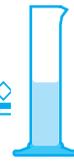
El peso de la columna líquida, es decir, la fuerza con que tira del menisco hacia abajo, es numéricamente igual a mg , donde m es la masa de la columna líquida. Por consiguiente:

$$mg = \rho Vg = \rho \pi r^2 hg$$

h es la altura de la columna líquida, ρ su densidad y r el radio del tubo.

Por su parte, la fuerza de tensión superficial es σL , donde σ es el coeficiente de tensión superficial del líquido y L la longitud de la circunferencia que forma el borde del menisco alrededor del tubo. Por tanto:





$$\sigma L = \sigma 2\pi r$$

Y como el peso de la columna líquida ($\rho\pi r^2 hg$) es equilibrado por la fuerza de tensión de la capa superficial del menisco ($\sigma 2\pi r$), se tiene:

$$\rho\pi r^2 hg = \sigma 2\pi r$$

De donde:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr}$$

Esta ecuación concuerda con el resultado obtenido en la experiencia de la figura 3.17a: la altura del líquido en un capilar aumenta con la disminución de su radio. También muestra que mientras mayor sea el coeficiente de tensión superficial del líquido mayor será su elevación.

La ecuación anterior también puede resolverse para σ :

$$\sigma = \frac{h\rho gr}{2}$$

Observa que si se conocen la densidad ρ del líquido, su altura h en el capilar y el radio r de éste, entonces a partir de esa ecuación es posible determinar el coeficiente de tensión superficial σ del líquido. Es necesario tener en cuenta que **la fórmula anterior es válida solo para líquidos que mojan perfectamente la pared del tubo**. Puesto que el agua pura moja casi perfectamente al vidrio limpio, es posible utilizar un capilar de vidrio y dicha fórmula para determinar su coeficiente de tensión superficial.

Según la fórmula obtenida para la elevación de un líquido en un capilar, ¿qué debe elevarse a mayor altura, el agua o el alcohol? Argumenta.





Ejemplo 3.3. El extremo de un tubo capilar de vidrio de 1.0 mm de diámetro se introduce en agua a 20° C. ¿A qué altura sube el agua en el capilar?

La altura a que sube el agua en el capilar viene dada por la fórmula:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$$

Según la tabla 3.1, el coeficiente de tensión superficial del agua a 20° C es:

$$\sigma = 7.3 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

El radio del tubo es:

$$r = 0.50 \text{ mm} = 0.50 \times 10^{-3} \text{ m}$$

y la densidad del agua, como sabes es:

$$\rho = 1.0 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Por consiguiente,

$$h = \frac{2 \left(7.3 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}} \right)}{\left(1.0 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) \left(0.5 \times 10^{-3} \text{ m} \right)} = 0.030 \text{ m} = 3.0 \text{ cm}$$



Ejemplo 3.4. Cierta líquido ascendió por un tubo capilar 5.5 cm, mientras que el agua a 20° C lo hizo, 14.0 cm. La densidad del líquido es $8.0 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$. ¿Cuál es su coeficiente de tensión superficial? Considera que tanto el agua como el otro líquido mojan perfectamente el capilar.

Puesto que ambos líquidos mojan perfectamente el capilar, es posible utilizar la fórmula

$$\sigma = \frac{h\rho gr}{2}$$

$$\text{Para el agua: } \sigma_a = \frac{h_a \rho_a g r}{2}$$

$$\text{Para el otro líquido: } \sigma_L = \frac{h_L \rho_L g r}{2}$$

Dividiendo esta última ecuación entre la primera:

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_a} = \frac{\frac{h_L \rho_L g r}{2}}{\frac{h_a \rho_a g r}{2}} = \frac{h_L \rho_L}{h_a \rho_a}$$

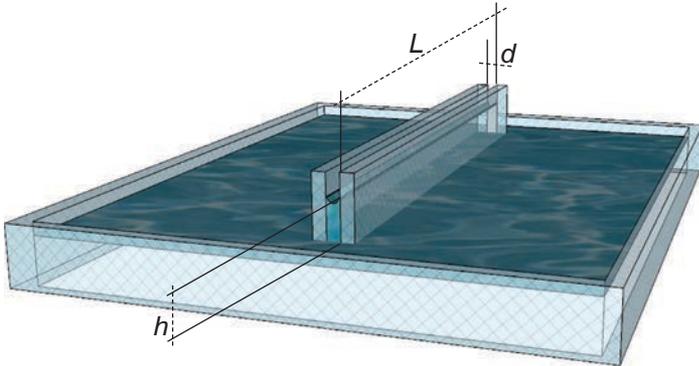
De aquí que:

$$\sigma_L = \sigma_a \left(\frac{h_L \rho_L}{h_a \rho_a} \right) = \left(7.3 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}} \right) \left(\frac{(5.5 \text{ cm}) \left(8.0 \times 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{(14.0 \text{ cm}) \left(1.0 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} \right) = 2.3 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$





Ejemplo 3.5. En una bandeja con agua destilada se colocan dos láminas de vidrio bien limpias, una paralela a la otra. ¿A qué altura subirá el agua entre las láminas si la separación entre ellas es 1.0 mm?



Como el agua es destilada y el vidrio está bien limpio, entonces puede suponerse que el mojado es perfecto y, en consecuencia, que el menisco es paralelo a las láminas en los puntos de contacto con ellas. En este caso el peso de la porción de agua que se ha elevado equivale a una fuerza paralela a la pared distribuida a lo largo del borde del menisco, es decir, a lo largo de su longitud L . Esta fuerza es equilibrada por la tensión de la capa superficial del menisco, también distribuida a lo largo de su borde.

El peso de la porción líquida entre las láminas, es decir, la fuerza con que tira del menisco hacia abajo, es numéricamente igual a mg , donde m es la masa de la porción. Por tanto:

$$mg = \rho Vg = \rho Lhdg$$

Por su parte, la fuerza de tensión superficial es $2\sigma L$ (el 2 se debe a que el agua hace contacto con dos láminas). De aquí que:

$$\rho Lhdg = 2\sigma L$$

De donde:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g d}$$

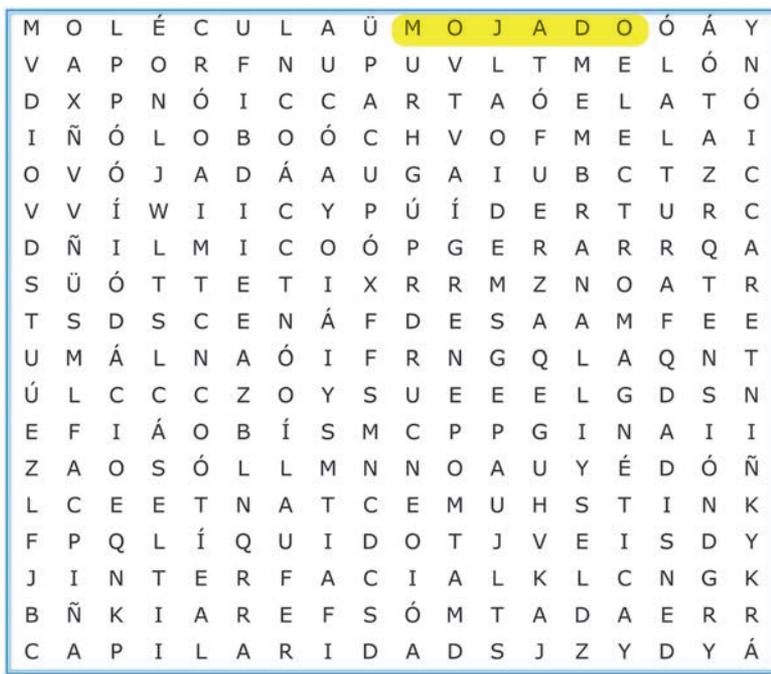
Sustituyendo los datos en esta ecuación se tiene:

$$h = \frac{2 \left(7.3 \times 10^{-2} \frac{\text{N}}{\text{m}} \right)}{\left(1.0 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) \left(1.0 \times 10^{-3} \text{ m} \right)} = 1.5 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.5 \text{ cm}$$

3.5. Actividades de sistematización y consolidación

3.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.



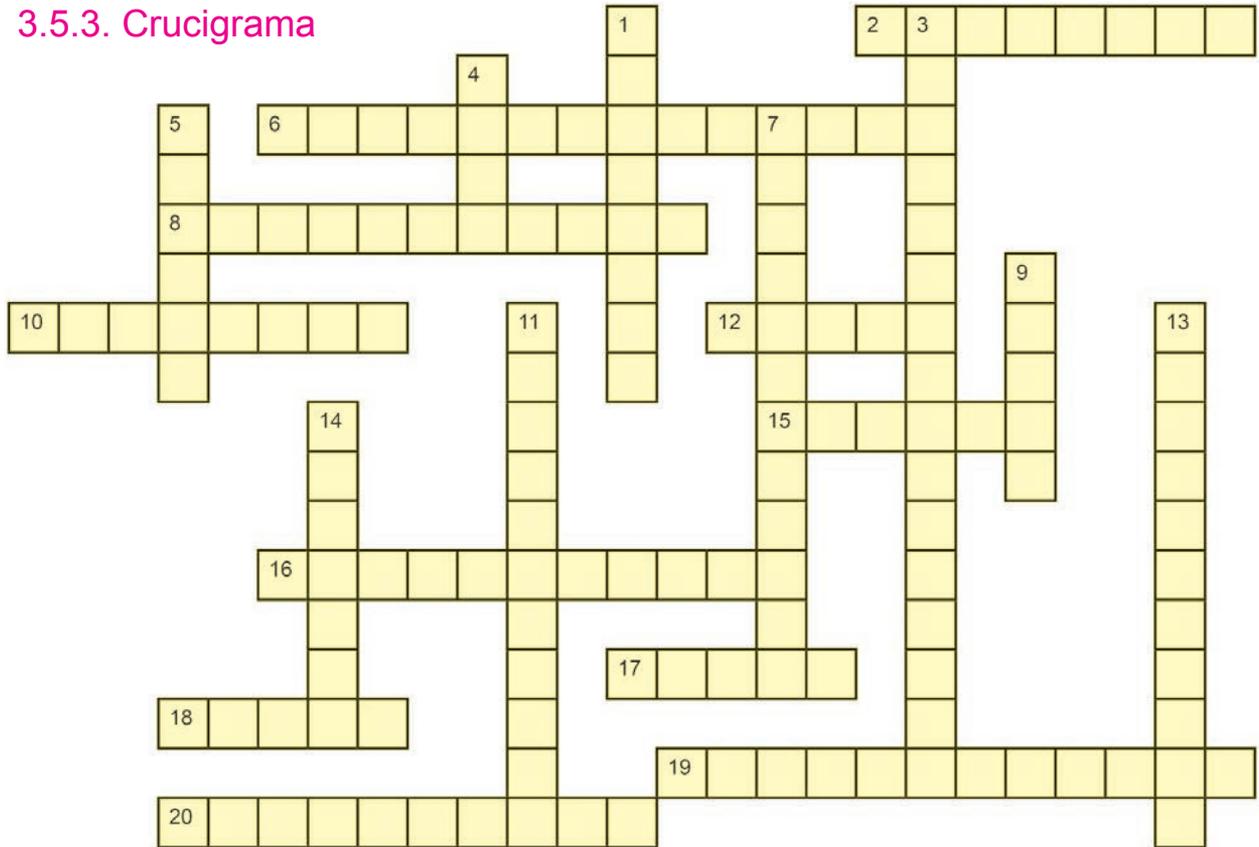
- | | | |
|------------------|-------------|-------------|
| Altura | Humectante | Peso |
| Atmósfera | Interacción | Potencial |
| Atracción | Interfacial | Sólido |
| Capilaridad | Líquido | Superficial |
| Densidad | Medio | Tensión |
| Elástica | Membrana | Tensoactivo |
| Electromagnética | Menisco | Vapor |
| Energía | Mojado | |
| Fuerza | Molécula | |



3.5.2. Conexión de conceptos e ideas

1. Fuerza responsable de que una gota que cae tenga forma aproximadamente esférica. () Aumento de la concentración de moléculas en su vapor
2. Origen de la fuerza de tensión superficial. () De contacto o interfacial
3. Término comúnmente utilizado para designar la superficie de los líquidos en contacto con la atmósfera. () El líquido asciende por encima de su nivel en el exterior
4. Objeto con el que tiene semejanza la superficie libre de un líquido. () El líquido desciende por debajo de su nivel en el exterior
5. Fenómeno aparentemente contradictorio que tiene lugar debido a la fuerza de tensión superficial. () Energía potencial
6. Fenómeno común originado por la fuerza de tensión superficial. () Energía potencial de interacción molecular
7. Característica de la superficie libre de los líquidos debida a la tensión superficial. () Flotación de una aguja de coser en agua
8. Sentido de la fuerza neta sobre las moléculas de la superficie libre de un líquido. () Formación de gotas a la salida de un gotero
9. Tipo de energía que posee en exceso la superficie libre de un líquido. () Hacia su interior
10. Magnitud característica de un sistema que tiende a disminuir cuando el sistema se deja libre. () Interacción molecular
11. Dos de los factores que determinan el valor del coeficiente de tensión superficial. () Membrana elástica estirada
12. Nombre del ángulo formado entre el menisco de una gota y la superficie del sólido en que se encuentra. () Naturaleza del líquido y del medio con que hace contacto
13. Tipo de mojado cuando un líquido se extiende sobre la superficie de un sólido u otro líquido en forma de una fina película. () Paralelo a la pared
14. Fuerza que es compensada por la de tensión del menisco de un líquido que ha alcanzado cierta altura en un capilar. () Perfecto o completo
15. Uno de los factores que explica la disminución del coeficiente de tensión superficial de un líquido al aumentar su temperatura. () Peso de la columna líquida
16. Característica del menisco de un líquido en los puntos de contacto con la pared del recipiente cuando el mojado es perfecto. () Proporcionalidad directa
17. Ocurre al introducir el extremo de un capilar en un líquido que no lo moja. () Proporcionalidad inversa
18. Ocurre cuando se introduce el extremo de un capilar en un líquido que lo moja. () Superficie libre
19. Tipo de relación entre la altura que alcanza un líquido en un capilar y su densidad, suponiendo el resto de las condiciones constantes. () Tendencia a reducirse
20. Tipo de relación entre la altura que alcanza un líquido en un capilar y el coeficiente de tensión superficial, suponiendo el resto de las condiciones constantes. () Tensión superficial

3.5.3. Crucigrama



Horizontales

- 2. Líquido que no moja el vidrio.
- 6. Adjetivo que pudiera calificar el espesor, y por tanto el peso, de una película jabonosa.
- 8. Magnitud cuyo aumento provoca la disminución del coeficiente de tensión superficial de un líquido.
- 10. Una de las magnitudes de las que depende la elevación de un líquido en un capilar.
- 12. Tipo de ángulo de contacto entre el menisco de una gota y una superficie sólida a la que moja.
- 15. Se dice del fenómeno que tiene lugar cuando el ángulo entre el menisco de un líquido y la superficie sólida con que hace contacto es agudo.
- 16. Tipo de variación que experimenta la energía de interacción molecular de la capa superficial de un líquido cuando su extensión disminuye.
- 17. Adjetivo que compara el coeficiente de tensión superficial del agua jabonosa con el del agua limpia.
- 18. Adjetivo que compara la atracción entre las moléculas de un líquido y un sólido al que no moja con la atracción entre las propias moléculas del líquido.
- 19. Nombre que reciben las sustancias que agregadas a un líquido reducen su coeficiente de tensión superficial.
- 20. Nombre que recibe una sustancia que agregada a otra hace que esta moje bien.

Verticales

- 1. Forma que tiende a adoptar una porción de líquido cuando el efecto debido a su peso es despreciable.
- 3. Naturaleza de la fuerza de tensión superficial.
- 4. Líquido que moja bien el vidrio limpio.
- 5. Tipo de ángulo de contacto entre el menisco de una gota y una superficie sólida a la que moja.
- 7. Magnitud que, a diferencia de lo que ocurre con la fuerza elástica, no influye en la tensión de la capa superficial de un líquido.
- 9. Adjetivo que compara la atracción entre las moléculas de un líquido y un sólido al que moja, con la atracción entre las propias moléculas del líquido.
- 11. Tipo de variación que experimenta la energía de interacción molecular de la superficie de un sólido o líquido, cuando sobre ella se extiende cierto líquido.
- 13. Fenómeno de ascenso o descenso de líquidos en tubos, y en general, cavidades estrechas.
- 14. Nombre que recibe la curvatura de la superficie de un líquido.

3.5.4. Actividades de repaso

1. Comenzando con el concepto de tensión superficial, confecciona un diagrama que conecte y ramifique frases y palabras como las siguientes: tendencia a reducir la superficie, fuerza de atracción, coeficiente de tensión superficial, tensoactivos, mojado, capilaridad.
2. A modo de síntesis del capítulo intenta responder, resumidamente, las preguntas clave planteadas al iniciarlo: ¿En qué fenómenos se hace notar la fuerza de tensión superficial? ¿Cómo se origina dicha fuerza? ¿Qué son los tensoactivos? ¿De qué depende el mojado o no de cierta superficie por un líquido? ¿En qué consiste el fenómeno de la capilaridad?

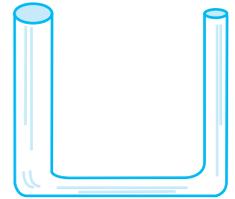


3. ¿Saldría el agua de un gotero medicinal en forma de gotas si no existiera la fuerza de tensión superficial? Argumenta.
4. Un procedimiento para elaborar pequeños perdigones de plomo consiste en dejar caer el plomo fundido desde una altura considerable en un baño de agua fría. Explica por qué los perdigones adquieren forma esférica.
5. En una solución de alcohol y agua se introduce una cuchara con aceite de oliva. ¿Qué forma adquiere el aceite si su densidad es igual a la de la solución?
6. ¿A cuenta de qué energía se produce la elevación de un líquido en un tubo capilar?
7. Al introducir el extremo de un tubo capilar en mercurio, éste desciende por debajo de su nivel en el exterior y, en consecuencia, disminuye su energía potencial gravitatoria. ¿A dónde va a parar esa energía?
8. Una mecha funciona como un conjunto de vasos capilares a través de los cuales asciende el agua. ¿Podría emplearse para subir agua a un depósito que está a cierta altura? Argumenta.



9. Imagina que las láminas de vidrio del ejemplo 3.5 se juntan por un extremo, pero por el otro quedan separadas un milímetro. ¿Qué sucede con el nivel del agua entre las láminas? Argumenta.

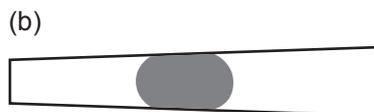
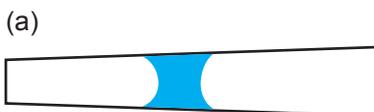
10. En dos tubos estrechos de vidrio comunicados entre sí se vierte líquido. ¿Cómo se dispondrá su nivel en los tubos si el líquido es: a) agua, b) mercurio?



11. A una misma temperatura, ¿qué alcanzará mayor altura en un capilar de vidrio, el agua o el alcohol?

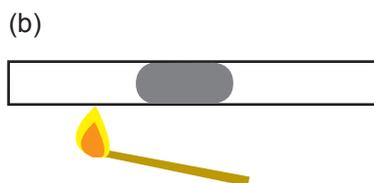
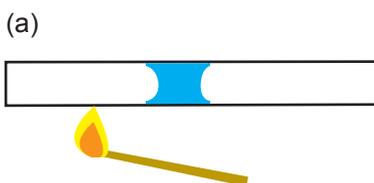
12. ¿Qué alcanzará mayor altura en un capilar, el agua a 20° C o a 50° C? Argumenta.

13. ¿Hacia dónde se desplazará una gota en un tubo capilar cónico de vidrio colocado horizontalmente, si la gota es: a) de agua, b) de mercurio?



14. En la tierra comúnmente se forman numerosos canalitos estrechos. Al remover su capa superficial los canalitos se hacen más anchos en ella. ¿Por qué esto contribuye a conservar la humedad de las capas inferiores de tierra?

15. En un tubo estrecho de vidrio colocado horizontalmente hay una gota de líquido. El tubo se calienta por uno de los lados de la gota, ¿qué sucede con ella si es de: a) agua, b) mercurio?



16. Cuando una gota de grasa cae sobre una tela, puede contribuir a su eliminación aplicar una plancha caliente por un lado y un papel absorbente por el otro. ¿Cómo se explica esto?

17. En un capilar colocado verticalmente el agua asciende 10 cm sobre su nivel en el exterior. ¿A qué altura se elevará si el tubo se inclina 45°?





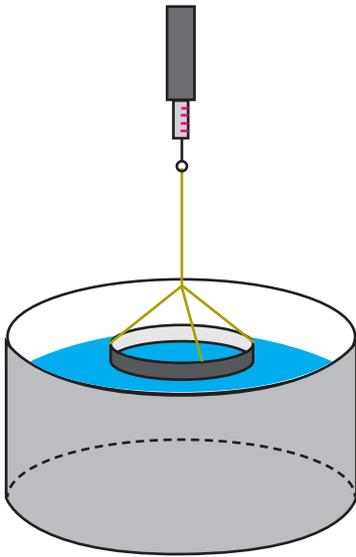
3.5.5. Ejercicios de repaso

1. En un experimento similar al de la figura 3.9, el lado AB del marco es de 10.0 cm y al hacer descender el recipiente el dinamómetro indicaba 5.0×10^{-3} N. ¿Cuál era el coeficiente de tensión superficial del agua jabonosa utilizada?

Respuesta: 2.5×10^{-2} N/m

2. Uno de los procedimientos más comunes para determinar la tensión superficial de un líquido consiste en sumergir en él un anillo de aluminio y luego hacer descender el recipiente lentamente. El borde del anillo es muy afilado, de tal modo que cuando el agua asciende por su superficie, el peso de la porción que se eleva resulta despreciable. En cierto experimento la fuerza por encima del peso del anillo que indicó el dinamómetro fue 2.2×10^{-2} N. Si el anillo tenía 5.0 cm de radio, ¿qué coeficiente de tensión superficial se determinó para el líquido?

Respuesta: 3.5×10^{-2} N/m



3. Un cubo de arista 5.2 cm flota en agua. Si el agua moja perfectamente al cubo, ¿cuál es la fuerza que debido a ello actúa hacia abajo sobre él?

Respuesta: 1.5×10^{-2} N

4. Un tubo de diámetro 6.0 mm se introduce verticalmente por uno de sus extremos en agua a 20° C, ¿a qué altura se elevará el agua?

Respuesta: 5.0×10^{-3} m = 5.0 mm

5. Si en cierto tubo capilar el agua a 20° C se eleva 2.2 cm, ¿cuánto se elevará el alcohol a esa misma temperatura?

Respuesta: 0.87 cm

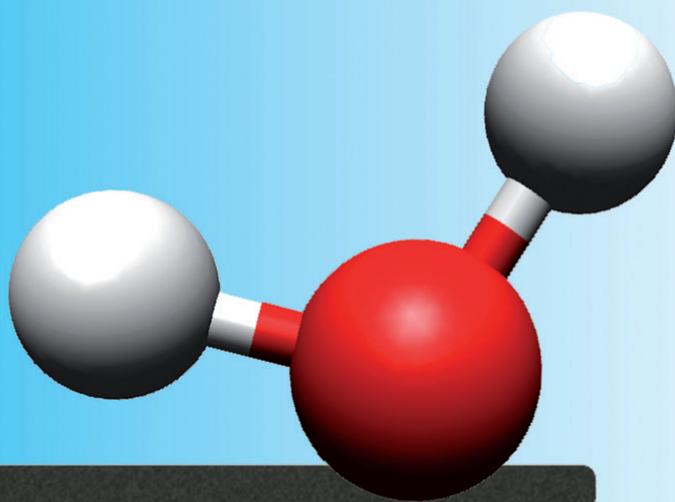
6. En un tubo capilar en que el agua se eleva 6.1 cm, cierto líquido de densidad 9.2×10^2 kg/m³ lo hizo 3.0 cm, ¿cuál es el coeficiente de tensión superficial de ese líquido?

Respuesta: 3.3×10^{-2} N/m

7. Cierta líquido se eleva 4.0 cm en un tubo capilar de 0.30 mm de diámetro, y 9.0 cm en otro, ¿cuál es el diámetro de este otro capilar?

Respuesta: 0.13 mm

4 Teoría cinético-molecular y leyes de los gases





4. Teoría cinético-molecular y leyes de los gases

Comenzamos el curso examinando las ideas básicas de la **teoría cinético-molecular** y después las hemos estado utilizando para explicar, desde el punto de vista microscópico, diversas propiedades y leyes. Pero hasta ahora esas explicaciones han sido solo **cualitativas**.

Es en este capítulo, dedicado a los gases, que emplearemos la teoría cinético-molecular **para dar explicaciones cuantitativas**. Ello se ve facilitado en los gases en comparación con los sólidos y líquidos, debido a que las interacciones entre sus moléculas tienen mucha menor importancia.

Concretamente, la tarea fundamental en este capítulo consistirá en encontrar **las ecuaciones** que relacionan a la **presión** y la **temperatura** de los gases (magnitudes que pueden ser medidas directamente) con características microscópicas de ellos, como la **velocidad** y la **energía cinética** de las moléculas. De estas ecuaciones deduciremos luego las que relacionan entre sí a la presión, la temperatura y el volumen de un gas, comúnmente conocidas como **leyes de los gases**. El hecho de que los experimentos confirmen estas leyes, que han sido obtenidas teóricamente, reafirmará la validez de la teoría cinético-molecular, al menos en su aplicación a los gases.

Expresa con tus propias palabras en qué consiste la tarea fundamental en este apartado.

Las preguntas clave de este capítulo son:

¿Qué relación hay entre la presión ejercida por un gas y la velocidad de sus moléculas? ¿Cómo se relaciona la temperatura de un gas con la energía cinética de sus moléculas? ¿Cómo obtener teóricamente las relaciones entre presión, temperatura y volumen de un gas, es decir, las denominadas leyes de los gases?



4.1. Ecuación básica de la teoría cinético-molecular de los gases

En los capítulos anteriores hemos visto que utilizar la teoría cinético-molecular para explicar cualitativamente una serie de propiedades de los cuerpos, no presenta grandes dificultades. Sin embargo, obtener **ecuaciones** que conecten magnitudes macroscópicas de los cuerpos, es decir, medidas en los experimentos (como presión y temperatura), con características microscópicas de ellos (como la masa y la velocidad de las moléculas) es, en general, una tarea sumamente compleja. Por eso nos limitaremos a obtener dichas ecuaciones en el caso de los gases y, además, para **un modelo muy simple** de ellos, habitualmente denominado **gas ideal**, o **gas perfecto**.

4.1.1. Modelo de gas ideal

Un gas ideal es un modelo en el cual: 1) las moléculas son consideradas partículas (se hace abstracción de la estructura, deformación y rotación de ellas), 2) la separación promedio de ellas es mucho mayor que sus dimensiones y 3) no interactúan entre sí a distancia.

¿Por qué al caracterizar el modelo de gas ideal en el texto se dice separación “promedio” entre las moléculas? ¿Qué significa esto?

Esclarezcamos las características del modelo de gas ideal mediante un modelo mecánico (Figura 4.1). En el aparato de la figura, cierta cantidad de bolitas son forzadas a moverse continuamente haciendo vibrar el fondo del recipiente que las contiene. Las bolitas solo interactúan (con “fuerzas de repulsión”) al chocar, o sea, cuando las distancias entre sus centros son iguales a sus diámetros. Debido a esas interacciones el movimiento es desordenado.

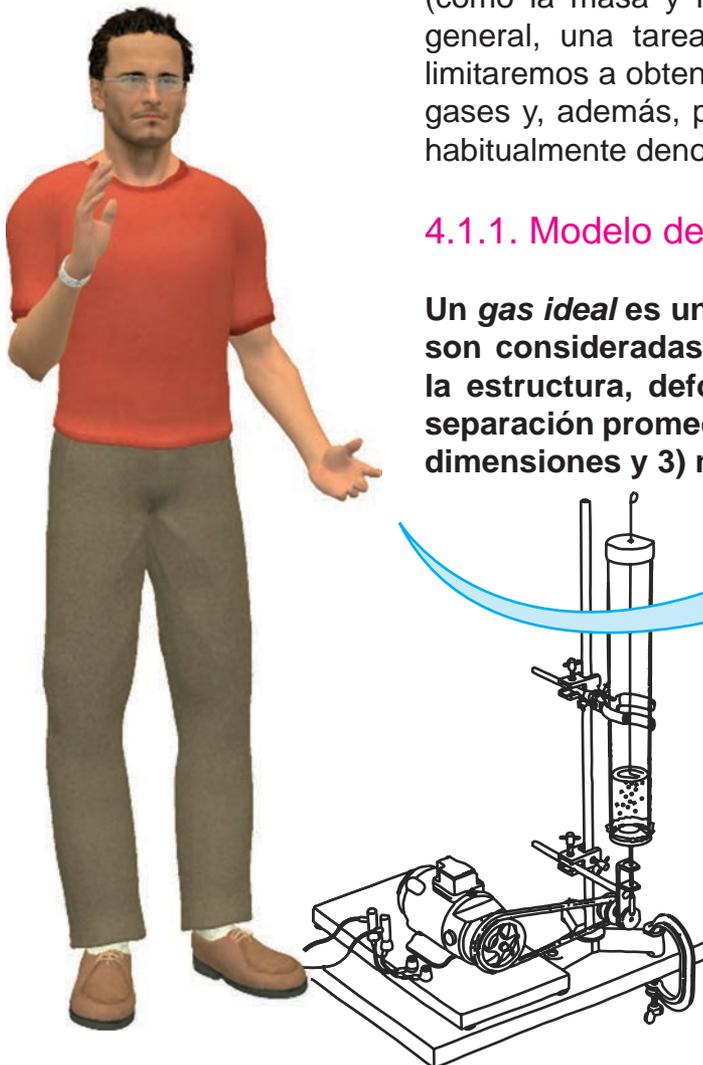
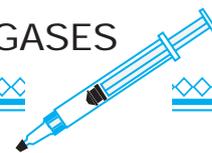


Fig. 4.1. Modelo mecánico de gas ideal Pequeñas bolitas de acero son forzadas a moverse continuamente dentro del tubo. Las bolitas interactúan entre sí solo al hacer contacto unas con otras.



La similitud entre el modelo de bolitas y los gases reales es solo parcial. En primer lugar, **las moléculas de los gases pueden considerarse esféricas únicamente cuando son monoatómicas**, como en el caso de los denominados “gases nobles” (helio, neón, argón, etc.). De modo parecido que en el modelo mecánico, si las distancias entre los centros de las moléculas son iguales al diámetro de ellas, actúan fuerzas de repulsión, pero a diferencia del modelo mecánico, a mayores distancias actúan fuerzas de atracción. Sin embargo, puesto que la atracción decrece muy rápidamente con la separación entre las moléculas (para distancias entre sus centros de 2-3 diámetros puede ya depreciarse), si la separación promedio de ellas es grande, el comportamiento del gas se aproxima al del modelo.

De este modo, **un gas real se aproxima tanto más al modelo de gas ideal cuanto mayor sea la separación promedio de sus moléculas**, en otras palabras, cuanto menor sea la concentración de ellas.

Muchos gases pueden considerarse ideales incluso en las condiciones habituales. En efecto, en el capítulo 1 vimos que, a la presión y temperatura del ambiente, la separación promedio de sus moléculas supera en más de 10 veces sus dimensiones, por lo que la atracción entre ellas puede despreciarse.

Resume con tus palabras las similitudes y diferencias entre el modelo de gas ideal y los gases reales.



Describe las características esenciales del modelo de gas ideal. ¿En qué casos los gases reales se aproximan a dicho modelo?



Ejemplo 4.1. La densidad del vapor de agua a 100°C es $6.0 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ y la masa de una molécula de agua $2.7 \times 10^{-23} \text{ g}$. Considera 1 cm^3 de vapor. a) ¿Cuántas moléculas de agua hay en él? b) Si el diámetro de una molécula de agua es aproximadamente $3 \times 10^{-10} \text{ m}$, ¿cuál es el volumen ocupado por ellas?, ¿qué fracción representa del volumen total?

a) Que la densidad del vapor de agua es $6.0 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ significa que 1 cm^3 de él tiene una masa de 0.96 g .

Como la masa de una molécula es $2.7 \times 10^{-23} \text{ g}$, entonces la cantidad de ellas en 1 cm^3 es:

$$N = \frac{6.0 \times 10^{-4} \text{ g}}{2.7 \times 10^{-23} \frac{\text{g}}{\text{molécula}}} = 2.2 \times 10^{19} \text{ moléculas}$$

b) Puesto que la molécula se considera esférica, el volumen de cada una es:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi (1.5 \times 10^{-10} \text{ m})^3 = 1.4 \times 10^{-29} \text{ m}^3 = 1.4 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

Por consiguiente, el volumen de todas las moléculas que hay en 1 cm^3 es:

$$V_{\text{molécula}} = (2.2 \times 10^{19})(1.4 \times 10^{-23} \text{ cm}^3) = 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$$

La fracción que esto representa de 1 cm^3 es:

$$\frac{V_{\text{molécula}}}{V} = \frac{3 \times 10^{-4} \text{ cm}^3}{1 \text{ cm}^3} = 3 \times 10^{-4}, \text{ lo que significa tan solo el } 0.03\%.$$

Este ejemplo muestra que en los gases reales con características próximas al modelo de gas ideal, el volumen que ocupan todas sus moléculas resulta insignificante comparado con el del gas.

Pasemos ahora a responder la primera de las preguntas formuladas al comienzo del capítulo: *¿Qué relación hay entre la presión ejercida por un gas y la velocidad de sus moléculas?* La respuesta será, se sobreentiende, para el caso de un gas cuyo comportamiento se aproxima al del gas ideal.

4.1.2. Relación entre la presión de un gas y la velocidad de sus moléculas

Primero analizaremos la relación que existe entre la presión del gas y la velocidad de sus moléculas **cualitativamente** y luego obtendremos la **ecuación** que las vincula.

Hemos visto que en condiciones habituales, la separación promedio de las moléculas de los gases supera en más de diez veces las dimensiones de ellas y en el ejemplo 4.1, que su volumen es miles de veces mayor que el volumen total de sus moléculas. ¿Cómo es posible entonces que se necesite realizar cierto esfuerzo para comprimir los gases, por ejemplo, el aire encerrado en una jeringuilla? (Fig. 4.2).

Para explicar lo que ocurre, debes tener en cuenta que **la presión ejercida por los gases es producida por los continuos choques de sus moléculas**. El modelo mecánico de la figura 4.1 lo ilustra muy bien. Nota que el pistón se encuentra separado del fondo de la caja, lo cual significa que la fuerza de gravedad sobre él es compensada por la fuerza debida a los constantes choques de las bolitas.

El aire encerrado en la jeringuilla de la figura 4.2 está constituido por un gigantesco número de moléculas moviéndose a grandes velocidades (a cientos de metros por segundo, e incluso muchas de ellas a más de mil metros por segundo), las cuales chocan constantemente entre sí, con la pared de la jeringuilla y con el émbolo. Esos choques originan una presión sobre el émbolo, dificultando la compresión.



Fig. 4.2. Si cierras el orificio de una jeringuilla e intentas comprimir el aire encerrado en ella, advertirás que se requiere un esfuerzo considerable.



¿Cuántas moléculas habrá en el aire encerrado en la jeringuilla de la figura 4.2?



Sí, parece razonable que la frecuencia con que las moléculas de un gas chocan con cierta superficie dependa de la velocidad de ellas: ¡Si la velocidad fuese cero, la frecuencia de sus choques también sería cero!



La explicación anterior sugiere que la presión ejercida por un gas sobre cierta superficie se debe a dos factores: la **frecuencia de los choques** de sus moléculas con la superficie y la **intensidad** de dichos choques.

A su vez, la **frecuencia de los choques** depende de la **concentración n** de moléculas (mientras mayor sea la concentración, mayor será la frecuencia de los choques) y de la **velocidad v** de ellas (mientras mayor sea ésta, mayor será el número que logra llegar a la pared en cierto intervalo de tiempo). Por su parte, la **intensidad** de los choques también depende de la **velocidad v** de las moléculas.

Realiza un esquema que ilustre, simbólicamente, la relación entre la presión de un gas y las magnitudes de las cuales ella depende.

En conclusión:

La presión ejercida por un gas depende de la **concentración n** de sus moléculas y de la **velocidad v** de ellas. Esta última repercute doblemente en la presión: debido a que influye en la frecuencia de los choques y a que determina la **intensidad** de ellos.

¿Cómo explicas desde el punto de vista microscópico, el hecho de que la presión ejercida por el aire encerrado en una jeringuilla aumente al disminuir su volumen?

¿De qué otro modo, además de disminuir su volumen, es posible aumentar la concentración de moléculas de un gas?

¿Por qué al aumentar la velocidad de las moléculas de un gas, aumenta la presión que él ejerce?





El modelo mecánico (Fig. 4.3) ilustra estas dependencias. Según se desplaza el émbolo hacia abajo, mayor es la fuerza que hay que aplicar, ya que aumenta la concentración de bolitas y con ello la frecuencia de sus choques contra el émbolo. Por otra parte, si se incrementa la velocidad de las bolitas (aumentando la frecuencia con que vibra el fondo del tubo), se requiere aplicar una fuerza mayor para desplazar el émbolo hacia abajo.

Una deducción formal de la ecuación que expresa la dependencia de P con n y v , requiere conocimientos avanzados. Por eso nos limitaremos a una deducción muy simplificada, esquemática.

Imagina que el recipiente representado en la figura 4.4 contiene un **gas ideal** y determinemos la presión ejercida, por ejemplo, sobre su pared derecha. Esta presión es resultado de la **fuerza** con que actúan las moléculas al chocar con la pared. Utilizaremos la segunda ley de Newton, en su forma $\vec{F} = \Delta\vec{p}/\Delta t$, para calcular esa fuerza. Debes recordar del curso de Mecánica 2 que en esa ecuación, \vec{p} es cantidad de movimiento, es decir $\vec{p} = m\vec{v}$, aunque para designarla hayamos utilizado la misma letra que para la presión. No vayas a confundir una magnitud con otra.

Consideremos una molécula que se dirige perpendicularmente hacia la pared a velocidad v . Si el choque es perfectamente elástico, su velocidad al rebotar es $-v$. Por eso, la variación Δp de su cantidad de movimiento es:

$$\Delta p = mv - (-mv) = 2mv, \text{ donde } m \text{ es la masa de la molécula.}$$

Como sabes, la cantidad de moléculas en cualquier recipiente habitual es colosal. Si llamamos Z al número total de choques que recibe la pared en cierto intervalo de tiempo Δt , entonces la variación total de la cantidad de movimiento originada por la

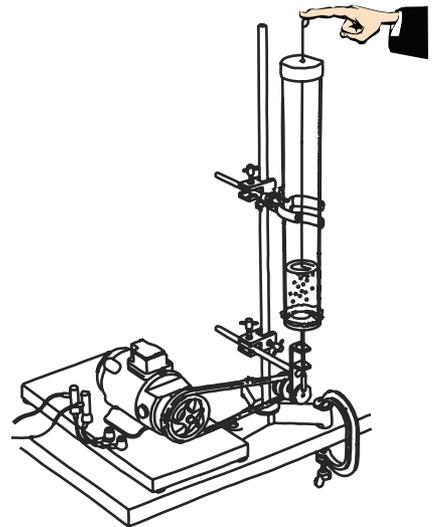


Fig. 4.3. Para desplazar al émbolo hacia abajo se requiere aplicar cierta fuerza, ya que aumenta la concentración de bolitas y, por tanto, la frecuencia de sus choques contra el émbolo. Al incrementar la velocidad del movimiento de las bolitas, se necesita aplicar una fuerza todavía mayor.

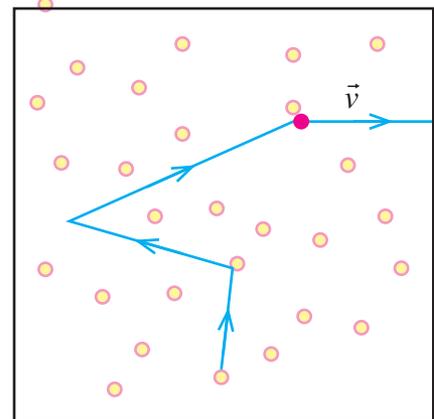


Fig. 4.4. La presión de un gas sobre las paredes del recipiente que lo contiene es resultado de la fuerza con que actúan las moléculas al chocar con la pared.





Ya veo, para obtener la ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular, utilizamos las leyes de Newton, en particular la 2ª y la 3ª.



pared en ese tiempo es $\Delta p = 2Zmv$ y, por tanto, la **fuerza media**, o **fuerza promedio**, ejercida por ella:

$$\bar{F} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2Zmv}{\Delta t}$$

Ésa es la magnitud, no solo de la fuerza media ejercida por la pared sobre las moléculas, sino también por éstas sobre ella. En efecto, según la tercera ley de Newton, la fuerza con que actúa cada molécula al chocar con la pared es de igual magnitud que la ejercida por la pared sobre ella.

Sí, pero observa que no se trata de una molécula, sino de un colosal número de ellas y por eso hay que usar, además, el concepto estadístico de valor medio.

Nota que $Z/\Delta t$ es la frecuencia de los choques contra la pared. Si la llamamos f , podemos escribir:

$$\bar{F} = 2fmv$$

Ahora recordemos que la frecuencia de los choques depende directamente de la concentración n de moléculas y de la velocidad v de ellas. Por otra parte, f es proporcional al área A de la pared (obviamente, mientras mayor sea dicha área, mayor será la cantidad de choques y por tanto la frecuencia). De modo que $f = nAv$. De donde:

$$\bar{F} = 2nvAmv = 2nmAv^2$$

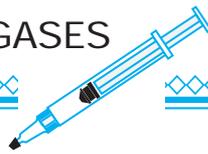
¡Ah!, el hecho de que la velocidad influya doblemente, debido a que repercute en la frecuencia de los choques y a que determina la intensidad de ellos, es lo que hace que la fuerza dependa del cuadrado de la velocidad.



De aquí que la presión media sobre la pared es:

$$P = \frac{\bar{F}}{A} = \frac{2nmAv^2}{A} = 2nmv^2$$

Observa que en el razonamiento anterior hemos considerado a las moléculas, **moviéndose con igual valor de velocidad y perpendicularmente hacia la pared**, cuando en realidad ellas lo hacen **con diversos valores de**



velocidad y en cualquier dirección. La ecuación anterior debe, por tanto, ser modificada.

En primer lugar, lo que realmente tiene sentido no es v^2 , sino el valor medio (o promedio) de esta magnitud, $\overline{v^2}$:

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}$$

Donde $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$, son los diversos valores de las velocidades de las moléculas y N el número total de ellas.

Por otra parte, debido a que las moléculas se mueven en cualquier dirección, sus velocidades pueden tener tres componentes y cada una de esas componentes dos sentidos. Esto hace que la ecuación resulte afectada por el factor $1/6$. De modo que finalmente tenemos:

$$P = \frac{1}{6}(2nm\overline{v^2}), \text{ de donde:}$$

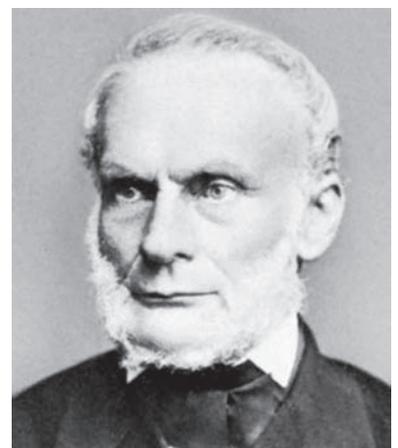
$$P = \frac{1}{3}nm\overline{v^2}$$

Con frecuencia esta ecuación es denominada **ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular de los gases**.

El hecho de que sea catalogada de “fundamental” se debe a que **fue la primera relación de tipo cuantitativo obtenida en la teoría cinético-molecular**. Después de su deducción por Rudolf E. Clausius en la década de 1850, dicha teoría se desarrolló con gran rapidez.

Nota que la ecuación relaciona una magnitud que puede ser medida directamente mediante instrumentos, la **presión**, con magnitudes referidas a características microscópicas: **concentración** de las moléculas, **masa** y **velocidad** de ellas. **La ecuación representa, pues, una especie de puente entre los mundos macroscópico y microscópico.**

Presta atención a que el valor medio del cuadrado de las velocidades de las moléculas, $\overline{v^2}$, no es lo mismo que el cuadrado de la velocidad media (\overline{v})².



Rudolf Emanuel Clausius (1822-1888), físico alemán, uno de los fundadores de la termodinámica, desempeñó un importante papel en el desarrollo de la teoría cinético-molecular.



Como n es la concentración de moléculas del gas, es decir, su número en la unidad de volumen y m la masa de una molécula, entonces el producto nm es la masa de gas en la unidad de volumen, o sea, su densidad ρ . De modo que la **ecuación fundamental** puede escribirse:

$$P = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}$$

Si divides y multiplicas el segundo miembro de la ecuación por dos, se puede escribir:

$$P = \frac{2}{3} n \frac{1}{2} m \overline{v^2}$$

donde $\frac{1}{2} m \overline{v^2}$ es la **energía cinética media** $\overline{E_c}$ de las moléculas del gas, o lo que es lo mismo, **la energía cinética que, en promedio, le corresponde a cada molécula**. De ahí la forma más común de escribir dicha ecuación:

$$P = \frac{2}{3} n \overline{E_c}$$

Cabe recordar que al deducir esta ecuación hemos utilizado el modelo del gas ideal, en el cual las moléculas se consideran **partículas** (sin estructura, sin rotación, ni deformación). Por consiguiente, **la energía cinética $\overline{E_c}$ que aparece en dicha ecuación es únicamente la relativa al movimiento de traslación de las moléculas**. Las moléculas de los gases reales pueden tener, además, energía cinética de rotación y de vibración alrededor del centro de masas.

¡Cierto!, la velocidad v que se utilizó en la deducción de la ecuación fundamental es la de traslación de las moléculas. Por eso, la energía cinética se refiere solo a la traslación de ellas.

Hemos visto que en las ecuaciones anteriores interviene la magnitud $\overline{v^2}$, de ahí su importancia en la teoría cinético-molecular. Su raíz cuadrada, $\sqrt{\overline{v^2}}$, no es, por supuesto, la velocidad media de las moléculas, se denomina **raíz de la media cuadrática**, y también **velocidad media cuadrática**, y es 1.08 veces mayor que la velocidad media, es decir, alrededor de 8% mayor. Para designarla puede emplearse





el símbolo v_{rms} , cuyo subíndice proviene de las iniciales de **raíz de la media cuadrática**. De modo que $v_{\text{rms}} = 1.08\bar{v}$.

La energía cinética que, en promedio, le corresponde a cada molécula es la misma para las moléculas de todos los gases que componen la mezcla. Pero de $E_c = \frac{1}{2}m\bar{v}^2$ se ve que, entonces, a las moléculas de mayor masa corresponde una menor velocidad media cuadrática.



Hasta ahora se ha hablado de un gas, pero ¿y si se trata de una mezcla de ellos, como el aire?



En el siguiente apartado analizaremos la relación que hay entre la energía cinética media de las moléculas del gas y su temperatura.

Ejemplo 4.2. Un gas se encuentra a la presión atmosférica ($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$) y 27°C . ¿Cuál es la velocidad media cuadrática de sus moléculas si se trata de: a) dióxido de carbono ($\rho = 1.8 \text{ kg/m}^3$), b) hidrógeno ($\rho = 0.082 \text{ kg/m}^3$).

Como $P = \frac{1}{3}\rho\bar{v}^2$, se tiene:

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

De ahí que:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3P}{\rho}}$$

a) Para el dióxido de carbono:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3(1.01 \times 10^5 \text{ Pa})}{1.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 4.1 \times 10^2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) Para el hidrógeno:

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3(1.01 \times 10^5 \text{ Pa})}{0.082 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 1.9 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tendrás una idea más clara de lo grande que son estos valores de velocidades si los expresas en **km/h**.



Ejemplo 4.3. Este ejemplo ilustra la diferencia entre el valor medio de un conjunto de valores y el valor medio cuadrático. Cinco moléculas de un gas tienen velocidades de 400, 500, 600, 700 y 800 m/s. Calcula: a) la velocidad media, b) la velocidad media cuadrática. Compara los resultados.

$$\text{a) } \bar{v} = \frac{400 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 500 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 600 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 700 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 800 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5} = 600 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{b) } \bar{v}^2 = \frac{(400 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + (500 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + (600 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + (700 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + (800 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{5} = 380 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{380 \times 10^3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 616 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La velocidad media cuadrática es algo mayor que la velocidad media. Sin embargo, en este caso v_{rms} no es $1.08\bar{v}$, porque de todas las posibles velocidades de las moléculas de un gas solo hemos seleccionado cinco arbitrariamente. El ejemplo solo pretende ilustrar la diferencia entre el valor medio y el valor medio cuadrático.

Ejemplo 4.4. Se sabe que a la presión atmosférica normal (1.013×10^5 Pa) y 27°C , un mol de gas ideal ocupa 24.6 L. Determina: a) la energía cinética media de sus moléculas, b) la energía cinética total de ellas.

a) Como $P = \frac{2}{3}n\bar{E}_c$, se tiene:

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

$n = \frac{N}{V}$, donde N es el número de moléculas en el volumen V . En un mol de gas hay $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ moléculas. Por otra parte, 24.6 L es equivalente a $24.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Por tanto:

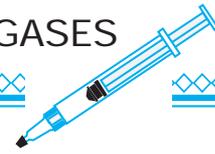
$$\bar{E}_c = \frac{3PV}{2N_A} = \frac{3(1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(24.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{2(6.02 \times 10^{23})} = 6.21 \times 10^{-21} \text{ J}$$

Nota que el resultado es el mismo con independencia del gas de que se trate.

b) La energía cinética media representa la energía que, como promedio, corresponde a cada molécula. Por consiguiente, la energía cinética total de las moléculas de un mol de gas, o sea de 6.02×10^{23} moléculas, es:

$$E_c = 6.02 \times 10^{23} \bar{E}_c = (6.02 \times 10^{23})(6.21 \times 10^{-21} \text{ J}) = 3.74 \times 10^3 \text{ J}$$

Esta energía cinética es considerable, equivale, aproximadamente, a la energía cinética que adquiere un cuerpo de cuatro kilogramos al dejarlo caer desde una altura de cien metros.



La energía cinética de un litro de gas es:

$$\frac{3.74 \times 10^3 \text{ J}}{24.6} = 152 \text{ J}$$

que todavía sigue siendo considerable.

Ejemplo 4.5. Considera que el gas del ejemplo anterior es oxígeno y utiliza los resultados obtenidos para calcular la velocidad media cuadrática de sus moléculas. La masa de una molécula de oxígeno es $5.31 \times 10^{-26} \text{ kg}$.

En el ejemplo anterior se obtuvo que la energía cinética que como promedio tiene cada molécula de oxígeno es $\overline{E_c} = 6.21 \times 10^{-21} \text{ J}$. Por tanto:

$$\overline{E_c} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = 6.21 \times 10^{-21} \text{ J}$$

De aquí que:

$$\overline{v^2} = \frac{2(6.21 \times 10^{-21} \text{ J})}{m}$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{2(6.21 \times 10^{-21} \text{ J})}{m}} = \sqrt{\frac{2(6.21 \times 10^{-21} \text{ J})}{5.31 \times 10^{-26} \text{ kg}}} = 484 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Mientras que la energía cinética media de las moléculas del gas ideal no depende del gas de que se trate, la velocidad media cuadrática y la velocidad media de las moléculas sí: a mayor masa de las moléculas, menores serán dichas velocidades, y a la inversa.

4.2. Temperatura y energía cinética media de las moléculas

Todos sabemos que la temperatura caracteriza el grado de calentamiento de los cuerpos (frío, tibio, caliente) y que para medirla se utilizan los termómetros. Pero, *¿cómo se relaciona la temperatura de un gas con la energía cinética de sus moléculas?*

Los termómetros pueden utilizar diversos principios para determinar la temperatura: la dilatación o contracción de un líquido (generalmente mercurio) al calentarse o enfriarse, como en los tradicionales termómetros clínicos; el cambio en la resistencia eléctrica de algún material semiconductor, como en los termómetros digitales; etc. Sin embargo, cualquiera que sea su tipo, todos tienen algo en común:





se requiere ponerlos en contacto con el cuerpo cuya temperatura se va a medir y esperar cierto tiempo. Ello hace que cierta característica del termómetro y del cuerpo se igualen entre sí. Esa característica es precisamente la que denominamos temperatura. Cuando esto ocurre, se dice que se ha alcanzado el **equilibrio térmico** entre el cuerpo y el termómetro.

¿Por qué será que en los termómetros que utilizan líquido, éste generalmente es mercurio?

Aunque usualmente no meditamos en ello, **la tendencia de los cuerpos a igualar sus temperaturas es una ley general**. Puede ser constatada en numerosos ejemplos: al dejar cierto tiempo un vaso de agua fría, o caliente, sobre una mesa; al colocar un trozo de hielo en el agua de un vaso; etc.

Precisa en cada una de las dos situaciones siguientes, entre qué cuerpos se establece el equilibrio térmico luego de cierto tiempo: al colocar un trozo de hielo en el agua, al dejar un vaso de agua fría sobre la mesa.

Menciona ejemplos de la vida diaria diferentes a los del texto, que ilustren que los cuerpos tienden a igualar sus temperaturas.



Cualquier sistema de cuerpos que no reciba acciones de agentes exteriores, pasa por sí solo al estado de *equilibrio térmico*, en que las temperaturas de los cuerpos se igualan y ya no varían.

¿Cómo interpretar el proceso de establecimiento del equilibrio térmico entre dos cuerpos desde el punto de vista molecular?

En *Mecánica 2* ya mencionamos la estrecha relación que hay entre la temperatura de un cuerpo y la velocidad de sus moléculas y, por tanto, la energía cinética de ellas, y nuevamente hemos insistido en esto en el primer capítulo.



Cuando dos cuerpos con diferentes temperaturas se ponen en contacto térmico, se transmite energía del más caliente al más frío en forma de movimiento de sus moléculas, es decir, en forma de energía cinética de ellas. Este proceso transcurre hasta que las temperaturas de los cuerpos se igualan.

¿Qué fenómeno estudiado en el primer capítulo pone de manifiesto que la temperatura y la velocidad de movimiento de las moléculas están estrechamente relacionadas?

En el caso de los gases, ahora disponemos de un argumento más que apoya esa relación directa entre temperatura y energía cinética media de las moléculas: al elevar la temperatura de un gas contenido en un recipiente, aumenta su presión y, según la ecuación $P = \frac{2}{3}n\overline{E}_c$, ello significa que aumenta la energía cinética de sus moléculas.

Lo dicho anteriormente sugiere **caracterizar la temperatura de un gas ideal como una magnitud proporcional a la energía cinética media de sus moléculas.**

Por supuesto, no se trata de la temperatura en grados celsius (0°C). Considerar la temperatura de un cuerpo proporcional a la energía cinética media de sus moléculas implica que si una es cero la otra también. Y sabemos que aunque los gases estén a 0°C sus moléculas se mueven a grandes velocidades y, por tanto, poseen energía cinética. Se trata de la **temperatura absoluta**, la cual no se expresa en $^\circ\text{C}$, sino en **kelvin** (K). Para designarla se utiliza la letra T .

La relación de proporcionalidad entre la temperatura absoluta (T) de un gas y la energía cinética media de sus moléculas (\overline{E}_c) se expresa como sigue:

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

$k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ es una constante, denominada **constante de Boltzmann** en honor del físico austriaco Ludwig Boltzmann.





Ludwig Boltzmann (1844-1906). Hizo aportes fundamentales a la Teoría Cinética de los gases y proporcionó la interpretación estadística del segundo principio de la Termodinámica.

Indaga cómo se establecieron el 0 y el 100 de la escala Celsius.

Expresa 27 °C en kelvin.



La ecuación anterior, de modo similar que la ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular, **constituye un puente entre el mundo microscópico de las moléculas y el mundo macroscópico**: relaciona una magnitud que caracteriza propiedades de las moléculas, la energía cinética media de ellas, con la temperatura, que puede ser medida directamente mediante un instrumento.

La ecuación se aplica no solo a los gases, sino también, con exactitud razonable, a los líquidos y sólidos. Sin embargo, debes recordar que $\overline{E_c}$ es la energía cinética media de las moléculas **debida al movimiento de traslación de ellas**. Las moléculas monoatómicas no poseen otra energía cinética, pero las formadas por varios átomos pueden tener además, como ya hemos dicho, energía cinética de rotación y de vibración.

La temperatura absoluta se relaciona con la temperatura en grados celsius y es posible pasar de una a otra, como hacemos con unidades de otras magnitudes. La unidad de temperatura absoluta, un kelvin (1 K), representa lo mismo que un grado celsius (1° C). En otras palabras, una variación de temperatura de 1° C es lo mismo que de 1 K. Lo distinto entre una misma temperatura expresada en grados celsius y kelvin radica en que las escalas utilizadas tienen sus orígenes, o ceros, desplazados uno respecto al otro (Fig. 4.5): 0 K no corresponde a 0 °C, sino a -273.15 °C. Por eso, para expresar en kelvin cierta temperatura en grados celsius, solo tenemos que sumarle a esta última 273 grados. En símbolos:

$T = t + 273$, donde t es la temperatura en grados celsius y T en kelvin.

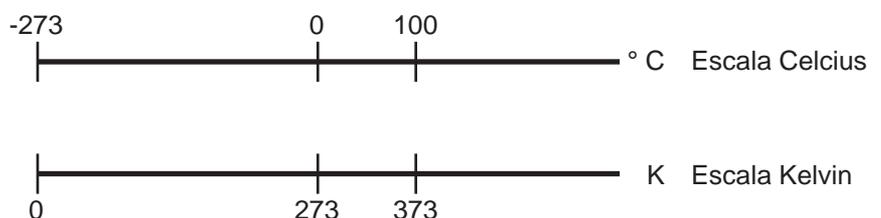
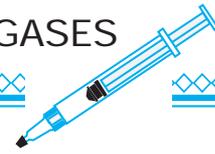


Fig. 4.5. Relación entre las escalas de temperatura Kelvin y Celsius.



La temperatura de 0 K, o lo que es equivalente -273.15°C , se denomina **cero absoluto**. A diferencia de los ceros de las escalas de temperatura Celsius y Fahrenheit, los cuales originalmente estuvieron asociados con cierta propiedad del agua, el 0 de la escala Kelvin tiene un significado universal: no es posible lograr una temperatura inferior a esa. Esto explica la denominación de ese cero como “absoluto”.

Ejemplo 4.6. La temperatura de la superficie del Sol es $6 \times 10^3\text{ K}$. Calcula la velocidad media cuadrática de los átomos de helio de su superficie. La masa de un átomo de helio es $6.6 \times 10^{-27}\text{ kg}$.

Sabemos que $\overline{E_c} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT$. Por tanto:

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

En esta ecuación, m es la masa de una molécula. La molécula de helio consta de un solo átomo, por lo que $6.6 \times 10^{-27}\text{ kg}$ es la masa de un átomo y, a la vez, de una molécula.

$$v_{\text{mc}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}})(6 \times 10^3 \text{ K})}{6.6 \times 10^{-27} \text{ kg}}} = 6 \times 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 2 \times 10^4 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

4.3. Ecuación de estado del gas ideal

En este apartado y en el siguiente responderemos la tercera pregunta planteada al iniciar el capítulo: *¿cómo obtener teóricamente las relaciones entre presión, temperatura y volumen de un gas, es decir, las denominadas leyes de los gases?*

Si en la ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular, $P = \frac{2}{3}n\overline{E_c}$, colocamos la expresión de la concentración de moléculas del gas, $n = N/V$, donde N es el número de moléculas del gas en el volumen V , se tiene:

$$P = \frac{2}{3}n\overline{E_c} = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \overline{E_c}$$

Por otra parte, acabamos de ver que $\overline{E_c} = \frac{3}{2}kT$. De aquí que:





$$P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \frac{3}{2} kT = \frac{N}{V} kT$$

Es habitual escribir la ecuación anterior en la forma:

$$PV = NkT$$

Esta ecuación, que relaciona la presión, el volumen y la temperatura de un gas, se denomina **ecuación de estado del gas ideal**. Debes recordar siempre que la temperatura T que interviene en esa ecuación se refiere a la escala Kelvin.

Aclaremos por qué la ecuación tiene ese nombre.

Sí, es obvio que si se tiene aire encerrado en una jeringuilla y se desplaza el émbolo comprimiéndolo, la situación, o estado, en que se encuentra varía.

Lo de **gas ideal** se debe a que todos nuestros razonamientos y conclusiones sobre los gases han estado basados en ese modelo. De ahí que todas **las ecuaciones obtenidas se cumplen solo para gases reales que se aproximen a dicho modelo**.

Ahora veamos por qué **ecuación de é estado**”.

Por estado de una partícula o sistema se entiende la situación en que se encuentran, la cual es caracterizada por medio de ciertas magnitudes.

Y presta atención también a que en el ejemplo que mencionas se hace evidente que al cambiar el estado, cambian ciertas magnitudes que lo caracterizan, por ejemplo V y p .

Cuando la situación o estado del sistema varía, también lo hacen los valores de las magnitudes que lo caracterizan. Así, por ejemplo, el estado de movimiento de una partícula se determina por su posición y velocidad y cuando éstas cambian, ha variado su estado. Por su parte, **el estado de un gas ideal queda definido por su presión, volumen y temperatura**. Si cambia alguna de estas magnitudes, también cambia el estado del gas. Entre las magnitudes que determinan





el estado de un sistema puede existir cierta dependencia funcional y la ecuación que expresa esa dependencia se llama **ecuación de estado**.

De este modo, la ecuación $PV = NkT$ se denomina **ecuación de estado del gas ideal** porque expresa la dependencia funcional entre las magnitudes que determinan su estado: P , V y T .



La dependencia entre v y y para un cuerpo en caída libre es $v = \sqrt{2gy}$. ¿Podría decirse que ésta es la ecuación de estado para un cuerpo en caída libre?

Aunque es poco común decirlo así, sería correcto.

Es posible escribir la ecuación anterior de otras formas.

Así, el número de moléculas N de determinado volumen de gas es igual al número de moles N_m que hay en dicho volumen multiplicado por el número de Avogadro N_A :

$$N = N_m N_A$$

De ahí que $PV = N_m N_A kT$

Observa que N_A y k , son dos constantes, por lo que su producto, $N_A k$, también lo es. Esta constante se denomina **constante universal de los gases** y se designa mediante la letra R . De modo que:

$$PV = N_m RT$$

donde:

$$R = N_A k = (6.03 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})(1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}) = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Esta es otra forma de escribir la **ecuación de estado del gas ideal**.





Ahora obtendremos una tercera forma de escribir la ecuación de estado, la cual resulta muy útil al analizar ciertas situaciones.

A partir de cualquiera de las dos variantes anteriores de la ecuación de estado podemos escribir la relación entre P , V y T **para dos estados cualesquiera del gas**. Así, si en la última variante designamos con el subíndice 1 los valores que caracterizan uno de los estados y con el subíndice 2 los que caracterizan el otro, entonces se tiene:

$$P_1 V_1 = N_m R T_1 \quad \text{y} \quad P_2 V_2 = N_m R T_2$$

O, lo que es equivalente:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = N_m R \quad \text{y} \quad \frac{P_2 V_2}{T_2} = N_m R$$

De aquí que:

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

Ejemplo 4.7. En cierto motor de automóvil, la mezcla de aire y gasolina durante la compresión en los cilindros disminuyó su volumen 9.0 veces y la presión aumentó de 1.0 atm a 22.4 atm. Si antes de la compresión, la mezcla tenía una temperatura de 40 °C, ¿qué temperatura alcanzó al final de la compresión? Considera la mezcla de aire y gasolina un gas ideal.

La temperatura de 40 °C debe ser convertida a la escala Kelvin:

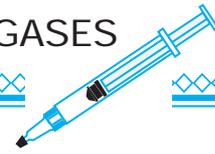
$$T = (40 + 273) \text{ K} = 313 \text{ K} = 765 \text{ K.}$$

Designemos con el subíndice 1 a los valores de las magnitudes que caracterizan al estado de la mezcla sin comprimir y con el subíndice 2 a los valores que lo caracterizan al final de la compresión:

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

De aquí que la temperatura T_2 de la mezcla al final de la compresión era:

$$T_2 = T_1 \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = (313 \text{ K}) \frac{(22 \text{ atm})}{(1.0 \text{ atm})} \frac{1}{9.0} = (313 \text{ K}) \frac{22}{9.0} = 765 \text{ K}$$



Para expresar esa temperatura en grados celsius le restamos 273. Por tanto la temperatura de la mezcla al finalizar la compresión es de 492 °C.

Al encenderse la mezcla su temperatura crece aún más.

4.4. Leyes de los gases

Partiendo de la ecuación $PV = N_m RT$ es posible obtener las denominadas **leyes de los gases**.

Se denominan leyes de los gases a las relaciones entre dos de las tres magnitudes (P , V , T) que determinan el estado de un gas, cuando la tercera magnitud se mantiene constante.

Esto da lugar a tres relaciones, o leyes.

1. Relación entre P y V cuando T permanece fijo.

Según la ecuación $PV = N_m RT$, en tal caso:

$$PV = \text{constante}$$

A temperatura constante, la presión y el volumen de un gas son inversamente proporcionales.

Esta relación fue establecida experimentalmente por el científico inglés Robert Boyle alrededor de 1662, e independientemente de él, por el científico francés Edme Mariotte, de ahí que se denomine **ley de Boyle-Mariotte**.

La ley es válida para cualquier gas y también para una mezcla de varios de ellos, por ejemplo el aire. Solo para grandes presiones, cientos de veces mayores que la presión atmosférica, el comportamiento de los gases difiere notablemente de esa ley.

Cabe señalar que al comprimir o expandir un gas, su temperatura tiende a variar y no a permanecer constante. Así, por ejemplo, si comprimes rápidamente el aire encerrado en una bomba de echar aire a la goma de una





bicicleta, se realiza un trabajo sobre el aire y, por tanto, se le comunica energía, con lo cual su temperatura se eleva. Para que la temperatura del aire permanezca constante puede efectuarse el proceso con relativa lentitud, de modo que dé tiempo a que transfiera energía al exterior. Si la pared de la bomba permite un buen intercambio térmico, esto es fácil de lograr.

El proceso de variación de la presión y el volumen de un gas a temperatura constante se denomina *proceso isotérmico* (el término griego *iso* significa igual).

La lentitud del proceso también garantiza que la presión y la temperatura del gas puedan considerarse las mismas a través de todo él (de lo contrario no tendrían un valor único, estarían indeterminadas). **Solo en tal caso tiene sentido representar el proceso mediante un gráfico.**

El gráfico de la relación entre presión y volumen en un proceso isotérmico se llama **isoterma**. Puesto que la relación entre P y V es de proporcionalidad inversa, el gráfico es una rama de hipérbola. En la Fig. 4.6 se muestran los gráficos de dos isotermas para un mismo gas a dos temperaturas diferentes.



Argumenta por qué en el gráfico de la figura 4.6, la isoterma correspondiente a una mayor temperatura queda por encima de la otra.

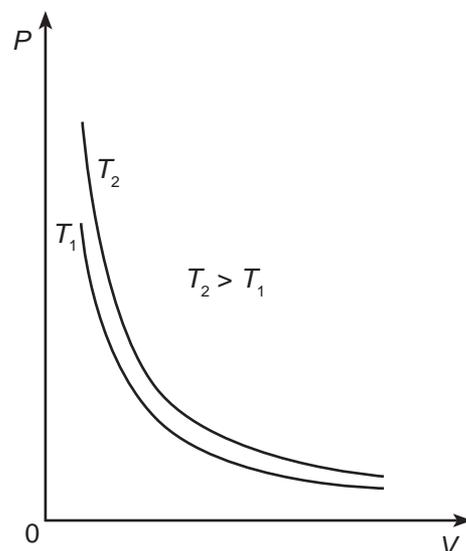


Fig. 4.6. El gráfico que relaciona la presión y el volumen de un gas a temperatura constante, denominado isoterma, es una rama de hipérbola.

La compresión o dilatación del aire encerrado en una jeringuilla (Fig. 4.7), o en una bomba de insuflar aire en una goma de bicicleta, pueden considerarse aproximadamente isotérmicas, con la condición de que no se realicen rápidamente.



Fig.4.7. La compresión o dilatación del aire encerrado en una jeringuilla, si se realiza lentamente, puede considerarse un proceso isotérmico.

2. Relación entre V y T cuando P permanece constante.

En este caso, de acuerdo con la ecuación de estado $PV = N_m RT$:

$$\frac{V}{T} = \text{constante}$$

A presión constante, el volumen y la temperatura de un gas son directamente proporcionales.

Esta relación fue establecida por el científico francés Jacques Charles en 1787, pero este no publicó sus resultados. Posteriormente, el científico Joseph L. Gay-Lussac, también francés, retomó el trabajo de Charles. La ley se denomina **ley de Charles** y a veces también **ley de Charles y Gay-Lussac**.

El proceso de variación del volumen y la temperatura de un gas a presión constante se denomina *proceso isobárico* (*bar* alude a presión, proviene de la palabra griega *baros*, que significa pesadez).

Ahora comprendo de dónde proviene el nombre de barómetro, que se le da al instrumento de medir la presión atmosférica.



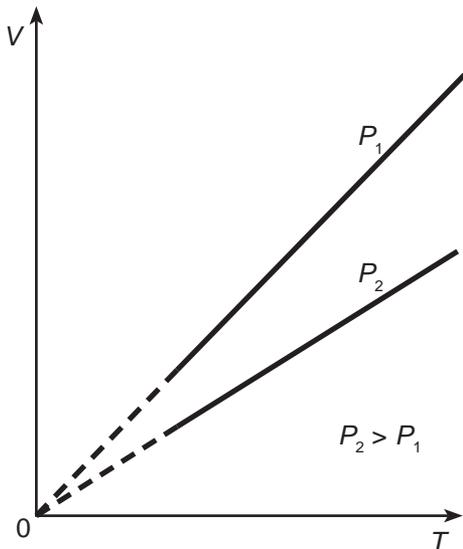


Fig. 4.8. El gráfico que relaciona el volumen y la temperatura de un gas a presión constante, denominado isobara, es una línea recta que pasa por el origen de coordenadas.

Como en el caso anterior, si el proceso se efectúa tan lentamente que la temperatura y la presión del gas pueden considerarse las mismas a través de todo él, entonces es posible describirlo mediante un gráfico. En este caso el gráfico se llama **isobara** (Fig. 4.8). Puesto que representa una relación de proporcionalidad directa entre V y T , corresponde a una recta que pasa por el origen de coordenadas. Pero observa que una parte de las isobaras se ha dibujado con línea discontinua. Esto se debe a que todos los gases, al descender la temperatura suficientemente, se transforman en líquidos y, por tanto, para temperaturas muy bajas la ecuación de estado y la relación anterior dejan de tener sentido.

¿Por qué en la figura 4.8, una parte de las isobaras se ha representado con línea discontinua? Argumenta por qué la isobara correspondiente a una mayor presión está por debajo de la otra.

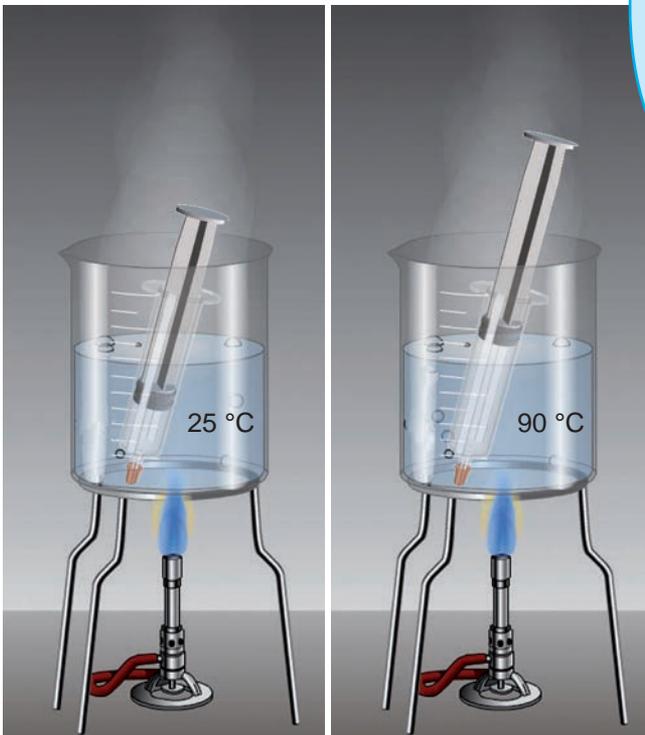


Fig. 4.9. El émbolo asciende, pero la presión del aire en la jeringuilla permanece aproximadamente constante, está determinada por el peso del émbolo y la presión atmosférica (el rozamiento del émbolo se desprecia).



Un ejemplo de proceso isobárico es la dilatación del aire encerrado en una jeringuilla durante el calentamiento de ésta (Fig.4.9). Mientras el aire se calienta y el émbolo se desplaza, su presión se mantiene constante, ya que está determinada por el peso del émbolo y la presión atmosférica que actúa sobre su superficie externa.



3. Relación entre P y T cuando V permanece constante.

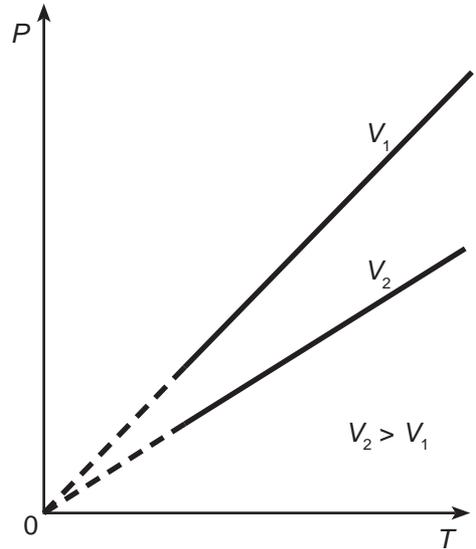
A partir de $PV = N_mRT$ se obtiene para este caso:

$$\frac{P}{T} = \text{constante}$$

A volumen constante, la presión y la temperatura de un gas son directamente proporcionales.

Esta relación fue obtenida por Gay-Lussac, el cual publicó su resultado en 1802.

El proceso de variación de la presión y la temperatura de un gas a volumen constante se denomina *proceso isocórico, o isovolumétrico* (cor alude a volumen, proviene de la palabra griega *chora*, que significa espacio).



El gráfico de la relación entre presión y temperatura en un proceso isocórico se llama **isocora**. Como representa una relación de proporcionalidad directa entre P y T , corresponde a una recta que pasa por el origen de coordenadas (Fig. 4.10).

Fig.10. El gráfico que relaciona el volumen y la temperatura de un gas a volumen constante, denominado isocora, es una línea recta que pasa por el origen de coordenadas.

Un ejemplo de proceso isocórico es el que tiene lugar durante el calentamiento de una jeringuilla con aire encerrado en ella, pero cuyo émbolo se mantiene en una posición fija (Fig. 4.11). Otro ejemplo de la vida cotidiana, es el aumento de la presión del gas del interior de un bombillo de filamento incandescente al elevarse la temperatura cuando se enciende el bombillo.

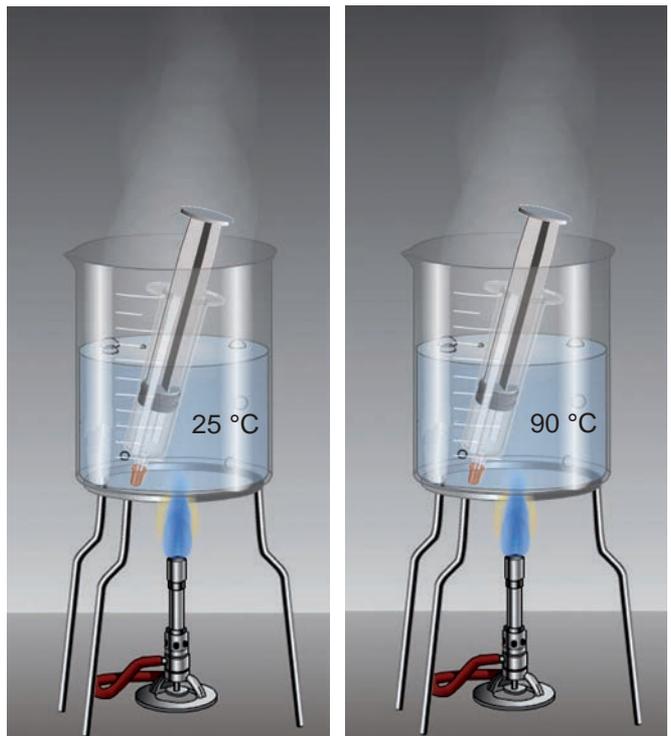


Fig. 4.11. El émbolo de la jeringuilla se ha fijado, por lo que al elevarse la temperatura del aire encerrado en ella aumenta su presión.



¿Por qué en la figura 4.10, una parte de las isocoras se ha representado con línea discontinua? Argumenta por qué la isocora correspondiente a un mayor volumen está por debajo de la otra.



Como hemos señalado, la ley de Boyle fue obtenida experimentalmente en el siglo XVII y las leyes de Charles y Gay-Lussac, a finales del XVIII y principios del XIX, es decir, antes de que se desarrollara la teoría cinético-molecular de los gases en la década de 1850. El hecho de que puedan ser establecidas teóricamente, a partir del modelo del gas ideal, como hemos hecho en este apartado, muestra la potencia de la teoría cinético-molecular.



4.5. Actividades de sistematización y consolidación

4.5.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.



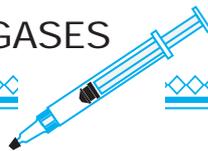
É	Ñ	M	I	C	R	O	S	C	Ó	P	I	C	O	Á	J	U	P
J	X	Q	T	S	Q	I	Ó	V	O	L	U	M	E	N	S	Ó	G
M	Ó	A	E	G	O	Q	D	W	C	H	A	R	L	E	S	Z	A
F	Ü	W	M	Ü	U	T	W	E	O	Z	B	V	W	O	W	K	S
N	M	D	P	B	V	B	É	N	A	Ó	L	C	E	C	T	N	O
E	O	Z	E	E	D	M	O	R	D	L	D	E	R	I	I	N	C
L	L	X	R	O	C	O	W	Y	M	Ó	Y	X	Y	P	S	A	I
T	É	M	A	O	C	L	Í	E	L	I	Z	M	F	Ó	O	Y	R
E	C	O	T	C	L	I	A	W	X	E	C	J	N	C	B	L	T
O	U	D	U	Ó	C	Í	T	U	G	Ü	G	O	Ó	S	Á	C	É
R	L	E	R	L	B	C	X	É	S	V	C	L	I	O	R	N	M
Í	A	L	A	Ú	E	T	É	Á	N	I	M	Z	S	R	I	I	U
A	T	O	Ñ	L	K	Ñ	F	E	T	I	U	L	E	C	C	V	L
Ñ	S	Á	S	L	E	X	Z	Ü	G	Q	C	S	R	A	O	L	O
H	M	I	T	É	R	M	I	C	O	É	U	B	P	M	I	E	V
Ú	U	T	E	R	M	Ó	M	E	T	R	O	T	Y	X	B	K	O
S	Ó	M	S	Á	O	C	I	R	Ó	C	O	S	I	X	N	R	S
E	E	Q	U	I	L	I	B	R	I	O	K	Ü	Ú	V	K	I	I

- | | | |
|------------|----------------|-------------|
| Boyle | Isocórico | Molécula |
| Celsius | Isotérmico | Presión |
| Charles | Isovolumétrico | Temperatura |
| Cinético | Kelvin | Teoría |
| Clausius | Ley | Térmico |
| Equilibrio | Macroscópico | Termómetro |
| Gas | Microscópico | Volumen |
| Ideal | Modelo | |
| Isobárico | Mol | |

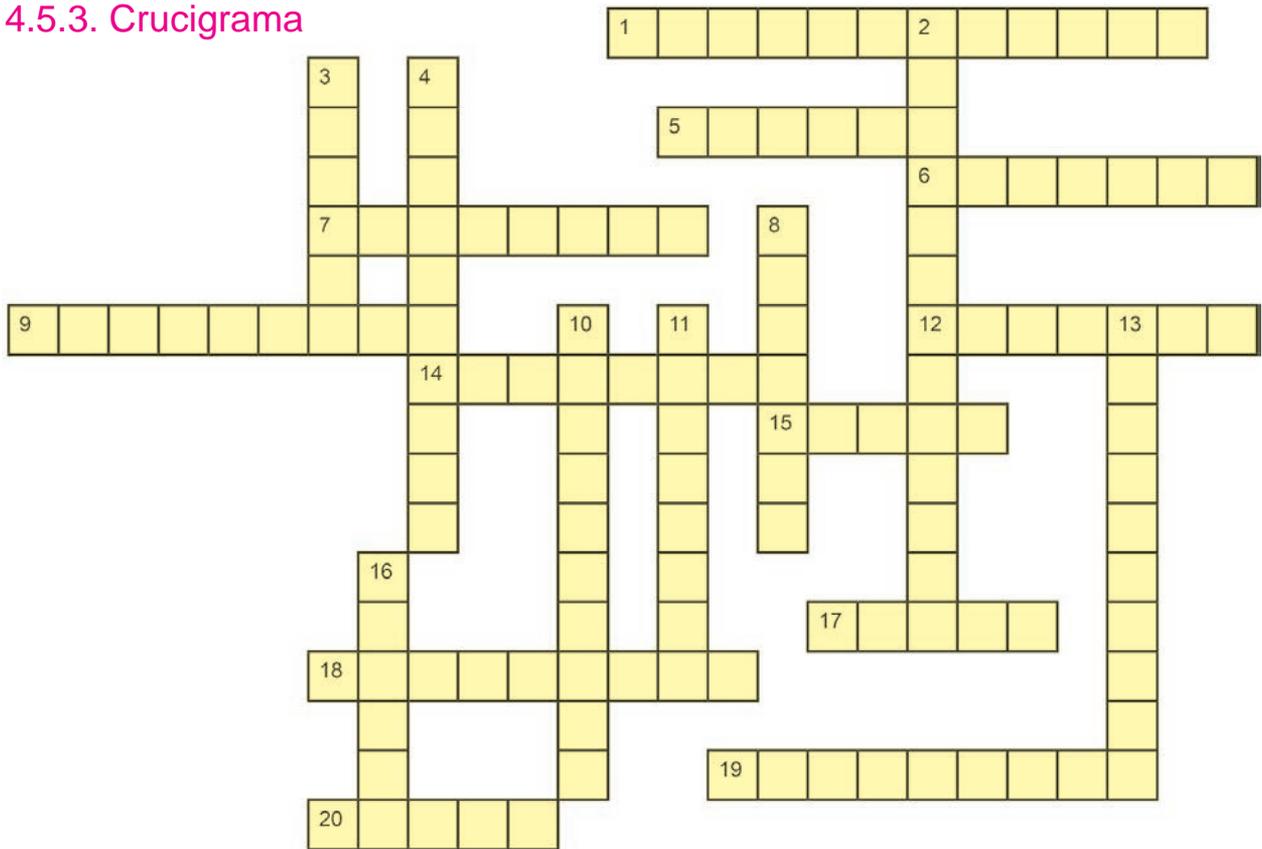


4.5.2. Conexión de conceptos e ideas

- | | |
|--|---|
| 1. Calificativo utilizado para designar a la teoría que explica el comportamiento de los gases desde el punto de vista microscópico. | () Cantidad de movimiento |
| 2. Magnitud física que depende de la masa y del valor de la velocidad. | () Cero absoluto |
| 3. Nombre que recibe el modelo en el cual la separación promedio de las moléculas es mucho mayor que sus dimensiones y las moléculas no interactúan a distancia. | () Cinético-molecular |
| 4. Fenómeno que da origen a la presión ejercida por los gases. | () Continuos choques de sus moléculas |
| 5. Magnitud que varía al chocar una molécula de gas con la pared del recipiente que lo contiene. | () Ecuación de estado |
| 6. Magnitudes de las que depende la presión ejercida por un gas. | () Energía cinética |
| 7. Científico que dedujo la ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular de los gases. | () Energía cinética media de las moléculas |
| 8. Magnitud cuyo valor no coincide con el de la velocidad media, pero se aproxima a él. | () Equilibrio térmico |
| 9. Estado que alcanza un sistema de dos cuerpos, uno caliente y otro frío, cuando por sí solos igualan sus temperaturas. | () Gas ideal |
| 10. Magnitud que es directamente proporcional a la temperatura absoluta de un gas. | () Grado celsius |
| 11. Unidad utilizada comúnmente para medir la temperatura de los cuerpos. | () Ley de Boyle-Mariotte |
| 12. Nombre que recibe el valor de temperatura a partir del cual no es posible hacerla descender más. | () Leyes de los gases |
| 13. Nombre que recibe la relación funcional entre la presión, la temperatura y el volumen de un gas ideal. | () Línea recta |
| 14. Nombre que reciben las relaciones entre dos de las tres magnitudes que determinan el estado de un gas, cuando la tercera magnitud permanece constante. | () Masa de las moléculas, concentración y velocidad de ellas |
| 15. Nombre que recibe la relación entre la presión y el volumen de un gas cuando su temperatura permanece constante. | () Muy bajas temperaturas |
| 16. Relación entre la presión y la temperatura absoluta de un gas si su volumen se mantiene constante. | () Proporcionalidad directa |
| 17. Relación entre la presión y el volumen de un gas si su temperatura se mantiene constante. | () Proporcionalidad inversa |
| 18. Tipo de gráfico que describe a la ley de Boyle-Mariotte. | () Rama de hipérbola |
| 19. Tipo de gráfico que describe la relación entre la presión y la temperatura absoluta en un gas ideal. | () Rudolf E. Clausius |
| 20. Condición para la cual pierde sentido la ecuación de estado del gas ideal. | () Velocidad media cuadrática |



4.5.3. Crucigrama



Horizontales

1. Volumen ocupado por todas las moléculas de un gas que puede considerarse ideal, comparado con el volumen total del gas.
5. Unidad de temperatura absoluta.
6. Nombre del grado comúnmente utilizado para medir la temperatura de los cuerpos.
7. Se dice del cero de temperatura en la escala Kelvin.
9. Gráfico de dependencia entre la presión y el volumen de un gas cuando la temperatura permanece constante.
12. Se dice del equilibrio que se establece entre un cuerpo caliente y otro frío cuando igualan sus temperaturas.
14. Apellido del científico que dedujo la ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular de los gases.
15. Se dice de un modelo de gas en el cual las separación promedio entre sus moléculas es muy grande en comparación con las dimensiones de ellas y no interactúan a distancia.
17. Velocidad media de las moléculas de oxígeno del aire que nos rodea, comparada con la de las moléculas de hidrógeno.
18. Magnitud característica de las moléculas de un gas que influye en la frecuencia e intensidad de ellos.
19. Nombre que recibe el proceso de variación del volumen y la temperatura de un gas a presión constante.
20. Valor de la velocidad media cuadrática de las moléculas de un gas comparado con el de la velocidad media.

Verticales

2. Magnitud característica del conjunto de moléculas de un gas que determina su presión.
3. Término utilizado para referirse a la situación en que se encuentra un gas, caracterizada por su presión, temperatura y volumen.
4. Tipo de movimiento de las moléculas al que está asociada la energía cinética que aparece en la ecuación $P = 2/3 n \overline{E_C}$.
8. Magnitud característica de un gas determinada por los continuos choques de sus moléculas.
10. Tipo de valor medio muy utilizado para la velocidad en la teoría cinético-molecular de los gases.
11. Uno de los adjetivos utilizados para calificar a la teoría que explica el comportamiento de los gases desde el punto de vista microscópico.
13. Nombre que recibe el proceso de variación de la presión y el volumen de un gas a temperatura constante.
16. Cociente entre la variación de la cantidad de movimiento y el intervalo de tiempo en que tiene lugar dicha variación.



4.5.4. Actividades de repaso

1. Confecciona un mapa conceptual que conecte conceptos e ideas como los siguientes: gas ideal, ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular de los gases, energía cinética media, temperatura absoluta, ecuación de estado del gas ideal, leyes de los gases.
2. Responde, resumidamente, las preguntas formuladas al inicio del capítulo: ¿Qué relación hay entre la presión ejercida por un gas y la velocidad de sus moléculas? ¿Cómo se relaciona la temperatura de un gas con sus características microscópicas? ¿Cómo obtener teóricamente las relaciones entre presión temperatura y volumen de un gas, es decir, las denominadas leyes de los gases?
3. Explica e ilustra mediante ejemplos: a) el modelo de gas ideal, b) la dependencia entre la presión de un gas y sus características microscópicas, c) el concepto de velocidad media cuadrática, d) el concepto de equilibrio térmico, e) la relación entre las escalas de temperatura Kelvin y Celsius, e) la ecuación de estado del gas ideal y las diferentes formas de expresarla, f) las leyes de los gases y los gráficos correspondientes.
4. La fuerza media producida por una molécula de un gas al chocar con una pared del recipiente que lo contiene es proporcional a la velocidad con que choca, ¿cómo se explica entonces que la presión sea proporcional al cuadrado de la velocidad?
5. ¿De dónde procede el factor $1/3$ que aparece en la ecuación fundamental de la teoría cinético-molecular?
6. Dos tanques contienen un mismo gas a igual presión y temperatura, pero el volumen de uno es mayor que el del otro. Compara: a) la energía cinética media de sus moléculas, b) la velocidad media de ellas, c) la energía cinética total de ellas? Argumenta.
7. Dos tanques idénticos contienen uno hidrógeno y otro oxígeno a la misma presión y temperatura. Compara: a) la energía cinética media de sus moléculas, b) la velocidad media de ellas, c) la energía cinética total de ellas. Argumenta.
8. Dos tanques idénticos están a la misma temperatura y tienen la misma masa de gas, pero uno contiene hidrógeno y el otro oxígeno. Compara: a) la energía cinética media de las moléculas, b) la velocidad media de ellas, c) la energía cinética total de ellas? Argumenta.
9. Se aumenta la cantidad de gas en un tanque, manteniendo la temperatura constante. ¿Qué sucede con: a) la energía cinética media de las moléculas, b) la energía cinética total de ellas, c) la presión del gas.





10. Dos tanques idénticos contienen cada uno 1 g de gas ideal, pero la masa de las moléculas de uno de los gases es mayor que la del otro (por ejemplo, helio y xenón).
a) ¿En cuál de ellos es mayor la presión? b) ¿En cuál se necesita suministrar mayor cantidad de energía mediante calor, para elevar la temperatura en 1 °C?
11. Apoyándote en la teoría cinético-molecular, da una explicación cualitativa de cada una de las leyes de los gases.
12. Menciona ejemplos concretos de procesos de cambios en un gas que aproximadamente puedan ser considerados: a) isotérmico, b) isobárico, c) isocórico.
13. Con la boca cerrada, infla los cachetes. Al hacer esto, aumentan tanto la presión como el volumen de aire. ¿Cómo se explica esto, si según la ley de Boyle-Mariotte la presión y el volumen son inversamente proporcionales?
14. Dibuja cómo son los gráficos de un proceso isobárico en un sistema de coordenadas:
a) p, T ; b) p, V ; c) V, T ?

4.5.5. Ejercicios de repaso

1. La densidad del gas en cierto bombillo de filamento incandescente es 0.92 kg/m³ y su presión 8.0×10^4 Pa. a) ¿Cuál es la velocidad media cuadrática de sus moléculas?
b) ¿En cuánto aumenta al encender el bombillo, si la presión del gas creció hasta 1.1×10^5 Pa?

Respuesta: a) 6.0×10^2 m/s, b) 88 m/s

2. Seis moléculas de un gas tienen velocidades de 500, 600, 600, 700, 800 y 900 m/s. Determina: a) la velocidad media, b) la velocidad media cuadrática.

Respuesta: a) 683 m/s, b) 696 m/s

3. Se sabe que para los gases la velocidad media cuadrática es 1.08 veces mayor que la velocidad media. Muestra que eso representa una diferencia de la primera respecto a la segunda de 8%.

4. Comúnmente la temperatura del cuerpo humano es 37 °C. Expresa dicha temperatura en μ lvin.

Respuesta: 310 K

5. Calcula la energía cinética media de las moléculas del aire y la velocidad media cuadrática de las de oxígeno para: a) 40 °C, b) 0 °C ($k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K y $m_o = 5.31 \times 10^{-26}$ g).

Respuesta: a) 6.48×10^{-21} J, 494 m/s; b) 5.65×10^{-21} J, 461 m/s





6. Una temperatura baja y otra alta en nuestro planeta son $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. a) ¿Cuánto representa en por ciento el aumento entre la energía cinética media de las moléculas a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ respecto a la energía cinética media de ellas a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$? b) ¿y el aumento de la velocidad media cuadrática de las moléculas de oxígeno? Utiliza los datos que necesites del ejercicio anterior.

Respuesta: a) 34%, b) 16%

7. Un gas está a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, ¿hasta qué temperatura debe calentarse para que la velocidad media cuadrática de sus moléculas se duplique?

Respuesta: $1200\text{ K} = 927\text{ }^{\circ}\text{C}$

8. Un recipiente contiene gas comprimido a una temperatura de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si se deja salir la mitad de la masa del gas y la temperatura se eleva hasta $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, ¿su presión será igual, mayor o menor que la inicial?

Respuesta: menor.

9. Si la temperatura del gas del bombillo del ejercicio 1 era $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, ¿qué temperatura alcanzó después de encendido? Utiliza los datos que necesites del ejercicio 1.

Respuesta: $411\text{ K} = 138\text{ }^{\circ}\text{C}$

10. Cierta tanque de gas de cocinar tiene una capacidad de 22 L. Si la presión del gas en el tanque es de 160 atm, ¿qué volumen ocuparía el gas a la presión normal de 1.0 atm e igual temperatura?

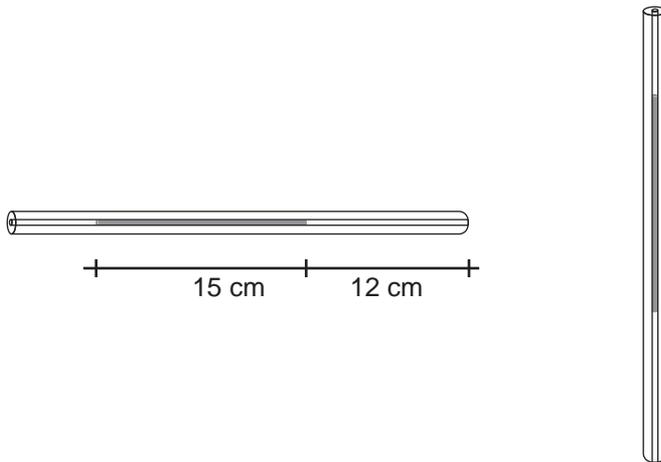
Respuesta: $3.5 \times 10^3\text{ L} = 3.5\text{ m}^3$

11. Un recipiente cerrado de 2.0 litros contiene aire a una presión de $5.0 \times 10^4\text{ Pa}$ y a la temperatura de la habitación. El recipiente se introduce en agua a igual temperatura y una profundidad de 2.0 m. ¿Qué volumen de agua entrará en el recipiente si se abre? Considera que la presión atmosférica es $1.0 \times 10^5\text{ Pa}$ y que la densidad del agua es $1.0 \times 10^3\text{ kg/m}^3$.

Respuesta: 1.2 L

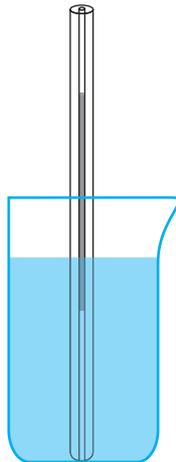
12. Un tubo muy estrecho, cerrado por uno de sus extremos y en el cual hay una columna de aire seguida de otra de mercurio, comúnmente se denomina tubo de Boyle. En cierto tubo de Boyle colocado en posición horizontal, la columna de aire tiene una longitud de 12.0 cm y la de mercurio de 15.0 cm ¿Cuál será la longitud de la columna de aire si el tubo se coloca en posición vertical de modo que la columna de mercurio quede encima de ella? Considera que la densidad del mercurio es $1.36 \times 10^4\text{ kg/m}^3$ y la presión atmosférica $1.01 \times 10^5\text{ Pa}$ y que la sección transversal del interior del tubo es uniforme.

Respuesta: 10.0 cm



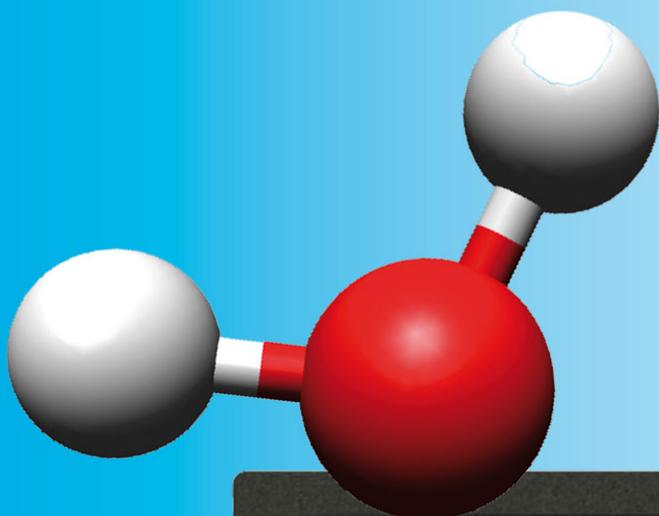
13. Considera que el tubo de Boyle de la actividad anterior estaba a $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y utiliza el resultado allí obtenido para calcular la longitud que tendrá la columna de aire al introducirlo verticalmente en agua caliente a $70.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y esperar unos minutos. Utiliza los datos que necesites del ejercicio anterior.

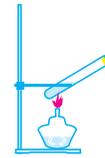
Respuesta: 11.5 cm



5

Nociones de Termodinámica





5. Nociones de Termodinámica

La **Termodinámica** desempeña un papel esencial en el conocimiento de las propiedades de la materia: estudia las **propiedades y fenómenos térmicos**. Surgió y se desarrolló en la segunda mitad del siglo XIX, durante la búsqueda de condiciones óptimas para transformar energía térmica en mecánica mediante máquinas. La Termodinámica trata así de la **energía**, concepto con el que ya estás familiarizado.

Recuerdo que la Dinámica, como parte de la Mecánica, estudia los factores que determinan las características del movimiento. ¡Así que, por analogía, la Termodinámica debe estudiar los factores que determinan las características de los procesos térmicos!

En Mecánica 2, al estudiar el tema de la energía la atención se centró en su **conservación**, para lo cual es preciso suponer que el sistema examinado está **aislado**, es decir, que **no intercambia energía con el exterior**. Por ejemplo, cuando consideramos que en el caso habitual de una pelota lanzada hacia arriba la suma de las energías cinética y potencial permanece constante, estamos suponiendo que no interactúa con el aire, en otras palabras, que el sistema Tierra-pelota está aislado.

En contraste con lo anterior, la Termodinámica examina en lugar de sistemas aislados, todo lo contrario: **los procesos de intercambio de energía del sistema con el exterior**.

En este capítulo introduciremos el concepto de **energía interna**, profundizaremos en los de **trabajo y calor**, ya conocidos por ti, y estableceremos la relación que hay entre esos tres conceptos, lo cual nos conducirá a la **primera ley de la Termodinámica**. Luego veremos algunos hechos relacionados con la **segunda ley de la Termodinámica**, en particular, que la transformación espontánea de energía tiene lugar en una dirección determinada y que es imposible construir una máquina térmica con 100% de eficiencia, por mucho desarrollo que pueda alcanzar la tecnología. En los últimos apartados examinaremos el principio básico de funcionamiento de las máquinas térmicas y cuestiones





relativas a la preservación del medio ambiente. Esto ya fue abordado en Mecánica 2, pero dada su enorme importancia profundizaremos en algunos de sus aspectos.

Por consiguiente, entre las preguntas claves en este capítulo estarán:

¿Qué se entiende por energía interna de un cuerpo? ¿Qué peculiaridades tiene el trabajo en Termodinámica y cómo calcularlo? ¿Cómo calcular la energía transmitida a un cuerpo mediante calor? ¿Cuál es la relación entre energía interna, trabajo y calor? ¿En qué dirección ocurre la transformación y transmisión de energía? ¿En qué consiste el principio básico de funcionamiento de las máquinas térmicas y de qué depende la eficiencia de ellas? ¿Cómo preservar el medio ambiente?

¿Recuerdan lo estudiado sobre el concepto de energía en Mecánica 2?

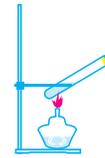
5.1. Energía interna

¿Qué se entiende por energía interna de un cuerpo?

Sí, recuerdo que la energía caracteriza la magnitud de los cambios que ocurren en un momento dado, o que tienen posibilidad de ocurrir.

También se habló de energía interna, que es el título de este apartado. Me parece que es la que poseen las partículas que constituyen los cuerpos.





Además de energía mecánica (potencial y/o cinética), los cuerpos poseen energía asociada a las moléculas que los forman. En un **gas ideal**, constituido por moléculas monoatómicas, la **energía cinética de las moléculas es solo de traslación**. Pero en la mayoría de los gases las moléculas están formadas por varios átomos, por lo que además de energía cinética de traslación pueden tener **energía cinética de rotación y de vibración**. Por otra parte, en los gases reales a grandes presiones y en los líquidos y sólidos, también es necesario tomar en cuenta la **energía potencial de interacción de las moléculas**. Además, las partículas del interior de las moléculas, igualmente poseen energía. Todo ello constituye lo que se denomina **energía interna** de los cuerpos.

Argumenta por qué en los gases reales a grandes presiones y en los líquidos y sólidos, siempre hay que tener en cuenta a la energía potencial de interacción de las moléculas.

Sin embargo, **la energía interna que toma en cuenta la Teoría Cinético-Molecular, es solo la cinética de las moléculas y la potencial de interacción entre ellas.**

Esto se debe a que al analizar los fenómenos térmicos, si las temperaturas no se elevan demasiado, la energía del interior de los átomos permanece la misma y, por ello, no es necesario tomarla en consideración.

¿Y por qué cuando la temperatura se eleva mucho sí es necesario tener en cuenta la energía del interior de los átomos?

Los choques entre las moléculas pueden ser tan fuertes que rompan las moléculas e incluso afecten la estructura de los átomos. Estos pueden ionizarse, emitir radiación, con lo cual varía la energía del interior de ellos.





La Física Atómica y la Física Nuclear sí examinan procesos en los cuales es esencial considerar la energía del interior de los átomos y sus núcleos.

Resume con tus palabras en qué consiste la energía interna de los cuerpos y qué parte de ella se toma en cuenta en la Teoría Cinético-Molecular y por qué.

El caso en que resulta más simple calcular la energía interna que interesa en la teoría cinético-molecular es el del **gas ideal**, en el cual las moléculas están representadas por esferitas cuya rotación, deformación, estructura interna e interacción a distancia no se consideran. En ese caso la energía cinética de traslación que como promedio corresponde a una molécula del gas es: $\overline{E_c} = \frac{3}{2}kT$. Por eso, si en cierta cantidad de **gas ideal** hay N moléculas, entonces la energía cinética total de ellas y, por consiguiente, la **energía interna que interesa en la teoría cinético-molecular** es:

$$E_i = N \frac{3}{2} kT$$

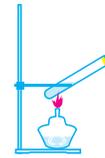
Teniendo en cuenta que es posible expresar el número N de moléculas que hay en cierta cantidad de gas como $N = N_m N_A$, donde N_m es el número de moles y N_A el número de Avogadro, la ecuación anterior puede escribirse:

$$E_i = N_m N_A \frac{3}{2} kT$$

Y como $N_A k = R$, se tiene otra expresión equivalente para la energía interna de un gas ideal:

$$E_i = \frac{3}{2} N_m R T$$

Las dos ecuaciones destacadas anteriormente hacen explícito que **la energía interna de cierta cantidad de gas ideal es proporcional a la temperatura T y que solo depende de ella**. En otras palabras, si la temperatura permanece constante, entonces aún cuando varíen la presión y el volumen del **gas ideal**, su energía interna no cambia.



En los **gases cuyas moléculas están formadas por más de un átomo**, a la energía interna debida a la traslación de las moléculas ($3/2 N_m RT$) se añade la debida a la rotación y, para temperaturas elevadas, también la de vibración de ellas. En estos casos la energía interna sigue siendo proporcional a la temperatura, pero el coeficiente que interviene en las ecuaciones anteriores es mayor que $3/2$. Si la separación media entre las moléculas del gas no es suficientemente grande, entonces en su energía interna habría que considerar, además, la energía potencial de interacción de ellas. En tal caso la energía interna ya no sería proporcional a la temperatura.

¿Lo dicho en el texto significa que si se tienen dos recipientes a la misma temperatura y con igual número de moléculas, pero uno con helio y otro con oxígeno, entonces la energía interna de este último es mayor?

Sí, las moléculas de helio son monoatómicas y las de oxígeno biatómicas, por lo que éstas, además de trasladarse, pueden rotar y vibrar.

En conclusión, **la ecuación $E_i = N 3/2 kT$ es válida solo para gases que se aproximan al gas ideal, en los demás casos la energía interna considerada por la teoría cinético-molecular es mayor.**

La energía interna de los cuerpos líquidos y sólidos, ¿será $N 3/2 kT$? Argumenta.

Puesto que en realidad, la energía interna de los cuerpos depende de la interacción entre sus moléculas y ésta, a su vez, de la separación entre ellas, se deduce que, en general (con la sola excepción del gas ideal), la energía interna de determinado cuerpo depende no solo de su **temperatura**, sino también de su **volumen**.

En general, la energía interna considerada en la teoría cinético-molecular depende de: a) la temperatura del cuerpo y b) su volumen.





¿Entonces cuando un líquido o un sólido se calienta y dilata, aumenta la energía potencial de interacción de sus moléculas?

Sí, al calentarlo, una parte de la energía transmitida se invierte en aumentar la energía cinética de sus moléculas, o sea de la temperatura del cuerpo, pero otra parte en aumentar la energía potencial de interacción de ellas.

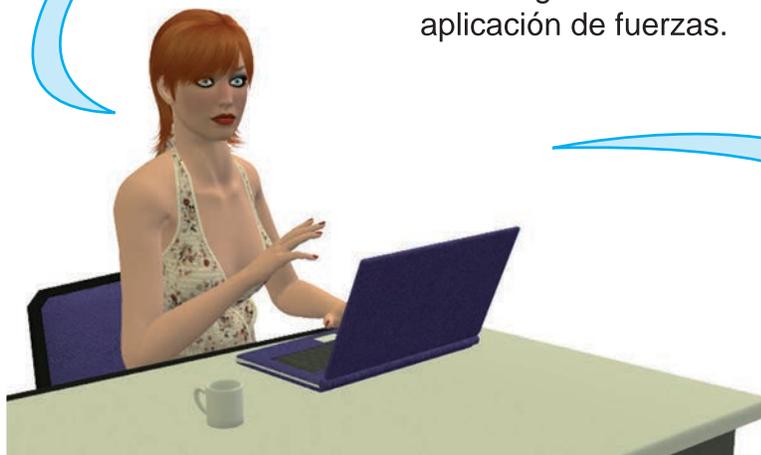
Un ejemplo cotidiano que ilustra muy bien la dependencia de la energía interna con el volumen del cuerpo, es el de la ebullición de cierta cantidad de agua. La temperatura permanece constante, sin embargo, durante el paso de líquido a vapor su volumen está aumentando enormemente y, con ello, su energía interna. La energía que se transmite al agua va a parar a energía potencial de interacción de sus moléculas.

Resume en qué situaciones la energía interna de un cuerpo depende de: a) su temperatura, b) su temperatura y volumen.

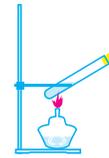
Menciona ejemplos comunes de transformación o transmisión de energía mediante: a) trabajo, b) calentamiento o calor.

En los apartados que siguen analizaremos dos procesos mediante los cuales puede variar la energía interna de un cuerpo: a) realización de **trabajo** y b) **calentamiento** o **transmisión de calor**.

Como conoces, **trabajo** es el proceso en el cual se **transforma y transmite** energía **mediante la aplicación de fuerzas**, y **calentamiento**, el proceso de **transmisión de energía en forma de movimiento molecular**, sin la aplicación de fuerzas.



Hemos llamado calentamiento a la transmisión de energía en forma de movimiento molecular. ¿Mediante qué otra vía, sin aplicar fuerzas, puede transmitirse energía a un cuerpo?



5.2. Trabajo en Termodinámica

En Mecánica aprendiste que si se aplica una fuerza constante sobre un cuerpo que no rota ni se deforma, sino que solo se traslada, el trabajo se calcula mediante la fórmula $W = F\Delta x \cos\theta$ y que dicho trabajo es igual a la variación de la energía cinética del cuerpo. Sin embargo, en Termodinámica estas cuestiones son algo diferentes.

¿Qué peculiaridades tiene el trabajo en Termodinámica y cómo calcularlo?

Resulta que la Termodinámica no examina la traslación de los cuerpos, sino **la deformación de ellos, producto de lo cual cambian su volumen**. Pero al deformarse, el punto de aplicación de la fuerza se desplaza y, por tanto, se realiza trabajo. ¿Cómo calcular el trabajo realizado durante el cambio de volumen de un cuerpo?

Comenzaremos con un caso sumamente simple, el de un gas encerrado en un cilindro con pistón. Supondremos que el pistón puede desplazarse libremente, sin rozamiento. Inicialmente el gas tiene un volumen V_1 y una presión P . (Fig. 5.1a) (determinada por la presión atmosférica y el peso del pistón). Si el área del pistón es A , la fuerza que el gas ejerce sobre él es $F = PA$. Imagina ahora que el gas se calienta y se expande lentamente, de modo que todo el tiempo está en equilibrio (Fig. 5.1b). Solo en estas condiciones la presión y la temperatura son las mismas a través de todo el gas y será posible caracterizarlo en su conjunto por unos valores únicos de estas magnitudes; además, en ese caso **la presión del gas, y por tanto la fuerza ejercida por él, puede considerarse constante**. El desplazamiento del pistón es $h_2 - h_1 = \Delta h$ (Fig. 5.1b), por lo que el trabajo que el gas realiza sobre él es:

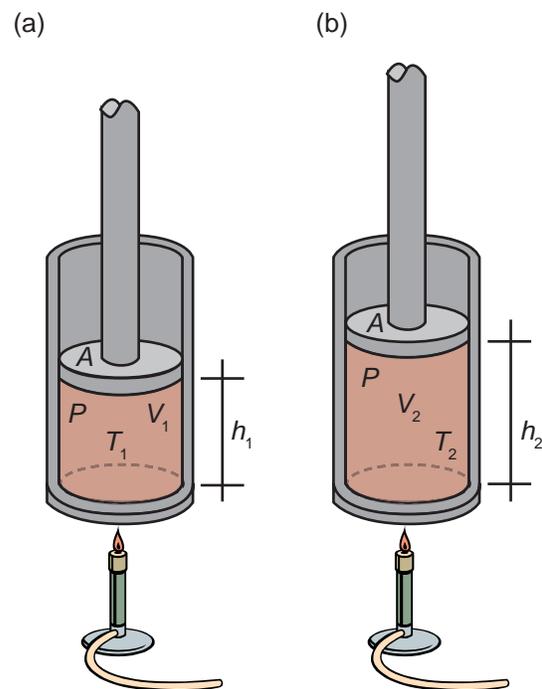


Fig. 5.1. (a) La presión y el volumen del gas bajo el pistón son P y V_1 . (b) La temperatura del gas se eleva lentamente y su volumen aumenta hasta V_2 , manteniéndose constante la presión. El trabajo realizado por el gas es $P\Delta V$.



¿Entonces el proceso representado en la figura 5.1 es isobárico?

Sí, nota que el gas ejerce sobre el pistón una presión y una fuerza hacia arriba y que en todo momento esta fuerza es equilibrada por la de gravedad y la debida a la presión atmosférica que actúan sobre el pistón hacia abajo. Y como estas son constantes, significa que la presión ejercida por el gas también.

$W = F\Delta h$

Pero como $F = PA$ se tiene:

$W = PA\Delta h$

Observa que $A\Delta h$ es la variación ΔV del volumen del gas, de ahí que el trabajo realizado por el gas es:

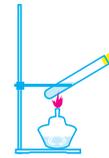
$W = P\Delta V$

Puesto que en el caso analizado el volumen final V_2 es mayor que el inicial V_1 , la variación de volumen ΔV del gas es positiva y, por consiguiente, también el trabajo realizado por él. En este proceso el gas transmite energía al pistón mediante trabajo.

Si, a la inversa, el estado inicial del gas es el representado en la figura 5.1b y se hace descender su temperatura lentamente, entonces su volumen disminuye al representado en la figura (Fig. 5.1a). En tal caso la variación de volumen ΔV es negativa y, por tanto, también el trabajo realizado por el gas. En este caso el gas recibe energía del pistón mediante trabajo.

Observa que **el trabajo realizado por el gas (por el sistema) es positivo si entrega energía y negativo si la recibe.**

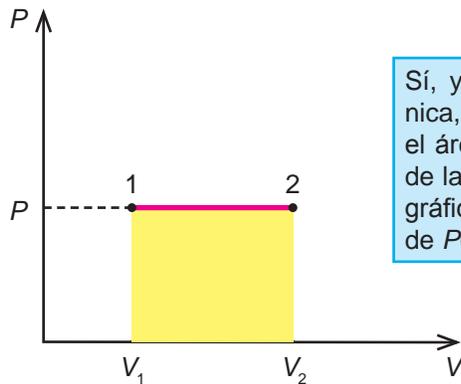
Pero debes prestar atención a que la conclusión anterior se refiere al **trabajo realizado por el gas**. Según la tercera ley de Newton, la fuerza que ejerce el pistón sobre el gas es de igual magnitud y sentido contrario que la ejercida por el gas sobre él. De ahí que el trabajo realizado por el pistón sobre



el gas y el de éste sobre el aquel, sean de igual magnitud y signos opuestos.

En la figura 5.2 se muestra el gráfico de los procesos descritos en un sistema de coordenadas P , V . Ya que la presión es constante, el gráfico es una recta paralela al eje del volumen. En el gráfico, el proceso de calentamiento del gas corresponde al tránsito por la recta de 1 a 2 y el proceso de enfriamiento, al tránsito en sentido inverso, de 2 a 1. Nota que el valor del trabajo realizado por el gas, $W = P\Delta V$, es numéricamente igual al área del rectángulo sombreado, o sea, **igual al área comprendida entre el gráfico y el eje del volumen.**

Ya veo, el cálculo del trabajo es análogo que en Mecánica, $W = F\Delta x$, solo que ahora el lugar de la fuerza lo ocupa la presión y el del desplazamiento la variación de volumen, es decir $W = P\Delta V$.



Sí, y también como en Mecánica, el trabajo viene dado por el área entre el gráfico y el eje de las abscisas, solo que allí el gráfico era de $F(x)$ y ahora es de $P(V)$.



Fig. 5.2. Gráfico de $P(V)$ correspondiente a la expansión o compresión de un gas a presión constante. El área comprendida entre el gráfico y el eje V es numéricamente igual al trabajo realizado, $P\Delta V$.

Consideremos ahora una situación más general, en que **la presión del gas no permanece constante**, como por ejemplo, en una expansión **isotérmica** del gas. Esta vez, en lugar de calentar el gas, simplemente se tira del pistón hacia arriba lentamente (Fig. 5.3). La lentitud del proceso garantiza que haya tiempo para el intercambio térmico con el medio, de modo que su temperatura permanezca siempre la misma, y también que el gas permanezca en equilibrio y su presión y temperatura sean las mismas a través de todo él. Según aumenta el volumen del gas, disminuye su presión. ¿Cómo calcular el trabajo en este caso que la presión es variable? La solución consiste en reducir mentalmente esta nueva situación a la anterior, ya conocida.



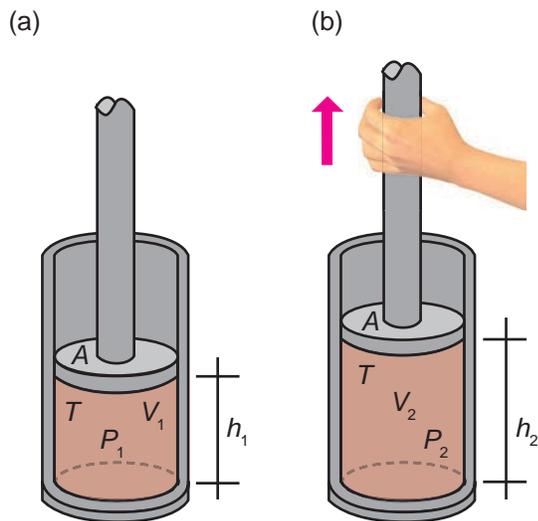


Fig. 5.3. (a) La presión y el volumen del gas bajo el pistón son P_1 y V_1 . (b) Se tira del pistón hacia arriba lentamente, de modo que el volumen del gas aumenta y su presión disminuye hasta P_2 , manteniéndose constante su temperatura.



En la situación de la figura 5.3, ¿será positivo o negativo el trabajo realizado por el gas? ¿Y el realizado por la fuerza con que la mano tira del pistón?

Se considera el cambio total de volumen del gas, ΔV dividido en intervalos tan pequeños ($\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \dots$), que en ellos la presión pueda asumirse constante, se calcula el trabajo en cada uno de esos intervalos ($P_1\Delta V_1, P_2\Delta V_2, P_3\Delta V_3, \dots$) y luego se suman ($W = P_1\Delta V_1 + P_2\Delta V_2 + P_3\Delta V_3, \dots$). Esta suma puede realizarse con ayuda del **Cálculo Integral**. Pero aquí nos conformaremos con una interpretación gráfica (Fig. 5.4). Como en el caso anterior, en éste también **el trabajo viene dado por el área comprendida entre el gráfico y el eje del volumen**.

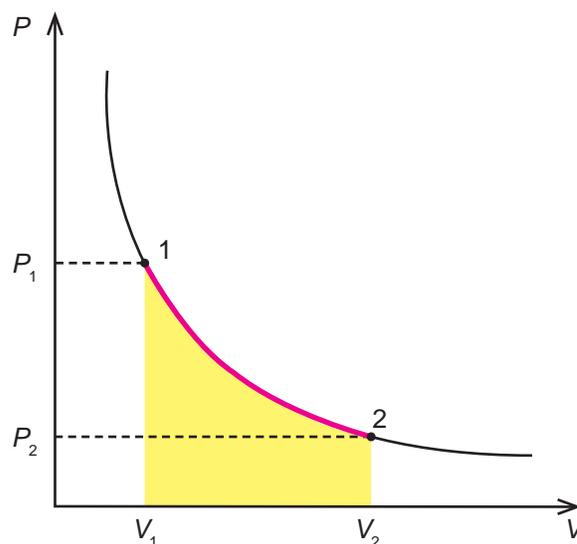
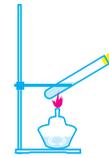


Fig. 5.4. Gráfico de $p(V)$ correspondiente a la expansión de un gas a temperatura constante (isoterma). El área sombreada es numéricamente igual al trabajo realizado por el gas al pasar del estado 1 al 2.

Hemos visto cómo calcular el trabajo realizado sobre un cuerpo cuando se aplica una fuerza sobre él y cambia de volumen. En tal caso el proceso de realización de trabajo sobre el cuerpo conduce a la variación de su energía interna.

Mediante el proceso de realización de trabajo es posible transformar cierta cantidad de energía en energía interna del cuerpo.



Utilizando el concepto de trabajo, explica por qué si el pistón del cilindro de la figura 5.3 se extrae rápidamente, sin dar tiempo a que haya intercambio de energía con el exterior, la temperatura del gas desciende.

Si martillamos repetidas veces un trozo de plomo que está sobre una mesa, no adquiere energía cinética, pero en cambio su temperatura se eleva, poniendo de manifiesto que su energía interna aumenta.

5.3. Cantidad de calor. Calor específico

Acabamos de ver que la energía interna de un cuerpo puede variar mediante realización de trabajo, ahora consideraremos su variación mediante **calor**.

Al calentar un cuerpo puede aumentar la energía cinética de sus moléculas (cuando se eleva su temperatura), la energía potencial de ellas (cuando se funde o vaporiza), o ambas (cuando se eleva su temperatura y se dilata). En cualquiera de los casos el calentamiento conduce a aumentar la energía interna del cuerpo.

Nota que, a diferencia del trabajo, el proceso de **calentamiento** no consiste en **transformar** alguna otra forma de energía en interna, sino en **transmitir** parte de la energía interna del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura.

La cantidad de energía que se transmite de un cuerpo a otro mediante calentamiento, usualmente se denomina *cantidad de calor (Q)*.





¿Entonces durante el calentamiento se transmite calor de un cuerpo a otro?



Aunque con frecuencia se dice que durante el calentamiento se transmite calor de un cuerpo a otro, en realidad eso no es correcto. Lo que se transmite de un cuerpo a otro es energía, energía interna.

¿Cómo calcular la energía transmitida a un cuerpo mediante calor?

Ya en el curso de Mecánica 2 viste que la cantidad de calor que recibe o cede un cuerpo de masa m al variar su temperatura de un valor T_1 a otro T_2 se calcula mediante la fórmula:

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm\Delta T$$

El coeficiente c se denomina **calor específico** y depende de la sustancia.

El **calor específico** representa la cantidad de calor que una sustancia recibe o cede por cada kilogramo y por cada kelvin (o por cada grado celsius), al variar su temperatura.

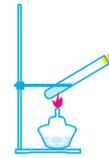
Por ejemplo, el calor específico del agua líquida es $4.2 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$. Esto significa que por cada kilogramo y por cada kelvin (o grado celsius) recibe o cede $4.2 \times 10^3 \text{ J}$ al variar su temperatura.



¿Será lo mismo expresar el calor específico de una sustancia en $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ que en $\frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$? Argumenta.

Si el cuerpo recibe cantidad de calor y su temperatura se eleva, entonces ΔT es positivo y, por tanto, Q también. Si, por el contrario, el cuerpo cede cantidad de calor y su temperatura disminuye, entonces ΔT es negativo y en consecuencia Q también.

La cantidad de calor Q es positiva cuando el cuerpo la recibe y negativa cuando la cede.



Ejemplo. 5.1. Se calientan 2.0 L de agua y su temperatura se eleva de 25 °C a 100 °C.

- a) Calcula la energía recibida por el agua. b) Para que tengas una idea de lo grande que es esa energía, determina a qué altura podría elevarse un cuerpo de 100 kg de masa que sea lanzado verticalmente hacia arriba con esa energía cinética. La densidad del agua es $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Utilizaremos la fórmula $Q = cm\Delta T$. Por eso debemos determinar la masa de agua. El cálculo en este caso es inmediato, pero de todos modos lo haremos formalmente: 2.0 L equivale a 2.0 dm^3 , es decir, a $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, por lo que:

$$m = \rho V = \left(1.0 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)(2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 2.0 \text{ kg}$$

Puesto que 1 °C equivale a 1 K, es lo mismo expresar **la variación** de temperatura en grado celsius que en kelvin. En el caso de este problema, la variación de temperatura es $\Delta T = 100 \text{ °C} - 25 \text{ °C} = 75 \text{ °C}$, que equivale a decir, de 75 K. Por igual razón, da igual expresar el calor específico en J / kg °C que en J / kg K. De este modo:

$$Q = cm\Delta T = \left(4.2 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}\right)(2.0 \text{ kg})(75 \text{ K}) = 6.3 \times 10^5 \text{ J}$$

- b) Cuando se lanza un cuerpo hacia arriba, su energía cinética inicial se transforma en potencial gravitatoria. Por consiguiente:

$$6.3 \times 10^5 \text{ J} = mgh$$

De donde:

$$h = \frac{6.3 \times 10^5 \text{ J}}{mg} = \frac{6.3 \times 10^5 \text{ J}}{(100 \text{ kg})\left(9.8 \frac{\text{N}}{\text{kg}}\right)} = 6.4 \times 10^2 \text{ m}$$

Es decir, un cuerpo de 100 kg lanzado verticalmente hacia arriba con una energía cinética de $6.3 \times 10^5 \text{ J}$ se elevaría a más de 600 m, si no influyera la resistencia del aire. Esto ilustra lo grande que es la cantidad de energía transmitida al agua.





Ejemplo 5.2. Un cuerpo de aluminio de 43 g se introdujo en un vaso con agua a 80 °C. Luego se extrajo y se introdujo en un vaso de frigolit con 100 g de agua a 20.0 °C. La temperatura de ésta subió a 25.0 °C. a) Calcula la cantidad de calor transmitida al agua del vaso de frigolit. b) Desprecia la cantidad de calor transmitida al frigolit y la disipada en el ambiente y determina el calor específico del aluminio.

a) La variación de temperatura del agua del vaso de frigolit es:

$$\Delta T = 25.0\text{ °C} - 20.0\text{ °C} = 5.0\text{ °C} = 5.0\text{ K}$$

Por consiguiente, la cantidad de calor que se le transmite es:

$$Q = cm\Delta T = \left(4.2 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}\right)(0.10\text{ kg})(5.0\text{ K}) = 2.1 \times 10^3\text{ J}$$

b) Si se desprecia la cantidad de calor transmitida al vaso de frigolit y la disipada en el ambiente, entonces la cantidad de calor cedida por el cuerpo de aluminio es igual a la transmitida al agua, por lo que:

$$c_{\text{al}}m_{\text{al}}\Delta T_{\text{al}} = 2.1 \times 10^3\text{ J}$$

La variación de temperatura del cuerpo de aluminio es:

$$\Delta T_{\text{al}} = 80\text{ °C} - 25\text{ °C} = 55\text{ °C} = 55\text{ K}$$

De ahí que:

$$c_{\text{al}} = \frac{2.1 \times 10^3\text{ J}}{m_{\text{al}}\Delta T_{\text{al}}} = \frac{2.1 \times 10^3\text{ J}}{(0.043\text{ kg})(55\text{ K})} = 8.9 \times 10^2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

El valor que aparece en las tablas para el calor específico del aluminio es:

$$9.0 \times 10^2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

La diferencia entre este valor y el resultado obtenido probablemente se debe al hecho de que al realizar los cálculos no se tuvo en cuenta la energía transmitida al frigolit ni la disipada en el ambiente.

En realidad, la cantidad de energía que recibe o cede un cuerpo al variar su temperatura en determinado valor, y por tanto su calor específico, **dependen de si el cuerpo solamente varía su temperatura o, además de ello, también varía su volumen.** Por ejemplo, en la situación de la figura 5.5 se ha representado el calentamiento de un gas de dos formas: en (a) el pistón se ha fijado y se calienta manteniéndose su volumen constante, mientras que en (b) el pistón se ha dejado libre, el gas se dilata y el calentamiento tiene lugar a presión constante. En el caso (b), además de elevar su temperatura, el gas realiza trabajo, por lo que para igual variación de temperatura que en (a) requiere más energía. Por eso se distinguen dos tipos de calores específicos: a volumen constante (c_v) y a presión constante (c_p). El calor específico a presión constante es mayor que a volumen constante, porque en ese caso el gas realiza trabajo: $c_p > c_v$. La presión a la que se miden los calores específicos a presión constante es la presión atmosférica.

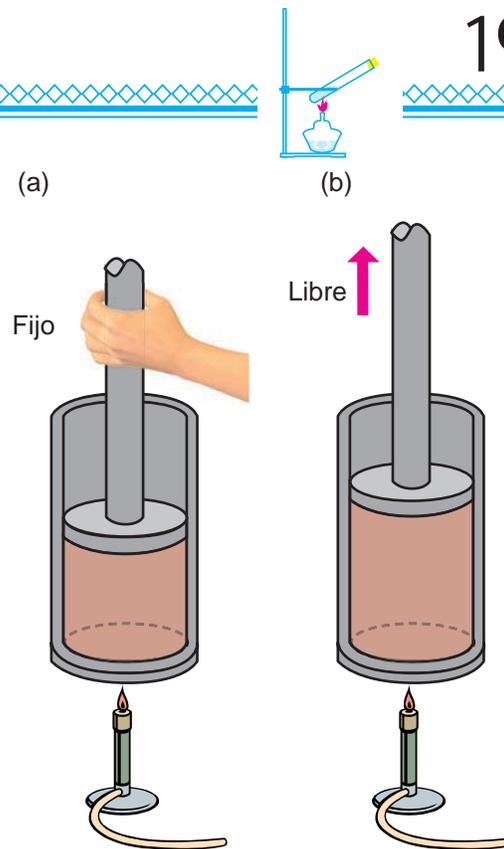


Fig. 5.5. Calentamiento de un gas: (a) a volumen constante, (b) a presión constante. En (b), además de elevar su temperatura, el gas realiza trabajo por lo que para igual elevación de temperatura que en (a) se necesita más energía.

En el caso de los líquidos y sólidos, como la variación de volumen debido al calentamiento es relativamente pequeña, las diferencias entre los calores específicos a presión constante y a volumen constante también lo son, por lo que en la práctica no suelen diferenciarse. Ese era el caso de los ejemplos 5.1 y 5.2.

Observa que desde el punto de vista práctico solo tiene sentido distinguir entre los calores específicos a volumen constante y a presión constante, en el caso de los gases. En los sólidos y líquidos dichos calores específicos son aproximadamente iguales y la mayoría de las veces no tiene sentido diferenciarlos.





En rigor, el calor específico también depende de la temperatura, pero si el intervalo de variación de ésta no es muy grande, entonces su valor puede considerarse el mismo para todo el intervalo. Por ejemplo, el valor del calor específico que hemos dado para el agua, $4.2 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$, vale para todo el intervalo entre 0°C y 100°C .

La dependencia más notable del calor específico es con la naturaleza de la sustancia. Esto se debe a diferencias entre las características microscópicas de distintas sustancias, en particular: en sus **masas moleculares**, en la **complejidad de sus moléculas** y en los **tipos de enlaces que forman sus átomos**.

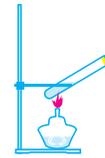
Así, la sustancia de menor masa molecular es el hidrógeno y en estado gaseoso tiene el mayor calor específico, $14.3 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$. En las sustancias de pequeña masa molecular se requiere un mayor número de moléculas para llegar a tener un kilogramo. Y como la energía cinética de traslación que en promedio corresponde a cada molécula es $\frac{2}{3}kT$, resulta obvio que mientras mayor sea el número de moléculas mayor será la cantidad de energía requerida para variar en una misma magnitud la temperatura.



El argón tiene una masa molecular diez veces mayor que el helio. Ambos son gases simples, monoatómicos. ¿Qué puede esperarse acerca de la relación entre sus calores específicos?

El uranio, el plomo, el oro y el mercurio, a causa de sus grandes masas moleculares (atómicas) están entre las sustancias de menor calor específico. Para el oro y el plomo sólidos es $1.3 \times 10^2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ y para el mercurio líquido $1.4 \times 10^2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$. Puedes comprobar que estos valores son más de 100 veces menores que el del hidrógeno.

Pero el calor específico de una sustancia depende no solo de la masa molecular de la sustancia, sino también de la complejidad de sus moléculas y de los tipos de enlaces entre sus átomos. Por ejemplo, en un kilogramo de hidrógeno hay 9 veces más moléculas que en uno de agua y, sin embargo, su calor específico es solo 3.4 veces mayor que el del agua. Esto se explica, en parte, porque la



molécula de agua, debido a que es más compleja, invierte parte de la energía que se le comunica en realizar más movimientos que la de hidrógeno, pero sobre todo, porque cierto tipo de enlace entre sus moléculas, denominado puente de hidrógeno, tiene la capacidad de absorber gran parte de la energía que se le transmite. Ello determina su elevado calor específico: entre todos los líquidos y sólidos, es la sustancia de mayor calor específico.

El elevado calor específico del agua influye en que las islas y zonas costeras de los continentes mantengan una temperatura más estable que otros lugares. ¿Podrías explicar por qué?

Resume los factores de los que, en general, depende el calor específico de una sustancia.

No, puede ir a parar a energía cinética de rotación de las moléculas, de vibración, e incluso de los enlaces de sus átomos. Y si el volumen del cuerpo varía, cierta parte también se invierte en energía de interacción de las moléculas y en realización de trabajo contra la presión atmosférica. De todo ello depende el valor del calor específico c .



Entonces la energía que se transmite a un cuerpo, calculada mediante la fórmula $Q = cm\Delta T$, ¿no siempre va a parar a energía cinética de traslación de sus moléculas?

5.4. Calores específicos de vaporización y de fusión

Cuando calentamos agua, después que comienza a bullir, su temperatura se mantiene constante. Esto significa que ya no aumenta la energía cinética media de sus moléculas. ¿En qué se invierte la energía que seguimos suministrándole mediante calor?

Durante la transformación de cierto líquido en vapor, aumenta grandemente la separación promedio de sus moléculas y, por consiguiente, la energía potencial de interacción entre ellas.





¿En qué se invierte la energía que se suministra al agua durante su ebullición?

También, puesto que el volumen del sistema aumenta, se realiza cierto trabajo contra la presión atmosférica. Sin embargo, la energía invertida en esto es muy pequeña comparada con la que va a parar a energía potencial de interacción de la moléculas.

Para calcular la energía transmitida a un cuerpo durante su vaporización no puede ser utilizada la fórmula $Q = cm\Delta T$, lo cual es obvio, pues la temperatura no varía. En lugar de ella se emplea la fórmula:

$$Q = L_v m$$

El coeficiente L_v se denomina **calor específico de vaporización**, o **calor latente de vaporización**.

El **calor específico de vaporización** representa la cantidad de energía que recibe un cuerpo por cada kilogramo al pasar de líquido a vapor (vaporización), o la que entrega al pasar de vapor a líquido (condensación).

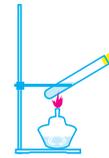
El calor específico de vaporización del agua, $2.26 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$, es grande, entre 3 y 10 veces mayor que el de otros líquidos.

Durante la fusión de las sustancias cristalinas, la temperatura también permanece constante y la energía que se le transmite igualmente se invierte en aumentar la energía potencial de interacción de las moléculas. En este caso se tiene:

$$Q = L_f m$$

El coeficiente L_f se denomina **calor específico de fusión**, o **calor latente de fusión**.

El **calor específico de fusión** representa la cantidad de energía que el cuerpo recibe por cada kilogramo al pasar de sólido a líquido (fusión), o que cede al pasar de líquido a sólido (solidificación).



El calor específico de fusión del hielo es $3.34 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$, mayor que el de muchas otras sustancias sólidas.

Resume con tus palabras qué representan los calores específicos de vaporización y de fusión.

¿Qué cantidad de energía deben absorber 4.0 kg de hielo a 0°C para fundirse totalmente?



5.5. Primera ley de la Termodinámica

Después de haber examinado los conceptos de energía interna, trabajo y calor, estamos en condiciones de analizar la relación entre ellos. La pregunta clave en este apartado será, por tanto:

¿Cuál es la relación entre energía interna, trabajo y calor?

Esa relación se expresa formalmente en la **primera ley de la Termodinámica**, que en forma de ecuación puede escribirse:

$$Q = \Delta E_i + W_s$$

Esto significa que **la cantidad de calor absorbida por un sistema se invierte en variar su energía interna y realiza r trabajo.**

Debes prestar atención a que en esta ecuación el trabajo W_s es el realizado **por el sistema sobre los cuerpos externos.**

Con frecuencia la ecuación se escribe también de otra forma equivalente, en función del trabajo realizado **por agentes exteriores sobre el sistema**, W_e . Puesto que la fuerza ejercida por el sistema es de igual magnitud y sentido opuesto que la ejercida sobre él, los trabajos correspondientes también son de igual magnitud y sentidos opuestos. De ahí que en la ecuación pueda sustituirse W_s por $-W_e$, con lo cual queda:

Intenta esclarecer, mediante algún ejemplo concreto, el significado físico de la ecuación $Q = \Delta E_i + W_s$.





$$Q = \Delta E_i - W_e$$

que usualmente se escribe:

$$\Delta E_i = Q + W_e$$

En palabras:

La variación de energía interna de un sistema es igual a la suma de la cantidad de calor que intercambia con el exterior y el trabajo realizado sobre él.

Intenta esclarecer, mediante algún ejemplo, el significado físico de la ecuación $\Delta E_i = Q + W_e$.

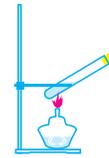
Nota que **un sistema posee energía interna pero no cantidad de trabajo ni cantidad de calor**. La energía interna es una característica del sistema, mientras que el trabajo y la cantidad de calor no, éstos caracterizan los procesos mediante los cuales el sistema intercambia energía. Observa también que es absolutamente equivalente una variación de energía interna producida por trabajo que por cantidad de calor.

Por otra parte, **una misma variación de energía interna ΔE_i puede deberse a infinidad de combinaciones de procesos de realización de trabajo e intercambio de cantidad de calor**.

En los ejemplos siguientes examinamos algunas de esas posibles combinaciones, ya conocidas por ti del capítulo anterior, a la luz de la ecuación $Q = \Delta E_i + W_s$.

Ejemplo 5.3. Analiza el proceso isobárico ($P = \text{constante}$) representado en la figura 5.1 desde el punto de vista de la primera ley de la Termodinámica ($Q = \Delta E_i + W_s$).

Cuando se comunica cierta cantidad de calor al gas (Q positiva), una parte se invierte en elevar su temperatura, y por tanto aumentar su energía interna (ΔE_i positiva), y otra parte en realizar trabajo sobre el pistón (W_s positivo). Si en lugar de transmitir cantidad de calor al gas, ésta es cedida por él (Q negativa), por ejemplo, cuando a partir de la



situación (b) se retira el mechero y el gas se deja enfriar, entonces su energía interna disminuye (ΔE_i negativa). En este caso el pistón desciende, por lo que la fuerza ejercida por el gas sobre él tiene sentido contrario a su desplazamiento (W_s negativo).

En la figura 5.1, al pasar de la situación (a) a la (b) el gas realiza trabajo sobre el pistón, comunicándole energía. ¿En qué se invierte esa energía? ¿Qué transformación de energía tiene lugar al pasar de la situación (b) a la (a)?



Ejemplo 5.4. Analiza el proceso isotérmico ($T = \text{constante}$) representado en la figura 5.3 desde el punto de vista de la primera ley de la Termodinámica ($Q = \Delta E_i + W_s$).

El hecho de que no varíe la temperatura del gas significa que tampoco varía su energía interna ($\Delta E_i = 0$), por lo que la ecuación queda $Q = W_s$. Esto implica que si se transmite cierta cantidad de calor al gas (Q positiva), toda ella se invierte en el trabajo que realiza el gas sobre el pistón (W_s positivo). Si, por el contrario, el gas cede cantidad de calor (Q negativa), como por ejemplo cuando se pasa de la situación (b) a la (a), entonces el pistón desciende y la fuerza ejercida por el gas sobre él tiene sentido contrario al desplazamiento (W_s negativo). Ya sabes que un proceso estrictamente isotérmico es ideal, requeriría un contacto térmico perfecto con el medio. Sin embargo, si se realiza con relativa lentitud puede ser considerado como tal.

Ejemplo 5.5. Analiza el proceso isocórico o isovolumétrico ($V = \text{constante}$) representado en la figura 5.5a desde el punto de vista de la primera ley de la Termodinámica ($Q = \Delta E_i + W_s$).

Puesto que el pistón está fijo, no se realiza trabajo ($W_s = 0$). De ahí que $Q = \Delta E_i$. Esto quiere decir que si el sistema recibe cantidad de calor (Q positiva), como es el caso de la figura 5.5a, su energía interna aumenta (ΔE_i positiva). Si, en cambio, el sistema cede cantidad de calor (Q negativa), entonces su energía interna disminuye (ΔE_i negativa).

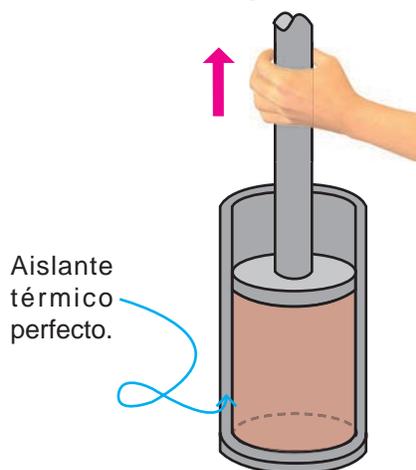


Fig. 5.6. Expansión adiabática de un gas. Cuando el pistón se desplaza hacia arriba, disminuye la temperatura del gas.

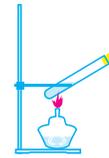
Examinemos ahora un cuarto modo de variar la energía interna de un sistema, también de gran interés:

Proceso adiabático. Se denomina así un proceso en el cual el sistema no intercambia cantidad de calor ($Q = 0$). Como ejemplo consideremos la situación representada en la figura 5.6. Las paredes del cilindro son un aislante térmico perfecto y no permiten el intercambio térmico. Puesto que $Q = 0$, entonces $\Delta E_i = -W_s$. De ahí que si el pistón se desplaza hacia arriba (W_s positivo), la variación de su energía interna es negativa, lo que implica que la temperatura del gas disminuye. Si, por el contrario, el pistón se desplaza hacia abajo (W_s negativo), entonces la variación de su energía interna es positiva, lo que quiere decir que la temperatura del gas aumenta.

Realmente es imposible tener un sistema como el descrito, aislado térmicamente de modo perfecto, pero en algunos casos es posible aproximarse a ello y el proceso puede considerarse adiabático. Para ello debe tener lugar con una rapidez que no dé tiempo a que el sistema intercambie con el exterior una cantidad de calor apreciable. Tal es el caso, por ejemplo, de la compresión brusca del aire contenido en una bomba de mano y, en cierta medida, también el de la compresión y expansión en los cilindros de un motor de combustión interna.

Resulta útil comparar los gráficos correspondientes a diferentes procesos, trazándolos en un mismo sistema de coordenada P - V . La figura 5.7 corresponde a un gas cuyo estado inicial es el representado por el punto 1, en los casos que se someta a procesos: isobárico (a), isotérmico (b), isocórico (c) o adiabático (d).

Como sabes del capítulo anterior, el trazado de dichos gráficos es posible solo si los procesos ocurren tan lentamente que el gas en su conjunto puede caracterizarse por unos valores únicos de presión y temperatura. Por eso, en rigor, esos gráficos representan una idealización.



¿Podrías explicar cuál es la razón física de que en la figura 5.7, la curva del proceso adiabático resulta más “empinada” que la del proceso isotérmico?

En la figura 5.7, ¿Cómo interpretarías que la línea c sea vertical y la a horizontal?

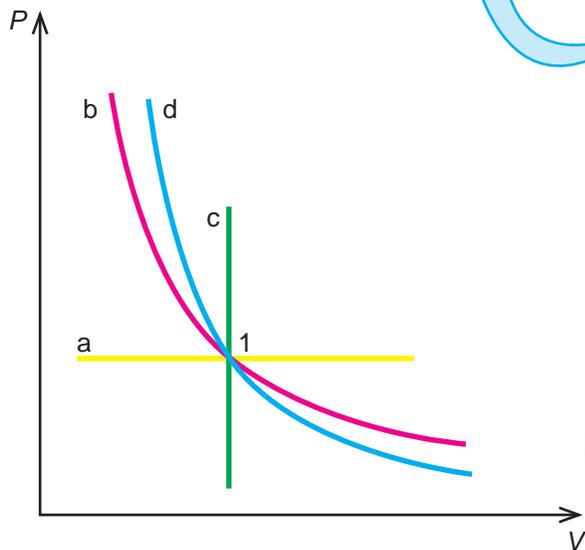


Fig. 5.7. Gráficos P - V correspondientes a un gas inicialmente en el estado 1, en los casos que se somete a procesos: isobárico (a), isotérmico (b), isocórico (c), adiabático (d).

En el texto se dice que los procesos representados por los gráficos de la figura 5.7 son ideales. ¿En qué circunstancias los procesos reales pueden aproximarse a ellos?

5.6. Procesos irreversibles

La primera ley de la Termodinámica, $Q = \Delta E_i + W_s$, vincula el **mundo macroscópico de la mecánica**, representado por el trabajo W_s que realiza el sistema, con el **mundo microscópico de las moléculas**, representado por la energía Q que intercambia el sistema mediante calor y por la variación ΔE_i de su energía interna.

Pero entre los procesos de transformación de energía que ocurren en el mundo macroscópico de los fenómenos estrictamente mecánicos y los que tienen lugar cuando interviene el mundo de las moléculas, hay una importantísima diferencia.



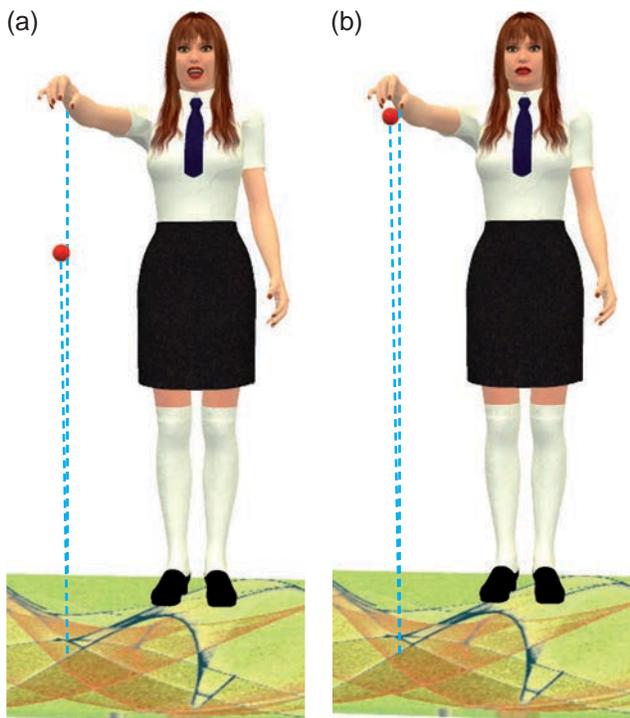


Fig. 5.8. Se deja caer una canica y rebota en el piso. (a) proceso real irreversible: la canica no alcanza la altura inicial. (b) proceso ideal reversible: la canica alcanza la altura inicial.

Consideremos, por ejemplo, el proceso que consiste en una canica que se deja caer y rebota en el piso (Fig. 5.8a). Al ascender no pasa por los mismos estados que al caer, en particular no llega a la misma altura desde la que se soltó. Se dice que este proceso es **irreversible**. Sería **reversible** si la canica después de rebotar llegara hasta la altura inicial (Fig. 5.8b). Como sabes, esto es una idealización, un modelo, pero que resulta útil en muchos casos.

Procesos reversibles son aquellos que tiene lugar en un sentido y que también pueden ocurrir espontáneamente en sentido opuesto, pasando por los mismos estados.

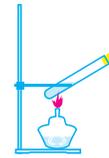
¿Será reversible el movimiento de vaivén de un péndulo? Argumenta.

Caracteriza con tus palabras qué se entiende por procesos reversible e irreversible.



Como sabes, el origen de la diferencia entre el proceso real, irreversible, de caída y ascenso de la canica (Fig. 5.8a) y el proceso ideal, reversible (Fig. 5.8b), es que en el primero, parte de la energía mecánica se transforma en interna durante el choque, es decir, en energía de movimiento molecular.

Un ejemplo de proceso claramente irreversible es el de un bloque que se lanza sobre la superficie de una mesa y desliza hasta detenerse (Fig. 5.9). La canica de la situación anteriormente analizada también queda en reposo luego de sucesivos choques. Tanto en el caso del bloque como en el de la canica, los procesos inversos, en los cuales se transforma energía interna en cinética y los cuerpos se ponen en movimiento, no ocurren espontáneamente, para ello se necesita la acción de un agente externo al sistema.



Desde el punto de vista de la energía, la irreversibilidad de los procesos anteriormente analizados significa que, si bien la energía mecánica se transforma **espontáneamente** en térmica, el recíproco no es cierto, por sí sola la energía térmica no se transforma en mecánica.

En las situaciones que hemos examinado intervienen tanto el mundo macroscópico de la mecánica como el mundo de las moléculas, pero **la irreversibilidad se debe a la participación del mundo de las moléculas.**



Fig. 5.9. Un bloque lanzado sobre una mesa desliza hasta detenerse. El proceso es claramente irreversible: el bloque no se pone en movimiento por sí solo y regresa.

¿Por qué puede afirmarse que en las situaciones de las figuras 5.7 y 5.8 interviene el mundo de las moléculas?

Así, durante el enfriamiento de un vaso con leche caliente dejado sobre una mesa o la fusión de un trozo de hielo que flota en agua, no ocurre fenómeno mecánico alguno y dichos procesos igualmente son irreversibles (los procesos inversos, de enfriamiento de la leche del vaso y de formación de un trozo de hielo, no tienen lugar por sí solos). Observa que en estos procesos interviene el mundo de las moléculas.

Estamos tan acostumbrados a que los procesos ocurran en un sentido y no en el contrario, que esto no suele llamarnos la atención. Sin embargo, pese a que la realización en sentido opuesto de procesos como los descritos anteriormente no violaría la ley de conservación de la energía, ellos no ocurren por sí solos, **únicamente pueden tener lugar con la intervención de algún agente externo al sistema.** Esto es una ley general de la naturaleza.

Esta ley general ha quedado expresada en la **segunda ley de la Termodinámica**, de la cual se han dado diversas formulaciones. A continuación enunciamos una variante debida al científico alemán Rodolf E. Clausius en 1850:





Es imposible transmitir energía de un sistema a otro que tenga mayor temperatura, sin realizar otros cambios en dichos sistemas o en los cuerpos que los rodean.

Consideremos, por ejemplo, un vaso con agua caliente y el medio que lo rodea. La transmisión de energía del medio al vaso, el cual se encuentra a mayor temperatura, es imposible, a menos que se efectúen otros cambios. En este caso ese otro cambio podría ser, por ejemplo, el trabajo mecánico efectuado por un refrigerador.

¿Cómo explicar el hecho de que los procesos macroscópicos tengan lugar en un sentido determinado y que espontáneamente no ocurran en el sentido opuesto?

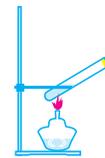
La razón de esto es **la tendencia de los sistemas a un aumento del desorden a nivel molecular.**

Para ilustrar esto analicemos nuevamente el caso del bloque que desliza sobre la mesa, pero ahora desde una perspectiva molecular. El movimiento del bloque puede ser interpretado como cierto movimiento ordenado de sus moléculas, el cual se superpone al movimiento térmico, desordenado, de ellas. Por eso, la transformación de ese movimiento ordenado en movimiento molecular desordenado cuando el bloque se ha detenido, representa un aumento del desorden a nivel molecular. El proceso inverso requeriría que las moléculas de la mesa y el bloque interaccionaran de tal modo que todas las del bloque adquirieran una componente de movimiento en determinada dirección, poniéndose en movimiento. Pero la probabilidad de que esto ocurra es, desde el punto de vista práctico, nula.

A una conclusión similar se llega al analizar desde la perspectiva molecular, por ejemplo, una barra metálica uno de cuyos extremos está a mayor temperatura que el otro. Inicialmente hay cierto ordenamiento, dado por el hecho de que, en promedio, las velocidades de las moléculas en uno de los extremos de la barra son mayores que en el otro. Pero cuando la temperatura de la barra se ha igualado en todos sus puntos, ese relativo orden ha desaparecido. El

proceso opuesto requiere que las moléculas interactúen de tal modo que las de uno de los extremos de la barra adquieran mayor velocidad promedio que las del otro extremo. No obstante, la probabilidad de que esto ocurra en la práctica es nula.

Considera un vaso con agua caliente sobre una mesa. ¿Podrías explicar cómo se manifiesta la tendencia al aumento del desorden a nivel molecular para el sistema vaso-medio?



5.7. Máquinas térmicas. Eficiencia energética

Hemos visto que la energía mecánica puede transformarse por sí sola en energía interna, pero que el proceso inverso no tiene lugar espontáneamente. **La función de las máquinas térmicas es precisamente realizar la transformación de energía térmica en mecánica.**

La figura 5.10 muestra el principio básico de esta transformación. Al calentar una pequeña cantidad de agua en un tubo de ensayo cerrado con un tapón, llega un momento que la presión del gas en el tubo es tal que el tapón sale despedido, lo que evidencia que se ha transformado cierta cantidad de energía térmica en mecánica.

El ejemplo anterior es simple, pero de poca utilidad práctica. Para que el proceso de transformación de energía térmica en mecánica pueda ser aprovechado, por ejemplo, en los medios de transporte y en las turbinas de las centrales eléctricas, es necesario que se repita continuamente.

Un modo común de lograr esto es empleando un cilindro en lugar del tubo de ensayos y un émbolo en lugar del tapón. Esto permite realizar el proceso de transformación de energía interna en mecánica una y otra vez, **cíclicamente.**

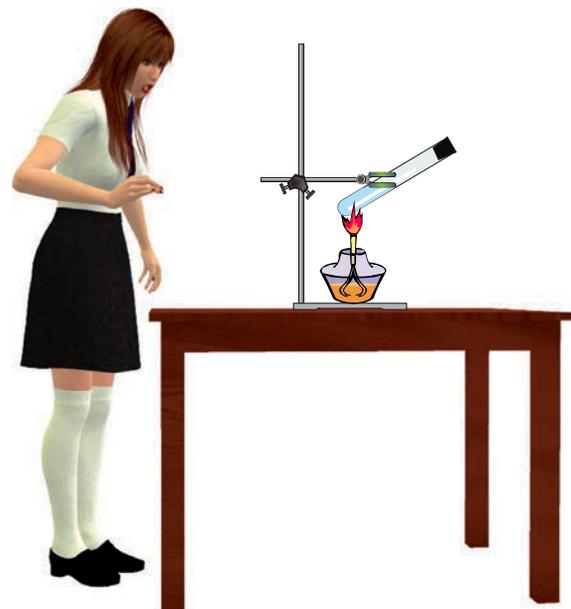


Fig. 5.10. Al calentar el agua del tubo de ensayo, aumenta la presión del gas y llega un momento que el tapón sale despedido.



Por eso examinaremos las características básicas de los **procesos termodinámicos cíclicos**.

Proceso cíclico es una sucesión de procesos en que el sistema vuelve a su estado inicial luego de determinado tiempo.

El hecho de que al cabo de determinado tiempo el estado del sistema vuelva a ser el mismo, significa que en un sistema de coordenadas $P-V$ la **curva que representa al ciclo es cerrada**, parte de un punto y vuelve a dicho punto. La forma de esa curva puede ser muy variada, la figura 5.11 muestra tres ejemplos.

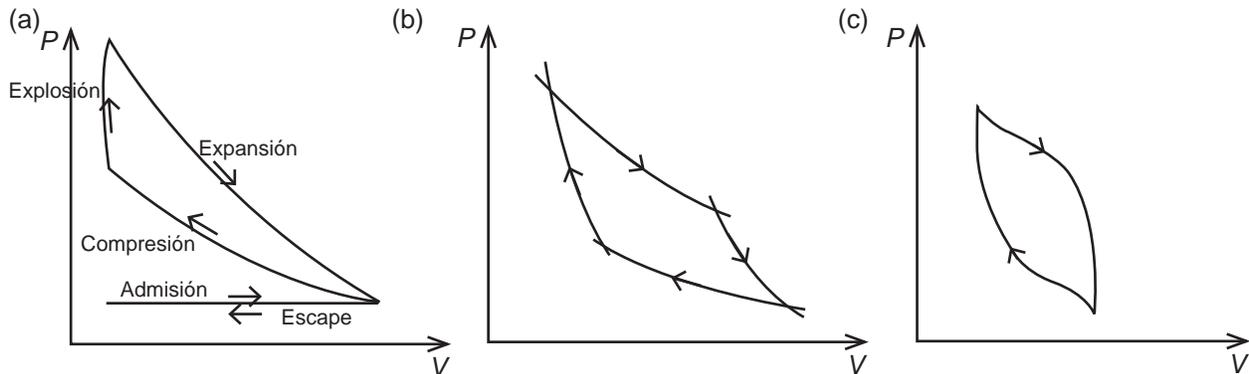
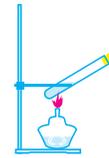


Fig. 5.11. Gráficos correspondientes a: (a) ciclo (teórico) de un motor de combustión interna; b) ciclo ideal, pensado por Sadi Carnot; (c) ciclo arbitrario cualquiera.

En los gráficos de la figura 5.11, señala cuáles tramos corresponden a la expansión del gas y cuáles a su compresión.



En las máquinas térmicas, análogamente que en el experimento del tubo de ensayo y el tapón (Fig. 5.10), una porción de cierta sustancia (o mezcla de ellas), denominada **sustancia de trabajo**, recibe energía térmica de un **calentador**, con lo cual aumentan su temperatura y presión, luego realiza trabajo, disminuyendo su presión y temperatura y, finalmente, entrega cierta cantidad de calor al ambiente o a cierta instalación enfriadora. Puesto que el ambiente o la instalación enfriadora se encuentran a menor temperatura que la fuente (generalmente mucho menor) en Termodinámica suelen llamarse **refrigerador**.



¿A qué se denomina refrigerador al referirse en Termodinámica al funcionamiento de las máquinas térmicas. ¿Cuál es la razón para ello?



En el experimento representado en la figura 5.10, ¿cuáles serían la sustancia de trabajo, el calentador y el refrigerador?

Así, en los motores de combustión interna, la sustancia de trabajo es una mezcla de aire y combustible, el calentamiento y aumento de la presión tienen lugar cuando se produce la explosión, a continuación se realiza trabajo sobre el émbolo y luego los gases calientes son expulsados al ambiente y es admitida una nueva porción de la mezcla, con lo cual la presión y temperatura de la sustancia de trabajo vuelven a ser las iniciales. Por su parte, en las turbinas de vapor la sustancia de trabajo es agua, la cual se calienta, vaporiza y aumenta su presión en la caldera, el vapor que sale de la caldera a gran presión mueve las paletas de la turbina y disminuye su presión y temperatura, luego el vapor entrega cantidad de calor a una instalación enfriadora, para ser condensado y poder utilizar nuevamente el agua en la caldera.

Confecciona un listado de desarrollo tecnológicos basados las máquinas térmicas. ¿Qué implicaciones directas o indirectas tienen las máquinas térmicas en nuestras vidas?



Indaga qué por ciento de la energía eléctrica utilizada en México se obtiene a partir del funcionamiento de máquinas térmicas.

Indaga acerca de las aplicaciones de diferentes tipos de máquinas térmicas: motores de combustión, turbinas de vapor, motores a reacción.



Describe con tus propias palabras los aspectos básicos que caracterizan el funcionamiento de un motor de combustión interna.



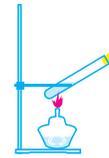
En todas las máquinas térmicas la sustancia de trabajo recibe cantidad de calor a elevada temperatura. Una parte de esa cantidad de calor es empleada en realizar trabajo, mientras que otra parte es entregada al refrigerador, a baja temperatura.

La figura 5.12 muestra un esquema del principio de funcionamiento de la máquina térmica.



Fig. 5.12. Esquema del principio de funcionamiento de una máquina térmica.

Ahora analicemos el proceso que tiene lugar en las máquinas térmicas desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica ($Q = \Delta E_i + W_s$). Como al cabo de cada ciclo el estado de la sustancia de trabajo vuelve a ser el mismo, la variación de su energía interna en un ciclo es nula ($\Delta E_i = 0$). Por eso, al cabo del ciclo, $W_s = Q$, es decir, el trabajo realizado por la sustancia de trabajo es igual a la cantidad de calor absorbida por ella en el ciclo. Obviamente, esta cantidad de calor absorbida es igual a la diferencia entre la cantidad de calor Q_1 que recibe de la fuente y la cantidad de calor Q_2 que entrega al refrigerador. En ecuaciones:



$$W_s = Q = Q_1 - Q_2$$

Un concepto de suma importancia para caracterizar el funcionamiento de las máquinas térmicas es el de **eficiencia energética** (η). Esta es la fracción del **trabajo realizado**, o energía útil obtenida (“salida”) respecto a la energía inicial puesta en juego (“entrada”). En ecuaciones:

$$\eta = \frac{W_s}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

Expresa con tus propias palabras, qué se entiende por eficiencia de una máquina térmica.

De la ecuación anterior se ve que si la cantidad de calor Q_2 que entrega la máquina al refrigerador fuese nula, entonces su eficiencia sería 1, es decir, 100%. Sin embargo, una eficiencia de 100% resulta imposible, pues toda máquina térmica inevitablemente entrega cierta cantidad de calor al medio o a la instalación refrigeradora.

¿De qué modo podría aumentarse la eficiencia de una máquina térmica? Para responder, apóyate en la fórmula para el cálculo de la eficiencia.



Ejemplo 5.6. El motor de gasolina de un camión recibe 10×10^3 J de cantidad de calor y realiza 2.0×10^3 J de trabajo en cada ciclo. a) Cuánto calor entrega al ambiente en cada ciclo? b) Si el motor realiza 50 ciclos por segundo, ¿cuál es su potencia? c) ¿Cuál es su eficiencia?

a) $Q_1 - Q_2 = W_s$, donde Q_1 es la cantidad de calor que recibe el motor y Q_2 la que entrega al ambiente. De ahí que:

$$Q_2 = Q_1 - W_s = 10 \times 10^3 \text{ J} - 2.0 \times 10^3 \text{ J} = 8.0 \times 10^3 \text{ J}$$

b) Su potencia es el trabajo realizado por segundo:

$$\left(50 \frac{\text{ciclo}}{\text{s}}\right) \left(8.0 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{ciclo}}\right) = 4.0 \times 10^5 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 4.0 \times 10^5 \text{ W}$$

c) Su eficiencia es:

$$\eta = \frac{W_s}{Q_1} = \frac{2.0 \times 10^3 \text{ J}}{10 \times 10^3 \text{ J}} = 0.20, \text{ o sea, su eficiencia es } 20\%.$$

Esta es la eficiencia típica de los motores de camiones y autos.



¿Cómo aumentar el trabajo W_s realizado por una máquina térmica y, por tanto, su eficiencia?

Ya sabes que en un sistema de coordenadas P - V el trabajo está dado por el área entre el gráfico y el eje del volumen. Así, por ejemplo, el área sombreada en la figura 5.13a corresponde al trabajo realizado en un motor de combustión interna durante la expansión y la sombreada en la figura 5.13b, al trabajo durante la compresión. El primero es positivo y el segundo negativo. Por tanto, el trabajo total o neto realizado en cada ciclo corresponde a la diferencia entre esas áreas (Fig. 5.13c). En general:

El trabajo neto realizado por una máquina térmica en un ciclo corresponde al área abarcada por la curva cerrada en el gráfico $P(V)$ que describe el proceso cíclico.

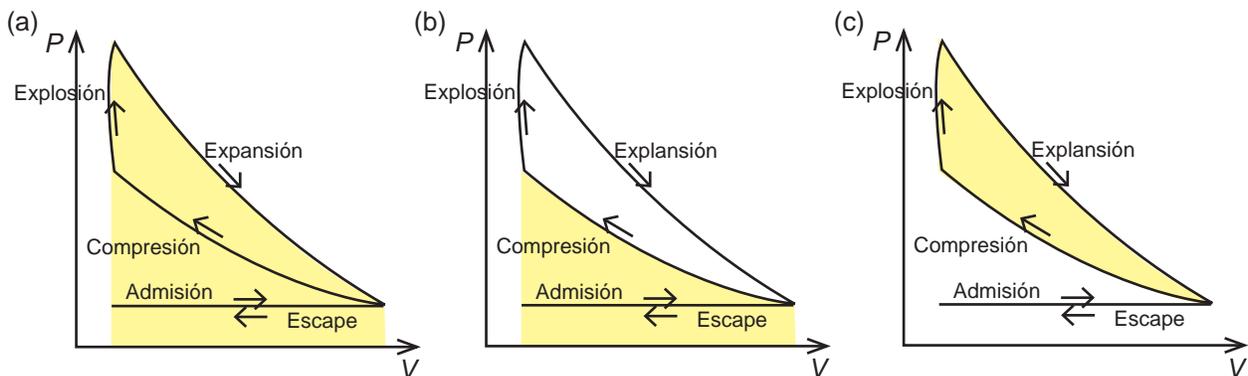
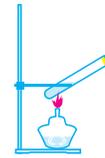


Fig. 5.13. El área sombreada corresponde al trabajo realizado por el gas sobre el émbolo durante: (a) la expansión, (b) la compresión, (c) el ciclo completo (trabajo neto).

Lo anterior sugiere cómo obtener el mayor trabajo neto posible de una máquina térmica: será tanto mayor cuanto mayor sea el área abarcada por la curva cerrada que describe el ciclo. En la figura 5.13 se aprecia que dicha área aumenta con la diferencia entre la presión del gas durante la expansión y la compresión, o lo que es equivalente, con la diferencia de temperatura durante la expansión y la compresión.

El trabajo realizado por una máquina térmica, y su eficiencia, aumentan con la diferencia de temperatura entre el calentador y el refrigerador.



Si la diferencia de temperatura $T_1 - T_2$ entre el calentador y el refrigerador es nula, entonces la máquina no puede trabajar.

Hemos visto que los procesos cíclicos mediante los cuales se obtiene trabajo de una máquina térmica pueden ser diversos (Fig. 5.11). En 1824 Sadi Carnot mostró que el proceso del cual se obtiene la **eficiencia máxima** es el compuesto por dos procesos isotérmicos y dos adiabáticos cuyo gráfico se muestra en la figura (Fig. 5.11b). Este proceso cíclico se conoce como “Ciclo de Carnot”. A partir de las leyes de la Termodinámica Carnot demostró que cuando la sustancia de trabajo es el gas ideal, la eficiencia de dicho proceso es:

$$\eta_{m\text{áx}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$



Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832). Físico francés, quien fue uno de los pioneros del estudio de la Termodinámica.

¿Cuáles serán las isotermas y cuáles las adiabáticas que menciona el texto al referirse a la figura 5.11b?



Debes tener presente que el proceso cíclico imaginado por Carnot es ideal, no puede ser implementado en la práctica, ya que se compone de dos procesos isotérmicos y dos adiabáticos, los cuales, en rigor, son irrealizables.

El significado de la magnitud $\eta_{m\text{áx}}$ (la cual se refiere a un proceso ideal) consiste, por una parte, en que **indica un valor límite para la eficiencia que puede ser alcanzada** por una máquina térmica cuyo calentador está a la temperatura T_1 y cuyo refrigerador está a la temperatura T_2 . La eficiencia de las máquinas térmicas reales es siempre bastante inferior a la eficiencia máxima calculada mediante dicha fórmula. Por otra parte, la fórmula para calcular $\eta_{m\text{áx}}$ **indica la vía para elevar la eficiencia de una máquina térmica**: será mayor mientras mayor sea la temperatura T_1 del calentador y menor la temperatura T_2 del refrigerador.



Explica por qué la fórmula $\eta_{\text{máx}} = (T_1 - T_2) / T_1$ corresponde al funcionamiento de una máquina ideal.

Argumenta por qué los procesos estrictamente isotérmico y adiabático son irrealizables en la práctica.

¿En qué caso la eficiencia de la máquina térmica ideal pensada por Carnot podría ser 1? ¿Sería posible semejante máquina? Explica.



Ejemplo 5.7. Imagina que en una turbina de vapor la temperatura inicial del vapor es 500 °C y la final 35 °C. ¿Cuál es la máxima eficiencia posible de la turbina?

Observa que en la fórmula para calcular la eficiencia máxima $\eta_{\text{máx}}$, las temperaturas deben estar expresadas en kelvin.

$$T_1 = 500 \text{ °C} = (273 + 500) \text{ K} = 773 \text{ K}$$

$$T_2 = 35 \text{ °C} = (273 + 35) \text{ K} = 308 \text{ K}$$

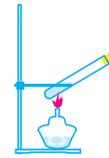
Por consiguiente:

$$\eta_{\text{máx}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{773 \text{ K} - 308 \text{ K}}{773 \text{ K}} = 0.60$$

O sea, la eficiencia máxima de la turbina para esas temperaturas es 60%.

En principio, esta eficiencia máxima podría elevarse aumentando la temperatura T_1 de la caldera y disminuyendo la temperatura T_2 del vapor al escapar. Pero lo primero conduce a un gran aumento de la presión del vapor de agua en la caldera, lo que se ve limitado por su resistencia mecánica. Así, a 500 °C la presión del vapor en una caldera es ya unas 235 veces mayor que la atmosférica. En cuanto a la temperatura del vapor al escapar, en la práctica nunca es inferior a la ambiente.

Cabe reiterar que el valor de 60% encontrado para la eficiencia, corresponde a un caso ideal. Debido a pérdidas de energía por diversos factores, la eficiencia que realmente alcanza una turbina de vapor que trabaja con las temperaturas indicadas es alrededor de 40%.



5.8. Máquinas térmicas y preservación del medio ambiente

La diaria utilización de desarrollos tecnológicos basados en las máquinas térmicas influye grandemente en el medio ambiente. La transformación de energía térmica en mecánica en los medios de transporte y de energía térmica en mecánica y luego en eléctrica en las centrales termoeléctricas, no puede ser realizada, como hemos visto, sin entregar al ambiente una considerable cantidad de calor, lo cual repercute en el calentamiento de nuestro planeta.

Por otra parte, la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas) durante el funcionamiento de las máquinas térmicas, ha conducido al aumento de la proporción de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, provocando una intensificación del llamado **efecto invernadero** y la consiguiente elevación de la temperatura media del planeta.

El efecto invernadero en sí mismo es positivo para la vida en nuestro planeta, es su intensificación lo que está conduciendo a dramáticas consecuencias. La atmósfera deja pasar gran parte de la radiación solar visible, la cual calienta la superficie de la Tierra. A su vez, la superficie caliente de ésta emite radiación invisible, infrarroja. Una parte de esta radiación traspasa la atmósfera y sale al espacio extraterrestre, pero otra parte es absorbida por la atmósfera. Si la atmósfera no absorbiera una parte de la radiación infrarroja que es emitida por su superficie, nuestro planeta sería mucho más frío, la temperatura media sería unos $30\text{ }^\circ\text{C}$ menor. Uno de los principales responsables de la absorción de radiación infrarroja por la atmósfera es el dióxido de carbono presente en ella.



Profundiza en una enciclopedia o en Internet acerca del efecto invernadero.



Sin embargo, durante el pasado siglo, debido a la quema de combustibles (Fig. 5.14), la proporción de dióxido de carbono en la atmósfera ha crecido. Esto ha conducido a una mayor absorción de la radiación infrarroja, lo que está originando la elevación de la temperatura del planeta. En las últimas décadas ésta se ha elevado alrededor de $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ cada diez años. Se estima que de aumentar la temperatura $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima del valor actual, podría originarse un **cambio climático** de catastróficas consecuencias para la humanidad y el ecosistema. Recientes estudios indican que el calentamiento del planeta ya está mostrando sus efectos negativos.



Fig. 5.14. Algunas termoeléctricas y vehículos emiten a la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono, y óxidos de azufre y nitrógeno que contaminan el medio ambiente.

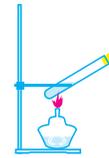
¿Qué factores asociados a la utilización de las máquinas térmicas están influyendo en el calentamiento global de la Tierra.

Indaga sobre el “cambio climático” que está experimentando el planeta, sus consecuencias y los acuerdos que se adoptan para frenarlo.



Pero la quema de combustibles fósiles ha originado también otros problemas. Junto con el dióxido de carbono, las termoeléctricas y vehículos de motor habituales también emiten a la atmósfera dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno (Fig. 5.14), los que dan lugar a ácido sulfúrico y ácido nítrico. Estos ácidos son luego arrastrados por las lluvias, originando las llamadas **lluvias ácidas**, que en algunas regiones del planeta han llegado a alcanzar una acidez incluso similar a la del vinagre.

Indaga en Internet acerca del efecto provocado por las lluvias ácidas.



Entre las medidas para enfrentar los problemas mencionados están: elevar la eficiencia de las máquinas térmicas, diseñar equipos y dispositivos que aprovechen mejor la energía, adoptar medidas de ahorro de energía, disminuir la emisión de los productos de la combustión a la atmósfera, desarrollar fuentes de energía que constituyan una alternativa a la utilización de los combustibles fósiles.

Entre las **fuentes alternativas de energía** están: la **solar**, ya sea al emplear directamente la radiación para el calentamiento, o para la generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos; la **hidráulica**, que se vale de la energía potencial y cinética del agua; la **eólica**, que utiliza la energía cinética del viento; la **geotérmica**, procedente de la energía térmica del interior de la corteza terrestre y que se manifiesta en forma de agua o vapor calientes; la **maremotriz**, que aprovecha mareas, olas y corrientes marinas; los combustibles a base de **biomasa**, **biogás** y **basura biodegradable**; la **nuclear**.

Si bien en los últimos años se ha ampliado la utilización de fuentes alternativas como la nuclear, la hidráulica, la eólica, la solar y los biocombustibles, son los combustibles fósiles los que continúan aún aportando la mayor parte de la energía total que se genera en el planeta, cerca del 80% de ella.

Cabe señalar, además, que no todas las fuentes alternativas mencionadas son **no contaminantes** o **“limpias”**. La biomasa, el biogás y la basura biodegradable, son en realidad contaminantes. Al igual que los combustibles fósiles, emiten dióxido de carbono durante la combustión. A veces también arrojan a la atmósfera hollines y otras partículas sólidas contaminantes. Por su parte, las centrales termonucleares dan lugar a desechos radiactivos altamente peligrosos. Las mayores perspectivas parecen estar en la fuentes de energía solar, eólica e hidráulica (Fig.5.15), las cuales solo intervienen en la contaminación durante el proceso de producción de los dispositivos requeridos para las instalaciones, por lo que se catalogan de “limpias”.



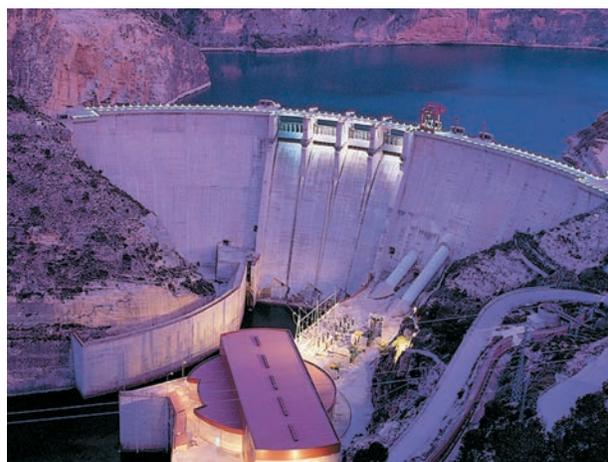
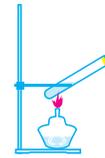


Fig.5.15. Las mayores perspectivas de fuentes alternativas a los combustibles fósiles son la solar, la eólica y la hidráulica.

En la actualidad es técnicamente viable y económicamente posible enfrentar la generación de toda la energía requerida a partir de fuentes “limpias”. El lento avance en esta dirección se debe, principalmente, a razones políticas e intereses de las grandes empresas que rigen el mercado de la producción y distribución de energía.



5.9. Actividades de sistematización y consolidación

5.9.1. Sopa de letras con palabras clave del capítulo

Escribe cada palabra en Wikipedia o en Encarta y da un vistazo a lo que encuentres.



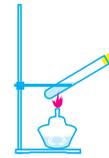
N	Ó	I	C	A	Z	I	R	O	P	A	V	Y	T	E	E	T	D
T	Q	I	L	P	B	A	V	C	S	T	E	F	F	A	R	E	I
Z	U	S	A	L	L	U	X	A	A	L	O	I	Z	C	A	M	R
Q	E	O	U	O	K	M	M	C	B	T	C	F	B	I	E	P	O
N	R	A	S	Z	Y	O	I	I	R	I	O	P	I	L	L	E	D
T	Z	L	I	M	I	L	S	A	E	G	N	R	O	U	C	R	A
C	E	I	U	B	Ó	R	B	N	C	M	T	O	D	Á	U	A	R
A	J	R	S	E	E	A	C	K	Í	R	A	D	E	R	N	T	E
R	E	I	M	V	J	I	O	R	C	G	M	A	G	D	M	U	G
N	B	U	E	O	A	H	M	O	L	E	I	T	R	I	A	R	I
O	D	R	W	N	D	B	H	L	I	O	N	N	A	H	R	A	R
T	R	Z	R	Ó	S	I	L	A	C	T	A	E	D	A	E	P	F
I	R	L	T	I	P	O	N	C	O	É	N	L	A	M	M	F	E
O	H	H	J	S	O	G	Z	Á	K	R	T	A	B	J	O	U	R
L	E	S	L	E	L	Á	X	M	M	M	E	C	L	O	T	S	S
Y	I	U	J	R	B	S	R	E	W	I	Y	R	E	Y	R	I	G
A	A	E	Z	P	R	F	C	L	V	C	C	U	L	Z	I	Ó	K
Q	S	E	N	E	R	G	Í	A	F	A	H	A	I	X	Z	N	M

- | | | |
|---------------|--------------|---------------|
| Biodegradable | Eficiencia | Presión |
| Biogás | Energía | Refrigerador |
| Biomasa | Eólica | Solar |
| Calentador | Fusión | Temperatura |
| Calor | Geotérmica | Termodinámica |
| Carnot | Hidráulica | Trabajo |
| Cíclico | Irreversible | Vaporización |
| Clausius | Maremotriz | |
| Contaminante | Nuclear | |

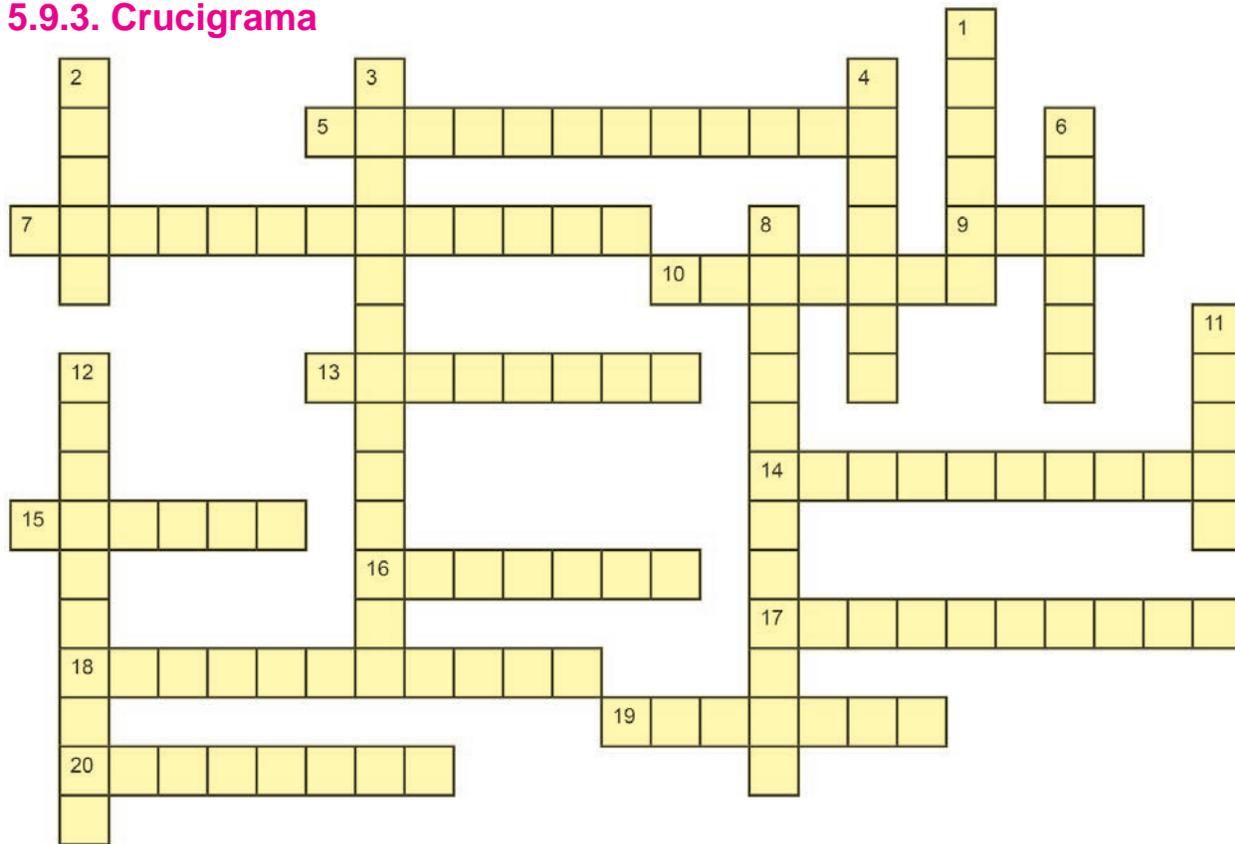


5.9.2. Conexión de conceptos e ideas

1. Relaciona el trabajo, el calentamiento y la energía interna de un sistema. () Calor específico de fusión.
2. Señala un sentido para los procesos que tienen lugar en los sistemas. () Calor específico.
3. Movimientos que, además del de traslación, pueden tener las moléculas formadas por más de un átomo. () Cantidad de calor.
4. Parte de la energía interna de los cuerpos tomada en cuenta en la Teoría Cinético-Molecular. () Cinética y potencial debida a la interacción entre las moléculas.
5. Magnitudes macroscópicas de las cuales depende la energía interna de un sistema. () Diferencia de temperatura entre el calentador y el refrigerador.
6. Fenómeno que ilustra claramente la dependencia de la energía interna con el volumen del cuerpo. () Dióxido de carbono.
7. Nombre que habitualmente recibe la cantidad de energía que se transmite de un cuerpo a otro mediante calentamiento. () Ebullición del agua.
8. Coeficiente que interviene en la ecuación para calcular la cantidad de calor transmitida a una porción de cierta sustancia. () Efecto invernadero.
9. Tipo de enlaces de las moléculas de agua, responsable de su elevado calor específico. () Eficiencia energética.
10. Magnitud que caracteriza la cantidad de energía que un cuerpo recibe por cada kilogramo al pasar de sólido a líquido. () Lluvias ácidas.
11. Desarrollo tecnológico cuya función es transformar energía térmica en mecánica. () Máquina térmica.
12. Denominación que en Termodinámica recibe la porción de sustancia (o mezcla de ellas) que en una máquina térmica recibe energía térmica. () Primera ley de la Termodinámica.
13. Concepto clave que caracteriza el funcionamiento de las máquinas térmicas. () Puentes de hidrógeno.
14. Magnitud que corresponde al área abarcada por la curva cerrada en el gráfico $P(V)$ que describe un ciclo de una máquina térmica. () Rotación y vibración.
15. Magnitud de la que depende la eficiencia de una máquina térmica. () Segunda ley de la Termodinámica.
16. Uno de los principales componentes de la atmósfera responsable del efecto invernadero. () Sustancia de trabajo.
17. Fenómeno relacionado con la elevación de temperatura en nuestro planeta. () Temperatura y volumen.
18. Fenómeno debido a la quema de combustibles fósiles que afecta al medio ambiente. () Trabajo neto.
19. Tipo de máquina térmica usualmente empleada en las centrales termoeléctricas. () Turbina de vapor.



5.9.3. Crucigrama



Horizontales

5. Nombre que en Termodinámica recibe el ambiente al que la sustancia de trabajo de una máquina térmica entrega cantidad de calor.
7. Uno de los procesos mediante los cuales un sistema intercambia energía con el exterior.
9. Valor de la variación de la energía interna de la sustancia de trabajo en un ciclo de una máquina térmica.
10. Característica de la curva que representa a un proceso cíclico en un gráfico de $P(V)$.
13. Se dice de los sistemas que no intercambian energía con el exterior.
14. Concepto clave que caracteriza el funcionamiento de las máquinas térmicas.
15. Apellido del científico que ideó el proceso cíclico de una máquina térmica cuya eficiencia es la máxima posible.
16. Adjetivo que caracteriza a la energía de las moléculas y del interior de ellas.
17. Tipo de radiación emitida por la superficie caliente de la Tierra.
18. Magnitud de la que depende la energía cinética de traslación que como promedio corresponde a una molécula de gas.
19. Se dice de aquellos procesos en que el sistema vuelve a su estado inicial luego de determinado tiempo.
20. Apellido de uno de los primeros científicos que formuló la segunda ley de la Termodinámica.

Verticales

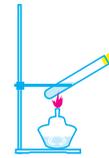
1. Adjetivo que caracteriza a la fuente de energía basada en la utilización del viento.
2. Gas constituido por moléculas monoatómicas que no interactúan a distancia.
3. Rama de la Física que estudia el intercambio de energía de los sistemas con el exterior.
4. Magnitud que es numéricamente igual al área comprendida entre el gráfico y el eje del volumen en un gráfico de $P(V)$.
6. Uno de los tipos de combustible fósil.
8. Proceso que tiene lugar en un sentido y que también puede ocurrir espontáneamente en sentido opuesto, pasando por iguales estados.
11. Una de las fuentes de energía de mayores perspectivas.
12. Proceso en el cual un sistema no intercambia calor con el medio.



5.9.4. Actividades de repaso

1. Confecciona un mapa conceptual que conecte conceptos e ideas como los siguientes: energía interna, trabajo, cantidad de calor, primera ley de la termodinámica, proceso irreversible, segunda ley de la termodinámica, máquina térmica, preservación del medio ambiente.
2. Responde, resumidamente, las preguntas formuladas al inicio del capítulo: ¿Qué se entiende por energía interna de un cuerpo? ¿Qué peculiaridades tiene el trabajo en Termodinámica y cómo calcularlo? ¿Cómo calcular la energía transmitida a un cuerpo mediante calor? ¿Cuál es la relación entre energía interna, trabajo y calor? ¿En qué dirección ocurre la transformación y transmisión de energía? ¿En qué consiste el principio básico de funcionamiento de las máquinas térmicas y de qué depende la eficiencia de ellas? ¿Cómo preservar el medio ambiente?
3. Explica e ilustra mediante ejemplos: a) el concepto de energía interna, b) el concepto de trabajo en la Termodinámica, c) el concepto de cantidad de calor, d) la primera ley de la termodinámica, e) el concepto de proceso irreversible, f) el concepto de proceso termodinámico reversible, g) el principio de funcionamiento de las máquinas térmicas.
4. ¿Cuál es el trabajo realizado sobre un gas (ideal o real), si su volumen permanece constante? Explica.
5. ¿Es posible que la energía interna de un sólido sea independiente de su volumen? Explica.
6. Imagina que se dan los estados inicial y final de cierta cantidad de gas y la variación de energía interna que experimentó. ¿Será posible determinar si la variación de energía interna se realizó mediante trabajo o mediante calentamiento?
7. Teniendo en cuenta el concepto de calor específico, explica por qué el agua es el líquido más conveniente para el enfriamiento de los motores de combustión interna.
8. El calor específico del aluminio es $9.0 \times 10^2 \text{ J / kg K}$ y el del cobre $3.9 \times 10^2 \text{ J / kg K}$. ¿Qué varía más fácilmente su temperatura, 100 g de aluminio o de cobre?
9. Masticar un pedazo del queso de una pizza recién extraída del horno quema mucho más que masticar un pedazo de la parte de harina de similar masa, pese a que la temperatura de ambos pedazos sea aproximadamente la misma. ¿Qué sugiere esto acerca de los calores específicos del queso y de la parte de harina?
10. Se tiene un kilogramo de hielo fundiéndose a $0 \text{ }^\circ\text{C}$, ¿qué cantidad de energía debe





absorber para fundirse todo el hielo? El calor de fusión del hielo es 3.34×10^5 J/kg. Argumenta.

11. Se tiene un globo con hidrógeno y otro con helio, a la misma temperatura y con igual número de moléculas. Compara: a) las energías cinéticas debida a la traslación de sus moléculas, b) la energía interna de ellos.
12. La masa atómica del helio es 4.0 u y la del argón 40 u. ¿Cuántas veces mayor es de esperar que sea el calor específico de uno respecto al otro?
13. ¿Cómo se explica la elevación de temperatura del aire encerrado en un cilindro (y por tanto de su energía interna) al comprimirlo bruscamente?
14. Interpreta la ecuación de la primera ley de la termodinámica en el caso que se golpea un trozo de plomo con un martillo.
15. En un termo que contiene un poco de agua fría se añade agua caliente. Considera que el termo es un aislante térmico perfecto e interpreta la ecuación de la primera ley de la termodinámica durante la mezcla del agua fría y el agua caliente.
16. Interpreta la ecuación de la primera ley de la termodinámica en los siguientes casos: a) se calienta el agua de un jarro y su temperatura se eleva, b) se continúa calentando el agua mientras hierve.
17. Cuando se derrite hielo a 0°C su volumen disminuye. ¿La variación de energía interna es mayor, menor o igual que la cantidad de calor suministrada? Explica.
18. ¿Frotar nuestras manos entre sí para calentarlas es un proceso reversible o irreversible? Explica.
19. En la figura 5.6 el punto 1 corresponde al estado inicial de cierto gas. Teniendo en cuenta que el área comprendida entre el gráfico y el eje V representa el trabajo realizado por el gas, determina en qué casos es mayor dicho trabajo: a) ¿durante la compresión isotérmica o la adiabática?; b) ¿durante la expansión isotérmica o la adiabática? ¿En cuáles casos dicho trabajo es positivo y en cuáles negativo?
20. En el experimento representado en la figura 5.9, explica cómo se obtiene energía mecánica a partir de energía interna y por qué la eficiencia de este proceso de transformación de energía no es 100%.
21. En las máquinas térmicas reales, como por ejemplo en un motor de gasolina, siempre hay fricción entre sus piezas móviles. ¿Una máquina de la cual se haya eliminado la fricción entre sus piezas, podría tener una eficiencia de 100%?



5.9.5. Ejercicios de repaso

1. Busca las masas moleculares del helio y del neón. ¿Qué debe esperarse acerca de la relación entre sus calores específicos? Argumenta.

Respuesta: el del He debe ser unas 5 veces mayor.

2. Un mismo gas se expande de un volumen V_1 a otro V_2 de tres modos: a) a presión constante, b) a temperatura constante, c) adiabáticamente. ¿En cuál caso el trabajo realizado por el gas es mayor y en cuál menor? Sugerencia: para el razonamiento puedes auxiliarte de los gráficos de la figura 5.6.

Respuesta: mayor en (a) y menor en (c)

3. Un líquido contenido en un recipiente aislado térmicamente se agita fuertemente y de modo irregular, con lo cual, aunque ligeramente, se eleva su temperatura. a) ¿Se ha transferido cantidad de calor al líquido? Argumenta. b) ¿Se ha efectuado trabajo sobre él? Argumenta. c) ¿De qué signo es la variación de energía interna, positiva o negativa?

Respuesta: a) no, b) sí, c) positiva.

4. Un jarro con 250 g de agua se coloca en un quemador. La temperatura inicial del agua es 25°C . Si el agua hierve hasta consumirse totalmente, ¿qué cantidad de calor absorbió? ($c = 4.2 \times 10^3 \text{ J / kg }^\circ\text{C}$, $L_v = 2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}$).

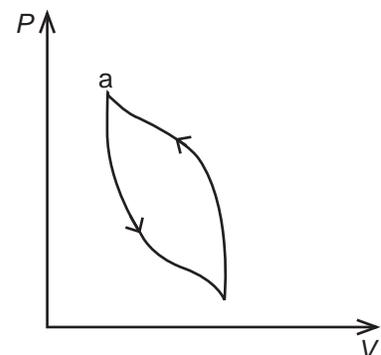
Respuesta: $6.4 \times 10^5 \text{ J}$

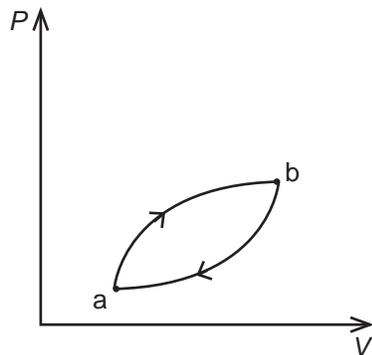
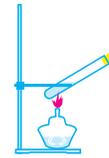
5. Se tiene 1.00 cm^3 de agua que hierve a la presión atmosférica ($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$), transformándose en 1671 cm^3 de vapor. El calor de vaporización es $2.25 \times 10^6 \text{ J/kg}$. Calcula: a) El trabajo efectuado por el agua al vaporizarse. b) La variación de su energía interna. ¿Ésta aumenta o disminuye?

Respuesta: a) 169 J, b) $2.08 \times 10^3 \text{ J}$, aumenta

6. La figura representa un proceso cíclico que se inicia en el estado representado por el punto a. El trabajo neto realizado es -600 J . a) argumenta por qué es negativo. b) ¿Cuál es la variación de energía interna del sistema? c) ¿El sistema recibe o entrega cantidad de calor? ¿Cuál es su valor?

Respuesta: b) cero; c) entrega 600 J.





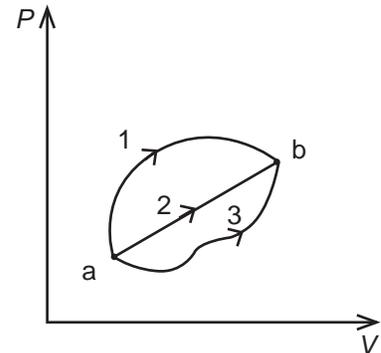
7. Un sistema se lleva del estado *a* al *b* y luego nuevamente al *a*. a) ¿Recibe o entrega cantidad de calor? b) Si la cantidad de calor transferida durante un ciclo es 6.5×10^3 J, ¿cuánto es el trabajo neto? c) Si el proceso se realiza en sentido contrario al descrito, ¿recibe o entrega calor? ¿Qué magnitud tiene en este caso la cantidad de calor transferida?

Respuesta: a) recibe, b) 6.5×10^3 J, c) entrega 6.5×10^3 J

8. Se tiene gas en un cilindro con émbolo y se calienta lentamente, de modo que durante su expansión la presión permanece constante e igual a 1.8×10^5 Pa. La variación de volumen del gas fue 0.21 m^3 y la cantidad de calor absorbida 1.15×10^5 J. a) Calcula el trabajo realizado por el gas. b) Calcula la variación de su energía interna. c) ¿Dependerán los resultados obtenidos de que el gas sea ideal o no? d) ¿Dependerá la temperatura del gas de si es ideal o no? Argumenta.

Respuesta: a) 3.8×10^4 J, b) 7.72×10^4 J, c) No, d) Sí

9. Un sistema se lleva del estado *a* al *b* siguiendo las tres trayectorias mostradas en la figura. a) ¿Por cuál es mayor el trabajo que realiza el sistema? ¿Por cuál menor? b) ¿por cuál trayectoria es mayor la transferencia de cantidad de calor? c) Si la energía interna en *b* es mayor que en *a*, ¿esa cantidad de calor es recibida por el sistema o cedida por él?



Respuesta: a) por la 1, por la 3; b) por la 1; c) recibida.

10. Un motor diesel efectúa en cada ciclo 2.5×10^3 J de trabajo y entrega al ambiente 4.8×10^3 J de cantidad de calor. El motor trabaja a 60 ciclos/s. a) ¿Cuánto calor se entrega al motor en cada ciclo? b) ¿Cuál es su potencia? c) ¿Cuál es su eficiencia térmica?

Respuesta: a) 7.3×10^3 J, b) 4.4×10^5 W, c) 34%

11. En una máquina térmica la temperatura del calentador es $250 \text{ }^\circ\text{C}$ y la del refrigerador $27 \text{ }^\circ\text{C}$. En un ciclo, la sustancia de trabajo recibe 1.50×10^6 J y entrega 1.20×10^6 J. Determina la eficiencia máxima de la máquina y su eficiencia real.

Respuesta: 43% y 20%

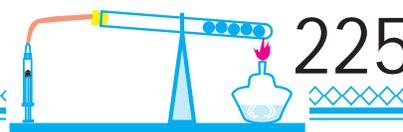
12. La máxima eficiencia teórica de cierta máquina térmica es 30%. Si la máquina utiliza como refrigerador a la atmósfera, cuya temperatura es de $27 \text{ }^\circ\text{C}$, ¿cuál es la temperatura del calentador?

Respuesta: 429 K ó 156 °C

6

Actividades prácticas





6. Actividades prácticas

Las actividades prácticas son parte esencial del aprendizaje de la Física. Durante ellas se enriquecen con experiencia concreta determinados conocimientos y se obtienen otros; se aprende a razonar a partir de condiciones reales; se desarrollan habilidades para la medición, el manejo de instrumentos y el procesamiento e interpretación de datos; se gana experiencia en la elaboración de informes acerca del trabajo realizado. En resumen, se adquieren conocimientos, habilidades y métodos de trabajo que no es posible obtener mediante otras actividades. A continuación se incluye un conjunto de actividades prácticas sobre **Propiedades de la Materia**, estrechamente relacionadas con el material del texto. Se han agrupado en dos apartados, en el primero se proponen actividades sencillas, que pueden ser realizadas en la casa o el aula. Éstas no exigen realizar mediciones precisas ni evaluar la incertidumbre de los resultados. Su objetivo fundamental es utilizar los conceptos básicos estudiados para analizar reflexivamente diversas situaciones prácticas, así como desarrollar algunas habilidades. El segundo apartado está dedicado a las prácticas de laboratorio, las cuales, como su nombre indica, deben ser realizadas en el laboratorio, con el instrumental adecuado.

6.1. Actividades prácticas para la casa o el aula

1. Pequeñez de las partículas que forman los cuerpos. Introduce un pequeño granito de algún colorante (por ejemplo, de fluoresceína sódica) en el agua de un vaso de precipitado y agita. Utiliza un gotero para extraer del vaso una pequeña porción del agua coloreada. Aproximadamente, ¿qué fracción del volumen total del agua coloreada representa la porción extraída? Deja caer una gota del gotero en otro vaso con agua limpia. ¿Todavía colorea el agua del vaso? ¿Qué sugiere esta experiencia acerca de la pequeñez de las partículas que forman el colorante?

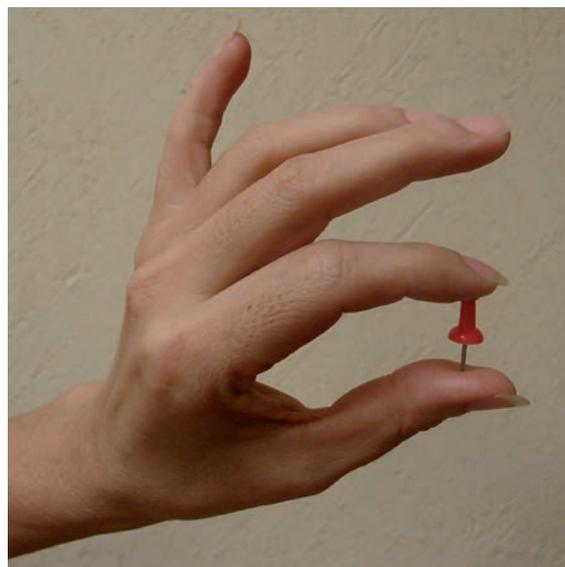
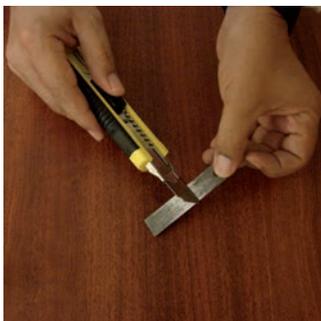
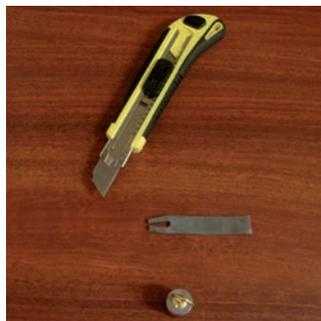




2. Movimiento de las moléculas. Coloca una cucharadita de azúcar en el fondo de un vaso y luego añade agua con cuidado por la pared del vaso, tratando que no se mezcle con el azúcar. Sitúa el vaso en algún lugar sin moverse y espera varios días. ¿Qué pasó con el azúcar que había en el fondo? Prueba el agua cerca de su superficie. ¿Hay moléculas de azúcar en la superficie del agua? ¿Cómo se explica esto?



3. Interacción entre las moléculas. Agarra un cilindro de plomo y una lámina de plomo bien plana. Con una navaja raspa la base del cilindro de plomo y una de las caras de la lámina, hasta que queden gris brillante. Coloca la lámina sobre una mesa, con la parte raspada hacia arriba, y presiona fuertemente contra ella la base del cilindro de plomo. Mientras presionas, haz girar ligeramente el cilindro en un sentido y en el contrario. La lámina y el cilindro deben adherirse entre sí. ¿Cómo explicarías esto?



4. Presión. Presiona ligeramente una tachuela entre tu dedo índice y pulgar, como se muestra en la foto. Utiliza el concepto de presión para explicar la diferencia entre lo que sientes en los dedos.

5. Presión ejercida por un cuerpo apoyado en una superficie. Utilizando una balanza y una regla graduada, determina la presión ejercida por tu libro de Física sobre la superficie de la mesa en la cual se apoya. b) Estima la presión ejercida por tu cuerpo sobre el piso cuando estás parado.



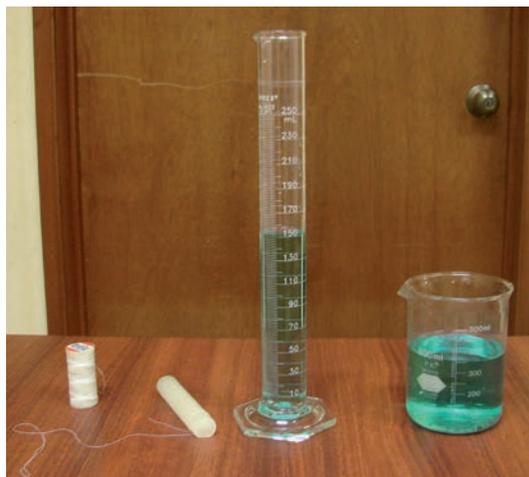
6. Dependencia de la presión en un fluido con la profundidad. Haz dos pequeños orificios en la pared de un vaso de frigolít, uno cerca del borde superior y otro cerca del fondo. Llena el vaso de agua y observa cómo sale por los orificios. ¿Por cuál sale a mayor velocidad? ¿Qué indica esto? ¿Dónde tendrías que hacerle un orificio al vaso para que el alcance del chorrillo de agua sea máximo?



7. Presión ejercida por nuestros pulmones. Participa en el diseño e instalación en el aula de un “manómetro gigante”. Utilízalo para medir la máxima presión que puedes ejercer al soplar aire.



8. Ley de Arquímedes. Determina la masa de un cuerpo que se sumerge parcialmente en agua (por ejemplo, un pedazo de parafina, de madera de cedro, de pino) utilizando solo una probeta en la que puede ser introducido.



9. Flotación y densidad. Llena dos copas iguales (o dos vasos transparentes iguales), uno de agua y otro de aceite. Tapa la copa que tiene agua con un pedazo de acetato y colócala con su boca hacia abajo encima de la copa con aceite, de modo que las copas queden bien alineadas. Tira de la lámina de acetato con cuidado y extráela de entre las copas. Explica lo que sucede.





10. Simulando los “ $\frac{1}{2}$ emisferios de Magdeburgo”. Consigue dos destapacaños iguales. a) Júntalos por sus bordes y comprímelos fuertemente, de modo que salga una parte del aire de la cavidad entre ellos. Prueba separar un destapacaño de otro. b) En el interior de uno de los destapacaños coloca un pedazo de algodón impregnado de alcohol y enciéndelo. Tapa este destapacaño con el otro, de modo que la cavidad entre ellos quede herméticamente cerrada. La combustión del alcohol consume gran parte del aire que hay entre los destapacaños. Prueba separar los destapacaños.





11. La presión atmosférica impide que el agua de un vaso caiga. Vierte agua en un vaso transparente, cierra su boca con un pedazo de acetato (o cartulina) y sujetando éste con una mano, vira el vaso boca abajo. Explica lo que sucede tanto en el caso que el vaso tiene un poco de agua, como en el caso que esté totalmente lleno.



12. La presión atmosférica abolla una lata. Vierte un poco de agua en una lata de refresco vacía y caliéntala hasta que hierva. Agarra la lata con un pinza e introdúcela con la abertura hacia abajo en un recipiente con agua. ¿Cómo se explica lo que sucede?



13. La presión atmosférica introduce un objeto en un recipiente.

Variante 1. Vierte un poco de agua en un erlenmeyer y caliéntala hasta que hierva. Cierra la boca del erlenmeyer colocando sobre ella un huevo cocido y luego deja enfriar el erlenmeyer. Explica lo sucedido. La experiencia puede transcurrir más rápidamente, si para enfriar el erlenmeyer, le echas agua de la llave encima.



Variante 2. Introduce un papel encendido en el erlenmeyer y cierra su boca con el huevo cocido. Explica lo que sucede.





14. La presión atmosférica introduce agua en un vaso. Inserta un fósforo en un una tapa de algún frasco y coloca ésta, flotando, en el agua de un plato. Enciende el fósforo y luego coloca un vaso con su boca hacia abajo en el plato con agua, de modo que el fósforo quede dentro del vaso. ¿Cómo se explica lo sucedido?



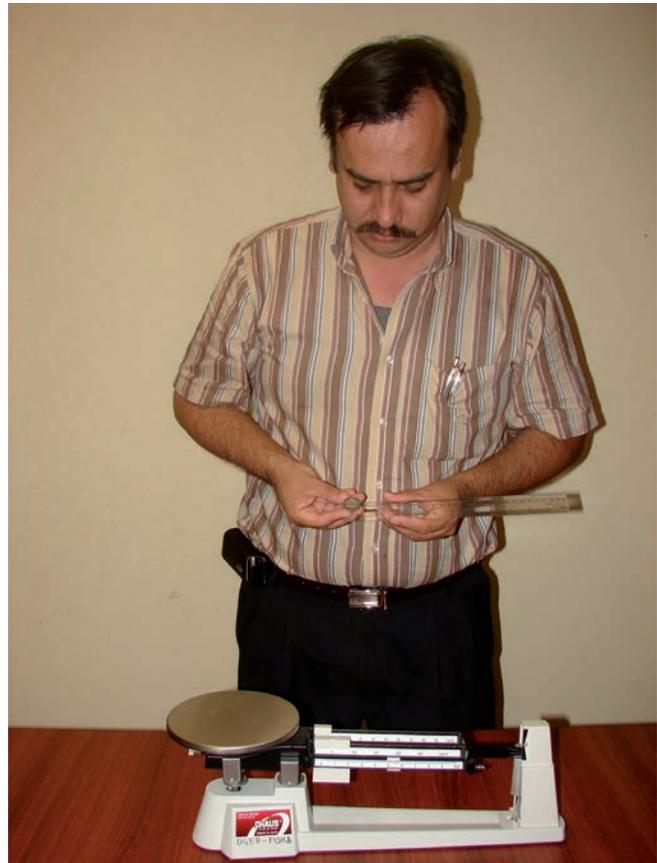
15. Surtidor de agua debido a la presión atmosférica. Vierte un poco de agua en un erlenmeyer y a continuación ciérralo con un tapón de goma atravesado por un tubo de vidrio. Calienta el agua del erlenmeyer hasta que hierva. A continuación agarra el erlenmeyer con una pinza e introduce el tubo de vidrio en un recipiente con agua. Describe lo que sucede. ¿Cómo se explica?



16. Efecto Bernoulli. Coloca dos latas de refresco, como se muestra en la foto. Sopla aire entre las latas mediante un popote. ¿Qué sucede con las latas? ¿Cómo se explica?



17. Aplicación de la ecuación de Bernoulli. Sitúa una moneda ligera a unos dos centímetros del borde de una mesa. Sopla aire fuertemente sobre ella. ¿Qué sucede con la moneda? ¿Cómo se explica? Utiliza una balanza, una regla graduada y la ecuación de Bernoulli para estimar la velocidad que, como mínimo, tenía el aire al pasar por encima de la moneda.





18. Efecto del cambio de dirección del movimiento de un fluido. Sostén ligeramente entre dos dedos una cuchara por su extremo. Aproxímalala al chorro de agua que cae de una llave abierta. El chorro “se pega” a la cuchara y se desvía de su dirección inicial. Repite la experiencia varias veces. ¿Qué cuerpo actúa sobre el chorro y hace que desvíe la dirección de su movimiento? Según la tercera ley de Newton, ¿qué sentido debe tener la fuerza que ejerce el chorro sobre la cuchara? ¿Percibes esta fuerza?



19. Efecto de membrana de la superficie de un líquido. Llena hasta el tope una copa o un vaso de agua. A continuación deja caer poco a poco en su interior alfileres o clips. ¿Cuántos de ellos puedes introducir en la copa sin que se derrame agua? ¿Cómo es posible esto?



20. Presión atmosférica y tensión superficial. Haz un pequeño orificio en la pared de una botella plástica, cerca de su fondo, y luego llénala de agua. Si cierras herméticamente la botella con su tapa, el agua deja de salir por el orificio. ¿Cómo se explica esto?



21. Tensión superficial de agua y de detergente. Recorta un rectángulo de papel, dóblalo como se muestra en la foto y colócalo sobre la superficie del agua en una vasija extensa. Deja caer una gota de detergente líquido en el espacio triangular formado por el papel. Explica lo que observas.





22. Expansión de aire. Sopla aire sobre una mano con la boca, primero dejando una pequeña abertura entre los labios y después con la boca bien abierta. ¿Cómo se explica la diferencia en la temperatura del aire en uno y otro caso?



23. Expansión casi adiabática de vapor de agua. Si en tu casa hay una olla puedes comprobar que es posible colocar la palma de la mano relativamente cerca del chorro de vapor de agua que sale por su tapa. ¿Cómo se explica esto, si dentro de la olla la temperatura del vapor debe ser, cuando menos, de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y con la rapidez que sale apenas tiene tiempo de entregar cantidad de calor al entorno?



24. Influencia del calor específico del agua. Evidentemente, si aproximas la llama de un fósforo a un globo con aire, éste explota. Llena un globo de agua y aproxímale la llama de un fósforo. ¿Qué sucede? ¿Cómo se explica?



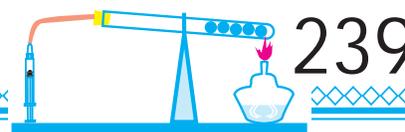
25. Transformación de energía interna en mecánica. Recorta una espiral de papel y suspéndela de una punta, como se muestra en la figura. Ya sea muy baja o muy alta la temperatura del entorno, la espiral permanecerá en reposo. Sin embargo, basta con que exista una pequeña diferencia de temperatura entre sus partes superior e inferior para que la espiral se ponga en movimiento. Para comprobar esto, coloca la espiral encima de una parrilla, o de un bombillo de filamento incandescente encendido. Analiza lo que ocurre desde el punto de vista del esquema de la figura 5.11.





26. Simulando una máquina térmica tipo Stirling. En la foto se muestra un modelo simplificado que ilustra el principio de su funcionamiento. Consta de un tubo de ensayo con un tapón de goma que es atravesado por un fino tubo de vidrio. En el interior del tubo se colocan 4 - 5 canicas. Utilizando una abrazadera con un eje, se coloca el tubo de ensayo en una base de madera, de tal modo que pueda girar alrededor del eje. Este tubo de ensayo se vincula mediante una manguera de goma con otro menor, en el cual se ha insertado un tapón de goma atravesado por un tubo que funciona como pistón. Es muy importante que el rozamiento entre el pistón y el tubo sea el menor posible. Al calentar el tubo de ensayo con las canicas, el aire de su interior se expande, lo que provoca que el pistón del tubo menor ascienda y haga girar al tubo mayor sobre su eje. Entonces las canicas se desplazan hacia el extremo del tubo, con lo cual el aire caliente que ocupaba ese extremo se desplaza hacia el otro y se enfría. Debido a este enfriamiento, el aire se contrae y el pistón del tubo menor se desplaza hacia abajo. El proceso se repite cíclicamente. Construye un modelo como el descrito e identifica los elementos básicos del funcionamiento de toda máquina térmica, esquematizados en la figura 5.11. Indaga en Internet acerca de las máquinas tipo Stirling.





6.2. Prácticas de laboratorio

Un aspecto central de las prácticas de laboratorio que aparecen a continuación es el manejo de ciertos instrumentos y la realización de mediciones. Sin embargo, las prácticas no se reducen a ello, otro importante aspecto consiste en la preparación previa de los estudiantes para el trabajo en el laboratorio. Durante esa preparación deben comprender la problemática que abordarán y el objetivo de la práctica, saber deducir las ecuaciones que utilizarán, así como conocer el contenido del trabajo que van a realizar. Y no menos importante que todo lo anterior es la labor posterior a la sesión de trabajo en el laboratorio: cálculos, análisis de la incertidumbre de los resultados, construcción de gráficas, respuestas a las preguntas formuladas y, finalmente, la elaboración del informe o reporte de la práctica.

En general, el informe de cada práctica debe constar de tres partes fundamentales: una, donde se expone la problemática abordada en la práctica y su objetivo; otra, donde se recogen los resultados de las mediciones realizadas, se analiza el origen de la posible incertidumbre en ellos, se presentan (en los casos que corresponda) los gráficos y se responden las preguntas formuladas; la última parte del informe consiste en unas breves conclusiones donde se da una valoración de los resultados obtenidos y del procedimiento empleado y se proponen variantes para mejorar el trabajo.





6.2.1. Estimación del tamaño de una molécula

Introducción. Algunos hechos cotidianos evidencian que de los cuerpos pueden desprenderse pequeñísimas porciones: el apenas perceptible desgaste de la punta de un lápiz luego de haber escrito varios trazos, un diminuto granito de tinte que colorea toda el agua de un vaso, el lento desgaste de las monedas con el roce, la evaporación de los líquidos. Esto sugiere que las moléculas de que están formados los cuerpos son extremadamente pequeñas.

Es posible adquirir una noción de la pequeñez de las moléculas a partir de un experimento relativamente simple. Se diluye un pequeñísimo volumen de ácido oleico en alcohol y luego se deja caer una gota de la disolución sobre la superficie de agua. El alcohol se disuelve inmediatamente en el agua y el ácido oleico se extiende en forma de una delgada película circular. Es de suponer que el tamaño de las moléculas de ácido oleico sea igual o menor que el espesor de la película. Conociendo el volumen de ácido oleico que hay en la gota que se dejó caer y el área de la película circular, es posible determinar el espesor de la película. Éste representa una cota superior para el tamaño de las moléculas de ácido oleico.

El **objetivo** de esta práctica es estimar una cota superior para el tamaño de las moléculas de ácido oleico.

Materiales e instrumentos: disolución de ácido oleico en alcohol al 0.5 %, previamente preparada por el profesor; bandeja; agua; trozo de gis; gotero; regla graduada.



Notas: a. Una variante para preparar la disolución puede consistir en lo siguiente. Se vierten 9.95 cm^3 de alcohol (prácticamente 10 cm^3) en una jeringa de 10 ml sin su émbolo y cuyo orificio se ha cerrado. Luego, con ayuda de una pipeta graduada en centésimas de cm^3 , se añaden 0.05 cm^3 de ácido oleico. La disolución así preparada puede conservarse cerrando herméticamente la jeringuilla. Alcanza para que todos los equipos de trabajo puedan realizar la práctica. b. La bandeja debe haberse lavado muy bien con detergente.



1. Repasa el apartado 1.2.1 y, en especial, el ejemplo resuelto 1.1.
2. En esta práctica es necesario conocer el volumen de ácido oleico que hay en una gota de la disolución preparada. Se sabe que dicho volumen representa el 0.5% del volumen total de la gota. Por eso, para determinar el volumen de ácido oleico que hay en ella, debes determinar el volumen de una gota. Para ello, toma con el gotero una porción de la disolución y anota el volumen que queda en la jeringa. A continuación vierte 30 gotas en la jeringa y anota nuevamente el volumen. ¿Cuál es el volumen de las 30 gotas? ¿Y el de una gota?

Calcula el volumen de ácido oleico que hay en una gota. Analiza los factores que determinan la incertidumbre de esta medición.



3. Vierte agua en la bandeja y sobre su superficie esparce una pequeña cantidad de polvo fino de gis. A continuación deja caer una gota de la disolución en la superficie del agua. Inmediatamente tu compañero determinará el diámetro de la película circular de ácido oleico que se extiende sobre el agua. Calcula su radio R . Analiza los factores que determinan la incertidumbre de esta medición.





4. El ácido oleico sobre la superficie del agua forma una especie de cilindro, cuya altura h , sumamente pequeña, es el grosor de la película y el área A de su base es la de la película circular. Como el volumen de un cilindro es $V = Ah$, el grosor de la película de ácido oleico es:

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

El volumen V de ácido oleico sobre la superficie del agua es igual al que hay en la gota que se ha dejado caer, calculado en la actividad 2. El área A de la película de ácido oleico es $A = \pi R^2$. De ahí que el espesor de la película es:

$$h = \frac{V}{\pi R^2}$$

Utiliza esta fórmula para calcular el espesor de la película de ácido oleico.

¿Por qué dicho espesor representa una cota superior del tamaño de las moléculas de ácido oleico?

5. Compara el resultado obtenido por ti con el tamaño de una molécula de ácido oleico. ¿A qué puede deberse la diferencia entre ambos valores?
6. Prepara un informe en el cual resumas el trabajo realizado y los resultados obtenidos.



6.2.2. Estimación de la presión atmosférica

Introducción. Nuestro planeta está rodeado de una capa de aire, la atmósfera, de decenas de kilómetros de espesor. Todos los cuerpos en la Tierra se encuentran sumergidos en ella y, de modo similar que en los líquidos, mientras mayor sea la profundidad a la que están, es decir, mientras más cerca estén de la superficie de la Tierra, mayor será la presión atmosférica sobre ellos.

Habitualmente no nos percatamos de la existencia de la presión atmosférica, porque estamos constantemente sometidos a ella. Pero basta que ascendamos a un lugar elevado y su valor decrezca un poco, para que advirtamos el efecto de esa variación. La presión atmosférica hace posibles numerosos fenómenos que observamos cotidianamente: el funcionamiento de una jeringa, la utilización de una pajilla para beber líquido, la adhesión de ventosas, y muchos más.

El **objetivo** de esta práctica es utilizar una jeringa para estimar el valor de la presión atmosférica.

Materiales e instrumentos: jeringa de 10 ml con gancho en el extremo del émbolo para colgar una carga, base para la jeringa, capucha para cerrar el orificio de la jeringa, soporte universal, aro con nuez, pesas (de 1000 g, 500 g y 250 g), arena, cubeta para colocar las pesas y arena, balanza triple brazo, vernier.





1. Repasa lo estudiado sobre la presión atmosférica (p. 73-76).
2. Primeramente determinarás el valor de la fuerza de rozamiento cinético entre el pistón y la pared de la jeringa. Para ello, sosteniendo la jeringa con una mano, cuelga la cubeta de su émbolo y añade arena hasta que el émbolo descienda con movimiento aproximadamente uniforme. Cuando esto ocurra, el peso de la carga que cuelga será numéricamente igual a la fuerza de rozamiento. Es posible que la sección transversal de la jeringa no sea exactamente la misma a todo su largo, en cuyo caso la fuerza de rozamiento con el émbolo variará ligeramente de una parte a otra. Realiza la medición para la parte media de la jeringuilla. Determina la fuerza de rozamiento y expresa el resultado en newton.

Analiza los factores que influyen en la incertidumbre del resultado. ¿Cuáles serán los principales?



3. Sitúa el émbolo de modo que no quede aire en el interior de la jeringa y cierra el orificio de ésta. Realiza el montaje según se muestra en la figura. A continuación coloca en la cubeta una carga de 1500-1750 kg y añade arena poco a poco, hasta lograr que el émbolo descienda aproximadamente con movimiento uniforme. Mide el peso de la carga que cuelga y exprésalo en newton.

Analiza los factores que influyen en la incertidumbre de este resultado.





4. Cuando el émbolo desciende con movimiento uniforme, el peso de la carga habrá equilibrado a la suma de la fuerza de rozamiento y la que actúa sobre el émbolo debido a la presión atmosférica. Dibuja un diagrama de las fuerzas que actúan sobre el émbolo. Determina la fuerza sobre él debida a la presión atmosférica.

¿Cuáles son los factores principales que influyen en la incertidumbre del resultado obtenido?

5. Mide el diámetro de la sección transversal interior de la jeringuilla, determina su radio y calcula su área. Expresa el resultado en m^2 .

Analiza los factores que determinan la incertidumbre de la medición.



6. A partir de los resultados de las actividades 4 y 5, determina el valor de la presión atmosférica y compáralo con el valor oficial, $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$. ¿Cuáles son los principales factores que influyen en la posible diferencia entre ambos valores?

7. Prepara un informe en el cual resumas el trabajo realizado y los resultados obtenidos.



6.2.3. Estudio de la fuerza de empuje de un líquido.

Introducción. Una importantísima propiedad de los fluidos es la fuerza de empuje que ejercen sobre los cuerpos parcial o totalmente sumergidos en ellos. Gracias a la fuerza de empuje son posibles la navegación marítima, el empleo de globos aerostáticos para explorar la atmósfera, la separación de ciertas mezclas y otros fenómenos.

El origen de la fuerza de empuje sobre un cuerpo sumergido en un fluido es la dependencia de la presión con la profundidad. En la parte inferior del cuerpo la presión es mayor y en la parte superior menor. El resultado de esto es una fuerza neta sobre el cuerpo de abajo hacia arriba, es decir, la fuerza de empuje.

El **objetivo** de esta práctica es estudiar los factores de que depende la fuerza de empuje de un líquido y verificar la ley de Arquímedes.

Materiales e instrumentos: balanza triple brazo, probeta graduada, cuerpo con un hilo atado, vaso con agua, vaso con alcohol.

1. Repasa el apartado 2.1.5 del libro y analiza el ejemplo resuelto 2.7.
2. Coloca el vaso con agua en el platillo de la balanza y equilibra ésta. Introduce el cuerpo suspendido del hilo en el agua del vaso. ¿Qué sucede con el equilibrio de la balanza? Dibuja un esquema de la situación con las fuerzas que actúan sobre el líquido y sobre el cuerpo y explica lo sucedido.



- Ahora introduce el cuerpo en el agua poco a poco. ¿Cómo depende la fuerza de empuje, del volumen de su parte sumergida en el agua?
- Mide la masa del vaso con agua y luego calcula su peso y expresa el resultado con su incertidumbre.

A continuación introduce el cuerpo completamente en el agua del vaso, pero sin que toque el fondo. Mientras mantienes el cuerpo sumergido, tu compañero de trabajo debe equilibrar nuevamente la balanza. Determina la fuerza ejercida sobre el platillo de la balanza y expresa el resultado con su incertidumbre.



- A partir de los resultados de las actividades 4 y 5 determina la fuerza de empuje que actúa sobre el cuerpo. Expresa el resultado con su incertidumbre.
- Repite las actividades 4 y 5, pero ahora utilizando alcohol en lugar de agua. ¿En qué caso es mayor la fuerza de empuje, cuando el cuerpo se sumerge en agua o en alcohol? ¿A qué se debe la diferencia?





7. Por último, comprobarás el cumplimiento de la ley de Arquímedes. Para ello, determina el volumen de agua que desplaza el cuerpo introduciéndolo en la probeta con agua y luego calcula el peso del agua desplazada. Expresa el resultado con su incertidumbre.



Compara el valor de la fuerza de empuje que actúa sobre el cuerpo cuando se sumerge en agua (calculado en la actividad 5), con el del peso del agua que desplaza. ¿Se verifica la ley de Arquímedes?

¿Dependerá la fuerza de empuje de la forma que tenga el cuerpo? Argumenta tu respuesta.

8. Prepara un informe en el cual resumas el trabajo realizado y los resultados obtenidos.

Variante 2.

En lugar de la balanza utilizarás un dinamómetro.

1. Repasa el apartado 2.1.5 del libro y analiza el ejemplo resuelto 2.7.
2. Suspende el cuerpo del dinamómetro y observa la indicación de éste. A continuación introduce el cuerpo en el agua del vaso. ¿Qué sucede con la indicación del dinamómetro? Dibuja un esquema de la situación con las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y explica lo sucedido.
3. Ahora introduce el cuerpo en el agua poco a poco. ¿Cómo depende la fuerza de empuje, del volumen de su parte sumergida en el agua?
4. Mediante el dinamómetro, mide el peso del cuerpo fuera del agua y sumergido completamente en ella. Expresa ambos resultados con sus incertidumbres.





5. A partir de los resultados obtenidos calcula la fuerza de empuje que actúa sobre el cuerpo. Expresa el resultado con su incertidumbre.
6. Repite las actividades 4 y 5, pero ahora utilizando alcohol en lugar de agua. ¿En qué caso es mayor la fuerza de empuje, cuando el cuerpo se sumerge en agua o en alcohol? ¿A qué se debe la diferencia?
7. Por último, comprobarás el cumplimiento de la ley de Arquímedes. Para ello, determina el volumen de agua que desplaza el cuerpo introduciéndolo en la probeta con agua y luego calcula el peso del agua desplazada. Expresa el resultado con su incertidumbre.

Compara el valor de la fuerza de empuje que actúa sobre el cuerpo cuando se sumerge en agua (calculado en la actividad 5), con el del peso del agua que desplaza. ¿Se verifica la ley de Arquímedes?

¿Dependerá la fuerza de empuje de la forma que tenga el cuerpo? Argumenta tu respuesta.

8. Prepara un informe en el cual resumas el trabajo realizado y los resultados obtenidos.



6.2.4. Determinación del coeficiente de tensión superficial de un líquido.

Introducción: estás acostumbrado a relacionarte con las fuerzas de gravedad, rozamiento, elasticidad y empuje y probablemente también has tenido oportunidad de apreciar las fuerzas magnética y eléctrica. En ciertos fenómenos de la vida cotidiana interviene además otra fuerza a la que suele prestársele menor atención, la de tensión superficial. Ella tiene su origen en la interacción entre las moléculas.

La tensión superficial está relacionada con fenómenos y tecnologías de gran importancia en la vida diaria, la ciencia y la ingeniería, como por ejemplo, el uso de tensoactivos, el mojado o no de cierta superficie por un líquido y el fenómeno de la capilaridad.

La fuerza de tensión superficial es directamente proporcional a la longitud de la frontera de la capa superficial del líquido dado: $F = \sigma L$, donde σ es una constante de proporcionalidad que depende del líquido, denominada coeficiente de tensión superficial. El procedimiento más directo para medir dicho coeficiente se basa en la fórmula anterior.



El **objetivo** de esta práctica es medir el coeficiente de tensión superficial del agua.

Materiales e instrumentos: marco de alambre con hilos para suspenderlo, recipiente con agua en el que se introducirá el marco de alambre, vaso de precipitado con agua, balanza triple brazo, gotero, soporte universal, polea con vástago, nuez doble.

1. Repasa el apartado 3.2 y estudia el ejemplo resuelto 3.2.
2. Mide la masa del recipiente con agua y calcula su peso. Expresa el resultado con su incertidumbre.



3. Fija la polea al soporte universal y sitúa éste de modo que la polea quede encima del recipiente. Pasa el hilo para suspender el marco de alambre por la garganta de la polea y fija el extremo libre del hilo a una de las pesas de la balanza, la cual colocarás sobre la mesa. Nivelas el marco de alambre para que quede lo más paralelo posible a la superficie del agua.

Deslizando la pesa sobre la mesa, haz que el marco descienda lentamente sobre la superficie del agua. ¿Qué sucede cuando toca la superficie de ésta? ¿Cómo se explica?

4. Ahora sitúa el marco muy próximo a la superficie del agua, pero sin tocarla. A continuación sube el platillo de la balanza para que haga contacto con el marco.



Con ayuda del gotero vierte poco a poco agua en el recipiente hasta que el marco se separe del agua. El peso del agua que fue necesario añadir para que el marco se separara de la superficie del agua es numéricamente igual a la fuerza de tensión superficial. Explica por qué.

Equilibra la balanza a fin de determinar el peso del recipiente con agua más el agua añadida con el gotero.



5. A partir del resultado anterior y el obtenido en la actividad 2, calcula la fuerza F de tensión superficial. Expresa el resultado en newton.
6. Realiza la experiencia tres veces y en cada caso calcula la fuerza de tensión superficial. ¿Se repiten los valores? ¿Qué factores influyen en la incertidumbre de esta medición? Halla un promedio de los resultados obtenidos.
7. Determina el perímetro L del marco de alambre. Expresa el resultado en metro.



Con los resultados de las dos actividades anteriores calcula el coeficiente de tensión superficial según la fórmula $\sigma = F / 2L$. ¿Cuál es el origen del 2 que aparece en esta fórmula?

8. Prepara un informe en el cual resumas el trabajo realizado y los resultados obtenidos.



6.2.5. Comprobación de la ley de Boyle-Mariotte.

Introducción. Aplicar la teoría cinético-molecular para obtener relaciones cuantitativas entre las magnitudes macroscópicas que caracterizan a los cuerpos es, en general, un problema sumamente complejo. Sin embargo, en el caso de un modelo tan simple como el del gas ideal ello se facilita. De la teoría cinético-molecular se obtiene la ecuación de estado, $PV = RN_m T$ y, a su vez, de ésta se deducen las denominadas leyes de los gases una de las cuales es la ley de Boyle-Mariotte.

Por consiguiente, comprobar experimentalmente el cumplimiento de la ley de Boyle – Mariotte utilizando un gas habitual, apoya dos importantes ideas: 1) que el comportamiento de dicho gas es similar al del gas ideal y 2) que la teoría cinético-molecular es correcta, al menos en lo que se refiere a su aplicación a los gases.

El **objetivo** de la práctica es comprobar experimentalmente la ley de Boyle-Mariotte.

Materiales e instrumentos: jeringa de 10 ml con gancho en el extremo del émbolo para colgar una carga, base para la jeringa, capucha para cerrar el orificio de la jeringa, soporte universal, aro con nuez, juego de pesas, cubeta para colocar las pesas, vernier, balanza triple brazo.



Nota: El profesor debe haber determinado previamente el peso conjunto del émbolo con gancho y la cubeta, para proporcionar este dato a los estudiantes.

1. Detalla las características básicas del modelo de gas ideal. ¿Qué condiciones debe cumplir un gas real para que se comporte como el modelo? ¿En qué consiste la ley de Boyle-Mariotte?





- Con la jeringa en posición horizontal, sitúa su émbolo de modo que el volumen de aire en su interior sea de unos 3 cm^3 y a continuación cierra el orificio de la jeringa. El rozamiento entre el émbolo y el cuerpo de la jeringa es grande y puede que el émbolo no haya quedado en la posición correcta. Por eso debes girarlo en un sentido y en el contrario varias veces, pero sin desplazarlo a lo largo de la jeringa. Esto ayudará a que el volumen mediado sea el correcto.

La presión del aire que ha quedado encerrado en la jeringa es la atmosférica.



- A continuación realiza el montaje que se muestra en la foto. Si cuelgas un peso del émbolo, el volumen del aire en la jeringa aumenta y su presión disminuye.

Cuelga sucesivamente diferentes pesos del émbolo y mide los volúmenes correspondientes del aire en la jeringa. ¿Podrá considerarse constante la temperatura del aire durante este proceso? Argumenta. Recuerda girar el émbolo

en un sentido y en el contrario cada vez que coloques una nueva pesa, a fin de evitar el efecto del rozamiento en su posición.

Escribe los resultados en una Hoja de Cálculo. En una columna coloca los volúmenes V del aire en la jeringa (en m^3) y en otra columna las masas m de las pesas que cuelgas más la del émbolo y la cubeta (en kg).

- Las fuerzas que actúan sobre el émbolo son, en su parte exterior,



la de las cargas que cuelgan (F_c) y la debida a la presión atmosférica (F_{at}) y en la parte que está dentro de la jeringa, la debida a la presión del aire en su interior (F_a). Representa mediante un esquema las fuerzas que actúan sobre el émbolo.

Cuando el émbolo está en equilibrio:

$$F_a + F_c = F_{at}$$

Si se divide esta ecuación entre el área A de la sección transversal del interior de la jeringa se tiene:

$$P_a + \frac{F_c}{A} = P_{at}$$

De donde:

$$P_a = P_{at} - \frac{F_c}{A}$$

5. Mide el diámetro del interior de la jeringa y determina el área A de su sección transversal en m^2 .

En una tercera columna de la tabla anterior calcula la presión P_a del aire en el interior de la jeringa.



6. Construye el gráfico de $P(V)$. ¿Tiene la forma que esperabas? Argumenta.

A continuación añade a la tabla otra columna con los valores de $1/V$ y construye el gráfico de $P(1/V)$. ¿Comprueba el resultado obtenido la ley de Boyle-Mariotte? Argumenta.

7. Prepara un informe en el cual resumas el trabajo realizado y los resultados obtenidos.



6.2.6. Comprobación de la ley de Charles



Introducción. En la práctica anterior verificaste el cumplimiento de una de las leyes de los gases, la ley de Boyle-Mariotte.

El **objetivo** de esta práctica es comprobar experimentalmente el cumplimiento de la ley de Charles.

Materiales e instrumentos: jeringa, capucha para cerrar el orificio de la jeringa, vaso de precipitado con agua, soporte universal, aro con nuez, triángulo de porcelana, pinza con nuez giratoria, mechero de alcohol, termómetro.

1. ¿En qué consiste la ley de Charles?
2. Sitúa el émbolo de la jeringuilla de modo que en su interior queden unos 6 cm³ de aire y luego cierra su orificio. Coloca la jeringa en posición vertical y gira su émbolo en un sentido y en el contrario varias veces, a fin de realizar una medida correcta del volumen del aire. Mide también la temperatura del aire. Expresa los resultados de estas mediciones con sus incertidumbres.
3. Utiliza la ley de Charles ($V_2/V_1 = T_2/T_1$) para predecir el volumen V_2 que tendría el aire encerrado en la jeringuilla si su temperatura fuese de 100 °C.



Expresa el resultado de este cálculo con su incertidumbre. Para determinar ésta, utiliza la siguiente fórmula:

$$\frac{\Delta V_2}{V_2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_1}{V_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T_1}{T_1}\right)^2}$$

4. Ahora intentarás verificar experimentalmente la predicción anterior. Coloca la jeringa en el vaso de precipitados con agua, como se muestra en la foto. Con ayuda del mechero calienta el agua hasta que hierva y luego de esperar varios minutos para que el aire de la jeringa adquiera la temperatura del agua, mide ésta y el volumen del aire en la jeringuilla.
Recuerda girar el émbolo en un sentido y en el contrario, a fin de efectuar una medida correcta del volumen. Expresa los resultados con sus incertidumbres.

Si la temperatura del agua cuando está hirviendo T_2 no es $100\text{ }^\circ\text{C}$ vuelve a calcular el volumen V_2 predicho, utilizando el valor correcto.

¿Coincide el volumen del aire en la jeringa con el predicho a partir de la ley de Charles?
¿Se verifica la ley de Charles?



5. Cuál sería el volumen del aire encerrado en la jeringa si su temperatura fuese $0\text{ }^\circ\text{C}$. Utiliza la ley de Charles para calcular dicho volumen.

Pudieras comprobar el resultado anterior introduciendo la jeringa en una mezcla de agua y bastante hielo.

6. Prepara un informe en el cual resumas el trabajo realizado y los resultados obtenidos.





6.2.7. Transmisión de energía térmica.

Introducción. Durante el calentamiento de un cuerpo se le transmite parte de la energía interna de otro cuerpo que está a mayor temperatura. Al enfriarse, ocurre a la inversa, es el cuerpo el que entrega energía a otro que está a menor temperatura. La cantidad de energía que el cuerpo recibe o entrega se denomina cantidad de calor (Q).

La cantidad de calor que recibe o entrega un cuerpo de masa m al variar su temperatura de T_1 a T_2 se calcula mediante la fórmula $Q = cm\Delta T$, donde c es el calor específico de la sustancia de que está constituido y ΔT la variación de su temperatura.

El **objetivo** de esta práctica es: 1) comparar las cantidades de calor entregada y recibida al mezclar entre sí dos porciones de agua que tienen diferentes temperaturas y 2) determinar el calor específico de una sustancia.

Materiales e instrumentos: “calorímetro” (un vaso de frigolit dentro de otro), termómetro, balanza triple brazo, vaso de precipitado, vaso de frigolit, probeta graduada de 100 ml, soporte universal, aro con nuez, triángulo de porcelana, mechero de alcohol, agua, cuerpo de aluminio de masa conocida con un hilo atado.



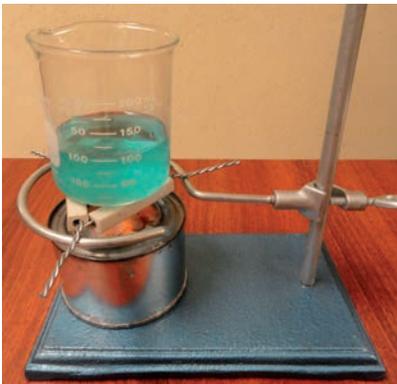
Primera parte.

1. Analiza detalladamente el ejemplo resuelto 2.2.

2. Vierte 100 g de agua (100 ml) en el vaso de precipitado, después echa el agua en el vaso de frigolit y mide su temperatura.



- Vierte otros 100 g de agua (100 ml) en el vaso de precipitado, caliéntala hasta unos 70 °C, échala en el “calorímetro” y mide su temperatura.



Inmediatamente añade el agua a temperatura ambiente al “calorímetro” y mide la temperatura de la mezcla del agua fría y la caliente.



¿A qué se debe la incertidumbre en los resultados de las dos mediciones de masa y de las tres mediciones de temperatura efectuadas anteriormente?





4. Calcula la cantidad de calor Q_r recibida por el agua que estaba a temperatura ambiente al calentarse y la cantidad de calor Q_e entregada por el agua caliente al enfriarse.

¿Dependerá la incertidumbre de los resultados obtenidos para Q_r y Q_e , solo de las incertidumbres de las masas y temperaturas medidas anteriormente? ¿Qué otros factores pudieran influir? En tu opinión, ¿cuáles de ellos son los que tienen mayor influencia?

5. Compara la cantidad de calor recibida por el agua a temperatura ambiente con la entregada por el agua caliente. ¿Cuáles son los factores que más pudieran haber influido en la diferencia entre dichos valores?

Segunda parte.

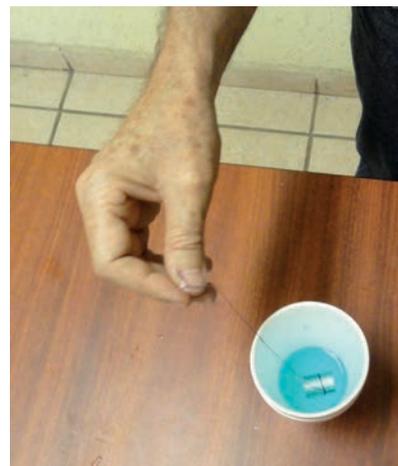
6. Vierte en el “calorímetro” 50 g (50 ml) de agua a la temperatura ambiente y mide su temperatura. ¿A qué se debe la incertidumbre en los resultados de estas mediciones?



7. Vierte agua en el vaso de precipitado, introduce el cuerpo de aluminio en el agua, caliéntala hasta unos 80 °C y luego apaga el mechero.

Mide la temperatura del agua (que será la misma que la del cuerpo de aluminio) y, valiéndote del hilo, extrae el cuerpo y rápidamente sumérgelo en el agua del “calorímetro”. Mide la temperatura del agua en el calorímetro (que será la misma que la del cuerpo de aluminio). ¿A qué se deben las incertidumbres en los resultados de estas dos mediciones de temperatura?





8. Calcula la cantidad de calor Q_r recibida por el agua al calentarse debido a la introducción en ella del cuerpo de aluminio.
9. Si la cantidad de calor Q_e entregada por el cuerpo de aluminio es igual a la cantidad de calor Q_r recibida por el agua, se tiene:

$$Q_r = Q_e = c_{Al} m \Delta T$$

¿Será rigurosamente cierto que la cantidad de calor Q_e entregada por el cuerpo de aluminio es igual a la cantidad de calor Q_r recibida por el agua? Argumenta.

Coloca en la ecuación anterior el valor de la masa m del cilindro de aluminio, el de la variación ΔT de su temperatura y el de la cantidad de calor, y calcula el calor específico c_{Al} del aluminio. ¿Será el valor de ΔT que utilizaste en la fórmula verdaderamente el real? ¿Será mayor o menor?

10. Compara el valor obtenido con el aceptado para el calor específico del aluminio, $9.0 \times 10^2 \text{ J / kg K}$. ¿Cuáles son los factores que más pudieran haber influido en la diferencia entre ambos valores?
11. Prepara un informe en el cual resumas el trabajo realizado y los resultados obtenidos.



Bibliografía

- Alvarado, A., Valdes, P. y Caro J. (2009). *Mecánica 1: Bachillerato universitario*. México: Once Ríos.
- Alvarado, A. y Valdes, P. (2009). *Mecánica 2: Bachillerato universitario*. México: Once Ríos.
- Alvarenga, B. y Máximo, A. (1998). *Física General con experimentos sencillos*. México: Oxford.
- Giancoli, D. (2002). *Física: Principios con aplicaciones*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Haber-Schaim y otros (1975). *Física PSSC **. España: Reverté.
- Hecht, E. (1999). *Física en perspectiva*. México: Addison-Wesley Iberoamericana.
- Hewitt, P. (1999). *Conceptos de Física*. México: Limusa.
- Hewitt, P. (2004). *Física conceptual*. México: Pearson.
- Holton, G. (1993). *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*. España: Reverté.
- Microsoft (2008). *Encarta 2009 Biblioteca Premium DVD*.
- Pérez, H. (2007). *Física General*. México: Patria.
- Pople, S. (1997). *Física Razón nada*. México: Trillas.
- Resnick, R. y otros. (2002). *Física*. Vol. 1. México: Continental.
- Sears, F. y otros. (1999). *Física Universitaria*, Vol 2 México: Pearson.
- Serway y Beichner. (2001). *Física para ciencias e ingeniería*. Tomo 1. México: McGraw Hill.
- Serway y Faughn (2001). *Física*. México: Prentice Hall
- Tipler, P. (1999). *Física para la ciencia y la tecnología*. Volumen 1. España: Editorial Reverté.
- Tippens, P. (1996). *Física: Conceptos y Aplicaciones*. México: McGraw Hill.
- Wikipedia, la enciclopedia de contenido libre.
- Wilson, J. (1996). *Física*. México: Pearson.

PROPIEDADES DE LA MATERIA

Bachillerato Universitario

Se terminó de imprimir en el mes de enero
de 2012 en los talleres gráficos de *Servicios Editoriales Once Ríos*
S.A. de C.V., Río Usumacinta No. 821, Col. Industrial
Bravo, Tel. 712-29-50

La edición consta de 3,000 ejemplares

Materiales didácticos para desarrollar competencias alineados a los planes y programas de estudio

Plan 2009 I



Las competencias integran el saber pensar,
el saber decir, el saber hacer y el querer hacer.