

Miguel Hoyuelos

Física Manifiesta

en la magia,
la cocina,
el deporte y la música

Universidad Nacional
de Mar del Plata


eudem

FÍSICA MANIFIESTA

Miguel Hoyuelos



Hoyuelos, Miguel

Física manifiesta / Miguel Hoyuelos. - 1a ed. - Mar del Plata : EUDEM, 2018.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga

ISBN 978-987-4440-26-6

1. Física. I. Título.

CDD 530

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723 de Propiedad Intelectual. Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio o método, sin autorización previa de los autores.

Primera edición: mayo 2018

Este libro fue evaluado por el Dr. Raúl Rossignoli

ISBN 978-987-4440-26-6

© 2018 Miguel Hoyuelos

© 2018, EUDEM

Editorial de la Universidad Nacional de Mar del Plata

3 de febrero 2538 / Mar del Plata / Argentina

Imagen de tapa: Fragmento “Los Embajadores”, Hans Holbein National Gallery Londres

La presente edición ha sido financiada por el Instituto de Investigaciones Físicas de Mar del Plata (IFIMAR)"



Libro
Universitario
Argentino



PRÓLOGO

En estas páginas se utilizan algunas leyes de la física para explicar fenómenos más o menos frecuentes en diversas actividades. En particular, se consideran la magia, la cocina, el deporte y la música. No se trata de un estudio exhaustivo y sistemático de estas actividades sino, en cambio, de una selección de ejemplos en los que se ha enfocado la atención por parecer adecuados para ilustrar principios de la física. Las leyes de la física se manifiestan en estos ejemplos. Los temas aquí tratados pueden profundizarse hasta niveles de complejidad mucho mayores.

El libro está dirigido a todo aquél que tenga curiosidad por la física o por la explicación científica de las actividades o disciplinas mencionadas. Está pensado para alguien que no tenga formación científica, pero que tenga la voluntad de hacer el esfuerzo intelectual para comprender algunos aspectos de la naturaleza. A pesar de esto, el libro también puede despertar la curiosidad de los que tengan una formación en física más avanzada, pues podría resultar interesante descubrir cómo se aplican las leyes de la física a ejemplos concretos de magia, cocina, deporte o música.

Las ilustraciones de este libro no desempeñan un mero rol decorativo. La mayoría de las figuras resultan imprescindibles para la explicación de algunas ideas. Gran parte de las figuras son originales. En todos los casos en que ha sido posible se

ha especificado la fuente de la figura en una lista al final del libro.

Los libros de divulgación científica suelen prescindir del uso de ecuaciones. Ver una expresión matemática produce en algunas personas la impresión de estar ante un tema inaccesible. En este libro se ha evitado el uso de ecuaciones, pero no se han eliminado por completo. Algunas pocas secciones utilizan expresiones matemáticas necesarias para presentar ideas con mayor claridad. No debería ser un problema entenderlas para cualquiera que tenga formación secundaria, aunque esos conocimientos estén algo oxidados o incompletos.

Los temas tratados se presentan de manera independiente, es decir, no es necesario hacer una lectura progresiva y secuencial de todas las secciones. También es posible usar el libro como material de referencia para acceder a la explicación de un tema particular, o saltar secciones.

Los capítulos se basan en charlas de divulgación dictadas dentro del ciclo de conferencias de física que, desde 2004, organizan la Secretaría local Mar del Plata de la Asociación de Profesores de Física de la Argentina y los Departamentos de Física de las Facultades de Ciencias Exactas y Naturales e Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), en el Centro Cultural Osvaldo Soriano. Gracias al esfuerzo de los organizadores, R. Stimler y R. Zamorano, este ciclo de conferencias, en el que participamos profesores de la UNMdP y profesores invitados de otras instituciones, se ha mantenido durante los últimos años y espero que se siga manteniendo en el futuro.

Agradezco a Alberto de la Torre y a Raúl Rossignoli por comentarios y sugerencias.

Cada vez que se comprende algo nuevo se siente un placer intelectual que es, creo, el mayor atractivo de la actividad científica. Pero no es necesario ser científico para disfrutar este tipo de placer. Solo hace falta tener curiosidad y también, para qué negarlo, estar dispuesto a realizar algún esfuerzo. La intención de este libro es hacer que ese esfuerzo no sea demasiado

grande y que el lector logre sentir el placer que conlleva pasar de la incomprensión a la comprensión.

M. Hoyuelos
Mar del Plata, noviembre de 2010.

INTRODUCCIÓN

Quizá el aspecto más asombroso del universo, además de que exista, es que se comporta de acuerdo a reglas. Nadie sabe por qué, pero las reglas están ahí. Cada vez que se suelta un objeto cerca de la superficie de la tierra, el objeto cae. Cada vez que se coloca una gota de tinta en agua, la tinta se mezcla con el agua y no vuelve a separarse. Siempre sucede así, de manera *regular*. Aunque todavía no es posible saber la magnitud de todo lo que se ignora, durante los últimos siglos se ha avanzado mucho, dentro de la física, en la comprensión de las reglas o leyes más básicas de la naturaleza. Las reglas están presentes siempre en cualquier evento o fenómeno que se observe. A diferencia de las leyes del derecho, las leyes de la física no pueden violarse. Si en algún momento un afortunado logra reproducir un experimento en el que se viole una ley física, esa ley pierde su carácter de tal.

Los ejemplos presentados en este libro sirven para introducir, ilustrar y explicar algunas leyes físicas de campos bastante diversos, como óptica, fluidos (fenómenos que ocurren en gases o líquidos), termodinámica (calor y transformaciones de energía), estática (casos en los que las fuerzas que actúan sobre un cuerpo están en equilibrio), cinemática (estudio del movimiento) u ondas (el sonido o la música). Las leyes de la física se manifiestan en forma clara a través de los ejemplos escogidos, toma-

dos de actividades o disciplinas usuales como la magia, la cocina, el deporte y la música.

Un poco de matemática

Uno de los hallazgos más importantes de Galileo fue haber descubierto que “el libro de la naturaleza está escrito en caracteres matemáticos.” Antes de Galileo eran muy pocas las leyes físicas escritas en forma matemática. Dos excepciones simples fueron la ley de reflexión y la de la palanca. A partir de Galileo, y más tarde con los trabajos de Newton, el uso de la matemática en física creció hasta hacerse casi imprescindible. Una excepción notable fue Michael Faraday, que escribió su famosa ley de inducción magnética con palabras. En la actualidad, en física es imposible avanzar si no se expresan las ideas en forma compacta y precisa con una expresión matemática.

A continuación se explica el significado de algunos símbolos matemáticos básicos de uso frecuente en física.

La forma general de una ecuación es la siguiente

$$a = b,$$

donde las letras a y b representan cantidades, y ambas son iguales. Para indicar que estas cantidades son distintas se escribe

$$a \neq b.$$

Un ejemplo concreto es $100 \neq 101$. Supongamos que estas cantidades se refieren al peso, en kilogramos (o kilogramo-fuerza en lenguaje más técnico), que una persona puede levantar. La fuerza de alguien que levanta 100 kilogramos es similar a la de otra persona que levanta 101 kilogramos. Para expresar esta idea en forma más abreviada se escribe

$$100 \simeq 101,$$

donde el símbolo ‘ \simeq ’ significa “similar a.”

Consideremos un resorte. Usemos la letra F para indicar la fuerza que hace este resorte y la letra x para indicar cuánto se estira. Mientras el resorte no se deforme de manera permanente (lo que puede suceder si se lo estira demasiado), se sabe que existe una relación de proporcionalidad entre F y x , o sea, si duplico el estiramiento x , se duplicará la fuerza F . Esta relación se expresa de la siguiente manera

$$F \propto x,$$

donde el símbolo ‘ \propto ’ (similar a la letra griega alfa) significa “proporcional a.” Notar que, a diferencia de las expresiones matemáticas anteriores, en la relación de proporcionalidad los valores de F y x pueden ser muy diferentes, de hecho, tienen distintas unidades (una cantidad corresponde a fuerza y la otra a distancia). La misma idea también podría haberse escrito como

$$F = -k x,$$

donde k es una constante de proporcionalidad que multiplica a x (el signo menos proviene de una convención usual que no tiene importancia en este momento). Sin embargo, a veces es conveniente utilizar el símbolo ‘ \propto ’ para fijar la atención solo en las cantidades que son proporcionales entre sí, y para indicar que, en el análisis que se está haciendo, no tiene importancia cuál es la constante de proporcionalidad.

FÍSICA DE LA MAGIA

El objetivo del mago es desconcertar, asombrar y maravillarse a su audiencia realizando algo imposible en apariencia, algo que viola las leyes de la física. En muchos casos, sin embargo, las leyes de la física son la base que permite hacer los trucos.

Se revelarán trucos que ilustran algunas leyes físicas. Al acceder a la explicación de un acto de magia se corre cierto riesgo: luego de la revelación no podrá volver a sentirse la misma ilusión que se experimentaba antes, cuando uno creía, por un momento, estar ante un acontecimiento extraordinario. Sin embargo, luego de la fascinación se suele pasar a la curiosidad y, a pesar del riesgo antes mencionado, uno desea saber cómo se realizó el truco. La intención aquí es satisfacer esa curiosidad con algunos ejemplos sencillos y, a la vez, hablar de física. La profesión de la magia no correrá riesgos, pues se trata de trucos simples y antiguos que ya han sido revelados muchas veces en otros medios.

Si un mago intenta hacer creer a su público que posee algún tipo de poder paranormal, que sus trucos no poseen una explicación a través de leyes naturales, se trata de un mago del que se debe desconfiar. No obstante, la mayoría de los magos son honestos, y admiten que sus ilusiones son creadas con medios naturales.

En las secciones que siguen se describen los trucos en

los que se aplican leyes físicas de, por ejemplo, fluidos, estática, termodinámica y óptica.

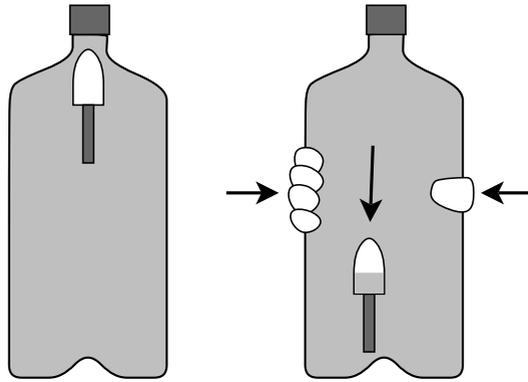
La intención es usar las descripciones no solo como base para la explicación de los principios físicos subyacentes, sino también para dejar de manifiesto la semejanza que existe entre la fascinación de una persona que presencia un espectáculo de magia y la de un científico que observa la naturaleza. En ambas situaciones se puede sentir la misma sensación de asombro y maravilla. Igual que el espectador de los actos de magia, el científico quiere saber cuáles son los trucos que hay detrás de los actos de la naturaleza.

El principio de Arquímedes

El *buzo cartesiano* es un experimento atribuido usualmente a Descartes; sin embargo no se han encontrado referencias a él en sus textos. La referencia más antigua es de 1648 y pertenece a Raffaello Maggiotti, un discípulo de Galileo, quien se atribuyó la invención del buzo cartesiano y explicó su funcionamiento.

Dentro de una botella de plástico cerrada y llena de agua flota un tubo con aire, como se muestra en la Figura 1. (Puede usarse una botella de vidrio, como hizo Maggiotti, pero con la de plástico el truco sale más fácil.) Del tubo cuelga un peso tal que una pequeña fuerza sería suficiente para que el tubo y el peso se hundan. La botella se sostiene con la mano derecha. Se acerca lentamente la mano izquierda hasta tocar la parte inferior de la botella. El tubo se hunde. La mano izquierda parece ejercer un misterioso magnetismo sobre él. Al alejar la mano izquierda, el tubo vuelve a subir.

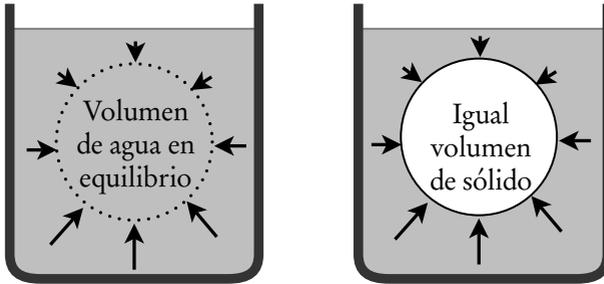
El papel de la mano izquierda en este truco es desviar la atención del público. La verdadera responsable de la bajada y subida del tubo es la mano derecha, que sostiene la botella. El tubo tiene un orificio en su parte inferior. Si la mano derecha



1. Bazo cartesiano. Consiste en un tubo hueco abierto por abajo dentro de una botella de plástico llena de agua. Al presionar la botella, entra agua en el tubo y se hunde.

presiona con más fuerza a la botella, entra un poco de agua al tubo y se reduce el volumen de aire que contiene. Esta compresión hace que el tubo se hunda. Si la presión ejercida por la mano derecha se reduce, el volumen de aire dentro del tubo se expande hasta alcanzar su volumen original y el tubo vuelve a flotar.

El funcionamiento del bazo cartesiano se basa en el principio de Arquímedes (siglo III a. de C.): *todo cuerpo sumergido en un líquido experimenta un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del líquido desalojado*. Este principio puede entenderse de manera intuitiva mirando la Figura 2. A la izquierda de la figura se muestra un recipiente con agua en reposo; la línea punteada marca un volumen arbitrario de agua quieta. Las flechas alrededor de este volumen representan las fuerzas ejercidas por el líquido circundante, cuyo efecto neto es producir un empuje hacia arriba que debe compensar exactamente al peso del volumen marcado; si así no fuera, el agua se movería. A la derecha, se ha reemplazado el volumen de agua por un objeto

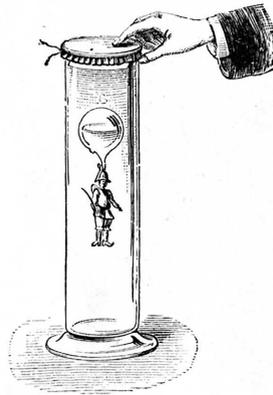


2. Ilustración del principio de Arquímedes. Las flechas indican el efecto producido por el líquido circundante, cuyo resultado neto es un empuje hacia arriba igual al peso del líquido contenido en la esfera.

que posee la misma forma. El efecto del líquido circundante es el mismo que antes, o sea, también produce un empuje hacia arriba igual al peso del volumen de agua desalojada. Por lo tanto, si el objeto es más denso que el agua, se hundirá, y si es menos denso, flotará.

Volviendo al buzo cartesiano, cuando se presiona la botella se reduce el volumen de aire dentro del tubo y, por lo tanto, se reduce la cantidad de líquido desalojado, lo que, a su vez, reduce el empuje de abajo hacia arriba que se menciona en el principio de Arquímedes, haciendo que el tubo se hunda. Cuando se libera la presión, el aire se expande y el tubo vuelve a flotar.

El buzo cartesiano aparece en algunos viejos libros de física con el nombre de *ludió*, ver Figura 3. En el caso del ludió, el objeto que sube y baja es un muñeco con una burbuja de aire y la presión se varía haciendo fuerza con la mano sobre una membrana flexible que cierra por arriba el recipiente de vidrio.



3. Ludión, ilustración de un libro de física editado en Buenos Aires en 1914.



4. Arquímedes, 287-211 a. de C. Retrato imaginario del siglo XVI.

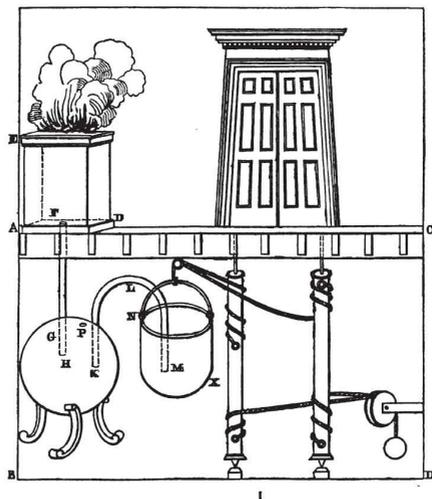


5. Herón de Alejandría, ca. 10-70 d. de C. Retrato imaginario del siglo XVII.

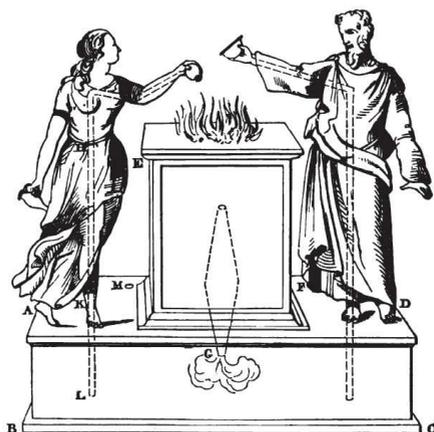
La dilatación de los gases

Esta sección empieza con el relato de un milagro. La historia transcurre en el siglo I, en las afueras de Alejandría, en la zona donde comienza el desierto. Un peregrino debe llegar, a la medianoche, hasta el templo dedicado al dios local para hacer una ofrenda. Camina a la luz de las estrellas. El único sonido perceptible es el rozar de sus pasos en la arena. Llega al templo y coloca su ofrenda sobre la pira, cerca de la entrada. Las llamas se elevan hacia el cielo estrellado. El dios parece aceptar la ofrenda y la consume a través del fuego sagrado. La puerta del templo está cerrada y el peregrino se encuentra completamente solo. Luego de algunos minutos, escucha un crujido que viene de la puerta. Se le eriza la piel e intenta tranquilizarse pensando que solo fue su imaginación. Al rato, otro crujido. La puerta parece moverse. Queda paralizado por el terror al ver que, poco a poco, la puerta se abre sola. Semejante prodigio le indica con claridad que el dios le es propicio y le permite la entrada a su santuario. El peregrino jamás olvidará esta experiencia y dedicará el resto de su vida al servicio y adoración del dios.

Herón de Alejandría (ca. 10-70 d. de C.), en su obra *Neumática*, explica cómo construir un templo cuya puerta se comporte de esta manera aparentemente sobrenatural. Describe un mecanismo oculto que se encuentra por debajo de la pira y que se conecta con la puerta del templo. El mecanismo se ilustra en la Figura 6. La pira es hueca y contiene cierto volumen de aire que, al expandirse por el calor del fuego, empuja el agua que se encuentra dentro de un recipiente, en una cámara oculta y subterránea. El agua pasa, a través de un tubo, a un balde sostenido por una cuerda. La cuerda está enroscada a dos cilindros. Al aumentar su peso, el balde con agua tira de la cuerda y hace girar los cilindros, que están unidos a los ejes de la puerta del templo. De esta forma, la puerta se abrirá lentamente gracias al calor producido por la pira.

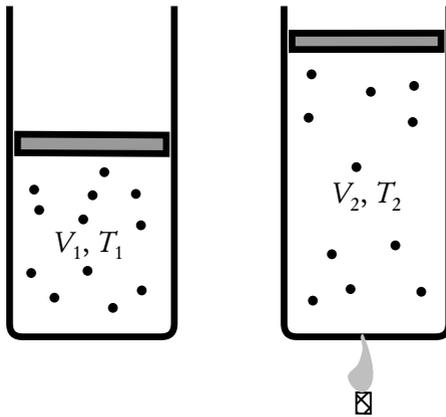


6. Templo descrito por Herón de Alejandría en su *Neumática*.



7. Libaciones en un altar, producidas por el fuego. Mecanismo descrito por Herón de Alejandría.

En su libro, Herón describe una gran cantidad de mecanismos ingeniosos dedicados a producir asombro. Uno más de ellos, que también utiliza la dilatación del aire al calentarse, son las libaciones de aceite en un altar, desde recipientes sostenidos por estatuas, como se describe en la Figura 7. El aire, al calentarse, empuja el aceite que empieza a gotear desde los recipientes y alimenta al fuego (ver *Física Recreativa I*, Perelman 1975).



8. Ilustración de la ley de Charles. Inicialmente se tiene un gas a volumen V_1 y temperatura T_1 . Luego de calentarlo, manteniendo la presión constante, pasa a V_2 y T_2 .

El comportamiento de un gas, a presión constante, al variar su temperatura está descrito por la ley de Charles, que dice que el volumen del gas varía en forma proporcional a su temperatura. En otras palabras, si inicialmente tenemos un volumen V_1 a una temperatura T_1 , y luego tenemos un volumen V_2 a una temperatura T_2 , entonces se cumple la relación

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2},$$

donde T_1 y T_2 son temperaturas absolutas, o sea, la unidad de medición es el Kelvin (por ejemplo, una temperatura de 20°C es equivalente a 293 Kelvin). La Figura 8 ilustra este comportamiento. Jaques Charles, un científico francés, dedujo esta ley en 1787. ¿Por qué se usa el nombre de Charles para esta ley si Herón sabía de la dilatación de los gases mucho tiempo antes? La diferencia es que Charles fue el primero en expresar este fenómeno físico de forma matemática, lo que permite una descripción mucho más precisa y también la realización de predicciones. Es decir, con la fórmula matemática es posible predecir, por ejemplo, cuánto variará el volumen de un gas si se varía su temperatura en cierta magnitud. Por supuesto, la ley no vale para cualquier valor de temperatura, porque a temperaturas bajas un gas se transforma en líquido, y la ley de Charles solo vale para gases.

Equilibrio estable e inestable y el huevo de Colón

Un relato, probablemente apócrifo, de la vida de Cristóbal Colón cuenta lo siguiente. Luego de sus viajes, durante una comida con hidalgos españoles, uno de ellos dijo que, si Colón no hubiera descubierto América, algún otro navegante español lo hubiera hecho en poco tiempo. A Colón no le agradó el comentario; sin embargo, en lugar de argumentar en contra, pidió una bandeja con huevos. Luego desafió a los presentes a que tomaran un huevo y lo colocaran en posición vertical sobre una superficie lisa. A pesar de los esfuerzos, ninguno lo consiguió. Entonces Colón mostró cómo debía hacerse: cascó un huevo en un extremo y lo puso vertical sin dificultad. Los demás protestaron, diciendo que de esa manera era muy fácil. Colón respondió que cuando se sabe cómo hacer algo entonces es fácil hacerlo; lo difícil es ser el primero. Esta anécdota ha tenido algo de fama y ha sido ilustrada por algunos artistas. Como ejemplo se muestra

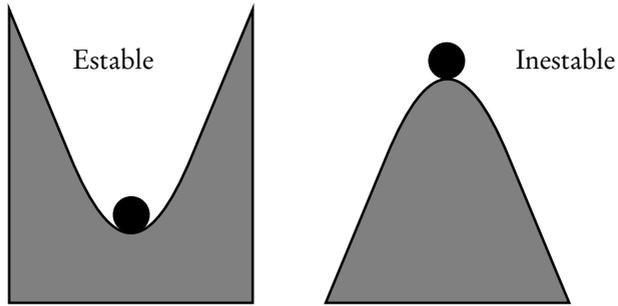


9. Fragmento del grabado de Theodore de Bry, 1594, que ilustra el relato de Colón y el huevo.

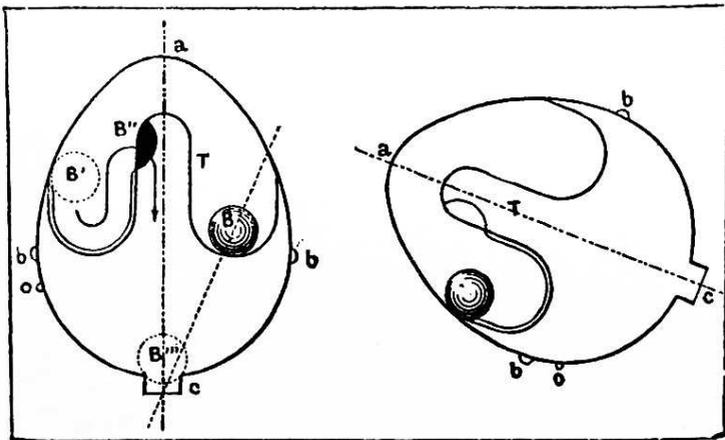
en la Figura 9 un fragmento del grabado de Theodore de Bry, de 1594.

El relato sirve para introducir el concepto de equilibrio estable e inestable. El ejemplo más simple es el de una esfera en el fondo de un pozo o en la cima de una colina. Las dos situaciones son de equilibrio en el sentido de que, si la esfera no es perturbada, quedará quieta en su posición, como se ve en la Figura 10. El huevo en posición vertical se encuentra en la misma situación de equilibrio inestable que la bola en la cima de una loma: cualquier pequeña perturbación hará que el huevo caiga.

La conexión de esta historia con un truco de magia es posterior a la época de Colón. Durante el siglo XIX se construyeron varios modelos de huevos con mecanismos ocultos que permitían transformar un equilibrio estable en inestable y viceversa. La Figura 11 muestra un ejemplo. El truco se realizaba de la siguiente manera. El propietario del huevo, único conocedor



10. Equilibrio estable e inestable.



11. Mecanismo interno de un huevo metálico que circulaba en Londres a fines del siglo XIX. Mientras la pequeña bola de plomo se encuentre en la canaleta interna, el huevo no podrá ser puesto en posición vertical.

del mecanismo oculto, entraba a un bar y, emulando a Colón, desafiaba a los presentes a poner el huevo en posición vertical. Como era de esperar, ninguno lo conseguía. Cuando todos se hubieran convencido de que la tarea era casi imposible, el dueño del huevo anunciaba que él lograría hacerlo en el primer intento, con algunas apuestas de por medio. Al tomar el huevo, el dueño realizaba un movimiento disimulado que hacía que, dentro del huevo, una bolita de plomo pasara a través de un agujero, saliera de una canaleta y cayera a la base del huevo. Con la bolita en la base, el huevo en posición vertical corresponde a un equilibrio estable, y el dueño no tenía dificultad en cumplir con el desafío y ganar algún dinero (más información en Gardner 2001).

Transmisión de calor

Durante los siglos XVIII y XIX era común encontrar en las ferias de Europa o Norteamérica algún representante de los “reyes del fuego” manipulando, en forma impresionante y peligrosa, objetos incandescentes, brasas o metales fundidos. Algunos ejemplos ilustres fueron Chabert y Madame Girardelli, la “célebre mujer a prueba de fuego”. La historia de estos y otros personajes similares, y la forma en que realizaban sus actos, pueden encontrarse en el libro de Houdini (1920), *Miracle Mongers and Their Methods*.

Dos de los actos más famosos de los reyes del fuego son caminar sobre brasas e introducir una mano en un metal fundido.

Caminata sobre fuego

La caminata sobre fuego o brasas tiene, en realidad, una tradición mucho más antigua que la de los reyes del fuego. Aparece en la historia, como parte de rituales religiosos o como costumbres populares que pudieron haberse originado en antiguos

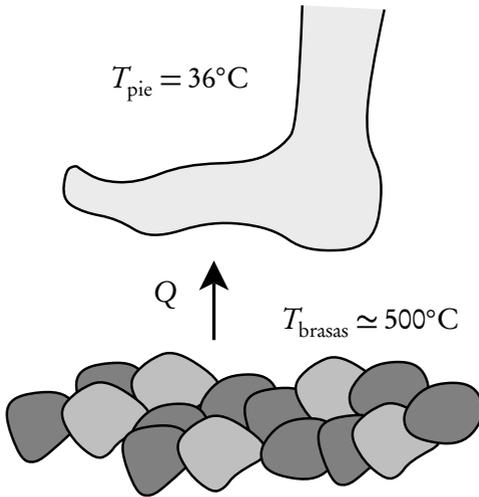
rituales de pasaje, en, por ejemplo, Japón, India, Sudáfrica, el desierto de Kalahari, Polinesia, Grecia y Bulgaria. En algunos pueblos de España se practica como una costumbre popular; y a través de los españoles ha llegado a América. También se practica en algunos sitios del noreste argentino.

No se trata de un truco en el sentido de que exista un artificio o un ardid oculto al espectador, las caminatas sobre brasas son lo que parecen. En su libro *Los fenómenos paranormales*, el físico francés H. Broch explica por qué es posible caminar sobre brasas ardientes. El mismo Broch llevó a la práctica esta experiencia leyendo, mientras caminaba, su libro, para convencerse de que no se quemaría. No se quemó y la mayoría de la gente que hace estas caminatas no se quema. Sin embargo, si el fuego no está adecuadamente preparado puede haber quemaduras. El carbón, o la madera, debe tener poca humedad y las brasas deben arder durante un buen rato para que se evapore la humedad que pueda haber (esto no significa que se enfríen, las caminatas pueden hacerse sobre brasas a 500°C o más). La ausencia de humedad es necesaria para mantener baja la conductividad térmica del carbón, que, como veremos, es uno de los factores más importantes para que una caminata sobre fuego sea posible.

La Figura 12 es un esquema que muestra las variables del problema: el pie a temperatura $T_{\text{pie}} = 36^{\circ}\text{C}$, las brasas a $T_{\text{brasas}} \simeq 500^{\circ}\text{C}$, y el calor Q que fluye de la zona de mayor temperatura a la de menor. El punto crítico es mantener Q acotado, pues si supera cierto valor se producen quemaduras. El calor Q se obtiene de la ley de Fourier de transmisión de calor, cuya versión simplificada y adaptada a este caso es:

$$Q \propto k(T_{\text{brasas}} - T_{\text{pie}})t,$$

donde \propto significa “proporcional a”, k es la conductividad térmica del carbón y t es el tiempo durante el cual el pie está apoyado sobre las brasas. La diferencia $T_{\text{brasas}} - T_{\text{pie}}$ es grande, lo que da-



12. Caminata sobre fuego. La flecha indica el flujo de una cantidad de calor Q que va de las brasas al pie.

ría un Q grande y peligroso, pero está compensada por las otras dos variables, k y t , que deben ser pequeñas. La conductividad térmica del carbón o la madera, k , es 300 veces menor que la del hierro. El tiempo t que dura una pisada es del orden del segundo mientras se mantenga un paso rápido (no es necesario correr). Estos factores son suficientes para mantener Q dentro de márgenes seguros. Por supuesto, si en lugar de carbón se usa una plancha de hierro, o si en lugar de mantener el paso uno se queda parado, habrá quemaduras.

Otro factor que influye en el éxito de una caminata sobre fuego es la diferencia entre la capacidad calorífica del pie y la de las brasas. La capacidad calorífica indica la capacidad de un objeto de absorber calor. Es decir, un objeto con capacidad calorífica grande podrá absorber una gran cantidad de calor sin cambiar mucho su temperatura. La capacidad calorífica del pie

es alrededor de tres veces mayor que la de las brasas. Cuando el pie y las brasas entran en contacto, el pie aumenta su temperatura y las brasas la disminuyen por el traspaso del calor Q . La diferencia en la capacidad calorífica hace que la variación de temperatura del pie sea menor que la de las brasas, o sea, el pie se calienta menos de lo que las brasas se enfrían. Este rápido enfriamiento de las brasas en el momento del contacto con el pie también ayuda a que el calor transmitido Q no sea demasiado grande.

Además de practicarse como parte de tradiciones populares o rituales religiosos, desde hace algunos años las caminatas sobre fuego también forman parte de las actividades de seminarios motivacionales. Ejecutivos de grandes empresas asisten a estos seminarios con la intención de alcanzar su máximo potencial de eficiencia a través de la motivación. Los especialistas afirman que las caminatas sobre fuego cumplen con el papel motivacional porque el caminante aumenta la confianza en sí mismo luego de haber superado ileso una prueba riesgosa. Mientras en una época se buscaba el dominio de la materia y el control del fuego a través del contacto con la divinidad, ahora se trata de un medio para aumentar la eficiencia en una empresa. Pero, a pesar de la explicación física, el peligro de quemaduras no está por completo ausente si el fuego no se prepara en forma adecuada. (Los puntos principales son: ausencia de humedad y la formación de una capa de ceniza para disminuir aún más la conductividad térmica.) En 2002, un grupo de ejecutivos de la empresa australiana KFC de comidas rápidas a base de pollo tuvo que recibir tratamiento por quemaduras causadas por una caminata sobre fuego. La noticia fue publicada en un periódico australiano bajo el título *Los jefes de KFC no son pollos, pero seguro están tiernos* (Kennedy 2002).



13. Mano sumergida en plomo fundido.

Mano en plomo fundido

Según David Willey, un profesor de física inglés, “nada captura más la atención de un alumno que ver a su maestro a punto de matarse”. Llevando a la práctica esta premisa, realiza ante sus alumnos algunas demostraciones bastante impresionantes. Una de ellas es introducir su mano desnuda dentro de un recipiente con plomo fundido, como se ve en la Figura 13. La temperatura de fusión del plomo es $327,5^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, para que la experiencia sea exitosa, es conveniente que el plomo esté aún más caliente, a alrededor de 500°C . La mano se introduce

un instante y se retira con rapidez. Si el plomo está lo suficientemente caliente, se produce una fina película de vapor en torno a la mano por evaporación de la transpiración. Esta película puede mantener la piel separada del plomo fundido durante un breve lapso. Dado que, en algunos casos, la transpiración puede no ser suficiente para producir la película protectora de vapor, es conveniente mojarse antes las manos.

Más detalles sobre ésta y otras demostraciones espectaculares pueden encontrarse en la referencia Willey (1999).

Fuerza y presión

La Figura 14 muestra un hombre santo hindú, en apariencia reposando sobre una cama con clavos. Dependiendo de la cantidad y del filo de los clavos, acostarse en una cama de este tipo, o usar zapatos con los clavos hacia arriba, puede ser doloroso. En la tradición hindú, una experiencia de este tipo es considerada como una prueba de devoción y como un medio para alcanzar un estado superior del ser. Las consecuencias físicas, sin embargo, no son graves: en general no se produce daño sobre la piel (especialmente si está curtida por la práctica). ¿Cómo es posible acostarse o pararse sobre clavos y no lastimarse?

La explicación está en la diferencia entre presión y fuerza. Por ejemplo, un calzado con taco tipo aguja puede dañar un piso de madera, mientras que la misma persona con un zapato con suela lisa no produce ningún daño. En ambos casos la fuerza que se aplica al piso es la misma: el peso de la persona. La diferencia, cuando el taco es tipo aguja, es que la fuerza está concentrada en un área pequeña. Entonces, el parámetro importante a tener en cuenta no es la fuerza, sino la fuerza por unidad de área, o sea, la presión. Si llamamos F a la fuerza, P a la presión y A al área, tenemos

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



14. Asceta hindú sobre cama con clavos en Benarés, India, 1907.

Volviendo a la cama con clavos, supongamos el caso extremo en el que hay un solo clavo y que el área de contacto con el clavo, A , es muy pequeña. De acuerdo con la ecuación anterior, la presión será muy grande y podrá causar daño. Pero, en la práctica, se tiene contacto con alrededor de 200 clavos y la presión promedio será $P = F/(200A)$, o sea, 200 veces menor que en el caso anterior, considerando que el peso se distribuye de manera homogénea. Esta disminución de la presión será suficiente para que no se produzcan daños, aunque probablemente no para transformar este lecho en algo confortable.

Choques

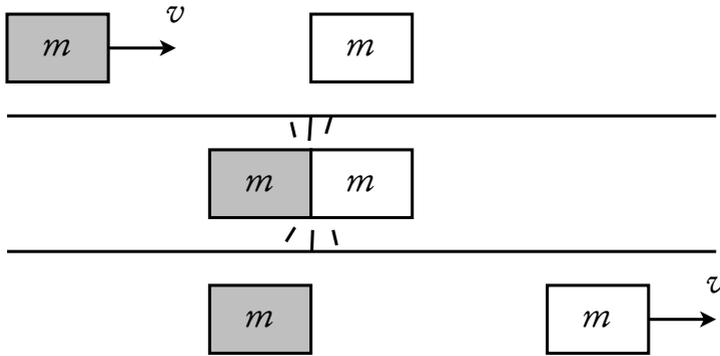
En la misma época en que los reyes del fuego, mencionados antes, gozaban de popularidad, también tenían éxito, en los mismos escenarios, las demostraciones de los hombres forzudos. Las pruebas que hacían eran variadas. Una de ellas se ilustra en la Figura 15, fragmento de un anuncio de las proezas de Johann von Eckenberg. En este caso, von Eckenberg se acostaba con



15. Una de las pruebas de von Eckenberg, famoso hombre forzudo del siglo XVIII (Houdini 1920).

una piedra sobre su abdomen y un compañero hacía pedazos la piedra golpeándola con una maza. Von Eckenberg se ponía de pie y saludaba al público sin dar muestras de dolor o daño físico.

La explicación de este acto tiene que ver con la distinción entre dos tipos de choques: elástico e inelástico. La Figura 16 muestra un diagrama de un choque elástico entre dos cuerpos de masas iguales. En un choque elástico la energía del movimiento, o energía cinética, se mantiene igual antes y después



16. Choque elástico entre dos cuerpos de masas iguales. El de la izquierda transmite toda su velocidad al de la derecha. No hay pérdida de energía cinética.

del choque. No se gasta energía en romper o deformar los dos cuerpos y la segunda masa continúa con la misma velocidad que la primera. El choque entre bolas de billar es aproximadamente elástico. Pero la mayoría de los choques son inelásticos y en estos casos siempre se gasta algo de energía en deformar o romper los cuerpos que chocan. Es lo que sucede en la demostración de von Eckenberg (y de varios otros que también la hacían). El éxito de la demostración depende en cierta medida de la habilidad del que da el golpe con la maza, pues debe aplicar la energía suficiente para romper la piedra, pero no más. De este modo, la mayor parte de la energía se consume en romper la piedra que, en la práctica, funciona como un escudo. Más información sobre los hombres forzudos puede encontrarse en el libro de Houdini (1920).

Willey realiza una demostración que consiste en una combinación de la cama con clavos y la rotura de un bloque sobre el pecho, como se ve en la Figura 17. En este caso, es necesario cubrirse el rostro y las piernas para evitar el golpe de algún

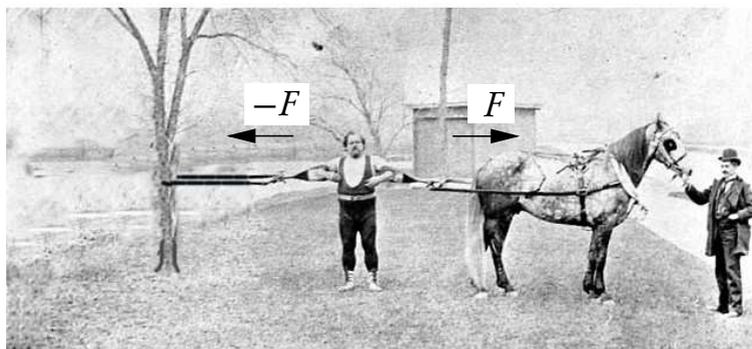
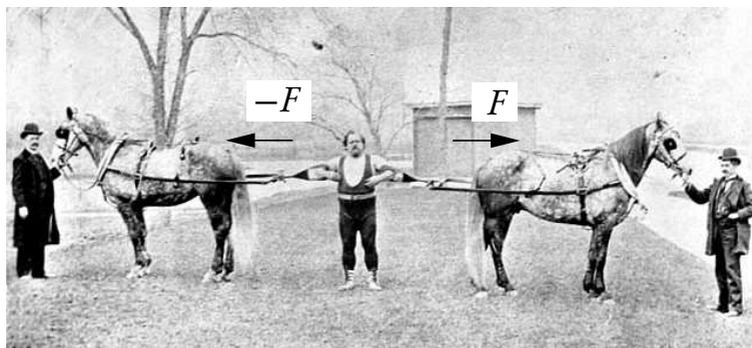


17. Combinación de cama con clavos y mazazo con bloque sobre el pecho. El temerario que recibe el golpe en esta fotografía es el profesor de física D. Willey (1999).

trozo de bloque. La explicación consiste, por supuesto, en una combinación de las explicaciones presentadas en esta sección y en la anterior.

Equilibrio de fuerzas

Hacia fines del siglo XIX las exhibiciones de hombres forzudos todavía mantenían su popularidad. Louis Cyr fue un canadiense que llegó hasta la categoría de mito por su gran fortaleza física. En Montreal hay un monumento dedicado a conservar su memoria.



18. El canadiense Louis Cyr en una de sus exhibiciones. Arriba, Cyr soporta la fuerza de dos caballos. Abajo, la fotografía modificada muestra la situación hipotética en la que solo un caballo tira de Cyr. En ambos casos, la fuerza que debe soportar es la misma.

La Figura 18 muestra una fotografía de 1891 en la que se ve a Cyr soportando la fuerza de dos caballos, uno a cada lado. Los caballos tiran con fuerzas iguales y opuestas indicadas con las letras F y $-F$. Imaginemos la situación en la que uno de los caballos es reemplazado por un árbol, como se muestra en la parte inferior de la Figura 18. A primera vista la exhibición es menos impresionante, pues ahora Cyr debe soportar la fuerza de solo un caballo. Sin embargo, si el árbol tiene suficiente firmeza, evitará que Cyr sea arrastrado por el caballo produciendo una fuerza igual y de sentido contrario. Las fuerzas que Cyr debe soportar son las mismas que cuando había dos caballos. Este análisis no sugiere que Cyr haya sido un fraude. Solo se busca llamar la atención acerca de la forma en que se preparaban este tipo de exhibiciones. Aunque las fuerzas que tuviera que soportar Cyr fueran las mismas en ambos casos, presentar la exhibición con dos caballos produce una impresión mayor en el público.

Sin embargo, un físico presente entre el público diría que si lo que se pretende es sostener a dos caballos, lo que debe hacerse es poner a ambos del mismo lado, para que sus fuerzas se sumen. Podemos imaginar a Cyr aceptando el desafío con una sonrisa displicente. Cyr no realizó la exhibición con dos caballos de un lado y el árbol del otro, pero, según un artículo de la enciclopedia Wikipedia, existen registros de que la realizó con cuatro caballos: dos a cada lado.

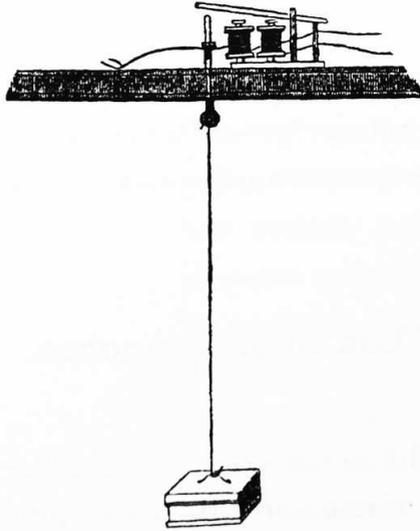
Otro detalle interesante que se aprecia en la fotografía de la Figura 18 está relacionado con lo que se conoce como momento de una fuerza. El momento de una fuerza es la capacidad de dicha fuerza para hacer girar un objeto con respecto a un eje. Para que el momento de una fuerza sea distinto de cero es necesario que la dirección a lo largo de la cual se aplica la fuerza pase a cierta distancia del eje de rotación. Por ejemplo, si la fuerza pasa por encima del eje, el objeto rotará en cierto sentido; si pasa por debajo del eje, rotará en sentido opuesto; y si pasa por el eje, no rotará en un sentido ni en el otro. En la fotografía de Cyr

se puede ver que la fuerza que producen los caballos pasa por el codo, o sea, por el eje de rotación del brazo, por lo tanto dicha fuerza es incapaz de rotar o abrir el brazo de Cyr. La fortaleza de Cyr se manifiesta en los músculos que mantienen unidas las articulaciones y que evitan que los brazos se disloquen.

Caja de resonancia

Jean Eugène Robert-Houdin (1805-1871) es uno de los personajes más importantes en la historia de la magia. De origen francés, fue él quien popularizó la clásica imagen de los magos con galera y frac. Escribió un libro titulado *Magia y física recreativa* (Robert-Houdin 1998) en el que describe, entre otras cosas, una sesión espiritista en su propia casa. Los invitados, amigos y conocidos de Robert-Houdin, entran circunspectos a la habitación en penumbras y se sientan en torno a una mesa redonda. Frente a ellos, en el centro de la mesa y a la altura de sus cabezas, cuelga del techo una caja de madera. Antes de la sesión, todos revisan la caja y comprueban que está vacía. Unen sus manos, cierran el círculo magnético y, luego de un rato de invocar a los espíritus, reciben la primera respuesta: un pequeño golpe que proviene de la caja. Los presentes realizan preguntas al espíritu y reciben respuestas más o menos coherentes a través de un código de pequeños golpes. En su forma más clásica y simple este código consiste en lo siguiente: un golpe significa sí y dos golpes significan no. Al final de la sesión todos vuelven a revisar la caja y comprueban que está tan vacía como antes. Robert-Houdin despide a los invitados, que retornan a sus casas sin poder decidir si fueron engañados o si realmente asistieron a un fenómeno sobrenatural. El aspecto más asombroso de la experiencia es que el sonido de los golpes proviene única y claramente de la caja.

Robert-Houdin explica en su libro que, durante la sesión espiritista, en el piso, cerca de su pie, hay un interruptor eléctrico para activar un par de electroimanes ocultos en el techo (ver



19. Caja de madera, que cuelga del techo, utilizada por Robert-Houdin para su sesión espiritista. Oculto sobre el techo puede verse un par de electroimanes que se usan para golpear la varilla que sostiene a la caja.

Figura 19) que sirven para golpear la varilla que sostiene la caja. La vibración del golpe se transmite a través de la varilla hasta la caja. Sin embargo, el sonido del golpe proviene solo de la caja, y no de la varilla ni del techo. La razón es el fenómeno de resonancia.

¿Qué es la resonancia? Al hamacarse en un columpio un niño recibe la ayuda de su madre que da pequeños empujones en cada oscilación. Los impulsos de la madre se aplican con la misma frecuencia con la que el columpio oscila solo. Luego de un rato, la amplitud de la oscilación aumenta y el niño se divierte: ha entrado en resonancia. Si la frecuencia de los impulsos fue-

ra mayor o menor, las oscilaciones no aumentarían su amplitud y no se produciría la resonancia. La resonancia es, entonces, la tendencia del columpio a oscilar con la máxima amplitud cuando se lo impulsa con la frecuencia adecuada, llamada frecuencia de resonancia. En el caso de la caja de madera, las moléculas de aire dentro de la caja pueden oscilar como lo hace el columpio, y el impulso externo lo reciben a través de las vibraciones de las paredes de la caja, que llegan de la varilla que la sostiene. A diferencia del columpio, las moléculas de aire dentro de la caja tienen muchas frecuencias de resonancia diferentes. La vibración de las paredes de la caja excita algunas de estas frecuencias y hace que la amplitud de las oscilaciones aumente, produciendo el sonido que los asistentes a la sesión espiritista escuchan.

Henri Broch, en su libro *Los fenómenos paranormales*, recuerda de esta manera una sesión espiritista:

—Espíritu, ¿estás ahí?

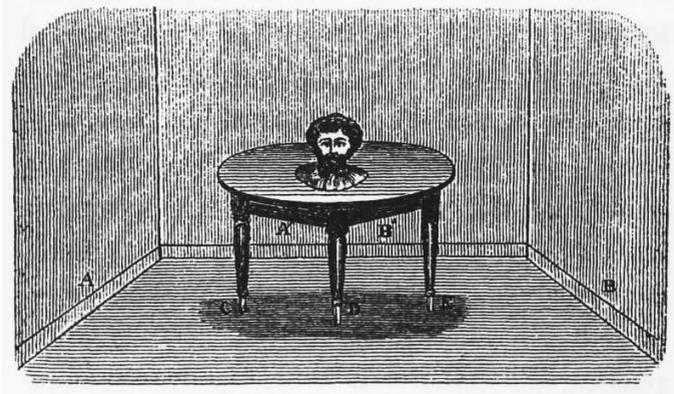
...En el cuarto reina la penumbra. Las manos forman la cadena sagrada sobre la mesa y toda la reunión está pendiente de los labios del médium:

—Si es sí, da un golpe; si es no, da dos golpes.

Se debe estar bien predispuesto a aceptar fenómenos extraordinarios para creer que un espíritu ausente pueda dar dos golpes. Si los da, debería dudarse, al menos, de su ausencia.

Ley de reflexión

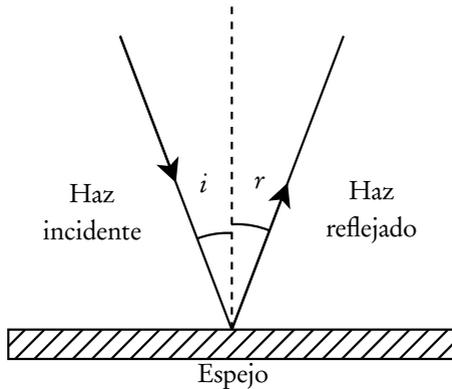
Robert-Houdin (1998) describe en su libro el truco de la cabeza parlante que se muestra en la Figura 20. Fue bastante popular hacia mediados del siglo XIX en París. Los que querían ver el prodigio, que era presentado como una especie de esfinge oracular, debían pagar un precio caro y atravesar pasillos oscuros, con cuadros tenebrosos, y bajar una escalera hasta llegar a la entrada de una habitación larga, húmeda y mal iluminada, con



20. La cabeza sobre la mesa es real, habla y contesta preguntas. El truco se realiza utilizando espejos y la ley de reflexión.

el ánimo bien predispuerto a la aprehensión. En el extremo de la habitación se hallaba la cabeza sobre una mesa. El visitante no podía acercarse pero podía realizar preguntas que eran contestadas por la cabeza con tono lúgubre. Según Robert-Houdin, se cometió el error de cobrar demasiado caro la entrada, lo que atrajo la asistencia de grupos de jóvenes de la alta sociedad parisina, desocupados, inquietos y poco respetuosos de las esfinges oraculares. Con el deseo de hacer valer el dinero invertido, algunos de ellos quisieron obtener mayor diversión de la cabeza parlante, y comenzaron a arrojarle pequeños objetos con la intención de acertar en la boca. La pobre cabeza no podía hacer más que gritar e insultar. Todo terminó cuando uno de los jóvenes, algo inhábil para arrojar objetos, dio con su proyectil bajo la mesa, entre las patas. El objeto, en lugar de atravesar el espacio por debajo de la mesa, rebotó dejando en evidencia la presencia de un espejo que ocultaba al propietario de la cabeza. En la Figura 20, las zonas marcadas con A' y B' bajo la mesa muestran

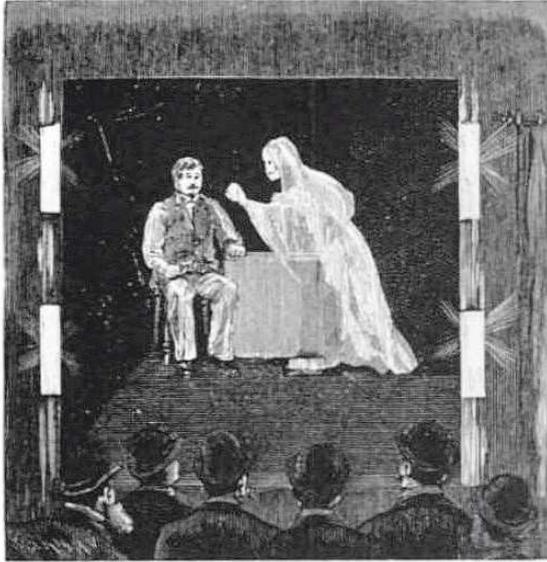
la reflexión de las paredes de los costados, marcadas con *A* y *B* respectivamente. Los espejos bajo la mesa están colocados de tal forma que las imágenes que producen parecen una continuación de la pared del fondo cuando, en realidad, son el reflejo de las paredes de los costados.



21. Reflexión de un haz de luz en un espejo. Las letras *i* y *r* indican los ángulos de incidencia y reflexión. Según la ley de reflexión, $i = r$.

El diseño de trucos con espejos requiere del conocimiento de la ley de reflexión, ilustrada en la Figura 21. Esta ley dice que, al reflejarse un haz de luz en un espejo, el ángulo de incidencia, i , debe ser igual al ángulo de reflexión, r . Antes de Galileo era raro que se utilizara la matemática para expresar leyes físicas. Una de esas excepciones fue la ley de reflexión, cuya expresión matemática es simplemente $i = r$. Herón de Alejandría dedujo esta ley partiendo de un principio que, siglos más tarde, también sería útil para deducir la ley de refracción: el camino que recorre un haz de luz es el más corto posible. Para llegar de un punto a otro, el camino más corto es una línea recta (en un espacio euclidiano). Herón deduce, por lo tanto, que la luz se propaga en

línea recta. Si antes de llegar al punto final el haz se refleja en un espejo, Herón demuestra, usando los axiomas de Euclides, que el camino más corto es el que corresponde a $i = r$.

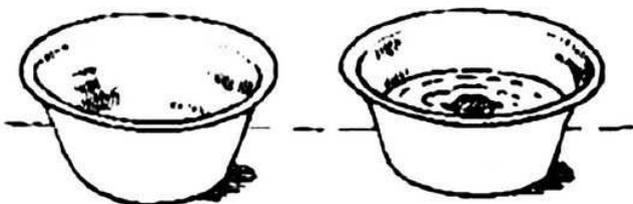


22. Aparición fantasmal producida con un espejo semitransparente.

Si nos encontramos en una habitación y miramos hacia afuera a través del vidrio de una ventana, la mayor parte de la luz que llega a nuestros ojos proviene del exterior. Si encendemos una luz dentro de la habitación, también podremos ver en la ventana, superpuesto a la imagen del exterior, el reflejo de la luz. El vidrio funciona, en este caso, como un espejo semitransparente. Lo que vemos es una superposición de luz transmitida del exterior y luz reflejada del interior. Esta superposición es la base de un truco usado en exhibiciones y obras de teatro durante el siglo XIX. El público se encuentra en penumbras y solo se

ilumina la acción en el escenario. Entre el público y el escenario hay una gran placa de vidrio que, cuando la acción lo requiere, refleja figuras que se superponen a los actores. Robert-Houdin (1998) y Hopkins (1901) explican entretenidas variantes de este truco, como la aparición fantasmal que se ve en la Figura 22. Hay una gran variedad de trucos que se realizan con espejos, algunos de ellos son bastante complejos y producen efectos espectaculares. Menciono un ejemplo más, descrito en el libro de Perelman (1975): el aparato de Roentgen. Este dispositivo sirve, en apariencia, para ver a través de cualquier tipo de material. En realidad, la luz elude el obstáculo desviándose en espejos.

Refracción

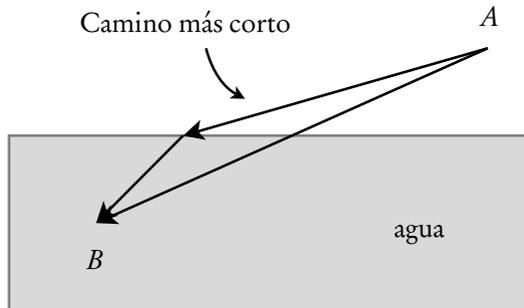


23. Truco de Ctesibio de Alejandría: aparición milagrosa de una moneda usando el fenómeno de refracción.

Ctesibio de Alejandría (siglo III a. de C.) era, como Herón, ingeniero y matemático. En alguno de sus textos describe la aparición milagrosa de una moneda. Se entrega al espectador un recipiente para que lo revise y compruebe que se encuentra vacío. Se toma el recipiente y se lo pone sobre una mesa. En ese momento se coloca, de manera disimulada, una moneda que queda oculta por las paredes del recipiente. El espectador continúa con la idea de que el recipiente se encuentra vacío. Luego

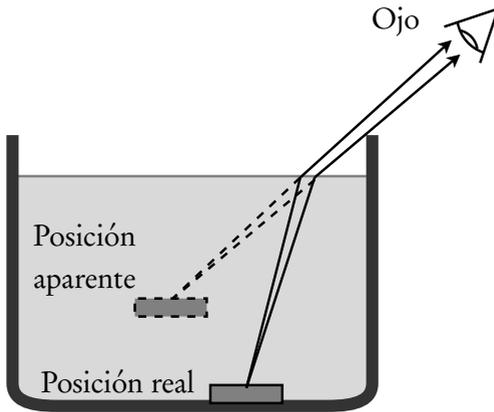
de anunciar la inminencia de un fenómeno extraordinario para aumentar la expectativa, se procede a derramar agua dentro del recipiente; ante la mirada de asombro del espectador, una moneda aparece en el fondo de él.

Cuando la luz se propaga en el aire, lo hace a una velocidad casi igual que en el vacío: $c = 300000 \text{ km/segundo}$. Cuando penetra en un medio como agua o vidrio, avanza a una velocidad menor. La nueva velocidad se escribe como c/n , donde n , el índice de refracción, es un número mayor que 1. En la sección anterior se aplicó el principio de Herón, que dice que, para llegar de un punto a otro, la luz siempre recorre el camino más corto. Haremos un pequeño cambio a este principio y consideraremos que se refiere al camino más corto en tiempo, o sea, al más rápido. La extensión del principio de Herón para reflexión y refracción fue propuesta por Ibn al-Haytham (Alhacen) en 1021, y por Pierre de Fermat en 1662. Supongamos que el punto de partida de un haz de luz se encuentra en aire y el de llegada en agua. El camino más rápido no será una línea recta, sino una línea quebrada como se muestra en la Figura 24. La trayectoria



24. Para llegar desde el punto A al B , el camino más corto en tiempo no es la línea recta, sino la línea quebrada. De esta manera se reduce el trayecto de la luz en el agua, donde su velocidad es más lenta.

se quiebra a fin de reducir el recorrido del haz en el agua, donde su velocidad es más lenta. La refracción es responsable del efecto óptico que se observa, por ejemplo, en una pileta de natación: el fondo parece estar más alto de lo que en realidad está. Lo mismo sucede en el truco de Ctesibio. En el esquema de la Figura 25 se



25. Esquema del truco de Ctesibio. Si el recipiente estuviera vacío, la moneda en el fondo no sería visible. Al llenarlo de agua, la refracción produce una imagen en una posición aparente más alta, ahora visible.

dibujaron dos rayos de luz que salen de la moneda, en el fondo del recipiente, y llegan hasta el ojo. En la superficie, los haces se desvían. Su prolongación, marcada con trazo discontinuo, converge en un punto donde se forma la imagen de la moneda, por encima de la posición real.

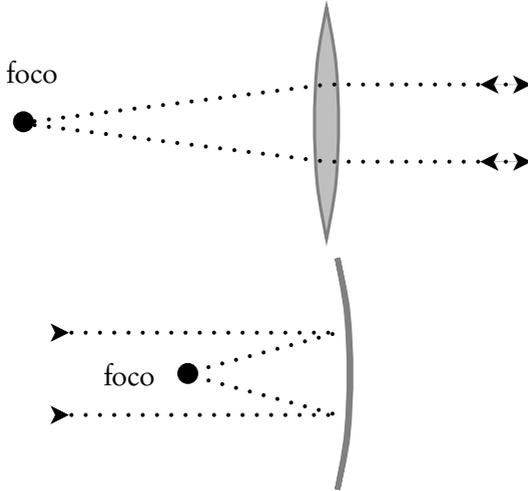
La fotografía psíquica de Serios

Ted Serios era ordenanza de hotel en Chicago cuando se hizo famoso, durante la década de 1960, gracias al libro del

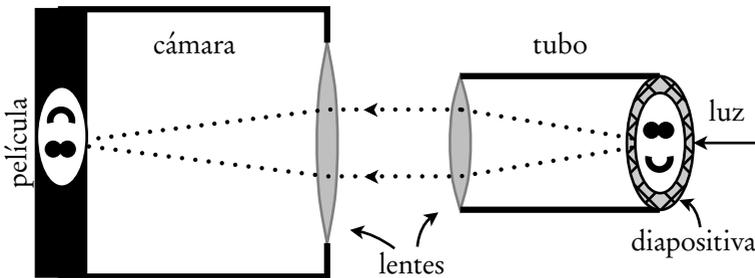
psiquiatra J. Eisenbud, *The World of Ted Serios: 'Thoughtographic' Studies of an Extraordinary Mind*, 1966 (*El mundo de Ted Serios: estudios 'pensamientográficos' de una mente extraordinaria*). Serios realizaba fotografías de sus pensamientos. Las fotografías se tomaban con flash y con una cámara tipo Polaroid enfocada en el infinito. Serios se ponía frente a la cámara, el fotógrafo disparaba y, en ese instante, Serios ponía ante el lente su "gizmo", un pequeño tubo que, según decían, le ayudaba a concentrar sus ondas psíquicas. La mayoría de las fotos eran manchas irreconocibles, pero en algunas se podían ver imágenes más o menos nítidas.

El truco ha podido ser reproducido por muchos fotógrafos y magos. Eisenbud continuó creyendo, hasta su muerte en 1999, en los poderes de Serios; durante la década de 1980 afirmaba que viejas fotografías psíquicas previamente no identificadas eran imágenes de Ganimedes, una luna de Júpiter, cuyo aspecto había podido verse con claridad recién en 1979, gracias al Voyager II. "Desafortunadamente," se quejaba Eisenbud con amargura, "no pude conseguir un astrónomo o científico óptico que esté de acuerdo" (Wikipedia: *Ted Serios*).

No es imprescindible recurrir a la existencia de un poder paranormal para explicar este truco (Randi y Clarke 1997). La fotografía psíquica se puede reproducir utilizando un tubo, o gizmo, adecuado. Para entender el pequeño secreto de este tubo es necesario recurrir a la rama de la física conocida como óptica geométrica, que explica cómo se desvían los rayos de luz al atravesar lentes o rebotar en espejos. El punto de partida es el concepto de foco de una lente, que se ilustra en la Figura 26. El foco es el punto en el que convergen los rayos que inciden sobre la lente en forma paralela. La trayectoria de los rayos es la misma en un sentido o en el opuesto, por lo tanto, los rayos de luz que se emitan desde el foco, al pasar por la lente saldrán paralelos. Para realizar una fotografía psíquica, el tubo y la cámara de fotos deben disponerse como se muestra en la Figura 27. Se debe



26. La definición de foco es la misma para una lente que para un espejo curvo: los rayos que inciden paralelos (o sus prolongaciones) convergen en el foco.



27. Cámara y tubo para realizar una fotografía psíquica de una cara sonriente.

disponer de una diapositiva con la imagen que se quiere reproducir. El tubo tiene una lente en un extremo y en el otro se coloca la diapositiva a una distancia igual al foco de la lente. Cuando se dispara el flash de la cámara, la luz rebota en la cara o en la ropa del “psíquico” y penetra en el tubo en dirección a la cámara. Cada punto de la diapositiva emite rayos de luz que, al pasar por la lente del tubo, salen paralelos. La cámara debe estar enfocada en el infinito, de modo que los rayos que llegan paralelos, provenientes en principio de objetos lejanos, convergen sobre la película (o sobre el sensor si se trata de una cámara digital). Los rayos no provienen de un objeto lejano, sino del tubo, sin embargo aparentan venir de lejos pues llegan paralelos. Al pasar por la lente de la cámara, la imagen de la diapositiva se proyecta sobre la película. Todo aquél que desconozca el contenido del tubo tendrá la impresión de que la aparición de la imagen es un misterio.

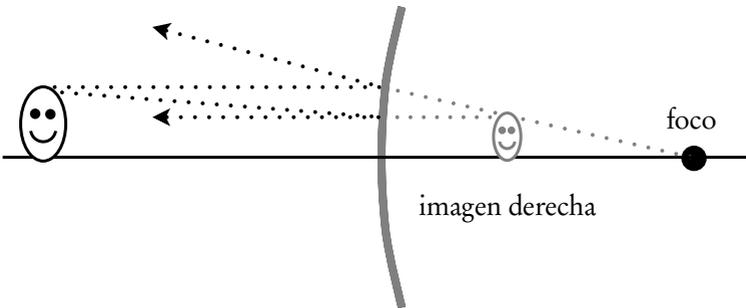
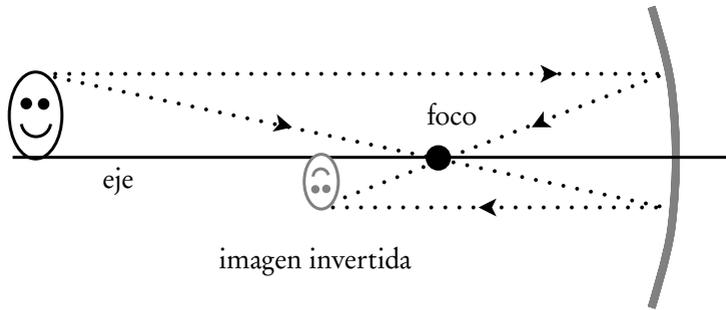
Espejo cóncavo

Hay un truco sencillo, adecuado para hacer ante un niño, que solo requiere del uso de una cuchara brillante. Se muestra la cara convexa de la cuchara para que el niño pueda ver su rostro reflejado. Se hacen unos pases mágicos con la mano para distraer la atención mientras se avisa al niño que su cabeza será dada vuelta. Durante esta maniobra se gira la cuchara para que quede expuesta su cara cóncava. Cuando el niño vuelva a mirarse verá su rostro al revés. Es probable que se dé cuenta de que la cuchara fue girada. El truco igual producirá asombro, pues no es evidente la razón por la cual de un lado de la cuchara la cara se ve derecha y del otro se ve al revés. El siguiente fragmento del poema de Silvina Ocampo, *La cara apócrifa* (en *Amarillo celeste*, 1972), expresa esta perplejidad:

La conocí diminuta
adentro de una luciente cuchara de plata
abría y cerraba la boca
cuando yo no sabía quién era.
Como a un simio curioso la contemplé.
Di vuelta la cuchara: la vi al revés.
¿Por qué al revés?

¿Por qué al revés? De nuevo es necesario recurrir a la óptica geométrica y utilizar la definición de foco de la Figura 26. El objetivo de los esquemas de la Figura 28 es determinar cómo es la imagen reflejada trazando dos rayos que pasan por el foco. Con dos rayos es suficiente porque el punto donde se cruzan será el punto donde los rayos convergen y donde se forma la imagen. Un rayo incide paralelo y su reflexión pasa por el foco. El otro rayo considerado pasa, antes de reflejarse, por el foco y luego se refleja paralelo. En el caso convexo, en la parte inferior de la figura, el foco está detrás del espejo y hay que considerar las prolongaciones de los rayos, mostradas con trazo gris. Los rayos considerados parten de la frente del rostro e indicarán, por lo tanto, donde se forma la imagen de la frente. Para saber si la imagen queda invertida o derecha tenemos que saber dónde queda la imagen del mentón. En el gráfico se ubica el rostro de tal forma que, el mentón esté justo sobre el eje del espejo, los rayos que van a lo largo de este eje se reflejan en forma perpendicular, o sea, siempre a lo largo del eje. La imagen del mentón, entonces, estará también sobre el eje. Con estos datos ya se puede saber si la imagen del rostro queda derecha o invertida. Otro dato que sale de los gráficos es que, en el caso convexo, la imagen se forma detrás del espejo (llamada imagen virtual), y, en el caso cóncavo, la imagen está delante del espejo (imagen real).

Luego de conocer la explicación de la imagen invertida en la cara cóncava de la cuchara, el poema de Ocampo queda algo estropeado en relación a su contenido de misterio. Si se lo vuel-



28. Diagramas de rayos para determinar la posición de la imagen cuando un rostro se refleja en una cuchara del lado cóncavo (arriba) o convexo (abajo).

ve a leer, no producirá la misma sensación. Sucede algo similar al conocer el secreto de un truco de magia: luego de revelado, el truco queda vacío de misterio. El lector ya sabe que la intención de este libro es satisfacer la curiosidad y que, si se logra, la consecuencia inevitable es la anulación del enigma. La situación no es preocupante, porque, afortunadamente, siempre hay magos o poetas dispuestos a renovar la cuota de ilusión y misterio.

Agradecimientos

El contenido de este capítulo ha sido presentado en charlas para todo público y en escuelas. Al final de las charlas, los magos Alan Magic y Fernando Rodríguez contribuyeron desinteresadamente a recuperar la ilusión realizando trucos maravillosos que no fueron explicados. Les agradezco a ellos y también a David Willey por permitirme el uso de sus imágenes.

FÍSICA DE LA COCINA

La infinidad de procesos físicos, químicos y biológicos, que tienen lugar cada vez que se prepara una comida, pasan inadvertidos en la mayoría de los casos. Una adecuada comprensión de esos procesos facilita la correcta preparación de una comida o permite mejorar o modificar una receta. Por otro lado, gracias a la ciencia hoy se dispone en la cocina de una gran variedad de artefactos útiles, como el horno a microondas o la heladera. Muchas veces se ha comparado a la cocina con el laboratorio; sin embargo, la principal motivación para una comprensión más profunda de lo que sucede en la cocina es, quizá, menos utilitaria: satisfacer la curiosidad. Es el placer que se siente al comprender algo que parece oculto y difícil de alcanzar.

La cocina, como la naturaleza, no está dividida en parcelas a las que se pueda aplicar, por separado, la física, la química o la biología. Estas divisiones son arbitrarias y sólo fueron creadas para facilitar el estudio de la ciencia. No es posible establecer límites claros entre las distintas disciplinas científicas. En estas páginas se hará hincapié en los aspectos científicos de la cocina que están más relacionados con la física, pero muchos de esos aspectos estarán también mezclados con química o biología.

Una muy buena referencia sobre ciencia de la cocina, desde una perspectiva más cercana a la química y la biología, es el libro de Golombek y Schwarzbau (2004), *El cocinero cientí-*

fico, y la bibliografía que incluye, o el sitio de Internet *Science of cooking*, de Semper.

Fuego y transmisión del calor

La historia de la cocina comienza hace alrededor de un millón años, cuando nuestro antepasado, el *Homo erectus*, comenzó a usar el fuego para cocinar. El fuego altera el sabor y mejora la digestibilidad de los alimentos. La carne cruda está formada por fibras musculares separadas por colágeno, que mantiene su estructura. Con el calor, las ligaduras de colágeno se rompen y la carne se vuelve tierna y más digerible. Este proceso se conoce como desnaturalización. El calor activa un conjunto de reacciones químicas conocido como reacción de Maillard que produce el color marrón tostado sobre la superficie de la carne y que le da un sabor apetitoso. Las mismas reacciones ocurren en el pan tostado, café tostado, cerveza o dulce de leche. El fuego también ayuda a controlar la transmisión de enfermedades. El dominio del fuego significó una gran ventaja evolutiva, pues permitió el acceso a más y mejores alimentos.

El fuego se produce por una reacción química que combina oxígeno del aire y combustible (carbón, madera, gas, etc.). La reacción comienza cuando se alcanza una determinada temperatura; una vez que se ha iniciado se mantiene sola, dado que la misma reacción produce calor, hasta que se acaba el combustible. La llama es una porción de gas incandescente. La reacción de combustión hace que esa porción de gas alcance una temperatura alta. Una alta temperatura significa que, a nivel microscópico, las moléculas y átomos que componen el gas se están sacudiendo violentamente. Estas sacudidas hacen que, cada tanto, algunos electrones se separen de los átomos. Debido a la atracción eléctrica, los electrones vuelven enseguida a acercarse a los átomos que tienen carga neta positiva. Este acercamiento significa una pérdida de energía de los electrones, energía de la que se libe-

ran emitiendo luz. Por esta razón la llama es incandescente. La forma de producir luz (o cualquier radiación electromagnética, como las ondas de radio) es sacudir electrones.

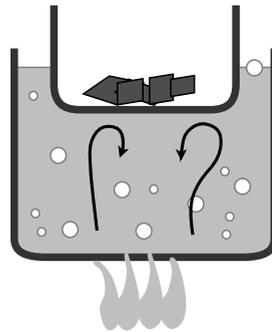
Desde tiempos remotos la luz y el movimiento de las llamas atrajeron la atención de los seres humanos. El fuego es uno de los cuatro elementos clásicos de la filosofía griega, propuestos por Empédocles en el siglo V antes de Cristo, y posee una categoría similar en las tradiciones de India, China y Japón. La teoría de los cuatro elementos, que, además de fuego, incluye agua, aire y tierra, fue adoptada por los alquimistas, que luego de siglos de trabajo, consiguieron la destilación, la separación o descubrimiento de muchas sustancias químicas. A partir del siglo XVIII comenzaron a eliminarse los ingredientes místicos y superfluos, y la alquimia transmutó en algo más perfecto: la química. Tradicionalmente existe cierta conexión entre alquimia, química y cocina. En esta tradición las mujeres juegan un papel relevante. En textos antiguos, el arte sagrado de la alquimia era considerado “opus mulierum”, el trabajo de las mujeres. Aparentemente las figuras femeninas eran vistas como portadoras legítimas de un conocimiento especial cuando existía un aspecto práctico. Un antecedente de estas actividades es la destilación, extracción y sublimación de sustancias químicas para la producción de perfumes y cosméticos en la antigua Mesopotamia, trabajo que era realizado por mujeres con equipos derivados de la cocina. Desafortunadamente, se ha perdido la mayoría de los nombres de las antiguas mujeres alquimistas.

Uno de los nombres que han sobrevivido al olvido es el de María la Judía o María la Profetisa, que vivió en Alejandría, Egipto, probablemente en el siglo III, o antes (Figura 29). Fue una de las primeras alquimistas y estableció fundamentos prácticos y también teóricos de esta disciplina. El aspecto práctico de su trabajo se manifiesta por haber diseñado varios aparatos de laboratorio, cuya descripción se conserva en textos antiguos. Aunque hoy María es una figura casi legendaria de cuya vida

poco se conoce, su nombre perdura y la mayoría de nosotros lo ha mencionado alguna vez. Fue ella quien inventó el método de cocción a temperatura controlada conocido como Baño María (Figura 30). Si, por ejemplo, se desea derretir chocolate, la



29. Retrato imaginario, del siglo XVII, de María la Judía, que vivió entre los siglos II y III.



30. Método de cocción a temperatura controlada conocido como baño María para, por ejemplo, fundir chocolate sin que se queme.

primera opción es colocarlo en un recipiente metálico y calentarlo al fuego; pero, con este método, lo más probable es que se queme. La segunda opción es el Baño María: el recipiente con chocolate se sumerge parcialmente en un recipiente mayor con agua y se calienta hasta que el agua hierva. A presión atmosférica el agua hierve a 100°C , esto significa que (en situaciones norma-

les) el agua líquida no puede superar la temperatura de 100°C . El chocolate se derretirá en forma lenta y controlada. Para modificar la temperatura de cocción se pueden utilizar otros líquidos como aceite o soluciones salinas.

Suponiendo que el agua del recipiente grande de la Figura 30 está inicialmente quieta, cuando se la empieza a calentar transmite calor desde la zona más caliente cercana al fuego hacia la zona más fría donde está el otro recipiente. La forma en que el calor se transmite en este caso es por *conducción*. El mismo proceso tiene lugar cuando, por ejemplo, se calienta una barra de metal por un extremo y, luego de cierto tiempo, se puede percibir que el calor llega hasta el otro extremo. Los fluidos, como el agua o el aire, tienen otra forma de transportar calor, que puede resultar más eficiente: la *convección*. Cuando el agua hierve, se producen borbotones: zonas donde el agua sube y zonas donde baja. Las líneas de la Figura 30 muestran en forma esquemática la circulación interna del agua. Este movimiento es el responsable de la transmisión de calor desde abajo hacia arriba por convección.

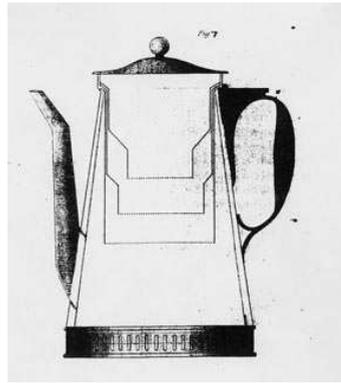
Hay una tercera forma de transmitir calor, que también se usa para cocinar: la *radiación*. El calor del sol llega hasta nosotros a través de la radiación electromagnética solar, que se compone en su mayor parte de luz visible pero también incluye radiación infrarroja y ultravioleta. Al aumentar la temperatura de un objeto, aumenta la radiación electromagnética que emite. Para saber si un objeto está caliente, a veces no es necesario tocarlo: con acercar la mano puede ser suficiente para notar que está emitiendo radiación. Es lo que sucede cuando acercamos las manos a un fuego para calentarlas. Si se comete la imprudencia de colocar las manos por encima del fuego es posible que se sufra alguna quemadura. En esta situación el calor llega hasta las manos no solo por radiación, sino también por convección, transportado por aire que, habiendo estado en contacto con el fuego, se eleva. Un asado al asador se cocina lentamente con el calor que le llega

casi exclusivamente por radiación. En cambio, un asado a la parrilla se cocina más rápido con el calor que llega por radiación y por convección.

Benjamin Thompson, la teoría del calor y el café



31. Benjamin Thompson, conde Rumford, 1754-1814.



32. Cafetera de goteo de Rumford.

Benjamin Thompson, conde Rumford, fue un físico e inventor anglo-estadounidense que vivió entre 1753 y 1814. Sus estudios sobre el calor formaron parte de la revolución en termodinámica que tuvo lugar durante el siglo XIX. En sus experimentos midió la cantidad de calor que se genera por fricción al trepanar cilindros de hierro para construir cañones. Estos resultados ayudaron a establecer que el calor no es una sustancia que se conserva, como afirmaba la teoría del calórico vigente en su época, sino que es una forma de movimiento desordenado a nivel microscópico.

Además de sus contribuciones a la teoría del calor, Rumford tuvo tiempo para producir varios inventos útiles durante una vida agitada y aventurera. Entre los que tienen relación con la cocina podemos mencionar: las cocinas con hornallas, el hervidor doble, hornos, la olla a presión, la cafetera a goteo y la sopa Rumford (nutritiva, aunque no muy sabrosa, y económica; la bebieron los pobres y los presos de Baviera). Con respecto al café, dice en uno de sus trabajos (Thompson 1969, vol. 5, pág. 265-266):

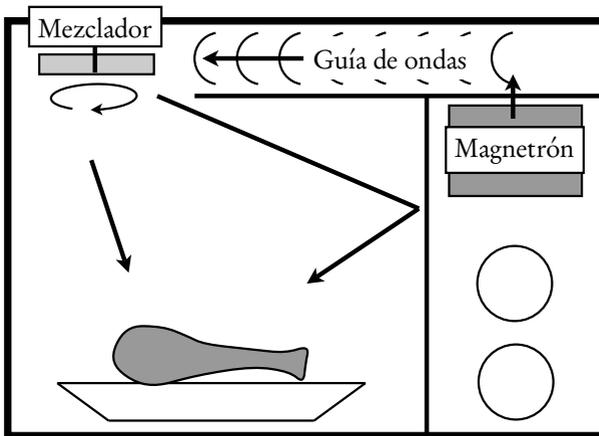
Entre los numerosos lujos de la mesa desconocidos para nuestros antepasados, que se han importado a Europa en épocas modernas, el café puede considerarse como uno de los más valiosos. Su degustación es de lo más agradable, y, de manera infrecuente, su sabor también; pero su virtud principal depende de su salubridad y de su cualidad de estimulante. Excita la alegría sin intoxicación, y el flujo placentero de los humores que ocasiona dura muchas horas, y nunca es seguido por la tristeza, la languidez o la debilidad.

El café se difundió en Europa durante el siglo XVII. Por entonces se lo preparaba hirviendo los granos en agua (el filtrado posterior era un paso opcional) lo que daba lugar a una bebida en extremo amarga. Basándose en modelos anteriores, Rumford diseñó la cafetera que se ve en la Figura 32 con la intención de minimizar las pérdidas por evaporación de los aceites del café, donde se encontraba el sabor, y que podían perderse por agitación o por cambios bruscos de temperatura. En la figura se ven filtros, de malla metálica, de distintos tamaños para preparar distintas cantidades de tazas. Se trataba esencialmente de una cafetera moderna: el agua hirviendo se derramaba sobre los filtros con café y la infusión goteaba al fondo. El café se enfriaba demasiado al gotear, por lo que Rumford usó paredes externas huecas que se llenaban de agua caliente para mantener la temperatura alta. Por otro lado, calentar el café únicamente a través del

agua hirviendo que se encuentra en la pared doble es una manera de mantener controlada la temperatura, pues no puede superar los 100°C , como sucede también con el baño María. Si el agua de la pared doble se renueva de forma frecuente, el café puede mantenerse caliente sin hervir.

Horno a microondas

En un párrafo anterior se mencionó que el asado al asador es un ejemplo de cocción usando calor transmitido por radiación. En ese ejemplo, la radiación es una mezcla de ondas electromagnéticas con frecuencias (o longitudes de onda) que varían en un rango amplio (el rango infrarrojo). El horno a microondas también transmite calor por radiación, pero lo hace usando una frecuencia bastante específica: la que agita las moléculas de agua en forma más eficiente.



33. Horno a microondas.

La Figura 33 muestra un esquema de horno a microondas. La radiación se genera en un dispositivo llamado magne-

trón. A través de un tubo llamado guía de onda se la dirige hasta un mezclador, que dispersa la radiación en todas direcciones. La radiación llega hasta el alimento en forma directa o luego de rebotar en las paredes. La malla de la puerta del horno, que nos permite ver dentro, deja pasar la luz visible pero no las microondas, que tienen una longitud de onda mucho mayor. El dispositivo clave para la generación de microondas es el magnetrón. Consiste en un cilindro hueco cargado positivamente (ánodo) con respecto a un filamento caliente que pasa por el centro (cátodo). Los electrones se desprenden del cátodo y son atraídos por el ánodo debido a una diferencia de potencial eléctrico. Pero la trayectoria no es recta debido a la presencia de un campo magnético, producido por imanes permanentes. El campo magnético hace que la trayectoria sea una espiral. En las paredes del cilindro hay ranuras que conectan con cavidades menores donde se produce resonancia, es decir, los electrones oscilan con frecuencias dentro de un rango determinado por la geometría de las cavidades. Del mismo modo que la agitación de los electrones en el fuego produce luz, o los electrones que oscilan en una antena producen ondas de radio, las oscilaciones de los electrones en el magnetrón producen microondas. En todos los casos se trata de radiación electromagnética que se produce por el movimiento de electrones.

El truco de un horno a microondas se basa en que la molécula de agua, formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, es una molécula dipolar, lo que significa que su carga positiva está un poco separada de su carga negativa, como si tuviera dos polos eléctricos. Del mismo modo que la aguja de una brújula, con sus dos polos magnéticos, se alinea a lo largo de un campo magnético, el dipolo eléctrico tiende a alinearse a lo largo del campo eléctrico. Una onda electromagnética tiene un campo eléctrico que oscila y, debido a las fuerzas que produce sobre las cargas, puede hacer oscilar a una molécula dipolar como la del agua. Si la frecuencia de la onda es demasiado alta, la mo-

lécua no puede acomodarse a cambios tan rápidos y apenas se mueve. Si, en cambio, es demasiado baja, la molécula se mueve muy lentamente y poco. Hay una frecuencia óptima para la cual la molécula oscila con amplitud grande y absorbe mucha energía de la onda. Se trata de la frecuencia de resonancia, que para el agua es de 2,45 GHz (lo que corresponde a una longitud de onda de 12,24 cm), o sea, 2.450.000.000 oscilaciones por segundo. Esta frecuencia está en el rango de las microondas, las que se encuentran entre las ondas de radio y la radiación infrarroja. Parece una frecuencia muy grande, pero no lo es tanto si la comparamos con la de la luz visible, que es de alrededor de 10^{15} Hz (un 1 seguido de 15 ceros de oscilaciones por segundo).

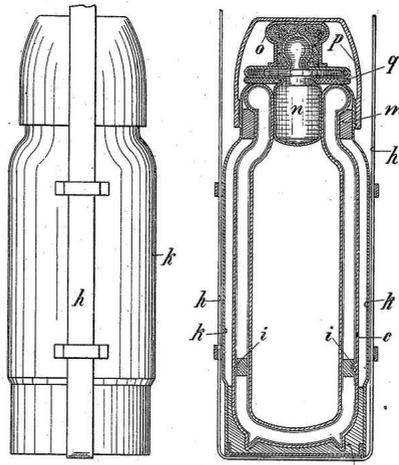
El magnetrón de un horno a microondas está diseñado para que produzca radiación con la frecuencia de resonancia del agua. Cuando las moléculas de agua vibran, transmiten su agitación a las moléculas vecinas a través de choques. Este incremento de la agitación a nivel microscópico se manifiesta como un aumento de temperatura. La radiación de microondas puede penetrar dentro de los alimentos y hacer oscilar a las moléculas de agua que están en su interior, no solo a las de la superficie, lo que produce un calentamiento más rápido y homogéneo. En cambio, la radiación infrarroja que recibe un asado al asador no penetra dentro del asado sino que se absorbe en la superficie, y el calor se transmite por conducción hacia el interior.

En un párrafo anterior, al hablar del Baño María, se mencionó que, en situaciones normales, el agua líquida no supera los 100°C , porque a esa temperatura se evapora. Existen situaciones raras en las que sí la puede superar. El agua sobrecalentada es agua líquida que supera la temperatura de ebullición y se puede producir con un horno a microondas. Realizar el experimento no es aconsejable, porque, con una pequeña perturbación, el agua sobrecalentada puede evaporarse súbitamente con una pequeña explosión. Es muy poco probable que el sobrecalentamiento suceda en forma accidental, porque en la mayoría

de los casos pequeñas imperfecciones en las paredes del recipiente o impurezas en el agua favorecen el crecimiento de burbujas a partir de las cuales se pasa al estado de ebullición apenas se alcanzan los 100°C.

El termo

El método de Rumford para mantener caliente el café tenía un problema: cuando el agua caliente contenida en la pared hueca de la cafetera se enfriaba, el café también (Figura 32). La solución para mantener la bebida caliente durante un tiempo mayor llegó en 1892 con el invento del escocés James Dewar: el termo. La Figura 34 muestra el diseño de una patente estadounidense de 1907. El objetivo del termo es evitar pérdidas de calor a través de cualquier mecanismo. Pérdidas por convección



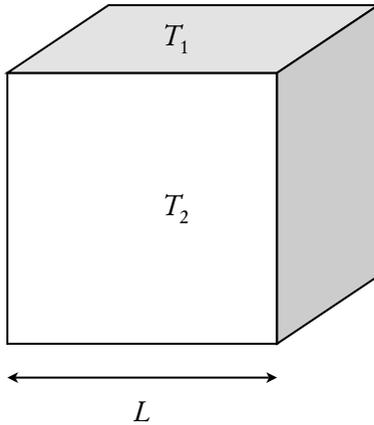
34. Esquema de un termo. (Tomado de una patente de 1907, de EEUU.)

se evitan sin inconvenientes tan solo manteniendo el recipiente cerrado. La conducción es un problema mayor. El calor puede salir (o entrar, si lo que se quiere es mantener el frío) a través de cualquier material que esté en contacto con el líquido. La solución de Dewar fue simple y original: eliminar el material. El vacío no puede conducir calor. El termo tiene una pared doble de vidrio dentro de la cual hay vacío. El calor todavía se las puede ingeniar para escapar a través del vacío por radiación. Para evitarlo, se cubre el frasco de vidrio con una capa de material reflectante (Dewar usó plata) a través de la cual la radiación electromagnética no puede entrar ni salir.

¿Qué pasa si lo duplico?

Si sabemos que un pavo de 4 kilogramos se cocina al horno en 4 horas, ¿cuánto tiempo deberíamos cocinar uno de 8 kilogramos? La primera respuesta que a uno se le puede ocurrir es la siguiente: si se duplica el peso, hay que duplicar el tiempo de cocción. Pero un cocinero con algo de experiencia sabe que si duplica el tiempo lo más probable es que el pavo quede seco o, peor, que se queme. Para obtener una respuesta más precisa es necesario recurrir a la ley de Fourier de conducción de calor.

En una forma simplificada, y apropiada para este problema, la ley de Fourier dice que la cantidad de calor Q que entra en un objeto es igual al producto de la conductividad térmica k por el área A por el tiempo t durante el que se calienta el objeto y por el gradiente de temperatura. En nuestro caso, el gradiente de temperatura es aproximadamente igual a la diferencia de temperatura afuera y adentro del objeto dividida el tamaño del objeto. O sea, si T_1 es la temperatura en la superficie externa del objeto, T_2 es la temperatura en el interior, y L es el tamaño del objeto, entonces el gradiente de temperatura es $(T_1 - T_2)/L$. Todo lo que dicen estas palabras se puede escribir en forma más



35. Pavo cúbico, de longitud L , a temperatura T_1 en la superficie y T_2 en el interior.

compacta con una ecuación matemática:

$$Q = k A t \frac{(T_1 - T_2)}{L}.$$

La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior varía a medida que pasa el tiempo, pero en esta ecuación se considera una diferencia de temperatura promedio durante el tiempo que se cocina el pavo. Al duplicar el peso, o el volumen, del pavo, consideramos que se utiliza el mismo horno para cocinarlo, que produce la misma diferencia de temperatura promedio entre el interior y exterior. La variación del tiempo de cocción dependerá de las cantidades que no se mantienen constantes, o sea,

$$t \propto \frac{Q L}{A},$$

donde de nuevo hemos utilizado el símbolo \propto como sinónimo de “proporcional a.” En nuestro problema, el objeto en cuestión

es un pavo que, para simplificar los cálculos, vamos a suponer que se ha compactado de tal modo que ha adquirido una forma cúbica de lado L y volumen L^3 , como se ve en la Figura 35. (Esta simplificación no afecta al resultado final, que es válido para objetos de cualquier forma.) Ahora duplicamos el peso del pavo, lo que significa que también duplicamos su volumen. Para que el pavo se cocine igual que antes, la nueva cantidad de calor necesaria es el doble de la anterior. Usando un subíndice n para las cantidades nuevas, tenemos $Q_n = 2Q$. El volumen también se ha duplicado, por lo tanto $L_n^3 = 2L^3$, o sea $L_n = \sqrt[3]{2}L$. El área total de un cubo es $A = 6L^2$, entonces, usando el resultado anterior para L_n obtenemos el área nueva: $A_n = (\sqrt[3]{2})^2 A$. Reemplazando los nuevos valores del calor, el área y la longitud en la ecuación de más arriba para el tiempo, se obtiene que el nuevo valor del tiempo está relacionado con el anterior de la siguiente manera:

$$t_n = (\sqrt[3]{2})^2 t \simeq 1,6 t.$$

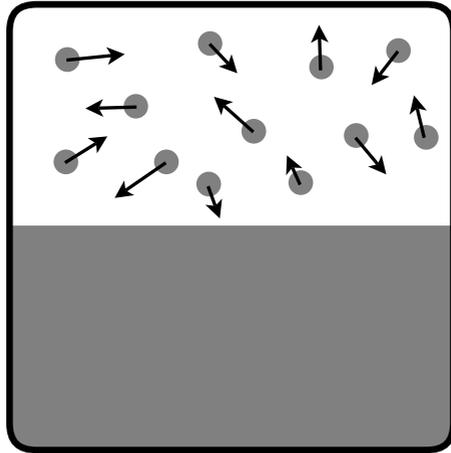
La conclusión es que el tiempo no debe duplicarse sino que debe multiplicarse por un factor 1,6. Si antes el pavo tardaba 4 horas en cocinarse, al duplicarlo se lo debe cocinar unas 6,4 horas (o, lo que es lo mismo, 6 horas y 24 minutos).

Líquido y vapor

Hervir agua es una actividad frecuente en la cocina. Quizá este carácter cotidiano hace que los detalles del proceso de ebullición pasen, en general, desapercibidos o no despierten la curiosidad de fenómenos más raros.

Consideremos agua líquida en reposo dentro de un recipiente. El agua parece estar completamente quieta, sin embargo, a escalas atómicas, sus moléculas tienen un movimiento permanente de agitación. Las moléculas se mueven en todas direcciones y chocan entre sí. Este movimiento caótico recibe el nombre

de agitación térmica y, ante nuestros ojos, pasa completamente desapercibido. No así para nuestro sentido del tacto. Podemos percibir la agitación térmica metiendo un dedo dentro del agua. A mayor agitación sentiremos que el agua está más caliente. Por lo tanto, la temperatura del agua es una indicación de cuán agitado es ese movimiento a escalas atómicas. Este movimiento, por ser caótico, no es uniforme, o sea, las moléculas no se mueven todas a la misma velocidad sino que algunas se mueven más rápido y otras más lento. Las moléculas que se mueven más rápido y que están cerca de la superficie pueden escapar del líquido, de esta forma se produce la evaporación.



36. Recipiente cerrado con agua líquida y vapor. Cuando existe equilibrio entre las moléculas que entran y salen de cada fase se ha alcanzado la presión de vapor.

Un recipiente herméticamente cerrado con agua líquida y vapor de agua (sin aire ni otro gas), dejado en reposo, como se ve en la Figura 36, alcanza un equilibrio entre la cantidad de moléculas de agua rápidas que se escapan del líquido y pasan al

vapor y la cantidad de moléculas que recorren el camino inverso, o sea, pasan del vapor al líquido. En este punto se dice que se ha alcanzado la *presión de vapor*. Al aumentar la temperatura, aumenta la presión de vapor. Cuando el recipiente está abierto, expuesto al aire, la presión no puede tomar cualquier valor; está fija y es igual a la presión atmosférica. El agua líquida pasará a vapor únicamente cuando la temperatura sea lo suficientemente alta para que la presión de vapor alcance a la presión atmosférica, entonces se produce la ebullición: se forman burbujas y el agua hierve.

A grandes alturas, donde la presión atmosférica es menor, la presión de vapor necesaria para la ebullición también será menor, por lo tanto, el agua hervirá a una temperatura menor. Dependiendo de la altura y del tipo de comida, el agua hirviendo puede no tener suficiente temperatura para cocinar de forma adecuada. Una forma de solucionar este problema es usar una olla a presión, que permite cocinar con agua a temperaturas mayores que la de ebullición a presión atmosférica sin que hierva, lo que también sirve para acelerar el tiempo de cocción.

La base de muchas salsas se hace hirviendo caldo de carne o vegetales y reduciendo el volumen a una fracción $1/10$ o $1/20$ del original. Al hervir una mezcla, las concentraciones de los distintos componentes de la mezcla pueden ser diferentes en el vapor que en el líquido. Por ejemplo, dado que el alcohol se evapora con más facilidad que el agua, al hervir una mezcla de agua y vino el vapor tendrá mayor concentración de alcohol que el líquido. La composición del caldo se puede modificar, y la reducción de volumen se puede acelerar, si se hierve a baja presión. Por ejemplo, a una presión que sea la mitad de la presión atmosférica normal, el caldo hierve a aproximadamente 80°C . El equipo necesario para cocinar con una olla despresurizada es bastante más sofisticado, y menos frecuente, que una olla a presión.

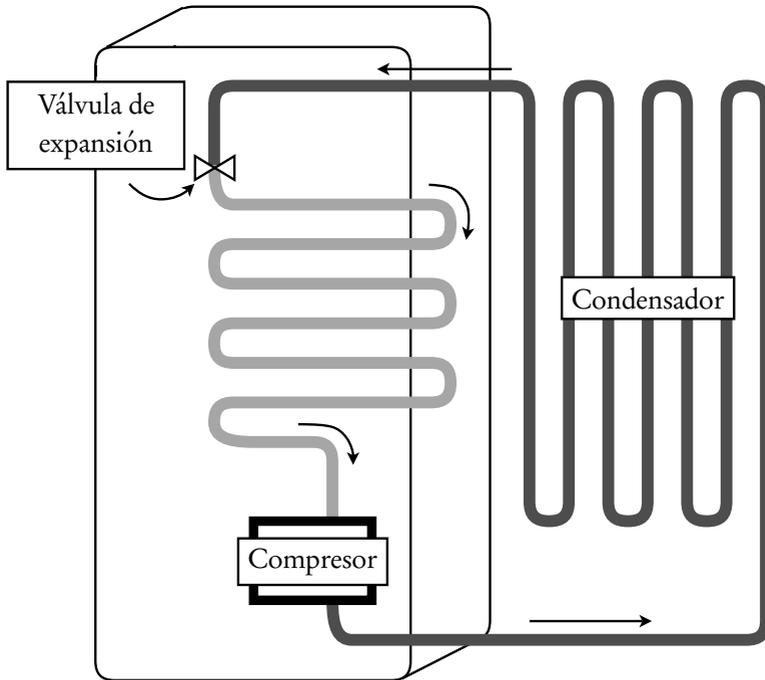
Al comprender el significado de la temperatura como el

nivel de agitación a escala atómica o molecular, se comprende también por qué soplar una taza de té caliente es un buen método para enfriarla. Al soplar, barremos de la superficie del té (o de cualquier alimento caliente) las moléculas más rápidas, o sea, las que contribuyen más a que la temperatura sea alta. Estas moléculas se van en una pequeña nube de vapor y no pueden regresar. En el té quedan las moléculas que no se mueven tan rápido y que corresponden a una temperatura menor.

Preservación de la comida, la heladera

Desde la antigüedad existe una variedad de métodos para evitar el crecimiento de hongos o bacterias en la comida. Algunos de ellos, utilizados para la conservación de distintos tipos de carne, son el secado, salado o ahumado. Para la conservación de frutas: el secado o el azúcar (dulces). El encurtido o escabeche se puede usar para conservar verduras, carnes o frutas. Otro método antiguo, aplicable a distintos tipos de alimentos, es la refrigeración con hielo o nieve. Métodos más modernos son el envasado al vacío, el enlatado y embotellado o la irradiación. El método actual más común es la refrigeración en heladeras.

La teoría de la termodinámica, establecida hacia mediados del siglo XIX, ofreció la base para el perfeccionamiento de máquinas térmicas, como la máquina de vapor, y de refrigeradores. Uno de los principales investigadores que contribuyeron a la construcción de la teoría termodinámica fue William Thomson, también conocido como Lord Kelvin. Thomson vivía en Glasgow y era uno de los pocos que poseía una heladera en su casa, lo que le permitía comer helado en verano. Para hacer helado, se batía la crema en un recipiente metálico rodeado de hielo. Dado que la cantidad de hielo necesaria, tanto para producirlo como para conservarlo, era más o menos considerable, solo se hacía helado en invierno. Dicen que Thomson sabía sacar ventaja de



37. Esquema de una heladera. En el exterior de la heladera está el condensador, que transmite calor al entorno. El punto clave se encuentra en la válvula de expansión, donde el gas, a temperatura ambiente, se enfría por el efecto Joule-Thomson.

su posición privilegiada invitando a las damas a tomar un helado a su casa durante los calurosos días del verano.

William Thomson, en colaboración con James Prescott Joule, descubrió en 1852 el efecto Joule-Thomson. Se trata de la disminución de temperatura que se observa cuando se hace pasar un gas o un líquido de una zona de alta presión a una zona de baja presión a través de una válvula. Al expandirse libremente en la zona de baja presión, el gas o el líquido (o la mezcla de ambos) se enfría. La explicación de este efecto requiere del uso de los conceptos de energía potencial y energía cinética. La energía potencial del gas se origina en sus interacciones moleculares y se comporta cualitativamente de manera similar a la energía potencial de un objeto en un campo gravitatorio; el objeto, cuando está a una altura mayor, aumenta su energía potencial (tiene una mayor capacidad latente, o potencial, de caer), del mismo modo, en el gas, cuando las partículas están más alejadas entre sí, también tienen una mayor energía potencial. Al expandirse, entonces, el gas aumenta su energía potencial. Como la expansión sucede lo suficientemente rápido como para poder desprestigiar intercambios de calor con el entorno, se considera que la energía total del gas debe mantenerse constante. Por lo tanto, si su energía potencial aumentó, para mantener la energía total constante su energía cinética (o energía del movimiento) debe disminuir. Esto significa que, en promedio, las moléculas se moverán más despacio, o sea, tendrán una temperatura menor. Ahora solo falta agregar un compresor para comprimir el gas (o la mezcla gas-líquido) y mandarlo de vuelta a la zona de presión alta. De esta forma cerramos el circuito y podemos mantener un flujo permanente a través de la válvula para continuar produciendo el efecto Joule-Thomson. Ya tenemos una heladera como la de la Figura 37.

En realidad, las cosas no son tan simples. La explicación anterior no es completa pues hay situaciones, que se dan a altas temperaturas, en las que el efecto Joule-Thomson para una

expansión puede producir un aumento, en lugar de una disminución, de temperatura.

Los procesos rápidos, en los que se puede despreciar el intercambio de calor con el entorno, se conocen como procesos adiabáticos. Como vimos, en una expansión adiabática la temperatura, en general, disminuye. Si, en lugar de una expansión, consideramos una compresión adiabática, utilizando los mismos argumentos de antes, llegamos a la conclusión de que la temperatura tiene que aumentar. Esto es lo que sucede, por ejemplo, con un inflador de bicicleta. Luego de varias compresiones rápidas del aire, el tubo del inflador puede calentarse bastante.

Además del efecto Joule-Thomson, existe otro que también ayuda a bajar la temperatura. En la parte del circuito que está dentro de la heladera hay, en general, una mezcla de líquido y gas. Debido a que esta parte se encuentra a una presión baja, el líquido se evapora. El cambio de líquido a gas se llama transición de fase y, para producirse, requiere de cierta cantidad de calor conocida como calor latente de vaporización. Esta absorción de calor es la que ayuda a enfriar más la heladera.

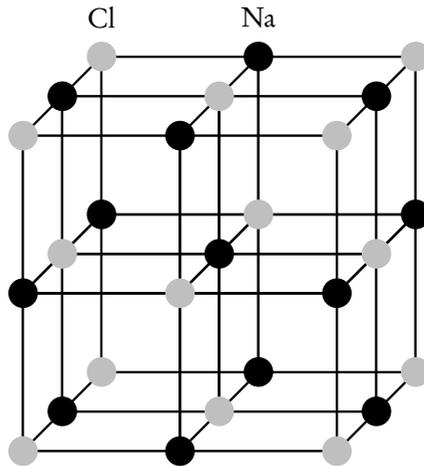
Mezclando agua y aceite

Al mezclar agua con aceite y agitar con rapidez, el aceite se separa en pequeñas gotas que parecen mezclarse con el agua. En cuanto se deja de agitar la mezcla, las gotas se unen poco a poco entre sí hasta que, al final, el aceite se separa del agua. Es posible lograr la mezcla y evitar que las gotas de aceite vuelvan a unirse agregando un ingrediente: yema de huevo. La yema de huevo posee una molécula llamada lecitina. Se trata de una molécula alargada cuyos extremos tienen la siguiente propiedad: a un extremo le gusta estar dentro del agua (hidrofílico) y al otro extremo no le gusta el agua (hidrofóbico). Cuando una molécula de lecitina se encuentra con una gota de aceite, un extremo se mete dentro del aceite y el otro queda dentro del agua. Varias

moléculas de lecitina pueden formar una capa en torno a la gota de aceite que evita que se pueda juntar con otras gotas. Agitando la mezcla durante un tiempo lo suficientemente largo, las gotas de aceite serán tan pequeñas que no podrán verse a simple vista y la mezcla parecerá homogénea. Esta es la forma en que, por supuesto, se hace la mayonesa.

Cristales y amorfos

Cada grano de sal es un pequeño cristal en el que los átomos de cloro y sodio se acomodan en una red muy ordenada como se ve en la Figura 38.



38. Estructura cristalina de la sal, formada por átomos de cloro (Cl) y sodio (Na).

No todos los sólidos tienen una estructura microscópica ordenada. El vidrio, en contra de lo que puede parecer, no es un

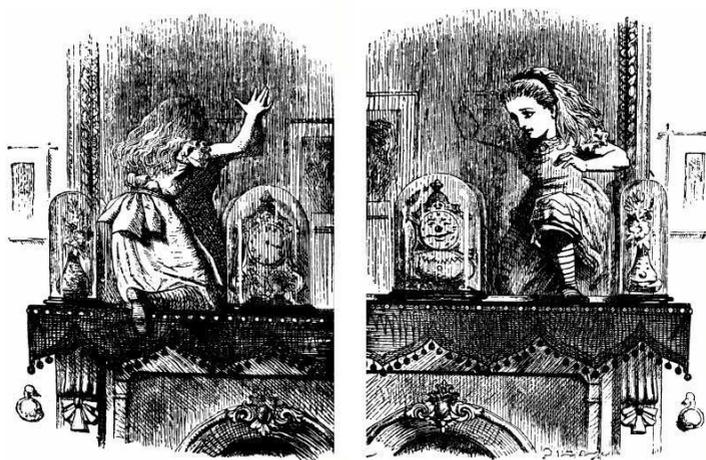
crystal, sino una mezcla desordenada de átomos de oxígeno y silicio que forman lo que se conoce como un sólido amorfo.

El azúcar común es una molécula llamada sacarosa y formada por una mezcla más o menos compleja de átomos de carbono, hidrógeno y oxígeno. Las moléculas de sacarosa, como los átomos de cloro y sodio en la sal, también se acomodan en una estructura ordenada. Cada grano de azúcar es un pequeño cristal.

Las recetas de caramelo buscan evitar que el azúcar tenga la textura granular. Al calentar azúcar se rompen los enlaces que mantenían la estructura cristalina y el azúcar se transforma en un líquido espeso. Al enfriarla, nuevamente surgirán los granos si no se agrega algún ingrediente. Una opción es agregar jugo de limón. El jugo de limón divide a la sacarosa en dos partes, llamadas fructuosa y glucosa. Las moléculas de sacarosa, fructuosa y glucosa no pueden acomodarse en una estructura ordenada y, al enfriarse, forman un sólido amorfo de textura suave. Otra alternativa es agregar manteca. El efecto de la manteca es el mismo, al mezclarse con la sacarosa evita que estas moléculas puedan acomodarse en una red cristalina.

Quiralidad y sentido del gusto

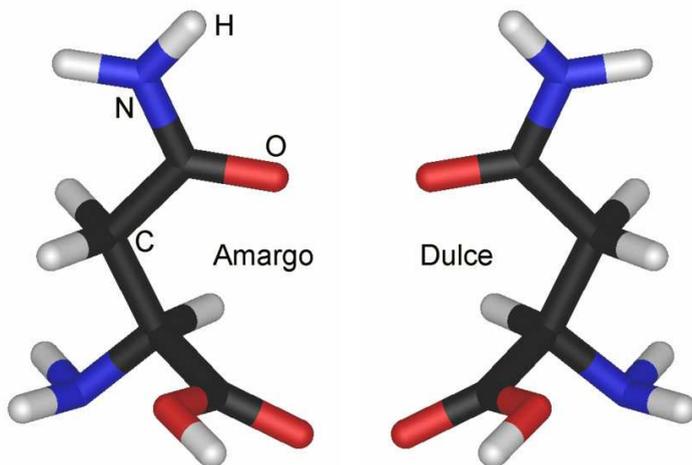
En el libro de Lewis Carroll, *Alicia a través del espejo*, 1871, Alicia entra a un mundo extraño en el que todo se ve igual y diferente a la vez. En ese mundo la mano izquierda es la mano derecha y, para abrir una canilla, uno debe girarla como si la quisiera cerrar. La imagen especular de un tornillo con rosca derecha tiene rosca izquierda, o sea, para atornillarlo del otro lado del espejo se lo debe girar en sentido antihorario, al revés que un tornillo normal. En cambio, figuras simples como una vara, una esfera, un cubo o un cilindro sin marcas, se verán exactamente igual del otro lado del espejo y no tendrán ninguna propiedad extraña. Para distinguir entre estos dos tipos de objetos, William



39. Al cruzar el espejo, Alicia dice con buen tino: “Quizá, la leche del espejo no es buena para tomar.”

Thomson definió la propiedad de quiralidad de la siguiente manera: “Denomino quiral y digo que tiene quiralidad toda figura geométrica, o todo grupo de puntos, si su imagen en un espejo plano, idealmente realizada, no puede hacerse coincidir consigo misma.” De acuerdo con esta definición, un tornillo o una mano tienen quiralidad definida, izquierda o derecha.

Cuando Alicia cruza el espejo, ve el plato de su gata y dice: “Quizá, la leche del espejo no es buena para tomar.” Aunque parezca una precaución exagerada, es probable que Alicia tenga razón. Al menos es probable que la leche del espejo tenga un sabor diferente. Esto es lo que sucede con, por ejemplo, la molécula de asparagina, una combinación particular de átomos de carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno que se encuentra en varios vegetales, especialmente en el espárrago. La asparagina es una molécula quiral, es decir, su imagen especular no se puede



40. Molécula de asparagina, $C_4H_8N_2O_3$, abundante en el espárrago, y su imagen especular. El sentido del gusto puede distinguir entre las dos variantes de esta molécula.

superponer con la figura original. En la naturaleza, la asparagina se produce con una quiralidad definida, que podemos llamar derecha, y tiene un sabor amargo (Moore et al. 2005, pág. 424). La asparagina se puede producir con medios artificiales y, en este caso, se producen las variantes con quiralidad derecha y con quiralidad izquierda. Lo curioso es que la asparagina con quiralidad izquierda tiene sabor dulce (Figura 40). Esto significa que nuestro sentido del gusto es capaz de distinguir la quiralidad de una molécula.

Determinar la quiralidad de una molécula es especialmente relevante en la producción de medicamentos. Al producir una droga pueden aparecer mezclados los dos tipos de quiralidad. En algunos casos, solo una quiralidad produce el efecto

deseado y la otra puede llegar a ser nociva. Existen mecanismos, más o menos complejos dependiendo de la molécula en cuestión, que sirven para separar la quiralidad no deseada.

Con respecto al sentido del gusto, se consideraba que existían cuatro: dulce, amargo, salado y ácido, y que los receptores nerviosos que detectaban cada uno de ellos estaban distribuidos en zonas diferentes sobre la superficie de la lengua. Hace algunos años se ha comprobado la existencia de un tipo de receptor que detecta un quinto sabor llamado umami (Lindemann 2000). Los japoneses y chinos lo conocen desde hace siglos. Umami significa “sabroso” en japonés. Cuando encontramos que una comida está sabrosa podríamos decir que tiene gusto a umami. También se ha determinado que, al contrario de lo que se creía, los cinco tipos de receptores nerviosos asociados a los cinco gustos están distribuidos aproximadamente en las mismas zonas sobre la lengua.

Gastronomía molecular

La idea de aplicar el conocimiento científico a las actividades de la cocina no es nueva, como lo demuestra, por ejemplo, el libro de Ella E. Kellogg, *Science in the Kitchen* (Ciencia en la cocina), de 1893, cuya portada se muestra en la Figura 41. Sin embargo, esta idea ha recibido un nuevo impulso con la creación de la disciplina de la gastronomía molecular en 1988, a cargo de Nicholas Kurti (físico húngaro) y Hervé This (físicoquímico francés) (ver, por ejemplo, Kurti y This 1994 o This 2006). Según sus fundadores, el objetivo de la gastronomía molecular es comprender la física y la química que hay detrás de la preparación de todo plato; por ejemplo, entender por qué la mayonesa se hace firme o por qué un soufflé se eleva.

La comprensión a nivel físico y molecular de recetas tradicionales es una importante guía para la experimentación. Inspirados por la gastronomía molecular, talentosos chefs están re-



41. Portada del libro de E.E. Kellogg, *Science in the Kitchen*, EE.UU., 1893

novando la cocina de distintas partes del mundo. Algunos de los más conocidos son Ferran Adriá (España), Heston Blumenthal (Reino Unido) y Pierre Gagnaire (Francia).

Un ejemplo de esta renovación son las espumas. Para dar textura de mousse a casi cualquier mezcla, dulce o salada, fría o caliente, se necesita un sifón con un cartucho de óxido nitroso, N_2O (propelente que se usa para aerosoles). Estos sifones se venden para uso doméstico en países del primer mundo. La mezcla, con un poco de gelatina o agar-agar, se coloca dentro del sifón. Se cierra y se conecta el cartucho de óxido nitroso. El óxido nitroso mantiene una presión alta y constante. Al abrir el sifón, la mezcla sale y se expande con rapidez. El efecto Joule-Thomson hace que se enfríe y que la gelatina coagule, dando estabilidad a la textura espumosa. El óxido nitroso se esfuma en el aire.

Otro ejemplo es el helado instantáneo. Aunque es anterior a la gastronomía molecular, se ha difundido más gracias a ella. Hacer helado lleva tiempo; al enfriar la crema se lo debe batir continuamente para evitar la formación de cristales grandes y mantener una textura cremosa. Hay una manera de evitar este proceso y hacer helado instantáneo. Una vez preparada la crema, a temperatura ambiente, se la mezcla con nitrógeno líquido, a 200°C bajo cero. El nitrógeno pronto se evapora y desaparece de la mezcla. Lo que queda es un helado cremoso, pues el enfriamiento súbito no permite la formación de cristales grandes, proceso que requiere un determinado tiempo para el acomodamiento de las moléculas en una estructura ordenada.

Un artículo de This (2006), menciona a Suiza, España, Francia y Argentina como los países en los que existen organizaciones dedicadas a la gastronomía molecular. Las organizaciones en Argentina son Asociación Argentina de Gastronomía Molecular¹ y Grupo Córdoba de Gastronomía Molecular.² Otra re-

¹<http://www.gastronomiamolecular.com>

²<http://www.gcgm.com.ar>

ferencia importante en Argentina es el sitio de Internet *Arte y Ciencia del Buen Comer*,³ donde existe una sección dedicada a la Cocina Molecular en la que se pueden encontrar respuestas científicas a varias preguntas interesantes.

Más comentarios de Thompson

La física o, en general, la ciencia, aplicada a la cocina permite mejorar, modificar o tener un mayor control sobre todo lo que se cocina; facilita el desarrollo de nuevos equipos, herramientas o instrumentos y, por si esto fuera poco, sirve para satisfacer la curiosidad.

Estas mismas motivaciones pueden encontrarse en el siguiente párrafo que B. Thompson, también conocido como Rumford, escribió en su ensayo *On the Construction of Kitchen Fire-places and Kitchen Utensils; together with Remarks and Observations relating to the various Processes of Cookery, and Proposals for improving that most useful Art* (1874, vol. 3, pág. 186), publicado por primera vez en 1794 (las itálicas son del original):

Mi intención principal en la publicación de estos cálculos es *despertar la curiosidad de mis lectores*, y fijar su atención en un tema que, aunque hasta ahora generalmente considerado bajo y vulgar, es de hecho muy interesante, y merecedor de la más seria consideración. Deseo que puedan servir para inspirar a los cocineros con una ajustada idea de la importancia de su arte, y de la íntima relación que existe entre los diversos procesos en los que están diariamente involucrados y muchos de los más bellos descubrimientos que han hecho los filósofos experimentales en la actualidad.

Las ventajas que resultarían de la aplicación de los últimos y brillantes descubrimientos en química y

³<http://www.delbuencomer.com.ar>

otras ramas de la filosofía natural y de la mecánica, para la mejora del arte de la cocina, son tan evidentes que no puedo evitar congratularme de que pronto veremos alguna persona ilustrada y de mentalidad liberal de la profesión que aborde el tema con seriedad, y le otorgue una profunda investigación *científica*.

¿En qué arte o ciencia pueden realizarse mejoras que contribuyan más poderosamente a aumentar el confort y el disfrute de la humanidad?

(...) Cuántos artículos baratos habrán, de los cuales la comida más delicada y saludable podría prepararse si el arte y la *ciencia* de la cocina fueran mejor comprendidos.

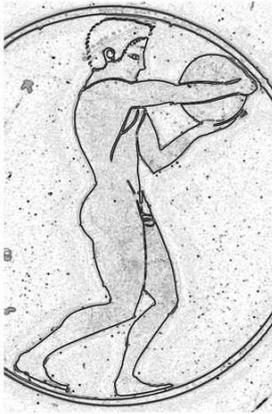
FÍSICA DEL DEPORTE

La física del deporte es un tema amplio. Analizar la física de solo una disciplina deportiva sería suficiente para llenar muchas páginas. La intención no es presentar un estudio exhaustivo de los procesos físicos que tienen lugar en la actividad deportiva, sino mostrar algunos ejemplos, elegidos por conveniencia o simplicidad, útiles para ilustrar principios básicos de la física. En una presentación resumida como ésta será inevitable dejar a un lado los aspectos físicos de muchos deportes interesantes.

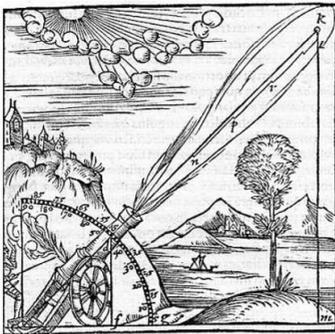
En la antigua Grecia, la actividad militar influyó en el desarrollo de los deportes. En general, las competencias deportivas eran una preparación para la guerra. La influencia marcial se nota aún en casos como, por ejemplo, las distintas formas de lucha, arrojar objetos lo más lejos posible (bala, disco, jabalina, martillo) o, también, correr (Figura 42). Hoy el espíritu de las olimpiadas (o, al menos, una parte de ese espíritu) es otro. Se trata de una reunión de deportistas de todos los países del mundo, de todas las razas y religiones, en un ambiente de confraternidad que privilegia el valor de la paz.

Lanzamiento de proyectiles

La Figura 43 muestra dos ilustraciones anteriores a Galileo. La primera representa las ideas aristotélicas acerca del mo-



42. Figuras áticas en cerámica mostrando actividades deportivas. La roja (izquierda) es de c. 520-500 a. de C., la negra (derecha) de c. 540-530 a. de C.

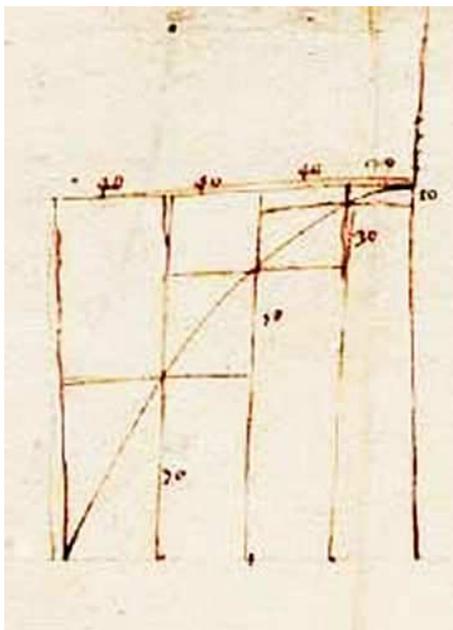


43. Dos ilustraciones anteriores a Galileo que describen el movimiento de un proyectil de manera diferente.

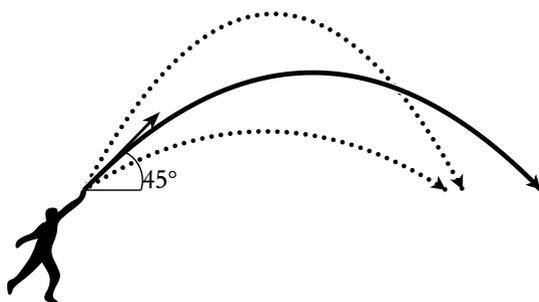
movimiento de proyectiles. La trayectoria de la bala de cañón está dividida en dos rectas. La primera parte corresponde al movimiento forzado por el impulso que dio a la bala la explosión en el cañón. La segunda parte es un movimiento natural de caída al suelo. Estas dos categorías aristotélicas del movimiento (forzado y natural) no se mezclan, el movimiento corresponde a una categoría o a la otra. La consecuencia de estas ideas es la aparición de un vértice en la parte superior de la trayectoria que, por supuesto, no se observa en la naturaleza. Esta descripción poco convincente del movimiento se restringía a ambientes académicos en los que las ideas aristotélicas poseían gran influencia. La intuición indica que la trayectoria se tiene que parecer a una curva suave. La misma intuición también existía antes de Galileo, como lo indica la segunda ilustración de la Figura 43.

Galileo logró, luego de un gran número de cuidadosos experimentos, determinar que la trayectoria que sigue un proyectil es una parábola (Figura 44). Si se tiene en cuenta la resistencia que el aire opone al movimiento del proyectil, la trayectoria no es exactamente una parábola. Por lo pronto, en los casos que se analizarán consideraremos que la resistencia del aire es pequeña y que no hace falta tenerla en cuenta. Sí debe tenerse en cuenta, por ejemplo, en balística, donde las velocidades que se alcanzan son grandes y la resistencia del aire también.

Galileo obtuvo una descripción matemática precisa del movimiento del proyectil que sirve, por ejemplo, para determinar a qué ángulo se debe arrojar el objeto para lograr que llegue lo más lejos posible: 45° (Figura 45). En la práctica el ángulo óptimo es un poco menor por dos razones. La primera es que el ángulo de salida de 45° es el que produce mayor alcance cuando el punto de partida y el de llegada se encuentran a la misma altura. En el caso de lanzamiento de bala, o martillo, el punto de partida está más alto que el piso. La segunda razón tiene que ver con nuestra estructura ósea y muscular. Debido a esta estructura, para algunos deportistas es posible hacer más fuerza cuando



44. Trayectoria parabólica. Ilustración de un manuscrito de Galileo, de 1608.

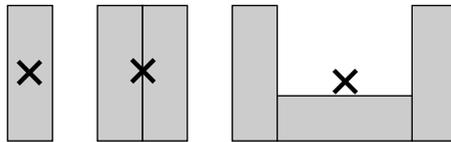


45. El alcance máximo se logra cuando se lanza el objeto a 45° .

se arroja el objeto a un ángulo algo menor. El ángulo óptimo para lanzamiento de bala está entre 40° y 42° , y, para martillo, entre 43° y 44° (ver *Sport Biomechanics*⁴).

Centro de masa

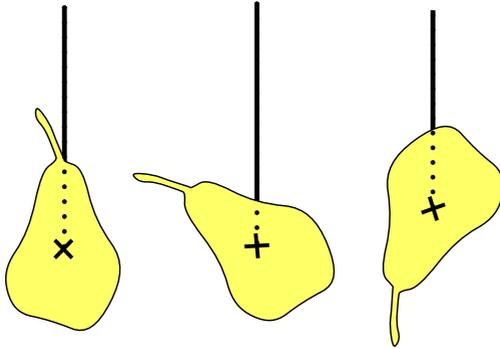
Cualquier cuerpo, o sistema de partículas, posee un punto específico conocido como centro de masa. Si la densidad del material es homogénea, el centro de masa se encuentra en el centro geométrico del cuerpo. La Figura 46 muestra algunos ejem-



46. Las cruces indican la posición del centro de masa de un cuerpo sencillo y de otros formados por la unión de dos o tres cuerpos.

plos. Al unir dos objetos, el centro de masa del cuerpo resultante se encuentra en un punto intermedio entre los centros de masa originales. También puede verse que el centro de masa no necesariamente se encuentra dentro del cuerpo. En muchos casos, el cuerpo se comporta como si toda su masa estuviera concentrada en ese punto. Una forma práctica de encontrar el centro de masa de un objeto es la siguiente. Al colgar el objeto de un hilo, la prolongación de la línea vertical que forma el hilo debe pasar por el centro de masa (pues se comporta como si todo su peso estuviera concentrado allí). Se vuelve a colgar el objeto luego de atarlo en otro punto. Se obtiene una nueva recta sobre la que debe estar, también, el centro de masa. La intersección de esta recta con la anterior da el punto donde se encuentra el centro

⁴<http://www.topendsports.com/biomechanics>

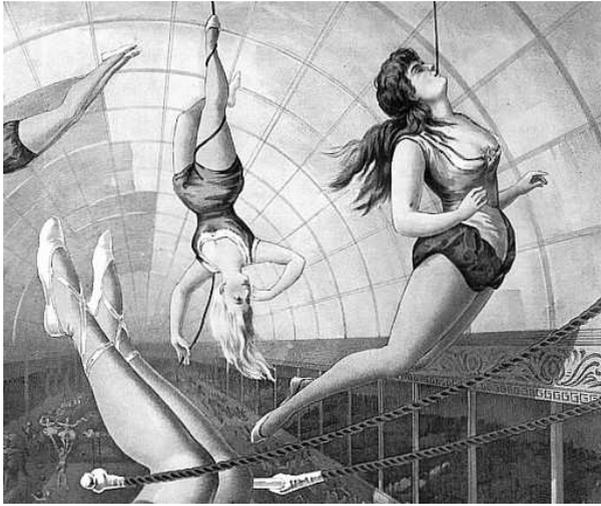


47. Ubicación del centro de masa de un objeto

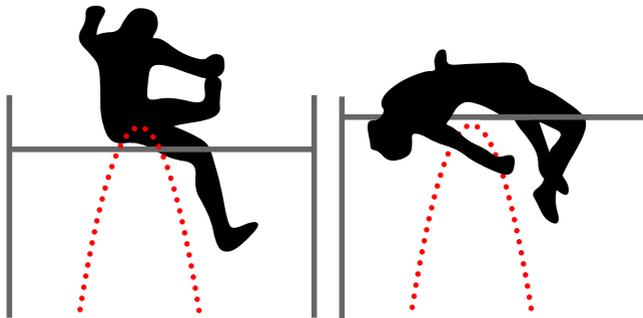
de masa, como se muestra en la Figura 47. En este método se supone que la aceleración de la gravedad no cambia a lo largo de distancias similares al tamaño del objeto, de modo que el centro de masa coincide con otro punto conocido como centro de gravedad. En todos los casos que se consideran aquí, no hay diferencia entre centro de masa o centro de gravedad (la diferencia puede aparecer para objetos como la Tierra o la Luna).

La Figura 48 ilustra una situación en la que el centro de masa no necesariamente se encuentra dentro del cuerpo en cuestión, lo que se logra cuando el cuerpo se arquea lo suficiente. El hecho de que el centro de masa quede fuera del cuerpo tiene su aplicación en el salto en alto.

Una técnica de salto en alto, que en la alta competencia está cayendo en desuso, es la de tijera (Figura 49, izquierda). Consiste en saltar pasando primero la pierna derecha por encima de la barrera. En cuanto pasó, se baja rápidamente subiendo al mismo tiempo la pierna izquierda; por este movimiento la técnica recibe el nombre de “tijera.” En la figura, la parábola representa la trayectoria del centro de masa. El movimiento del centro de masa del atleta es igual al movimiento de un proyec-



48. La prolongación de la cuerda de la que cuelga la acróbata en primer plano pasa por detrás de su espalda, de modo que su centro de masa podría estar fuera de su cuerpo.



49. Salto en alto, técnica tijera (izquierda) y técnica Fosbury Flop (derecha). La parábola indica, en ambos casos, la trayectoria del centro de masa.

til que se describió en la sección anterior. En este caso, la altura máxima de la parábola dependerá de la velocidad inicial con la que el atleta logra despegarse del piso. Suponiendo que ha logrado un entrenamiento óptimo y que ya no puede modificar esa velocidad de despegue, todavía queda un truco para desplazar la barrera unos centímetros más arriba y lograr pasar sin derribarla. El truco consiste en modificar la posición del cuerpo de modo tal que el centro de masa quede fuera. El atleta pasaría sobre la barrera pero el centro de masa no. Parece algo imposible de lograr. Sin embargo, desde los Juegos Olímpicos de 1968 se ha difundido el uso de una técnica de salto conocida como Fosbury Flop que permite a un atleta pasar sobre una barrera aunque su centro de masa no lo haga. Es necesario, por supuesto, arquear bastante el cuerpo, como se muestra en la Figura 49 (derecha).

Luego de cuarenta años, todavía se recuerda con admiración el impacto que produjo la innovación de Fosbury. Un ejemplo es el artículo publicado por S. Seguro en el diario *El País*, de Madrid, el 12/3/2007 (tomado de de Ambrosio 2009):

México 68 fue la madre de todos los Juegos, pero entre tanta maravilla sólo una cabe asociar al valor de la invención. Todas las grandes marcas de México fueron superadas tarde o temprano. Sin embargo, nadie ha logrado superar el modelo que instauró Dick Fosbury en el salto de altura. Aquello sí que fue memorable por novedoso, sorprendente y casi irreal. (...) Lo que en principio pareció una broma, se convirtió en una agitación desbordante: los espectadores coreaban con olés cada éxito de Fosbury y los jueces dudaban de la validez de una técnica que les resultaba desconocida. Tantos años de esforzado rodillo ventral, de potentes saltadores girando su pecho y sus piernas alrededor del listón, y de repente aparece un desgarrado americano que se eleva como una pluma, de espaldas a su objetivo y luego vuela como un planeador sobre la vara, que no cae ante el asombro de todos.

¡Cómo no celebrar aquel juego mágico de Fosbury, su desdén por las normas establecidas, su atrevimiento para enfrentarse en solitario a un desafío que parecía imposible, su grandeza para anticipar una técnica que poco después se convertiría en incontestable y su entereza para imponerse en el momento cumbre de unos Juegos memorables! ¡Cómo olvidar que la magia existe y sus efectos son perdurables!

En el salto en largo ocurre una situación similar a la que se tiene en el salto en alto. Cuando se alcanza la máxima velocidad de despegue del piso, ya no se puede modificar la parábola que marca la trayectoria del centro de masa. Pero se puede modificar la postura del cuerpo, estirando los brazos y las piernas hacia adelante, para lograr que el punto de contacto con el suelo se encuentre lo más adelante posible, como se ve en la Figura 50.



50. Salto en largo. Figura ática roja, ca. 510-500 a. de C.

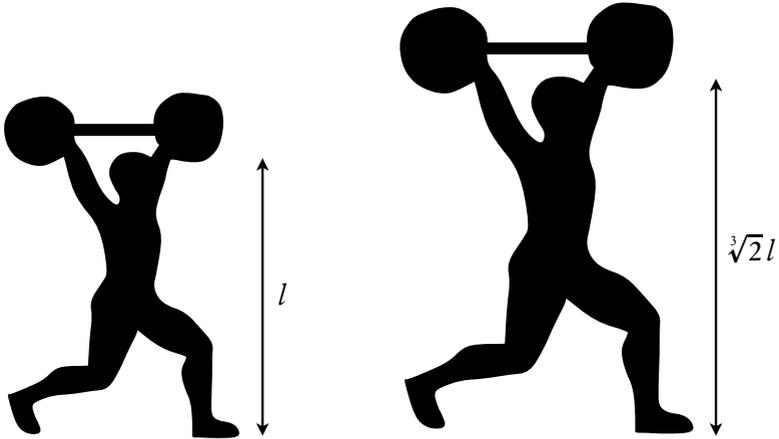
Se puede apreciar otro detalle interesante. El atleta sostiene en sus manos un par de objetos llamados *halteres*. Se trataba de pesas de plomo o piedra con forma de tubo de teléfono que se sostenían al frente en el momento del despegue. Durante el descenso, los *halteres* eran arrojados con fuerza hacia atrás para

impulsar algo más el cuerpo hacia adelante. Tanto en el momento del despegue como en el uso de los *halteres*, el atleta busca propulsarse hacia adelante utilizando la tercera ley de Newton. Esta ley física, también conocida como ley de acción y reacción, dice que cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro cuerpo, este último ejerce una fuerza igual y de sentido contrario sobre el primero. Cuando el atleta salta, aplica una fuerza hacia atrás sobre el piso, y, al mismo tiempo, el piso ejerce una fuerza hacia adelante que impulsa al atleta. Mientras está en el aire hace lo mismo con los *halteres*; les aplica una fuerza arrojándolos hacia atrás y los *halteres* producen una fuerza sobre el atleta hacia adelante. En la práctica resulta que el uso de *halteres* no es de mucha utilidad para saltar más lejos, porque aunque impulsan al atleta un poco más hacia adelante, también representan una carga adicional que reduce un poco la velocidad en el momento del despegue.

Levantamiento de pesas

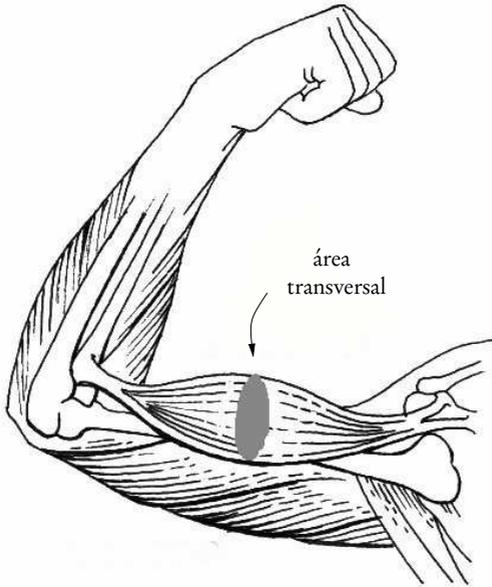
En la Figura 51, el levantador de pesas de la derecha pesa el doble que el de la izquierda. Considerando que el volumen del cuerpo es proporcional a su peso, el de la derecha también tendrá el doble de volumen. En particular, sus músculos tendrán el doble de volumen. Pero la fuerza que realizan los músculos no es proporcional al volumen sino al área transversal (Figura 52). A su vez, el área transversal de un músculo es proporcional al número de fibras musculares que pueden entrar en acción.

Para saber cuánto peso puede levantar el levantador de la derecha con respecto al de la izquierda hay que preguntarse cómo aumenta el área transversal de sus músculos cuando se duplica el volumen. Primero analicemos cómo cambia una longitud característica como la altura. Si en lugar de una persona se tratara de un cubo de lado l comparado con otro de lado L que tiene el doble de volumen, es sencillo encontrar la relación



51. Levantador de pesas. El de la derecha pesa el doble que el de la izquierda. ¿Levanta el doble de peso?

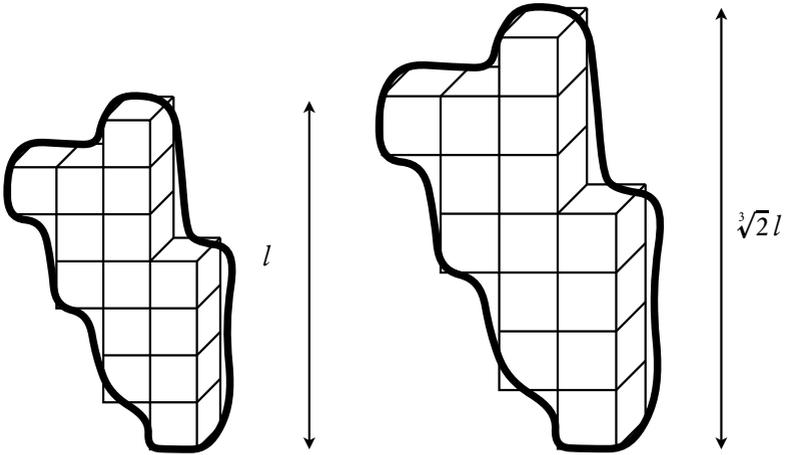
$L^3 = 2l^3$ y, por lo tanto, $L = \sqrt[3]{2}l$. Es posible demostrar que para un cuerpo de cualquier forma, cuando se duplica su volumen, cualquier distancia cambia en un factor igual a $\sqrt[3]{2} \approx 1,26$. (En realidad, existen formas en extremo complejas e intrincadas, conocidas como fractales, para las que no se cumple esta relación.) La Figura 53 ayuda a comprender este resultado general. La curva gruesa muestra el contorno de un cuerpo de cualquier forma. Los cubos se acomodan de modo que llenan el volumen del objeto. El volumen que ocupan los cubos es aproximadamente igual al volumen del objeto. Si consideramos cubos cada vez más pequeños, podemos hacer que el volumen que ocupan los cubos sea tan parecido como queramos al volumen del objeto. Ahora duplicamos el volumen de cada cubo; sus aristas cambian en un factor $\sqrt[3]{2}$ y el volumen del objeto también se duplica. La altura l del objeto es la suma de las alturas de cada cubo, y si cada cubo cambió su altura en un factor $\sqrt[3]{2}$, entonces la nueva altura se



52. El óvalo indica el área transversal del músculo bíceps. La fuerza que puede realizar depende del tamaño de esta área.

rá $L = \sqrt[3]{2}l$. Lo mismo sucederá para cualquier distancia entre distintos puntos del objeto.

¿Qué sucede con las áreas? Cuando se duplica su volumen, el área de la cara de un cubo pasa de l^2 a $L^2 = (\sqrt[3]{2})^2 l^2$. El factor de cambio del área es, por lo tanto, igual a $(\sqrt[3]{2})^2 \simeq 1,6$. Siguiendo argumentos similares a los anteriores, se puede ver que cualquier área dentro de un objeto de forma arbitraria cambiará en un factor 1,6 cuando se duplica el volumen. El área transversal de los músculos del levantador de pesas de la Figura 51 aumenta en un factor 1,6 y, por lo tanto, también su fuerza. Un



53. El volumen de un objeto de forma arbitraria, cuyo contorno se marca con la curva gruesa, es cubierto con cubos. Al duplicar el volumen, la altura l cambia en un factor $\sqrt[3]{2}$.

análisis similar se realiza en la página 74 donde se necesita calcular cómo varía el área y la longitud de un pavo al duplicar su volumen para saber cuánto tiempo se lo debe cocinar.

Una forma un poco más general de analizar este problema es la siguiente. Consideremos dos levantadores que pesan p y P , donde P no necesariamente es el doble de p , y que pueden hacer una fuerza f y F respectivamente. Sabemos que la fuerza es proporcional al área: $f \propto l^2$ (notar que podemos usar la altura l en lugar de, por ejemplo, el diámetro del músculo, porque todas las distancias mantienen una proporción constante). La misma relación también puede escribirse como

$$\frac{F}{f} = \frac{L^2}{l^2}.$$

Por otro lado, como el peso es proporcional al volumen, tene-

mos

$$\frac{P}{p} = \frac{L^3}{l^3}.$$

Tomando la raíz cúbica de esta ecuación y elevando al cuadrado, podemos comparar con la ecuación anterior y obtener

$$\frac{F}{f} = \left(\sqrt[3]{\frac{P}{p}} \right)^2.$$

En particular, si $P = 2p$, aparece el factor $(\sqrt[3]{2})^2$ que se obtuvo antes. Las estadísticas de levantamiento de pesas comprueban que se cumple esta relación entre peso del deportista y fuerza máxima que puede realizar.

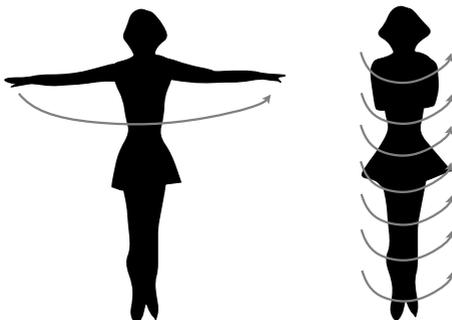
Inercia y rotación

Si un objeto se deja libre, sin ninguna influencia externa, permanece en reposo, quieto, o continúa con la velocidad que tenía, en línea recta. Se trata de una ley física fundamental conocida como la primera ley de Newton o principio de inercia. Cualquier modificación que se quiera realizar sobre el movimiento del objeto, requiere la aplicación de una fuerza. Solo forzándolo, el objeto cambia su movimiento, y esta resistencia a cambiar se conoce como *inercia*. Cuando un objeto se mueve sin influencias externas, la cantidad de movimiento, que se calcula multiplicando la masa por la velocidad, se mantiene constante, no cambia. Lo mismo sucede para un conjunto de objetos sin influencias externas, en este caso se mantiene constante la suma de las cantidades de movimiento de los objetos.

Algo similar sucede con el movimiento de rotación. Si una rueda que gira está libre de cualquier influencia externa, seguirá rotando. Sólo aplicando una fuerza podremos frenarla o

hacer que gire más rápido. En la práctica, la rueda, en algún momento, se detiene debido a la fuerza de fricción que produce el eje. Cuanto más se reduzca esta fricción, por ejemplo aceitando el eje, más tiempo girará la rueda sin detenerse. Como en el caso del movimiento lineal, para el movimiento de rotación también hay una cantidad importante que se mantiene constante mientras no se aplique una fuerza, aunque es algo más difícil de calcular. Es la cantidad de movimiento rotacional que depende de la frecuencia de rotación (medida, por ejemplo, en revoluciones por minuto) y de la forma en que la masa está distribuida en torno al eje. No contribuye de la misma manera a la cantidad de movimiento rotacional una parte de la rueda que se encuentre cerca del eje que otra parte que se encuentre más alejada, una razón es que la primera se mueve más lentamente que la segunda. Consideremos una rueda cuya masa se encuentra mayormente distribuida en un círculo de radio R . Otra rueda, de radio r menor que R , gira con la misma frecuencia que la anterior, pero tendrá una cantidad de movimiento rotacional menor porque, al estar las partes de la rueda más cerca del eje, se moverán a una velocidad menor. Si la rueda más chica debe tener la misma cantidad de movimiento que la más grande, entonces tiene que girar con mayor frecuencia.

Podemos aplicar estas ideas al patinaje sobre hielo. Un movimiento típico es el que se representa en la Figura 54. Se comienza un giro con los brazos extendidos. Luego se recogen los brazos y la rotación aumenta visiblemente. La explicación requiere del uso del concepto de cantidad de movimiento rotacional. Esta cantidad se mantiene aproximadamente constante dado que la fricción de los patines en el piso es pequeña. La posición con los brazos extendidos es equivalente a la de la rueda de radio grande. Cuando los brazos se recogen es como si la rueda se hubiera transformado en una de radio pequeño. Para conservar la cantidad de movimiento angular, la frecuencia de rotación debe aumentar.



54. En patinaje sobre hielo, cuando se encogen los brazos aumenta la frecuencia de rotación.



55. En salto o clavado, se recogen las rodillas para girar más rápidamente, y se extiende el cuerpo para minimizar la rotación.

En clavado o salto, o en gimnasia artística, también se utiliza el truco de modificar la posición del cuerpo para lograr girar con mayor o menor rapidez. Las fotografías de la Figura 55 ilustran dos posiciones que permiten maximizar o minimizar la frecuencia de rotación en clavado. Otro ejemplo es el de las barras paralelas en gimnasia artística. Cuando, en el salto final, el gimnasta sale despedido de las barras, pliega sus rodillas contra el cuerpo para girar con rapidez antes de caer al suelo.

Equilibrio en la bicicleta

¿Por qué es fácil mantener el equilibrio en una bicicleta andando y no en una bicicleta quieta? El movimiento de rotación de las ruedas hace pensar que la conservación del movimiento angular podría ser un factor importante para mantener el equilibrio. Pero no lo es. En un experimento en el que se agregan ruedas de radio menor y que giran en sentido opuesto a las de la bicicleta para anular el movimiento angular, se pudo comprobar que no hay mayor dificultad para mantener el equilibrio. La razón es otra y tiene que ver con un detalle de diseño que pasa mayormente desapercibido: la posición del eje y del punto de contacto en el piso de la rueda delantera con respecto a la línea que corresponde al eje del volante (ver Figura 56).

La disposición usual tiene el efecto de hacer que la rueda delantera tienda a mantenerse alineada con la bicicleta, lo que permite andar sin manos a algunos ciclistas audaces. Tiene otro efecto más: si la bicicleta comienza a perder su equilibrio y se inclina hacia un costado, la rueda delantera tiende a moverse de modo que la bicicleta doble hacia ese mismo costado. Al doblar, surge una fuerza centrífuga que tiende a restablecer el equilibrio. Se trata de un mecanismo automático de realimentación negativa: cuando la bicicleta se inclina hacia un costado automáticamente tiende a doblar y recuperar el equilibrio, cancelando esa inclinación inicial. Para que aparezca la fuerza centrífuga que

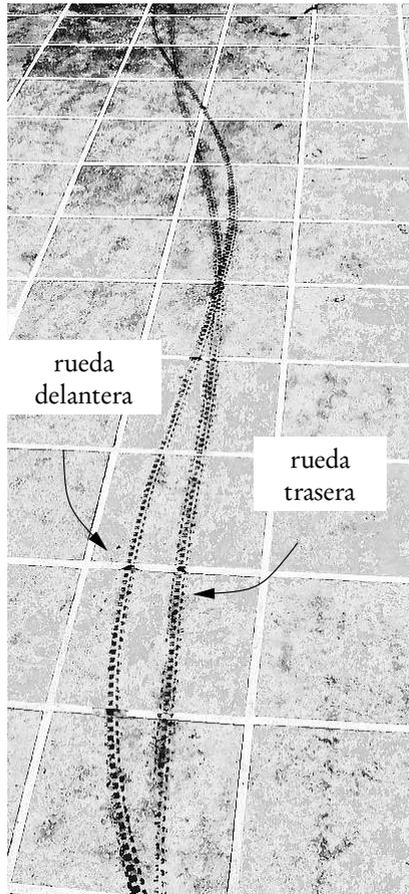


56. Bicicleta de dama, 1900. La línea punteada indica el eje de rotación del volante.

restablece el equilibrio es necesario que la bicicleta se esté desplazando a cierta velocidad, no hay fuerza centrífuga si está quieta. Este mecanismo puede observarse en forma indirecta en las huellas que dejan las ruedas. La rueda delantera deja una huella parecida a una oscilación. Cada oscilación corresponde a pequeñas inclinaciones hacia los costados corregidas con pequeños giros, ver Figura 57.

“La pelota no dobla”

En 1996, la selección argentina de fútbol jugó un partido contra la de Ecuador por las eliminatorias para el mundial de Francia. El partido fue en Quito, a 2850 metros de altura. La selección argentina perdió 2 a 0. En conferencia de prensa, el entonces director técnico de la selección, D. Passarella, dijo “la pelota no dobla,” en un intento, para algunos ineficaz, de explicar el resultado. La frase se hizo famosa y todavía hoy es recordada. A los que no les interesa el fútbol y nunca vieron una comba, les sorprende que alguien pueda pensar que la pelota doble en

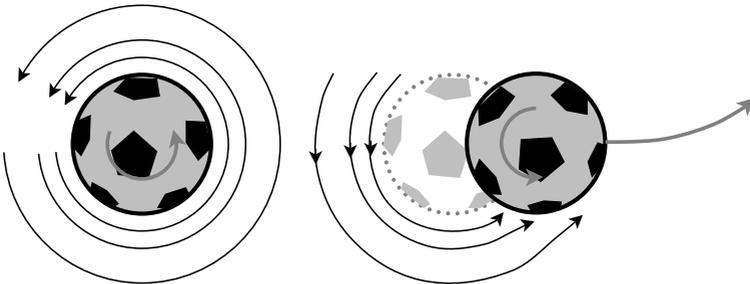


57. Huellas de las ruedas delantera y trasera de una bicicleta. Las oscilaciones de la huella de la rueda delantera manifiestan el mecanismo de recuperación del equilibrio. La amplitud de las oscilaciones se ha exagerado para mostrarla con mayor claridad; es, en general, más pequeña.

el aire. A los que saben que las combas son más o menos frecuentes, les sorprende que no lo sean en la altura de Quito. En cualquier caso, la frase puede producir cierta sorpresa y quizá ésta sea la razón por la que todavía perdura. El técnico tenía razón. En la altura las combas son menos marcadas que a nivel del mar. Como se verá más adelante, la causa es que a mayor altura el aire es menos denso. La disminución de la densidad del aire produce otros efectos. Los pases por elevación llegan más lejos y, sumando el hecho de que los jugadores se cansan más, se hace más difícil la realización de jugadas de equipo.

¿Por qué se produce la comba en condiciones normales? Hay que analizar cómo el aire circundante afecta el movimiento de la pelota. El problema no es simple. Para resolverlo con precisión se utilizan ecuaciones complejas que, en la mayoría de los casos, sólo pueden resolverse con computadoras. La intención aquí es, en cambio, presentar una explicación simple e intuitiva, útil para comprender cómo es posible que la pelota realice una comba. Pero también es importante tener presente que tal explicación es necesariamente incompleta, pues no se tendrá en cuenta, por ejemplo, el efecto de la turbulencia.

Consideremos una pelota que gira sobre sí misma sin desplazarse. La fricción entre la superficie de la pelota y el aire hace que el aire también gire alrededor, como se muestra en la Figura 58, a la izquierda. Cuando la pelota, además de girar, se desplaza, como se ve a la derecha de la figura, el flujo de aire hacia arriba se obstruye parcialmente por el movimiento de la pelota. En cambio, el flujo de aire hacia abajo no tiene obstáculos. Entonces, a medida que la pelota se desplaza girando, hay un flujo neto de aire hacia abajo. Por la tercera ley de Newton, o ley de acción y reacción, si la pelota, al moverse, produce una fuerza hacia abajo sobre el aire, el aire produce una fuerza hacia arriba sobre la pelota. Ésta es la fuerza que desvía su trayectoria y produce la comba. En zonas altas, donde el aire es menos denso, los flujos de aire mencionados serán menores y la comba que



58. Izquierda: la pelota gira sin desplazarse y, debido a la fricción, el aire alrededor también gira. Derecha: la pelota gira y se desplaza, el flujo de aire hacia arriba se ve obstaculizado por el movimiento de la pelota; hay un flujo neto de aire hacia abajo.

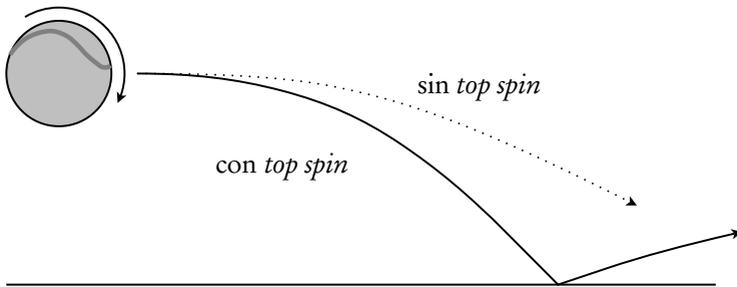
se le pueda dar a la pelota también.

Además de la altura, hay otro factor que influye en la realización de una comba: la humedad. Para que se produzca la comba se le debe pegar a la pelota con *efecto*, esto significa que el golpe no debe ser en el centro de la pelota sino a un costado de modo que la pelota salga rotando sobre sí misma. Cuando se pega de esta manera, la fuerza de fricción entre el botín y la superficie de la pelota es la que produce la rotación. Y esta fuerza de fricción depende de la humedad. Cuando hay humedad se forma, sobre la superficie de la pelota, una fina capa de agua que funciona como un lubricante reduciendo la fricción. Por lo tanto, es más difícil hacer una buena comba un día de humedad que un día seco.

La fuerza perpendicular a la trayectoria de la pelota, que hace que se desvíe y forme la comba, se conoce como efecto Magnus, por el físico alemán Heinrich Magnus que lo describió en 1852. Existe una explicación diferente, y bastante popular, de este efecto. Utiliza el principio de Bernoulli, que dice que la presión en un fluido es mayor en las regiones donde su velocidad es

menor. El principio de Bernoulli también se utiliza para explicar la fuerza de sustentación en las alas de un avión. Pero esta explicación tiene algunos inconvenientes. La referencia de Steiger es útil para los que quieran profundizar en este tema.

El efecto Magnus se observa, y se utiliza, en otros deportes además del fútbol. En tenis se usa con frecuencia el golpe con *top spin*, que consiste en pegarle a la pelota con un movimiento de la raqueta en diagonal, hacia adelante y de abajo hacia arriba,



59. Comparación entre un golpe de tenis con y sin *top spin*. La pelota rota en el sentido de las agujas del reloj.

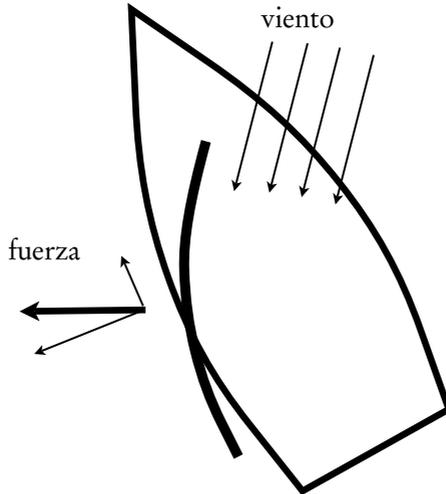
de modo que la pelota tenga el sentido de rotación que tendría si rodara por el piso. A diferencia de lo que sucede en la comba de fútbol, donde el eje de rotación de la pelota es vertical, la pelota de tenis tiene el eje de rotación horizontal. Al golpear con *top spin*, el efecto Magnus hace que la pelota baje más rápidamente, como se ve en la Figura 59, permitiendo dar golpes más fuertes sin que la pelota salga fuera de la cancha. Además, al chocar con el suelo, la pelota rebota con mayor velocidad y a un ángulo menor, lo que dificulta la devolución. De la misma forma se utiliza este efecto en ping-pong. En baseball, algunas veces el lanzador agrega rotación a la pelota para que haga una comba y dificulte el golpe al bateador. En golf, se utiliza el golpe con *backspin*, que

consiste en pegar a la pelota un poco por debajo de su centro de masa para que adquiera una rotación opuesta a la que se obtiene con *top spin*. El objeto de este golpe es lograr que la pelota se eleve más y tenga mayor alcance.

La fuerza es un vector

Que la fuerza sea un vector significa que se trata de una cantidad física que, además de tener cierta magnitud, también tiene una orientación espacial. Por ejemplo, el peso de nuestro cuerpo es una fuerza que está dirigida hacia abajo, contra el piso. Este tipo de cantidades se representa gráficamente con flechas, llamadas vectores. La longitud de la flecha representa la magnitud de la fuerza, y la orientación de la flecha indica en qué dirección y sentido se aplica esa fuerza.

La Figura 60 muestra el diagrama de un velero visto desde arriba donde se ha indicado, con una flecha de trazo grueso, la fuerza que produce el viento sobre la vela. Una característica importante de los vectores es que se pueden separar, o descomponer, en dos flechas perpendiculares entre sí, llamadas componentes, que producen el mismo efecto que el vector original. (Si la descomposición se hace en tres dimensiones, entonces se necesitan tres flechas perpendiculares.) Esta separación se muestra en la figura con dos flechas de trazo más fino, cada una de ellas se puede considerar como la sombra, o la proyección, del vector original sobre las dos direcciones perpendiculares. Las direcciones elegidas son la línea a lo largo de la cual se mueve el velero y su perpendicular. Por lo tanto, una de las componentes de la fuerza ayuda a que el velero avance mientras la otra tiende a desplazarlo a un costado. El desplazamiento al costado, o deriva, se anula casi por completo con la ayuda de una pieza fundamental en un velero: la quilla. La quilla es una placa plana que se ubica en la parte inferior del casco con orientación popa-proa. La Figura 61 es un esquema del velero visto desde atrás y muestra la



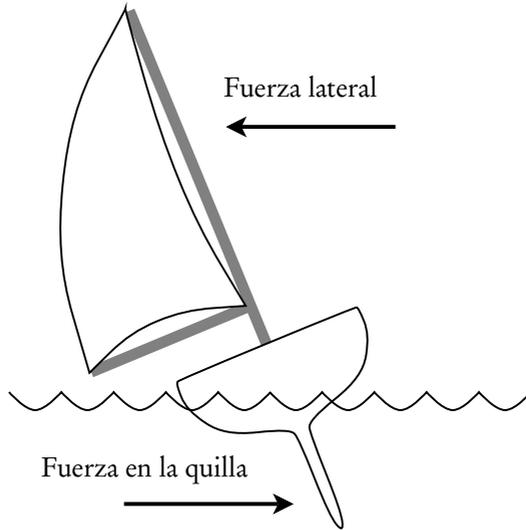
60. Vista superior de un velero. El viento incide de frente con cierto ángulo y produce una fuerza sobre la vela indicada con la flecha de trazo grueso.

fuerza sobre la quilla y la fuerza lateral sobre la vela. La fuerza sobre la quilla frena el desplazamiento producido por la fuerza lateral, y la combinación de ambas produce la inclinación del velero.

Con el desplazamiento lateral, o deriva, casi anulado, queda la componente de la fuerza que hace avanzar al velero. De esta forma es posible navegar con el viento casi de frente, a cierto ángulo, como se muestra en la Figura 60, modalidad llamada navegación en ceñida.

Competencia de remo

¿Qué sucede cuando, en una competencia de remo, deben enfrentarse dos remeros de pesos diferentes? Suponemos

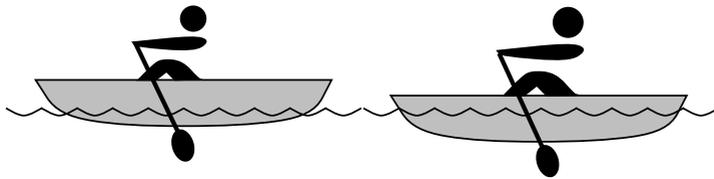


61. Velero visto desde atrás. Las flechas indican la fuerza lateral y la fuerza sobre la quilla.

que ambos han logrado un entrenamiento óptimo. A primera vista, el de mayor peso parece tener ventaja pues tiene más masa muscular. Pero el de menor peso tiene una ventaja que pasa más desapercibida: su bote se hunde menos, tiene menos superficie en contacto con el agua y, por lo tanto, ofrece menos resistencia al desplazamiento.

Es posible determinar si alguna de estas ventajas es mayor que la otra utilizando argumentos de escala similares a los utilizados en la sección sobre levantamiento de pesas.

Supongamos que P es la potencia (energía por unidad de tiempo) que puede producir el remero y que R es la fuerza de resistencia del agua al movimiento del bote. En un régimen de velocidad v constante, la potencia producida P es igual a la potencia disipada. Y la potencia disipada es igual a la fuerza de



62. Dos remeros de distinto peso en competencia. El de mayor peso tiene más fuerza, pero el bote del de menor peso se hunde menos y tiene menor resistencia para desplazarse en el agua.

fricción o resistencia multiplicada por la velocidad: Rv . Para llegar a este resultado se utiliza que la energía disipada a lo largo de una distancia recorrida es igual a la fuerza de resistencia por esa distancia. Evitando los detalles de definiciones más rigurosas, la idea intuitiva es: potencia = energía/tiempo = fuerza \times distancia/tiempo = fuerza \times velocidad. En resumen, en un régimen a velocidad constante, la potencia producida es igual a la disipada, o sea, $P = Rv$.

Vamos a hacer una estimación de la velocidad $v = P/R$. Lo deseable, por supuesto, es que sea lo mayor posible, o sea, que la potencia sea máxima y la resistencia, que está dividiendo, mínima. Si v aumenta al aumentar la masa m del remero, entonces el de mayor masa (o peso) tiene ventaja, y al revés si disminuye. Lo que determina, entonces, cuál de los dos tiene ventaja es encontrar cómo depende P/R de la masa m .

La potencia aeróbica P es proporcional a la capacidad de refrigerar el cuerpo para mantener su temperatura, que es proporcional a la superficie del cuerpo L^2 , donde L es alguna longitud característica, como la altura del remero (recordemos que, al hacer comparaciones entre deportistas de distinto peso o tamaño, estamos suponiendo que mantienen las proporciones de sus miembros). A su vez, la longitud L es igual a la raíz cúbica del

volumen, y el volumen es proporcional a la masa, por lo tanto $L \propto \sqrt[3]{m}$. Usando este resultado para la potencia P obtenemos

$$P \propto (\sqrt[3]{m})^2.$$

Por otro lado, supondremos que la resistencia R es proporcional a la superficie del bote que está en contacto con el agua, esta suposición es válida para los delgados e hidrodinámicos botes de competición. La superficie está relacionada con el volumen sumergido V ; el área sumergida es proporcional a la raíz cúbica del volumen (con unidad de longitud) elevada al cuadrado (unidad de área): $R \propto (\sqrt[3]{V})^2$. Finalmente, si suponemos que el bote es muy liviano, podemos considerar que el volumen sumergido es proporcional a la masa m del remero, por lo tanto

$$R \propto (\sqrt[3]{m})^2.$$

Combinando los resultados obtenidos para P y R sale que la velocidad $v = P/R$ no depende de la masa m . La conclusión es que un remero con mayor o menor peso (o masa) no tiene ventaja pues la velocidad no cambia al variar m . Lo que gana en fuerza el remero más pesado lo pierde por la mayor resistencia del agua.

Esta conclusión, sin embargo, debe analizarse todavía con cuidado. Es cierto que existe una compensación de efectos: mayor masa muscular produce también mayor resistencia del agua, y éste es el principal resultado de los cálculos anteriores. Pero esta compensación es exacta sólo si podemos despreciar, como se ha hecho, el peso del bote con respecto al peso del remero. Para ser rigurosos habría que considerar que el volumen sumergido es proporcional a la masa del remero *más* la masa del bote. Si se hacen las cuentas se encuentra que, en este caso, el que tiene ventaja es el remero de peso mayor. En las competencias existen categorías en función del peso de los remeros. Pero la ventaja es pequeña porque los botes de competición son muy livianos. La

diferencia de velocidad entre remeros livianos y pesados es solo de alrededor del 1%. La diferencia es más importante cuando se trata de botes con timonel, porque en este caso al peso del bote hay que sumarle el del timonel.

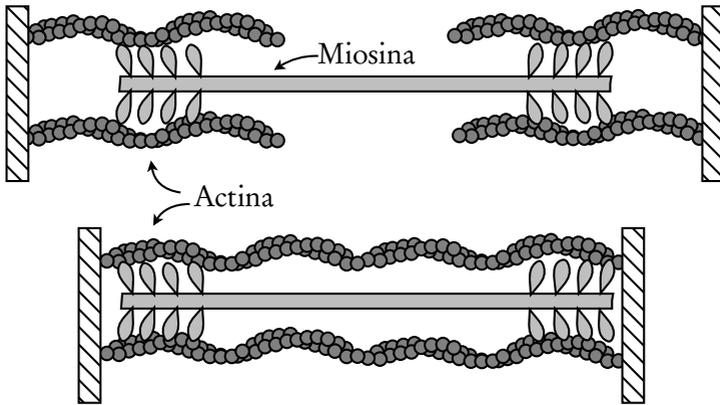
Contracción muscular

En física se ha logrado una gran simplificación con respecto a los tipos de fuerzas que existen en la naturaleza. Se sabe que cualquier fuerza tiene que pertenecer a alguno de los tipos siguientes: electromagnética, nuclear fuerte, nuclear débil o gravitacional. ¿En qué tipo encaja la fuerza muscular? Para comprenderlo es necesario analizar primero, aunque sea en forma simplificada, cómo funciona un músculo.

Las células de los músculos (o fibras musculares o mioцитos) contienen filamentos capaces de contraerse moviéndose unos respecto a otros y modificando el tamaño de la célula. Hay tres tipos de músculo: estriado o esquelético, liso o visceral y cardíaco. Los músculos utilizados de manera voluntaria para realizar deportes son los esqueléticos.

Dentro de la fibra muscular existen varios filamentos de la proteína actina. Entre la actina hay filamentos de otra proteína llamada miosina, como se muestra en la Figura 63. La miosina (en color gris claro en la figura) tiene en sus extremos unos lóbulos o cabezas.

Cuando un impulso nervioso llega hasta la fibra muscular, luego de un proceso complejo se libera calcio dentro de la célula. El calcio desbloquea sitios en la actina, llamados sitios de ligadura, en los que la cabeza de miosina se adhiere. En el momento en que se adhiere también se produce un pequeño desplazamiento de la miosina respecto de la actina, contrayendo la fibra. Es necesario repetir muchas veces este paso para lograr una contracción apreciable. Para ello, se vuelve a separar la miosina de la actina. La energía para producir la separación y repetir



63. Contracción de fibra muscular. Los filamentos de miosina (gris claro) se desplazan entre los de actina (gris oscuro).

el proceso es entregada por la molécula de ATP, o adenosín trifosfato, presente dentro de la célula. El paso se repite mientras haya ATP disponible y mientras haya calcio. En la parte inferior de la Figura 63 se ha alcanzado la máxima contracción.

Las fuerzas que actúan en todo este proceso son enlaces químicos entre calcio, miosina, actina y ATP (y, en realidad, otras moléculas que no se han mencionado para simplificar la explicación). El tipo de interacción presente en los enlaces químicos es el electromagnético. Millones de años de evolución han permitido el desarrollo de un mecanismo extraordinario, complejo y eficiente para que los seres del reino animal podamos usar a voluntad una fuerza básica de la naturaleza: la electromagnética. Esta fuerza, que corresponde a la interacción entre partículas cargadas, tiene una descripción matemática simple, aunque no tanto como para reproducirla aquí; se trata de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo. Esa simplicidad está enmascarada por el complejo mecanismo de las fibras musculares que

hace que la fuerza muscular parezca algo por completo distinto de las fuerzas de la naturaleza conocidas.

FÍSICA DE LA MÚSICA

No es sencillo definir con precisión qué es la música. La definición ha variado con la historia, las regiones o, incluso, dentro de las sociedades en un mismo momento de la historia. Una definición simple es considerar a la música como sonido organizado, que posee ritmo y combinación de tonos, y que produce placer. Se trataría de lo opuesto a ruido. El ruido es un sonido fuerte o chirriante, caótico, que, de algún modo, resulta desagradable. Esta definición tiene el defecto de ser subjetiva. Lo que produce placer a una persona puede ser desagradable para otra, y lo que es música para una persona puede no serlo para otra. Una definición algo más objetiva, y más amplia, es considerar que la música es un sonido organizado creado con *intención*. Tiene un propósito, que no necesariamente es producir placer. Por ejemplo, la música de una película de suspenso tiene el propósito de producir tensión.

Además de qué es la música, otra pregunta interesante, y también difícil de responder, es ¿por qué hay música? La respuesta a esta pregunta está fuera de los límites de la física, sin embargo, una de las mejores respuestas ha sido formulada por una persona conocida para todos aquellos que hayan estudiado física en Argentina: Juan Roederer. Roederer escribió *Mecánica Elemental*, uno de los libros de física básica más usados en carreras de ciencias o ingeniería desde 1963, con 30 reimpressiones de

la editorial Eudeba, la última de 2002. Nació en Italia y desde joven vivió en Argentina, donde recibió su formación como físico; en la actualidad vive en Alaska. En 1973 escribió otro libro titulado *The Physics and Psychophysics of Music*, la última edición revisada y actualizada es de 2008. En este libro, Roederer dice que la música es el producto de la evolución del lenguaje humano, que requiere la capacidad de procesamiento complejo del sonido para el reconocimiento de voces y la comprensión del habla. El gusto por la música es un estímulo, instintivo e innato, para el entrenamiento del sentido acústico desde el momento del nacimiento con el objeto de adquirir la capacidad del habla. Se trataría de una inclinación similar al gusto por el juego, que es una motivación para desarrollar habilidades motoras. En palabras de Roederer:

¿Por qué los seres humanos responden emocionalmente a la música, por qué la música puede provocar chorros de endorfinas que estimulan los centros de placer del cerebro humano, y por qué estamos motivados para crear música? En otras palabras, ¿cuál es, o fue, el valor de la música para la supervivencia que condujo al amor por la música en el curso de la evolución humana?...

La motivación para escuchar música bien podría ser el resultado de un impulso innato, con la recompensa límbica consiguiente, para entrenar a una edad temprana en las operaciones de análisis auditivo altamente sofisticadas necesarias para la percepción del habla y el lenguaje —no muy diferente del juego de un animal que es la manifestación de una motivación innata para desarrollar o mejorar movimientos hábiles necesarios para la caza y la defensa. Los bebés que nacían sin estímulo para escuchar con atención, o nacidos de madres sin estímulo para vocalizar sonidos musicales simples durante el lazo social temprano madre-hijo, habrían tenido una desventaja de comunicación decisiva para la supervivencia en el medio

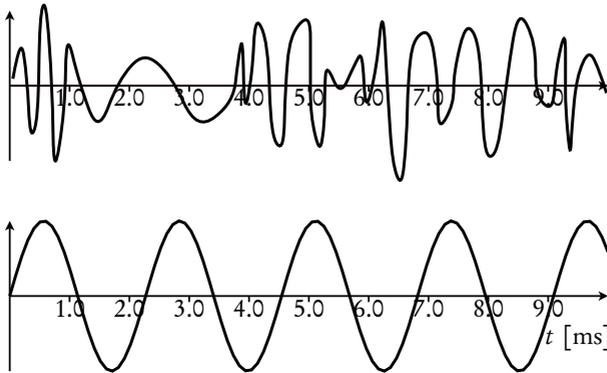
ambiente humano temprano. ¿La universalidad de las vocalizaciones de las primeras palabras de los bebés y de las canciones de cuna de las madres en todo el mundo no es un argumento convincente? La percepción del lenguaje se desarrolla espontáneamente, sin esfuerzo y lo mismo ocurre con la percepción de la forma musical, prácticamente al mismo tiempo. Experimentos asombrosos, que se llevan a cabo en la actualidad, con bebés de meses de edad están proporcionando argumentos de apoyo en favor de una predisposición innata para el procesamiento de mensajes musicales.

En el resto de este capítulo se presentarán aspectos físicos de la música o, en forma más general, del sonido. Como sucede en otros capítulos de este libro, también será necesario cruzar límites, siempre difusos, entre disciplinas científicas para tener una comprensión más profunda de algunos temas. Por ejemplo, se explicará en forma resumida la fisiología del oído para comprender por qué somos capaces de distinguir tonos de distinta frecuencia. También se analizará el problema de determinar qué notas utilizar en una escala musical, que es considerado, desde la época de Pitágoras, como un problema de matemática pura.

Representación gráfica del sonido

Una manera de representar una onda de sonido es graficar la presión del aire en un punto del espacio para distintos valores del tiempo.

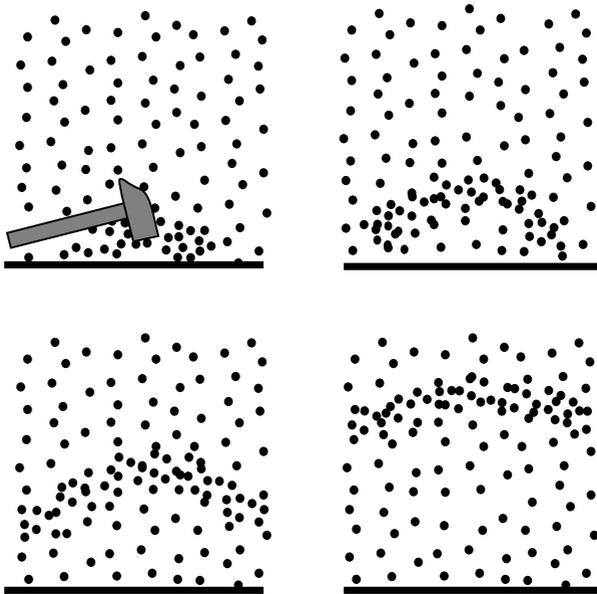
La Figura 64 muestra el aspecto de una onda de sonido que suena como ruido (arriba) y un tono correspondiente a la nota la, o A (abajo). Cada número en el eje horizontal del gráfico representa el tiempo en milisegundos. El eje vertical representa la presión del aire. Suponiendo que la presión atmosférica es de 1013,25 hPa (hectopascuales), entre los extremos superior e inferior de cada una de las curvas dibujadas, la presión varía



64. Gráfico de ondas de sonido. La de arriba es ruido y la de abajo es un tono de frecuencia 440 Hz, correspondiente a la nota la.

aproximadamente entre 1013,24 y 1013,26. Esta pequeña variación de presión corresponde, en realidad, a un sonido bastante fuerte. Una curva con la misma forma se obtendría si, en lugar de presión, se graficara la densidad o el desplazamiento de las moléculas de aire.

La forma más común de visualizar una onda de sonido es la anterior, pero hay otras. La Figura 65 da una idea de lo que sucede a nivel microscópico cuando se produce una onda de sonido golpeando una superficie. Cada punto representa una molécula de aire. La zona más densa, con mayor cantidad de puntos, que se propaga luego del golpe, coincide con la zona donde la presión es mayor. Esta figura podría producir la impresión equivocada de que existe un transporte de partículas en la dirección en la que se propaga la onda. En realidad, las moléculas se desplazan una distancia pequeña produciendo cambios de densidad y presión, pero luego vuelven, en promedio, a su posición inicial. Por lo tanto, el desplazamiento de la onda no produce desplazamiento neto de partículas del aire. Sí produce



65. Cuatro etapas en la propagación de un pulso de sonido producido al golpear una superficie con un martillo.

transporte de energía, que cuando incide en nuestros oídos hace vibrar los tímpanos. El aspecto de un pulso de sonido como el que se produce al golpear una superficie, utilizando la representación gráfica anterior, es como se ve en la Figura 66, donde, por simplicidad, se han eliminado los ejes de coordenadas.

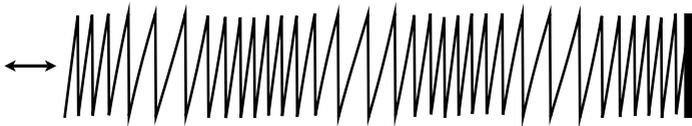


66. Pulso de onda.

El pulso de onda es cualitativamente diferente al tono representado por la onda periódica de la Figura 64. Sin embargo, en los dos casos se trata de una onda, es decir, de una perturbación que se propaga y que transporta energía sin transportar materia.

Cuando se propaga una onda de sonido, las moléculas del aire oscilan a lo largo de la dirección de propagación de la onda. Es lo contrario de lo que sucede con una onda que se propaga a lo largo de una cuerda. En este caso, cada porción de la cuerda se mueve en dirección perpendicular a la cuerda. Esta propiedad se usa para clasificar ondas; se dice que las ondas de sonido son de tipo longitudinal y las ondas sobre una cuerda son de tipo transversal.

Las ondas que se producen al comprimir y estirar un resorte (sin desplazarlo en la dirección perpendicular) son también de tipo longitudinal y sirven como modelo para visualizar lo que sucede con las ondas de sonido, ver Figura 67.



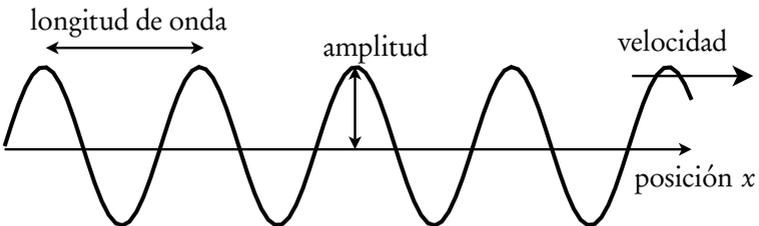
67. Onda longitudinal sobre un resorte. Las espiras se desplazan en la misma dirección de propagación de la onda. Lo mismo sucede con las partículas de aire al propagarse el sonido.

Por lo tanto, al propagarse una onda de sonido se producen oscilaciones longitudinales en la posición de las moléculas de aire. De acuerdo a esta descripción, no es posible la propagación del sonido sin aire. Este hecho no resultaba evidente en el siglo XVII, tampoco en la actualidad para los directores de películas de ciencia ficción en las que se escuchan bien las explosiones que ocurren durante combates en el espacio exterior. En 1650 Atha-

nasius Kircher, jesuita erudito de origen alemán, publicó el libro *Musurgia Universalis*, donde describe un experimento en el que coloca una campana dentro de un recipiente donde se realiza vacío. Kircher concluyó que el aire no era necesario para la propagación del sonido, pues la campana seguía sonando. La bomba de vacío no era eficiente o el sonido se transmitía por otros medios. En 1660 Robert Boyle realizó la primera demostración exitosa de que el sonido requiere de un medio para propagarse. Repitió el experimento de Kircher utilizando una bomba de vacío diseñada por su por entonces asistente Robert Hooke. Pudo ver, dentro del recipiente donde se había hecho vacío, a la campana moviéndose sin producir sonido.

Características básicas de una onda de sonido periódica

En la Figura 68 se ha dibujado una onda periódica como la de la Figura 64 con una diferencia: el eje horizontal representa la posición en el espacio en lugar del tiempo. Se trata ahora de



68. Características de una onda periódica: longitud de onda, amplitud y velocidad.

una representación estática de la onda, en un momento determinado, y hay que imaginar que la forma de la onda se desplaza en el sentido que indica la flecha de la velocidad. La forma dibujada se conoce como onda sinusoidal y es la forma más simple de onda periódica.

Los parámetros que caracterizan a esta onda son la longitud de onda (distancia entre repeticiones de una porción de la onda), la amplitud y la velocidad. La velocidad es igual a la longitud de onda dividida por el período, que es el tiempo que le toma a la onda desplazarse una longitud de onda. Por lo tanto, otro parámetro importante es:

$$\text{período} = \frac{\text{longitud de onda}}{\text{velocidad}}.$$

La velocidad del sonido es de 343 m/s, o 1230 km/h, para aire seco a 20°C.

Uno de los parámetros más importantes desde la perspectiva de la música es la frecuencia. La frecuencia es igual a $1/\text{período}$ e indica la cantidad de longitudes de onda que pasan por un punto por segundo; la unidad de frecuencia es 1/segundo, también llamada Hz (Hertz).

Una octava es el intervalo entre una frecuencia y el doble de esa frecuencia. Por ejemplo, hay una octava entre 440 Hz y 880 Hz; existe una consonancia particular entre notas relacionadas entre sí por un factor 2 y, por esta razón, reciben el mismo nombre. En este caso, ambas frecuencias corresponden a la nota la.

El oído humano puede detectar un gran rango de frecuencias, aproximadamente entre 20 y 20000 Hz. Este rango corresponde a alrededor de 10 octavas (si 20 Hz se multiplica 10 veces por 2 se obtiene 20480 Hz). Al envejecer, los sonidos de frecuencias bajas se siguen escuchando bien, pero se pierde sensibilidad a los sonidos con frecuencias altas. Los sonidos de las letras están formados por mezclas de frecuencias altas y bajas. Los sonidos producidos, por ejemplo, por las consonantes “pe”, “ka” y “te” contienen frecuencias altas que, al no percibirse, hace que esos sonidos se oigan similares.

Existe una relación directa entre frecuencia y longitud de onda:

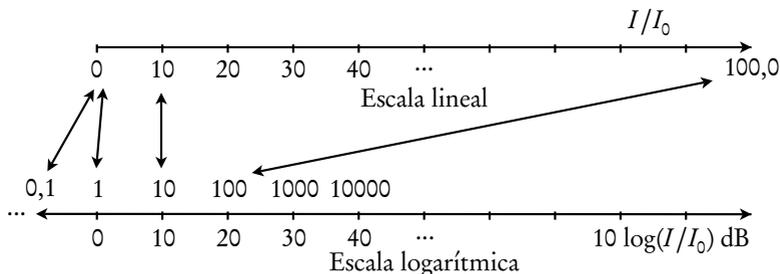
$$\text{frecuencia} = \frac{\text{velocidad}}{\text{longitud de onda}};$$

como la velocidad del sonido es constante, longitudes de onda cortas corresponden a frecuencias altas (sonido agudo), y longitudes de onda largas corresponden a frecuencias bajas (sonido grave).

La intensidad del sonido está relacionada con la amplitud (Figura 68); es proporcional a la amplitud al cuadrado. La intensidad es energía por unidad de tiempo y por unidad de área. La energía por unidad de tiempo se mide en Watts (como se puede comprobar en el consumo de una lámpara eléctrica), por lo tanto, las unidades de la intensidad serán Watt/metro² (o W/m² para abreviar). También hay un rango amplio de intensidades detectables por el oído humano. La intensidad mínima que se puede detectar es 10⁻¹² W/m² (o 0,000000000001 W/m²). La máxima intensidad que se puede oír antes de sentir dolor es de 100 W/m², 100 billones de veces mayor que la mínima. Sin embargo, al escuchar un sonido bajo y uno fuerte, no se tiene la sensación de que el volumen haya aumentado tantas veces. La razón es que el oído detecta el volumen en una escala logarítmica. El volumen se mide en dB (decibelios) y está relacionado con la intensidad de la siguiente manera

$$\text{volumen} = 10 \times \log(I/I_0) \text{ dB},$$

donde I corresponde a la intensidad e $I_0 = 10^{-12}$ W/m² es la intensidad mínima audible. El significado de esta expresión matemática con la función “log” es que cuando la intensidad se *multiplica* por 10, al volumen se le *suman* 10 dB (ver Figura 69). Este cambio de escala permite que tengamos buena sensibilidad a sonidos bajos y que la sensibilidad se reduzca rápidamente al aumentar el volumen. Si la sensibilidad se mantuviera podrían

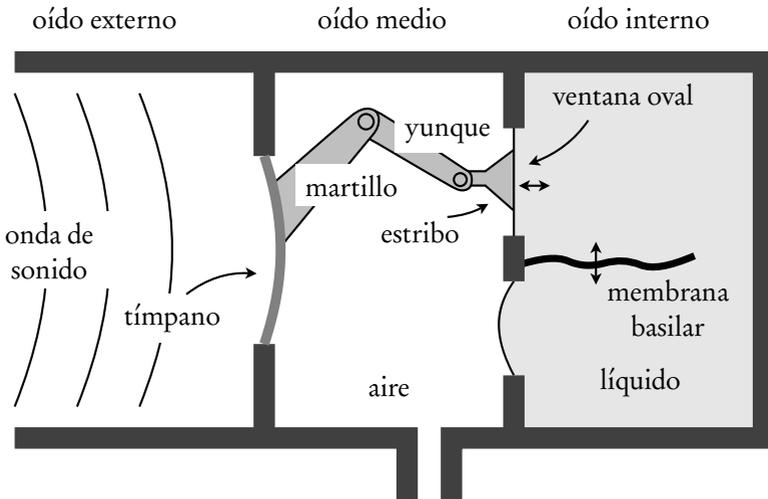


69. Escala lineal (arriba) comparada con la escala logarítmica (abajo).

producirse daños en los órganos del oído. Notar, por ejemplo, que el rango entre 0 y 10 dB corresponde a intensidades entre I_0 y $10 \times I_0$, mientras que el rango entre 30 y 40 dB corresponde a $1000 \times I_0$ y $10000 \times I_0$.

El oído — ¿cómo se perciben las distintas frecuencias?

La Figura 70 es un esquema simplificado de la estructura del oído. Hay tres partes: el oído externo, el medio y el interno. El oído externo está separado del oído medio por el tímpano. Las vibraciones de sonido se transmiten desde el tímpano, a través del martillo, el yunque y el estribo, hasta la ventana oval que comunica con el oído interno. Dentro del oído interno las vibraciones se propagan a través de un líquido hasta la membrana basilar. La complejidad de la estructura del oído interno se ha reducido en el esquema de la Figura 70 para mantener la simplicidad. La membrana basilar se encuentra, en realidad, dentro de la cóclea, que tiene forma de caracol. Esta membrana es la base de las células sensibles al sonido; son células con forma de pelos llamadas estereocilios. Cuando las vibraciones en el líquido mueven los estereocilios, se transmite una señal nerviosa al cerebro que indica la detección del sonido.

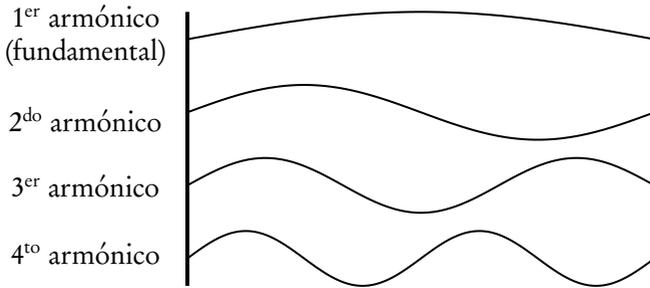


70. Modelo esquemático del oído. Las vibraciones de las ondas de sonido se propagan a través del tímpano, el martillo, el yunque y el estribo, hasta la ventana oval. En el oído interno, la membrana basilar vibra en distintas partes dependiendo de la frecuencia del sonido.

Para distinguir entre distintas frecuencias, el oído realiza una operación similar al de una cuerda tensa, que tiende a oscilar a una frecuencia mayor que una cuerda más floja. La rigidez de la membrana basilar varía a lo largo de su longitud. Cuando se perturba a la membrana basilar con una frecuencia determinada, solo vibra la parte de la membrana que tiene la tensión o rigidez que corresponde a esa frecuencia. En un extremo de la membrana se detectan los sonidos más graves y en el otro los más agudos. Cuando llega al oído una determinada frecuencia, solo vibran los estereocilios en la región de la membrana que corresponde a esta frecuencia y, de este modo, se la puede distinguir de otras.

Armónicos y timbre

La forma de una onda de sonido que produce un instrumento nunca es tan simple como la onda sinusoidal de la Figura 68. Los instrumentos de viento y de cuerdas tienen *modos* de vibración característicos, llamados armónicos, que se muestran en la Figura 71. Los modos de vibración son impuestos por la es-



71. Modos de vibración armónicos presentes en instrumentos de cuerda o viento.

tructura física del instrumento. Por ejemplo, una cuerda fija en ambos extremos no puede vibrar con una longitud de onda intermedia entre el 1^{er} y 2^{do} armónico, porque un extremo estaría suelto. Cada armónico tiene una frecuencia que es un número entero de veces la frecuencia del 1^{er} armónico, y la longitud de onda es igual a la del 1^{er} armónico dividida ese mismo número entero. Estos modos de vibración reciben el nombre de *armónicos* porque, especialmente los primeros, suenan bien juntos, producen consonancia (Lapp 2003).

La onda de sonido está formada por una mezcla de armónicos. De esa mezcla, la componente principal (aunque no necesariamente la más intensa) está dada por el 1^{er} armónico, también llamado fundamental. La nota que se percibe es la que corresponde a la frecuencia del 1^{er} armónico. El resto de los ar-

mónicos dan al sonido una característica especial que hace que se lo pueda reconocer como proveniente de un determinado instrumento. Es sencillo distinguir, con los ojos cerrados, si un sonido proviene de un piano o de una flauta, aunque ambos toquen la misma nota. Esta característica del sonido se llama timbre.

Daniel Bernoulli, en un trabajo publicado en 1755, analizó la vibración de una cuerda y estableció que su movimiento puede describirse a través de la suma, o superposición, de armónicos. Más tarde, en 1822, Jean Fourier extendió estas ideas para expresar una función matemática como una suma infinita de senos y cosenos.

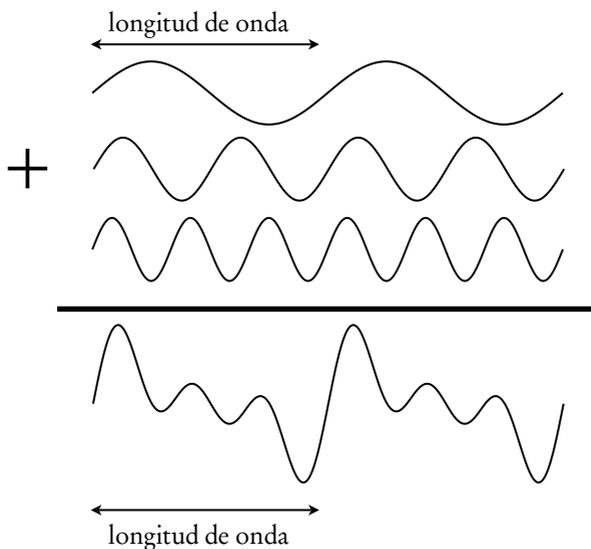
Los instrumentos de percusión también tienen un timbre que los distingue, pero los tonos que se mezclan con el tono fundamental no están relacionados entre sí de manera sencilla, no son armónicos.

Una flauta tocando la nota fa (349 Hz) produce una mezcla de los tres primeros armónicos cada uno aproximadamente con la misma intensidad, el 4^{to} armónico tiene una intensidad alrededor de 16 veces menor (ver el sitio *Music Acoustics at UNSW*⁵). Considerando solo los tres primeros armónicos, el aspecto de la onda es el que se muestra en la Figura 72. Distintas notas tocadas por el mismo instrumento pueden tener formas de onda algo diferentes, incluso la misma nota puede variar un poco su forma si se la toca a distinto volumen. Por simplicidad, en muchos casos se dibujan las ondas de sonido con forma sinusoidal; hay que tener presente que se trata de una simplificación y que, en general, la forma es más complicada.

Modos de vibración de un tambor

La Figura 71 en la sección anterior muestra la secuencia de armónicos. La misma figura también puede interpretarse co-

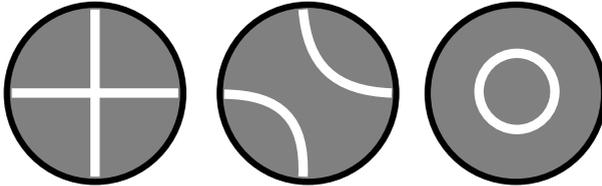
⁵<http://www.phys.unsw.edu.au/music/flute/modernB/F4.html>



72. Suma de los tres primeros armónicos que forman la nota fa producida por una flauta. La onda resultante tiene la misma longitud de onda que el 1^{er} armónico.

mo los posibles modos de vibración de una cuerda fija en ambos extremos. Mantener fijos los dos extremos limita las posibilidades de vibración a la secuencia armónica. Si lo que vibra, en lugar de una cuerda, es una membrana, las posibilidades son mayores. Es lo que sucede al golpear el parche de un tambor. Hay una forma simple de visualizar los posibles modos de vibración de un tambor. Se coloca en forma homogénea una capa de arena fina sobre el parche. Luego se lo hace vibrar. Las vibraciones hacen que la arena se desplace formando líneas que se llaman nodos. A lo largo de las líneas de los nodos el parche no se mueve. Los nodos separan zonas que se mueven de forma alternada hacia arriba y hacia abajo, ver Figura 73. Más información, incluyendo los modos de vibración de otros instrumentos de percusión,

como campana de mano o batería, puede encontrarse en Fletcher y Rossing (2005).



73. Tres posibles modos de vibración de un parche de tambor. Las líneas blancas indican los nodos donde se acumula arena al golpear el tambor. Muchas otras alternativas —en teoría infinitas— son posibles.

Velocidad y frecuencia de una onda en una cuerda

La velocidad v de una onda en una cuerda depende de la tensión T y de la masa por unidad de longitud μ . La relación es

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

La demostración de esta relación requiere del uso de la 2^{da} ley de Newton que dice que fuerza es igual a masa por aceleración, los detalles pueden encontrarse en, por ejemplo, Tipler y Mosca (2010), Roederer (2002) o Wikipedia: *Vibrating string*. La intuición coincide con lo que dice la ecuación: una onda se mueve con mayor rapidez en una cuerda tensa que en una cuerda floja, y se mueve con menor rapidez en una cuerda pesada que en una liviana.

En la página 135 se explicó que la frecuencia es igual a la velocidad dividida por la longitud de onda. La frecuencia que produce la cuerda experimentará las mismas variaciones que la



74. Pitágoras produciendo sonidos de distinta frecuencia en cuerdas con distinta tensión. Ilustración de 1492.

velocidad si se modifica la tensión o la densidad lineal (masa por unidad de longitud) de la cuerda. Por lo tanto, una cuerda más tensa producirá un sonido de frecuencia mayor o más agudo. Este efecto se conoce desde la antigüedad. Sin embargo, la deducción completa de la ecuación para la velocidad fue obtenida en 1759, en un trabajo publicado por Joseph Lagrange, que se había basado en trabajos anteriores de Brook Taylor y Daniel Bernoulli.

En la Figura 74 se ve a Pitágoras pulsando cuerdas con distinta tensión. Las pesas que cuelgan de los extremos de las cuerdas llevan los números 4, 6, 8, 9, 12 y 16. Estos números representan, en principio, las frecuencias de cada cuerda e indican

que están relacionadas entre sí a través de cocientes de enteros pequeños. Por ejemplo, la relación entre 4 y 8 es 2, y entre 4 y 6 es $3/2$. Como se verá más adelante, las frecuencias relacionadas de esta manera producen consonancia. Sin embargo, la primera impresión, al observar la figura, es que los números no representan directamente la frecuencia sino el peso que cuelga de cada cuerda, o, lo que es lo mismo, la tensión. Si ésta fue la intención del dibujante, entonces hay un error. Según lo que se explicó en los párrafos anteriores, la frecuencia es proporcional a la raíz cuadrada de la tensión: $f \propto \sqrt{T}$. Si, por ejemplo, se duplica la tensión, la nueva frecuencia aumenta en un factor $\sqrt{2}$ con respecto a la anterior, y ambas no producen consonancia.

Resonancia

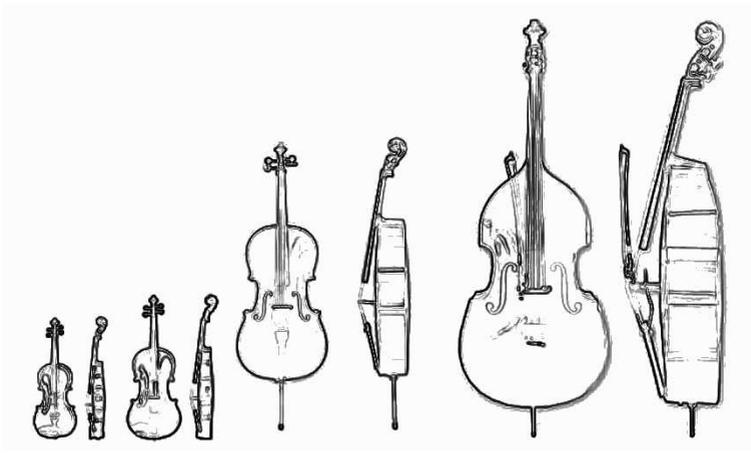
La resonancia es la tendencia de un objeto a oscilar con la máxima amplitud cuando se lo perturba con una frecuencia determinada, esto es llamado frecuencia de resonancia. El objeto en cuestión puede ser un columpio, un péndulo, un puente o, en el caso de instrumentos musicales, una cuerda o una columna de aire.

Todos los instrumentos musicales de cuerdas tienen una caja de resonancia. Si la caja de resonancia no estuviera presente, la energía producida al pulsar una cuerda se disiparía en su mayor parte en forma de calor, y solo una pequeña parte se transmitiría al aire. Con la caja de resonancia, las moléculas de aire que se encuentran dentro tienden a oscilar con gran amplitud. De esta forma se optimiza la transmisión de energía de la vibración de la cuerda a energía del sonido en el aire.

Un péndulo oscila a una frecuencia determinada, pero las moléculas de aire dentro de la caja pueden entrar en resonancia a muchas frecuencias distintas. Las frecuencias bajas tienen longitud de onda grande. El tamaño de la caja de resonancia li-

mita las frecuencias posibles. Una caja pequeña permitirá la resonancia de frecuencias altas (longitud de onda pequeña), mientras que en una caja grande habrá resonancia con frecuencias más bajas (longitud de onda grande).

Esta relación entre tamaño de caja y frecuencias es clara en la familia del violín (ver Figura 75). Hay un miembro ex-



75. Familia del violín. De izquierda a derecha: violín, viola, cello y contrabajo. Cajas de tamaño mayor permiten resonancia de frecuencias menores.

céntrico de la familia que no aparece en la figura. Se trata de un instrumento raro y poco conocido: el gigante octobajo. El octobajo es, en esencia, un contrabajo aproximadamente el doble de grande. No hay muchos octobajos en el mundo, sin embargo, algunos compositores, especialmente durante el siglo XIX, compusieron obras para este instrumento. Entre ellos se encuentra Hector Berlioz, quien en su *Gran Tratado de Instrumentación*, decía que “este instrumento posee un sonido de potencia y belleza considerable, pleno y fuerte sin ser duro.” El tamaño del



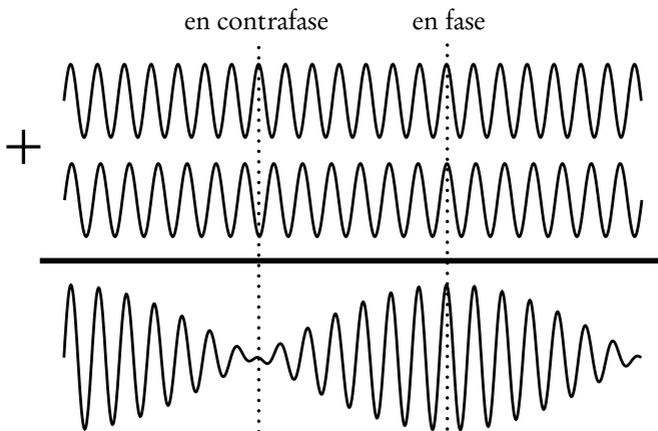
76. Octobajo. Ilustración del siglo XIX.

octobajo permite producir notas tan bajas como 16,35 Hz, cuya percepción puede depender de la sensibilidad de cada persona a frecuencias bajas.⁶

Batidos

El batido o batimiento es un efecto que se produce al superponer dos ondas de sonido de frecuencias similares. Las ondas interfieren entre sí, y si las frecuencias son cercanas, se oye un trémolo, o sea, una fluctuación periódica en la intensidad del sonido. Esa fluctuación tiene una frecuencia igual a la mitad de la diferencia entre las que se superponen.

⁶Moneta, N., *Sito ufficiale dell'Octobasse*. <http://www.xray.it/octo>

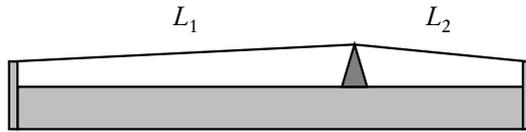


77. Batido. Las dos ondas que se suman parecen iguales, pero tienen una pequeña diferencia de frecuencia. En algunas regiones están en contrafase, o sea, mientras una onda sube la otra baja, y se anulan entre sí. En otras están en fase, ambas ondas se suman y dan la máxima amplitud.

El batido se utiliza para la afinación de instrumentos musicales. Por ejemplo, para que una guitarra esté afinada, una cuerda presionada en el 4^{to} o 5^{to} traste debe producir la misma frecuencia que la cuerda que está debajo. Si, al pulsarlas juntas, se escucha el batido, se debe regular la tensión de las cuerdas. Si el batido aumenta su frecuencia, quiere decir que debe modificarse la tensión en sentido opuesto. Cuando se logra que el batido desaparezca, ese par de cuerdas, al menos, estará afinado.

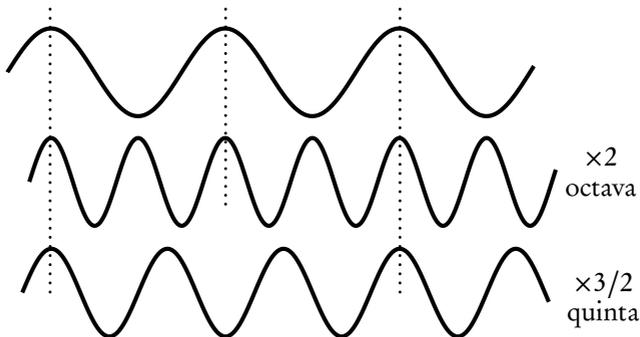
Consonancia

La consonancia es un concepto básico en música, pues hay algunos sonidos que juntos suenan bien, mientras otros, llamados disonantes, no. La consonancia puede percibirse utili-



78. Monocordio. La longitud L_1 es el doble de L_2 y, por lo tanto, la frecuencia que produce es la mitad.

zando un instrumento muy simple llamado monocordio. Es una caja de resonancia con una sola cuerda y con un tabique intermedio y deslizante que separa la cuerda en dos partes. Se desliza el tabique y se comprueba cómo suenan juntas las notas producidas por las porciones de cuerda de longitudes L_1 y L_2 . Se puede comprobar que existe consonancia cuando la relación entre L_1 y L_2 está dada por números enteros y pequeños, por ejemplo, 2:1, 3:2 o 4:3. La relación 2:1 recibe el nombre de intervalo de octava, la 3:2 intervalo de quinta y la 4:3 intervalo de cuarta, por razones que se verán más adelante. Las longitudes de onda



79. Consonancia entre notas cuyas longitudes de onda (o frecuencias) están relacionadas entre sí con números enteros pequeños. Las líneas punteadas indican los sitios donde las crestas coinciden.

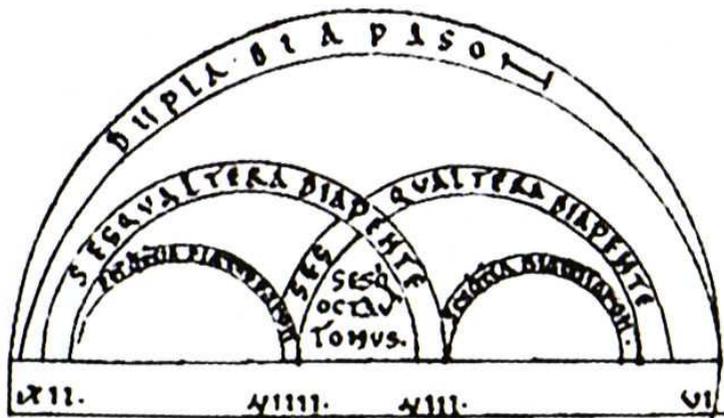
del sonido tendrán la misma relación que existe entre L_1 y L_2 . En la Figura 79 se observa que cuando existe una relación de números enteros y pequeños hay coincidencia entre las crestas de las ondas cada una, dos, tres, etc. longitudes de onda. Esta figura puede considerarse como una manera de presentar gráficamente la consonancia.

Se suele citar a Pitágoras, siglo VI a. de C., como el primero en afirmar que las relaciones simples entre L_1 y L_2 (o entre sus respectivas frecuencias) producen consonancia. Según la leyenda, Pitágoras descubrió la relación entre notas musicales y números enteros pequeños al pasar cerca de una herrería. Escuchó entonces que algunos sonidos que se producían al golpear los yunques se combinaban de manera bella y armoniosa. Pensó que debía haber una razón expresable matemáticamente que podría aplicarse a la música. Entró a la herrería para comprender cómo se producían los sonidos armoniosos observando las herramientas. Descubrió que los tamaños de los martillos (que determinan las frecuencias a las que vibran) estaban relacionados entre sí a través de razones simples, uno era la mitad del otro, otro tenía una razón $2/3$, etc. (Figura 80).

Boecio ilustra las relaciones simples con el diagrama de arcos que se muestra en la Figura 81, que aparece en una versión del siglo XII de su libro *De institutione musicae* (Solís y Sellés 2005). Los números 12 (XII), 9 (VIII), 8 (VIII) y 6 (VI) en la parte inferior representan frecuencias. El arco mayor que va del 12 al 6 representa la razón doble o *dupla* que corresponde a la octava o *diapason*. Los arcos intermedios entre 12 y 8 y entre 9 y 6 corresponden a intervalos de quinta ($12/8 = 9/6 = 3/2$), llamados *diapente* en el gráfico; la razón *sesquiáltera* significa una vez y media ($3/2 = 1 + 1/2$). Los arcos menores entre 12 y 9 y entre 8 y 6 son intervalos de cuarta ($12/9 = 8/6 = 4/3$), llamados *diatessarón* y tienen una razón *sesquitercia* o una vez y un tercio ($4/3 = 1 + 1/3$). Entre 9 y 8 hay un tono, o *tonus*, que tiene una relación *sesquiocava* o una vez y un octavo ($9/8 = 1 + 1/8$).



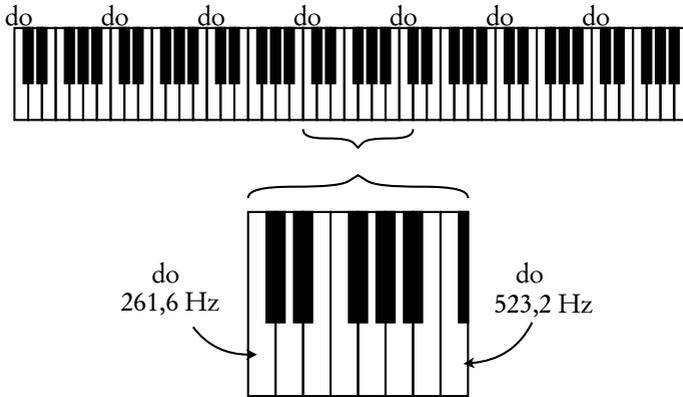
80. En esta ilustración de 1492, Pitágoras ha sido reemplazado por Jubal, personaje bíblico del Génesis, patrón de los que tocan la lira y la flauta. Jubal escucha el sonido producido por los golpes de martillo de los herreros. Los martillos tienen los números 4, 6, 8, 9, 12 y 16.



81. Intervalos, o relaciones entre frecuencias, básicos según Boecio: octava (*diapason*), quinta (*diapente*), cuarta (*diatessaron*) y tono (*tonus*). Ilustración del siglo XII.

Escalas

Un problema fundamental en música es establecer las escalas, o sea, cuáles son las frecuencias de sonido, o las notas, que un instrumento debe ser capaz de generar. Las escalas musicales se basan en los intervalos que producen consonancia mencionados en la sección anterior. El intervalo principal es la octava, o sea, la duplicación de frecuencia. En este caso la consonancia entre ambas notas es tal que, como se dijo antes, ambas reciben el mismo nombre. El problema es determinar qué notas se utilizarán dentro de una octava central o de referencia, pues en octavas inferiores o superiores se utilizarán las mismas notas multiplicadas o divididas por 2. Por ejemplo, el teclado de la Figura



82. Teclado de siete octavas. Para determinar la escala es suficiente con establecer las notas que se usarán en la octava central. El resto se obtiene multiplicando o dividiendo por 2.

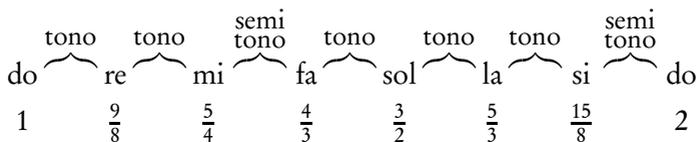
82 tiene siete octavas y se ha tomado como referencia la octava central, entre las notas do (o C) de 261,6 Hz y 523,2 Hz. Para determinar la escala es suficiente, entonces, determinar las notas que se utilizarán dentro de esta octava.

Las condiciones que deben cumplir las frecuencias de la escala son dos: separación regular entre notas y consonancia cuando se tocan juntas.

En este punto se presenta la dificultad de que no es posible satisfacer ambas condiciones a la vez de forma exacta. Dependiendo de a qué condición se da prioridad, se obtienen básicamente dos tipos de escalas: el temperamento justo y el temperamento igual (hay muchas variantes y opciones intermedias, como el buen temperamento de J. S. Bach, o escala bien temperada, que no es exactamente lo mismo que el temperamento igual, también llamado escala temperada).

El temperamento justo prioriza la consonancia. Un

ejemplo es la escala diatónica con temperamento justo:



donde cada nota se forma multiplicando la nota fundamental por los cocientes de enteros pequeños indicados. Los intervalos $4/3$ y $3/2$ reciben los nombres de 4^{ta} y 5^{ta} respectivamente porque corresponden a la 4^{ta} y 5^{ta} nota. Históricamente se ha utilizado en occidente el intervalo $9/8$, o tono mayor (o intervalo entre cuarta y quinta), como separación básica entre notas. Las distintas escalas que pueden obtenerse usando esta separación dan como resultado la aparición de dos semitonos, que, en este caso, corresponden a un factor $16/15$ (entre mi y fa, y entre si y do). Ésta es la primera dificultad que surge cuando se quiere obtener una escala con separación regular entre notas. Se resuelve de forma aproximada incluyendo semitonos entre cada tono (los bemoles y sostenidos representados por las teclas negras). Pero incluso en este caso la separación no es regular, pues los nuevos semitonos no tienen el mismo tamaño y, además, los tonos son, en algunos casos, un factor $9/8$ y, en otros, un factor $10/9$ (tono menor).

La irregularidad en la separación de notas no es grande, pero es suficiente para dificultar la transposición musical. Por ejemplo, si una canción que comienza con do se quiere tocar comenzando con fa, las irregularidades harán que suene diferente. Por esta razón se introdujo el temperamento igual, que es el sistema de afinación más utilizado hoy en música occidental. La escala con temperamento igual incluyendo todos los semitonos,

también llamada escala cromática, es

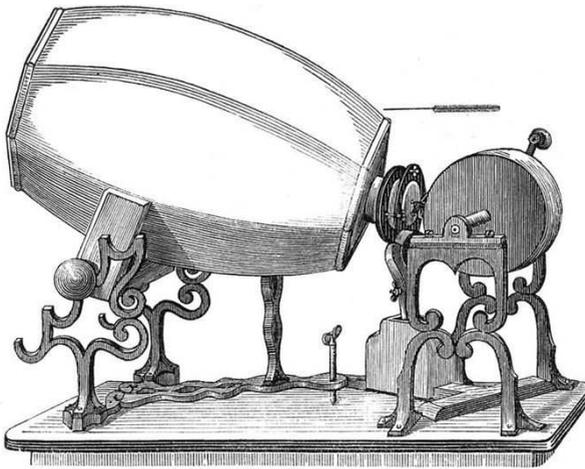
do	do [♯]	re	re [♯]	mi	fa	fa [♯]	sol	sol [♯]	la	la [♯]	si	do
	re ^b		mi ^b			sol ^b		la ^b		si ^b		
1	r	r^2	r^3	r^4	r^5	r^6	r^7	r^8	r^9	r^{10}	r^{11}	r^{12}

donde cada nota se obtiene multiplicando la nota fundamental (el do a la izquierda) por el factor r elevado a la potencia correspondiente. De esta forma, el factor de separación entre notas consecutivas siempre es r . Obtener cuánto vale r es simple, porque el do de la derecha debe tener el doble de frecuencia que el de la izquierda, por lo tanto debe ser $r^{12} = 2$, de donde sale $r = \sqrt[12]{2} \simeq 1,059$. La separación entre notas es ahora siempre igual y no hay inconvenientes para la transposición musical. Se ha relajado el requerimiento de consonancia, pues las notas no están relacionadas a través de cocientes de enteros pequeños (excepto, por supuesto, la octava). Sin embargo, la consonancia en intervalos de cuarta y quinta es casi exacta. Otros intervalos producen disonancias que pueden ser percibidas por oídos entrenados y que hacen que algunos músicos prefieran el temperamento justo u otras variantes de escalas.

Más sobre escalas musicales puede encontrarse en Rojo (2007) y Amster (2010).

Métodos de almacenamiento y reproducción del sonido

El más antiguo método de almacenamiento de sonido es el fonógrafo, de 1857, del impresor, librero y escritor francés É.-L. Scott de Martinville. Una pantalla en forma de barril recogía las ondas de sonido y trasladaba las vibraciones a una membrana que tenía unida una cerda; la cerda registraba los movimientos en un rollo de papel que se giraba a mano. El objetivo del aparato era solo el registro gráfico de las ondas de sonido para su posterior estudio y análisis. No podía *reproducir* sonido.



83. Fonoautógrafo de Scott, modelo de 1859.

Es difícil que Scott haya podido imaginar que mucho tiempo después, en el año 2008, sus registros habrían sido decodificados con programas de computadora y transformados en ondas sonoras. Hoy es posible escuchar una voz, posiblemente la de Scott, cantando *Au Clair de la Lune* en 1860, el registro de sonido, algo ruidoso, más antiguo con una voz humana reconocible; visitar el sitio de Internet *First Sounds*.⁷

En 1877 apareció el fonógrafo de T. A. Edison. Era un aparato similar al fonoautógrafo que, en lugar de un rollo de papel, usaba cilindros de estaño, plomo o cera donde las vibraciones del sonido quedaban marcadas en un surco por un estilete. Ahora el sonido podía reproducirse realizando el proceso inverso al de grabación: al pasar la aguja, o el estilete, las oscilaciones del surco pasaban a la membrana ubicada en la punta del cono

⁷<http://www.firstsounds.org/sounds/scott.php>

de donde salía el sonido. En 1888, E. Berliner inventó el gramófono, una variación del fonógrafo en la que la onda de sonido quedaba registrada en variaciones laterales del surco sobre un disco plano; tenía ventajas en la copia y almacenamiento de los discos, y fue el antecesor del tocadiscos.



84. Gramófono basado en disco (izquierda) y fonógrafo basado en cilindro (derecha).

Los métodos de almacenamiento y reproducción del sonido mejoraron su calidad cuando se empezó a utilizar una representación analógica del sonido dentro de un circuito eléctrico. La señal eléctrica, de tensión o corriente, tiene la misma forma, es *análoga*, a la onda de sonido. Dentro del circuito, la señal eléctrica puede amplificarse utilizando los viejos tubos de vacío o los modernos transistores. En forma simplificada, tanto los tubos de vacío como los transistores funcionan como una resistencia variable controlada por una señal de baja amplitud. “Transistor” proviene de la contracción de *transfer resistor* o resistencia de transferencia. La corriente, de una amplitud grande, que pasa por el transistor o tubo dependerá de esa resistencia. Como la resistencia varía de acuerdo a la señal pequeña, la corriente producirá las mismas variaciones con una amplitud mayor. El



85. Publicidad de Winco, de 1956. Winco fue una de las marcas de tocadiscos más conocidas en Argentina durante las décadas de 1950 y 1960.

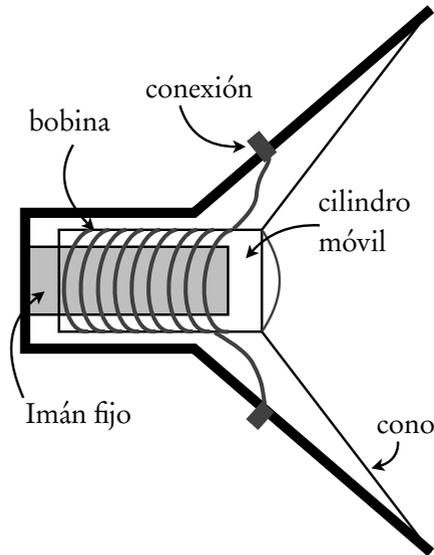


86. Publicidad de la radio a transistores *Transiter*, de 1960. Se armaba en Argentina con componentes traídos de Japón.

transistor reemplazó a los tubos de vacío en equipos de reproducción de sonido por varias razones: menor tamaño, menor peso, menor consumo, mayor tiempo de vida útil, menor costo, etc. Pero los tubos de vacío no han desaparecido por completo. Todavía se producen equipos de audio de alta gama con tubos de vacío, dirigidos a grupos reducidos de amantes de la alta fidelidad capaces de detectar diferencias de calidad a favor de los tubos especialmente cuando se trata de sonido de alta potencia.

¿Cómo se transforma una onda de sonido en una señal eléctrica análoga? ¿Y cómo esa señal se transforma en sonido otra vez? Las preguntas se refieren, por supuesto, al funciona-

miento básico de un micrófono o un parlante. La forma más usual de reproducir sonido es con el tipo de parlante cuyo esquema se muestra en la Figura 87. Está compuesto por un imán



87. Esquema de parlante o altavoz. La señal eléctrica entra por los bornes de conexión a la bobina. El campo magnético producido desplaza el cilindro y el cono de cartón.

fijo y un cilindro hueco. El cilindro puede desplazarse con respecto al imán y mover el cono, o membrana, del parlante. En torno al cilindro hay una bobina. A través de los puntos de conexión entra la señal eléctrica y produce un campo magnético dentro de la bobina. Según la ley de Ampère, el campo magnético está directamente relacionado con la corriente en la bobina. El campo magnético variable interactúa con el del imán fijo, haciendo que el cono se acerque o se aleje siguiendo las variaciones de la corriente. El cono mueve el aire y produce una onda de soni-

do con la misma forma que la señal eléctrica. El esquema de un micrófono es muy similar. Funciona con el proceso inverso. La onda de sonido hace vibrar el cono y la bobina. Las vibraciones hacen que varíe el campo magnético del imán que pasa a través de cada espira de la bobina. Según la ley de inducción de Faraday, el campo magnético variable induce una corriente en el circuito, y la corriente tendrá la misma forma que las oscilaciones producidas por la onda de sonido.

Una vez que el sonido se ha transformado en una señal eléctrica, es posible utilizar otros métodos de almacenamiento. El sistema de grabación magnético se comenzó a desarrollar a fines del siglo XIX, y su comercialización para uso doméstico se inició recién luego de la 2^{da} guerra mundial. Al principio se utilizaba para grabar mensajes telegráficos en código Morse, pues solo se podían grabar y reproducir estados magnéticos o no-magnéticos, que se asociaban a los puntos y rayas del código Morse. Luego se logró almacenar estados de magnetización continuos que podían ser análogos a una onda de sonido. Las primeras grabadoras magnéticas utilizaban un alambre para registrar el sonido. Fueron reemplazadas por las que utilizaban cinta magnética durante la década de 1950. La principal ventaja respecto al tocadiscos era que el alambre, o la cinta, se podía borrar y volver a grabar. La cinta contiene un material ferromagnético (óxidos de hierro o de cromo); la señal eléctrica análoga al sonido se hace pasar por un pequeño electroimán, que produce un campo magnético proporcional a la corriente. La cinta pasa junto al electroimán a una velocidad constante, y el electroimán reorienta las partículas del material ferromagnético. Esa orientación puede volver a leerse utilizando el proceso inverso.

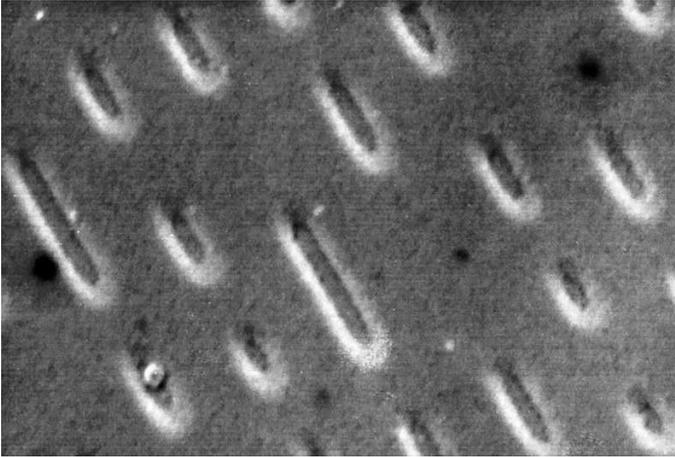
El CD, o disco compacto, se comercializa desde 1982. Ha reemplazado a los discos de vinilo y a las cintas magnéticas, y probablemente será reemplazado por las memorias flash de los pequeños reproductores mp3. Tanto el CD como la memoria flash y un tipo no muy conocido de cinta magnética (el



88. Casete con cinta magnética. Fue el formato de grabación doméstica de sonido más popular durante aproximadamente las décadas de 1970 y 1980.

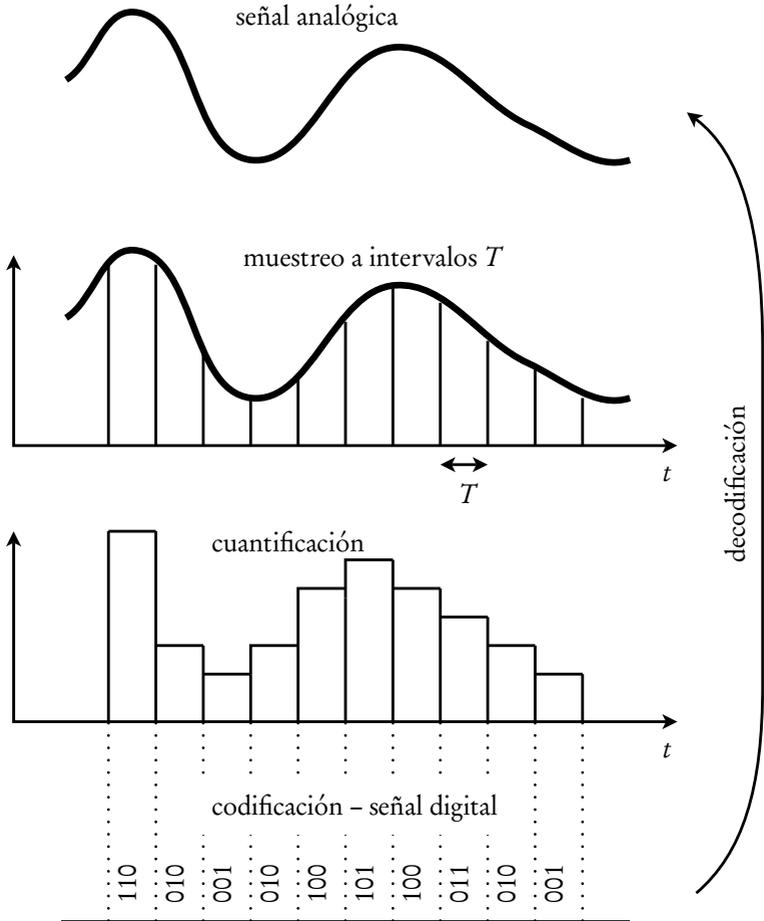
DAT, o *Digital Audio Tape*, cinta de audio digital), almacenan la información en forma digital. La Figura 89 muestra una ampliación de la superficie de un CD, donde se ven zonas marcadas (o quemadas) y zonas sin marcar, que representan unos y ceros. La información del CD puede leerse iluminando con un haz láser y midiendo con un fotodetector la luz reflejada. Cualquier número puede expresarse como una combinación de unos y ceros en lo que se llama notación binaria. Por ejemplo, el número binario 110 es igual a $1 \times 2^2 + 1 \times 2 + 0 \times 1 = 6$ en notación decimal, del mismo modo que el número 384 es igual a $3 \times 100 + 8 \times 10 + 4 \times 1$. La única diferencia es que, en el caso binario, cada dígito se multiplica por una potencia de 2 en lugar de una potencia de 10.

En la Figura 90 se muestra esquemáticamente el proceso de transformación de una señal analógica, o sea, una señal eléctrica que tiene la misma forma que la onda de sonido, a una señal digital. En este esquema, el eje horizontal representa el tiempo. El primer paso es tomar un muestreo de la señal a intervalos de tiempo T . El número de muestras por unidad de tiempo, o frecuencia de muestreo $1/T$, generalmente se toma igual a 44 kHz, o sea, aproximadamente el doble de la máxima frecuencia audible, que es 20 kHz. La razón por la cual es necesario



89. Superficie de CD ampliada. El tamaño de las marcas es de $0,83 \mu\text{m}$ o $0,00083 \text{ mm}$, o sea, poco menos que la milésima parte de un milímetro. En un DVD el tamaño del punto se ha reducido a $0,4 \mu\text{m}$.

que el muestreo tenga una frecuencia doble de la máxima que se quiere representar es un poco técnica y tiene que ver con un resultado matemático conocido como teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. No es necesario tener en cuenta frecuencias mayores, o valores de T menores, porque solo serviría para agregar frecuencias de sonido que no son audibles. El siguiente paso es cuantificar el valor de la señal en cada intervalo de tiempo. Luego se codifican esos valores con números binarios, se ponen en secuencia uno tras otro y ya se tiene la señal digital. La decodificación consiste en realizar el proceso inverso para poder transformar esos números en música.



90. Proceso de transformación de una señal analógica a una digital para su almacenamiento en un soporte como el CD.

Música de las esferas

Pitágoras y sus discípulos, durante el siglo VI a. de C. adoraban los números. En especial, los enteros positivos y pequeños. Debió haber sido un momento de gran excitación cuando descubrieron que los sonidos que producían consonancia provenían de cuerdas cuyas longitudes estaban relacionadas entre sí a través de enteros pequeños. Los pitagóricos consideraron bellos, o consonantes, solo a los intervalos musicales producidos por combinaciones de los números 1, 2, 3 y 4. Se trataba justamente de los números que aparecían en su símbolo sagrado: la tetraktys, una figura triangular formada por diez puntos colocados en cuatro filas, con 1, 2, 3 y 4 puntos en cada fila. Lograron así, por primera vez, fijar las consonancias musicales básicas en forma precisa e independiente de percepciones subjetivas. Creyeron que las distancias entre los planetas tenían las mismas proporciones que las longitudes de cuerdas consonantes. El sistema solar consistía en esferas rotando en círculos alrededor de la tierra, cada esfera produciendo un sonido como el que produce un proyectil que cruza el aire a gran velocidad. Las esferas cercanas producían tonos graves y las lejanas tonos agudos. La música de las esferas, o *musica universalis*, tenía que ser armoniosa y bella. Otros consideraron esta música como un concepto filosófico y místico; no se trataría de un sonido necesariamente audible sino de la presencia de cierta armonía en la estructura del universo. Esta última interpretación se tornó la única posible desde que se supo que los planetas se mueven en el vacío y que el sonido necesita un medio material para propagarse. La idea atrajo la atención de muchos pensadores, como Robert Fludd y Johannes Kepler, hasta aproximadamente el fin del renacimiento.

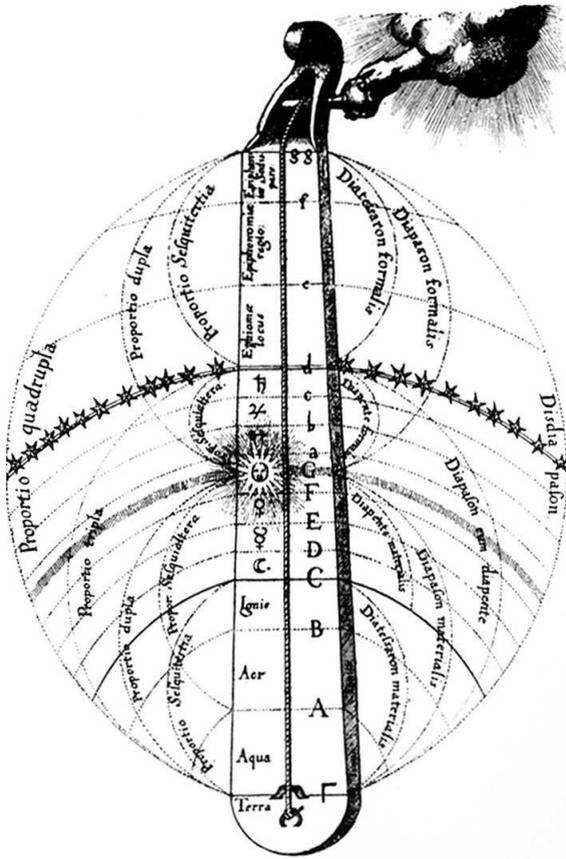
Robert Fludd, en *De Musica Mundana* (1618), describe sus teorías musicales. Su monocordio celeste es un esquema del universo, basado en los intervalos pitagóricos, en el que el sol se encuentra justo a mitad de camino entre la tierra y el cielo

superior, ver Figura 91.

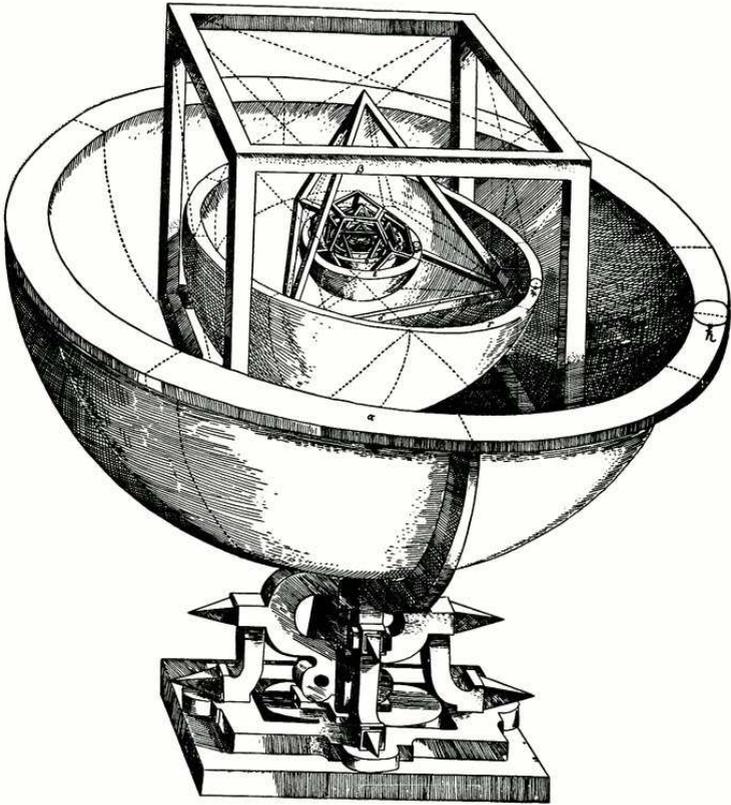
Kepler creyó descubrir una clave del misterio del universo en los cinco sólidos regulares atribuidos a Pitágoras (también llamados sólidos platónicos, aunque el primero en hacer una descripción completa fue Teeteto, c. 417 - 369 a. de C.). Un sólido regular es un cuerpo tridimensional de caras planas, cada cara formada por un polígono de lados iguales, como un cuadrado, un triángulo o un pentágono. Se puede demostrar que solo existen cinco sólidos que cumplen estas condiciones (ver, por ejemplo, Sagan 1997, apéndice 2). En la época de Kepler se conocían seis planetas: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Lo que llamó la atención de Kepler fue el hecho de que existieran 6 planetas y 5 sólidos regulares, justo uno para cada intervalo entre planetas. Supuso que estas formas perfectas, anidadas unas dentro de otras, estaban presentes en la estructura misma del universo y creyó que este descubrimiento revelaba la geometría sagrada de la creación de Dios. Kepler escribió entonces (ver Sagan 1997, pág. 57):

El placer intenso que he experimentado con este descubrimiento no puede expresarse con palabras... No prescindí de ningún cálculo por difícil que fuera. Dedicué días y noches a los trabajos matemáticos hasta comprobar que mi hipótesis coincidía con las órbitas de Copérnico o hasta que mi alegría se desvaneciera en el aire.

Las órbitas entre los sólidos perfectos tenían que ser circulares, como las que propuso Copérnico. A pesar de sus esfuerzos, Kepler no logró, con los datos que tenía, hacer encajar las órbitas planetarias entre los sólidos regulares. Creyó que el problema se solucionaría con datos más precisos. Luego de algunos años, los consiguió a través del astrónomo Tycho Brahe. Estudió entonces la órbita de Marte, y resultó que no fue posible hacer coincidir las observaciones precisas con una órbita circular. La alegría que había sentido al descubrir lo que llamó el Misterio Cósmico ter-



91. El monocordio celeste de R. Fludd. El sol se encuentra una octava (*diapason*) por encima de la tierra, y el cielo superior está una octava por encima del sol. El intervalo tierra-cielo es dos octavas (*disdiapason*). Aparecen otros intervalos: quinta (*diapente*) y cuarta (*diatessaron*) entre elementos, planetas y esferas celestes. Por encima del sol, en la parte más espiritual, el monocordio produce vida eterna y sonidos de frecuencia alta; por debajo del sol, en la zona donde predomina la materia, el monocordio produce vida transitoria y sonidos graves.



92. Estructura del universo según las ideas de Kepler de 1596. Las órbitas de los planetas están contenidas entre los sólidos regulares, el más externo es el cubo (separa las órbitas de Saturno y Júpiter), sigue el tetraedro, etc.

minó desvaneciéndose en el aire. Aunque todavía resonaba en sus oídos el encanto de la música de las esferas, terminó aceptando los hechos: “El universo lleva impreso el ornamento de sus proporciones armónicas, pero hay que acomodar las armonías a la experiencia.”

La idea de que las distancias de las órbitas planetarias están determinadas por intervalos musicales o por los sólidos regulares era simple y atractiva. Este tipo de idea pone orden en la descripción del mundo y da sensación de comprensión. La búsqueda de simplicidad y orden ha guiado la actividad científica desde sus comienzos: desde que Tales afirmó que todo es agua hasta, por ejemplo, el modelo estándar de partículas elementales. Sin embargo, como dijo Einstein, hay que simplificar todo lo posible, pero no más. La idea simple de los intervalos musicales o los sólidos regulares para determinar la estructura del universo conocido por entonces no funcionó, fue uno más de los muchos intentos fallidos en la historia de la ciencia. No fue sencillo para Kepler abandonar una idea a la que había dedicado años de trabajo, pero lo hizo. Este acto de subordinación de la teoría a los datos de las observaciones, que requiere no poco coraje, es la piedra fundamental de la actividad científica. Es, en esencia, el método científico y es, también, lo que marca la diferencia entre Kepler y Fludd.

Kepler abandonó los sólidos regulares y las órbitas circulares. Volvió a sentir una gran excitación cuando descubrió, luego de una enorme cantidad de cálculos, pruebas y errores, que las órbitas tenían la forma de una elipse. “Si te cansa este procedimiento tedioso,” escribió, “compadécete de mí que hice por lo menos setenta intentos.” Luego descubrió las otras dos leyes que gobiernan el movimiento de los planetas: la línea que une al sol con un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales y el cuadrado del tiempo necesario para completar una órbita es proporcional a la distancia al sol al cubo. Una amena introducción a la astronomía, y a su historia, puede encontrarse en

Abramson (2010).

Los logros de Kepler en la descripción del movimiento planetario causan admiración. Más tarde, Newton logró la validación de su ley de gravitación universal porque pudo reproducir las leyes de Kepler. Puede causar aún más admiración su entereza para descartar una teoría a la que había dedicado enormes esfuerzos pero que no se ajustaba bien a las observaciones. Como dice Sagan (1997), un epitafio apropiado para Kepler hubiera sido: “prefirió la dura verdad a sus ilusiones más queridas.”

COMENTARIO FINAL

En *Mecánica Elemental*, Roederer (2002) afirma que

los grandes problemas en las disciplinas como la biología, la química, la meteorología, la geología, la astronomía o la fisiología están íntimamente vinculados al conocimiento de los procesos físicos intervinientes. Es así como, con singular arrogancia, la física ha invadido prácticamente todas las ramas del conocimiento humano.

Los ejemplos de este libro muestran que la explicación científica de casi cualquier fenómeno requiere, en última instancia, de algún concepto físico, pues la física está siempre presente en los aspectos más básicos del comportamiento de la naturaleza. No debe pensarse que esto signifique cierta primacía de la física respecto de las otras ramas de la ciencia. Sería llevar esa “singular arrogancia” demasiado lejos.

Dependiendo de preferencias personales, siempre es posible encontrar motivos de peso para elegir una disciplina. Un químico se entusiasma al observar que las propiedades de cualquier material dependen de los enlaces químicos de sus componentes o al observar, por ejemplo, las reacciones dentro de los seres vivos. Un biólogo puede afirmar que se dedica al estudio de los sistemas más complejos que se han observado en el universo. Un geólogo, que uno debe conocer el sitio donde está parado.

Un matemático, que solo en el mundo abstracto e ideal de las matemáticas (más real que el mundo que vemos, según algunos platónicos) pueden alcanzarse verdades inmutables y eternas, y, repitiendo la frase de Galileo citada en la introducción, que “el libro de la naturaleza está escrito en caracteres matemáticos.” Finalmente, un mago dice que su actividad es completa porque combina conocimientos de física, química, matemática y psicología. Puede considerarse que todos estos argumentos tienen su base de verdad.

Con el paso del tiempo se hace cada vez más necesario cruzar los límites difusos entre disciplinas científicas para alcanzar explicaciones profundas de distintos fenómenos. No solo para las explicaciones a nivel de divulgación que se encuentran en este libro, sino también para el avance de la investigación en la frontera del conocimiento.

FUENTES DE FIGURAS

1.	Figura del autor	25
2.	Figura del autor	26
3.	H. E. C. (1914), <i>Física</i> , Buenos Aires: Cabaut y Cía.	27
4.	Grabado de André Thévet (1584), <i>Les vrais pourtraits et vies des hommes illustres grecz, latins et payens</i>	27
5.	Versión alemana de la <i>Neumática</i> , de Herón de Alejandría (1688).	27
6.	Versión inglesa de la <i>Neumática</i> , de Herón de Alejandría (1851).	29
7.	Versión inglesa de la <i>Neumática</i> , de Herón de Alejandría (1851).	29
8.	Figura del autor	30
9.	Grabado de Theodore de Bry, 1594	32
10.	Figura del autor	33
11.	Hopkins (1901), <i>Magic, Stage Illusions and Scientific Diversions Including Trick Photography</i>	33
12.	Figura del autor	36
13.	Willey (1999), <i>The Physics Behind Four Amazing Demonstrations</i> , imagen reproducida con permiso de D. Willey.	38
14.	Foto de H. Ponting, Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Fakir</i> , http://en.wikipedia.org/wiki/Fakir	40
15.	Anuncio de Eckenberg, de 1719.	41
16.	Figura del autor	42
17.	Willey (1999), <i>The Physics Behind Four Amazing Demonstrations</i> , imagen reproducida con permiso de D. Willey.	43
18.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Louis Cyr</i> (Noviembre 2007), http://en.wikipedia.org/wiki/Louis_Cyr	44
19.	Robert-Houdin (1998), <i>Magia y física recreativa</i> , ilustración de 1877.	47
20.	Robert-Houdin (1998), <i>Magia y física recreativa</i> , ilustración de 1877.	49
21.	Figura del autor	50
22.	Hopkins (1901), <i>Magic, Stage Illusions and Scientific Diversions Including Trick Photography</i>	51
23.	Perelman (1975), <i>Física Recreativa I y II</i>	52
24.	Figura del autor	53
25.	Figura del autor	54

26.	Figura del autor	56
27.	Figura del autor	56
28.	Figura del autor	59
29.	M. Maier (1617), <i>Symbola Aurea Mensae Duodecim Nationum</i> , Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Maria Prophetissa</i> , http://en.wikipedia.org/wiki/Maria_Prophetissa	66
30.	Figura del autor.	66
31.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Benjamin Thompson</i> , http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Thompson	68
32.	Thompson (1969), <i>The Collected Works of Count Rumford</i> , Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Benjamin Thompson</i> , http://en.wikipedia.org/wiki/Benjamin_Thompson	68
33.	Figura del autor	70
34.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Vacuum flask</i> (Noviembre 2007), http://en.wikipedia.org/wiki/The_rmos_flask	73
35.	Figura del autor	75
36.	Figura del autor	77
37.	Figura del autor	80
38.	Figura del autor	83
39.	Ilustración de J. Tenniel, 1871, versión original de <i>Alicia a través del espejo</i> de L. Carroll.	85
40.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Asparagine</i> (Noviembre 2007), http://en.wikipedia.org/wiki/Asparagine	86
41.	E. E. Kellogg (1893), <i>Science in the Kitchen</i> , EE.UU.	88
42.	Izquierda: Smith College Museum of Art, atribuida al pintor de Epeleios. Derecha: The University of Pennsylvania Museum of Archaeology and Anthropology.	96

43.	Izquierda: Daniel Santbech (1561), <i>Problematum Astronomicorum et Geometricorum</i> , Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Daniel Santbech</i> . http://en.wikipedia.org/wiki/Daniel_Santbech . Derecha: se desconoce la fuente original.	96
44.	Manuscrito de Galileo, 1608, https://eee.uci.edu/clients/bjbecker/RevoltingIdeas/quodlibet4.html	98
45.	Figura del autor	98
46.	Figura del autor	99
47.	Figura del autor	100
48.	<i>Female acrobats on trapezes at circus</i> , litografía de c. 1890.	101
49.	Figura del autor	101
50.	Museum of Fine Arts, Boston.	103
51.	Figura del autor	105
52.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Biceps</i> (Noviembre 2009), http://en.wikipedia.org/wiki/Biceps	106
53.	Figura del autor	107
54.	Figura del autor	110
55.	Wikimedia Commons, <i>Divers from Germany</i> , http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Divers_from_Germany ; izquierda: c. 1952; derecha: I. Krämer, 1964.	110
56.	Wikimedia Commons, <i>Bicycle</i> , http://commons.wikimedia.org/wiki/Bicycle	112
57.	Figura del autor	113
58.	Figura del autor	115
59.	Figura del autor	116
60.	Figura del autor	118
61.	Figura del autor	119
62.	Figura del autor	120
63.	Figura del autor	123
64.	Figura del autor	130
65.	Figura del autor	131
66.	Figura del autor	131
67.	Figura del autor	132
68.	Figura del autor	133

69.	Figura del autor	136
70.	Figura del autor	137
71.	Figura del autor	138
72.	Figura del autor	140
73.	Figura del autor	141
74.	Franchino Gaffurio (1492), <i>Theorica musicae</i> , Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Franchinus Gaffurius</i> http://en.wikipedia.org/wiki/Gaffurius	142
75.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Violin family</i> , http://en.wikipedia.org/wiki/Violin_family	144
76.	Ilustración del siglo XIX, <i>Sito ufficiale dell'Octobasse</i> , http://www.xray.it/octo	145
77.	Figura del autor	146
78.	Figura del autor	147
79.	Figura del autor	147
80.	Franchino Gaffurio (1492), <i>Theorica musicae</i> , Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Franchinus Gaffurius</i> http://en.wikipedia.org/wiki/Gaffurius	149
81.	Boecio, <i>De institutione musicae</i> , ilustración de una versión del siglo XII.	150
82.	Figura del autor	151
83.	Ilustración de Franz Josef Pisko (1865), <i>Die neueren Apparate der Akustik</i> , Viena; Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Phonautograph</i> , http://en.wikipedia.org/wiki/Phonautograph	154
84.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>History of sound recording</i> (Octubre 2010), http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_sound_recording	155
85.	Revista Chabela, abril de 1956.	156
86.	Revista Claudia, enero de 1960.	156
87.	Figura del autor	157
88.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, Compact Cassette, http://en.wikipedia.org/wiki/Cassete_tape	159
89.	Wikipedia, The Free Encyclopedia, <i>Disque compact</i> , http://fr.wikipedia.org/wiki/Disque_compact	160
90.	Figura del autor	161

91. Robert Fludd (1618), *De Musica Mundana*, Wikimedia Commons, *Category:Utriusque Cosmi*, http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Utriusque_Cosmi. 164
92. Johannes Kepler (1596), *Mysterium Cosmographicum*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, *Johannes Kepler*, <http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler>..... 165

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson, G. (2010). *Viaje a las estrellas*. Buenos Aires: Siglo veintiuno editores.
- Amster, P. (2010). *¡Matemática, maestro!*. Buenos Aires: Siglo veintiuno editores.
- Broch, H. (1987). *Los fenómenos paranormales, una reflexión crítica*. Barcelona: Ed. Crítica.
- de Ambrosio, M. (2009). *El deportista científico*. Buenos Aires: Siglo Veintiuno Editores.
- Fletcher, N. H., y Rossing, T. D. (2005). *The Physics of Musical Instruments*. Nueva York: Springer.
- Gardner, M. (2001). *¿Tenían ombligo Adán y Eva?* Madrid: Debate.
- Golombek, D., y Schwarzbaum, P. (2004). *El cocinero científico*. Siglo XXI Editores.
- Herón de Alejandría (1851). *The Pneumatics*. Londres. <http://www.history.rochester.edu/steam/hero/index.html>
- Hopkins, A. (1901). *Magic, Stage Illusions and Scientific Diversions Including Trick Photography*. Munn & Co.
- Houdini, H. (1920). *Miracle Mongers and Their Methods*. Nueva York: E. P. Dutton and Co. <http://etext.virginia.edu/toc/modeng/public/HouMirM.html>
- Kennedy, L. (2002). *KFC bosses aren't chicken, but they sure are tender*. Periódico The Age, 28 de febrero. <http://www.theage.com.au/articles/2002/02/27/1014704967158.html>
- Kurti, N. y This, H. (1994). *Chemistry and Physics in the Kitchen*. Scientific American, pág. 66, abril.
- Lapp, D. R. (2003). *The Physics of Music and Musical Instruments*. <http://staff.tamhigh.org/lapp/book.pdf>.
- Lindemann, B. (2000). *A taste for umami*. Nature Neuroscience, vol. 3, pág. 99.

- Moore, J. W., Stanitski, C. L. y Jurs, P. C. (2005). *Chemistry: The Molecular Science*. Thomson Brooks/Cole.
- Perelman, Y. (1975). *Física Recreativa I y II*. Moscú: Mir.
<http://www.librosmaravillosos.com/fisicarecreativ a1/index.html>
- Randi, J. y Clarke, A. C. (1997). *An Encyclopedia of Claims, Frauds, and Hoaxes of the Occult and Supernatural*. St. Martin's Griffin.
- Robert-Houdin, J. E. (1998). *Magia y física recreativa*. Barcelona: Alta Fulla.
- Roederer, J. G. (2002). *Mecánica Elemental*. Buenos Aires: Eudeba.
- Roederer, J. G. (2008). *The Physics and Psychophysics of Music*. Nueva York: Springer. Primer capítulo disponible en http://www.gi.alaska.edu/~Roederer/pdf/first_chapter.pdf. Versión en español: (1997) *Acústica y psicoacústica de la música*. Buenos Aires: Ricordi Americana.
- Rojo, A. (2007). *La física en la vida cotidiana*. Buenos Aires: Siglo veintiuno editores.
- Sagan, C. (1997). *Cosmos*. Barcelona: Planeta.
- Semper, R. *Science of cooking*. <http://www.exploratorium.edu/cooking/index.html>
- Solís, C., y Sellés, M. A. (2005). *Historia de la ciencia*. Madrid: Espasa Calpe.
- Steiger, T. *Physics of Sports, Fluid Dynamics*. <http://neutrino.phys.washington.edu/~wilkes/post/temp/phys208/volume5.html>.
- This, H. (2006). *Food for tomorrow?*. EMBO reports, vol. 7, pág. 1062.
- Thompson, B., Conde Rumford (1874). *The Complete Works of Count Rumford*. Boston.

Thompson, B., Conde Rumford (1969). *The Collected Works of Count Rumford*. Ed. Sanborn Brown, Harvard Univ. Press.

Tipler, P., y Mosca, G. (2010). *Física* vol. 1. Barcelona: Reverté.

Willey, D. (1999). *The Physics Behind Four Amazing Demonstrations*. Skeptical Inquirer, noviembre/diciembre. <http://www.csicop.org/si/9911/willey.html>

Wikipedia, The Free Encyclopedia, *Ted Serios* (Noviembre 2010), http://en.wikipedia.org/wiki/Ted_Serios.

Wikipedia, The Free Encyclopedia, *Vibrating string* (Noviembre 2010), http://en.wikipedia.org/wiki/Vibrating_string.

ÍNDICE

Prólogo	11
Introducción	17
Un poco de matemática	18
Física de la magia	23
El principio de Arquímedes	24
La dilatación de los gases	28
Equilibrio estable e inestable y el huevo de Colón . . .	31
Transmisión de calor	34
Caminata sobre fuego	34
Mano en plomo fundido	38
Fuerza y presión	39
Choques	41
Equilibrio de fuerzas	43
Caja de resonancia	46
Ley de reflexión	48
Refracción	52
La fotografía psíquica de Serios	54
Espejo cóncavo	57
Física de la cocina	63
Fuego y transmisión del calor	64
Benjamin Thompson, la teoría del calor y el café	68
Horno a microondas	70
El termo	73
¿Qué pasa si lo duplico?	74
Líquido y vapor	76
Preservación de la comida, la heladera	79
Mezclando agua y aceite	82
Cristales y amorfos	83
Quiralidad y sentido del gusto	84
Gastronomía molecular	87
Más comentarios de Thompson	90

Física del deporte	95
Lanzamiento de proyectiles	95
Centro de masa	99
Levantamiento de pesas	104
Inercia y rotación	108
Equilibrio en la bicicleta	111
“La pelota no dobla”	112
La fuerza es un vector	117
Competencia de remo	118
Contracción muscular	122
Física de la música	127
Representación gráfica del sonido	129
Características básicas de una onda de sonido periódica	133
El oído — ¿cómo se perciben las distintas frecuencias? .	136
Armónicos y timbre	138
Modos de vibración de un tambor	139
Velocidad y frecuencia de una onda en una cuerda . . .	141
Resonancia	143
Batidos	145
Consonancia	146
Escalas	150
Métodos de almacenamiento y reproducción del sonido	153
Música de las esferas	162
Comentario final	171
Fuentes de figuras	175
Referencias bibliográficas	183
Índice	189

