

Divulgación Científica

UN PASEO POR LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

Arnaldo González Arias

Arnaldo González Arias

UN PASEO POR LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



Este Paseo por la ciencia y la tecnología se propone divulgar el quehacer científico universal, enriquecer la cultura científica de los lectores y servir como un estímulo a los estudiantes de enseñanza media para que se interesen en los temas de la ciencia y la tecnología. Asimismo, es parte de un esfuerzo —entre muchos más— por mejorar la afluencia de educandos a las carreras de ciencias y profesoraes, algo indispensable con miras al desarrollo de cualquier país.

El texto consta de tres partes fundamentales: la primera se refiere a las características del medio ambiente y cómo afectan sus cambios a la humanidad; la segunda presenta un panorama sobre la situación actual de las fuentes renovables de energía; y la tercera describe algunas técnicas, instrumentos y materiales novedosos desarrollados con la contribución de diversas ciencias.

ARNALDO GONZÁLEZ ARIAS (La Habana, 1946). Graduado de doctor en Ciencias Físicas, fue profesor e investigador de la Universidad de La Habana desde 1972 hasta 2012. En este lapso, brindó asesoría a centros de producción y servicios, fue tutor de varios diplomas y un doctorado, e impartió conferencias sobre temas de magnetismo y técnicas termoanalíticas en diversas universidades nacionales y extranjeras. Durante cinco años se desempeñó como editor informático de la Revista Cubana de Física. Ha obtenido tres premios o menciones en concursos nacionales de periodismo científico y divulgación científica. Posee más de setenta artículos científicos en revistas arbitradas y un centenar de artículos de divulgación científica en medios de prensa nacionales y extranjeros. Tiene a su haber los títulos siguientes: Errores y mediciones (Ed. Ciencia y Técnica, La Habana, 1984), Análisis térmico diferencial y otras técnicas termoanalíticas (Ed. Ciencia y Técnica, La Habana, 1986), Técnicas experimentales del magnetismo (coautor, Ed. Mined, 1986), ¿Qué es el magnetismo? (Ediciones Universidad de Salamanca, España, 2001), Física para geografía (soporte magnético, Facultad de formación de profesores para la enseñanza media superior, La Habana, 2003) e Introducción a las técnicas termoanalíticas (coautor, Ediciones Universidad de Valladolid, 2014). Es miembro de la Sociedad Cubana de Física y de la Sociedad Española para el Avance del Pensamiento Crítico. En el presente, presta servicios en Ecuador como profesor invitado en la Universidad Técnica de Manabí.



Un paseo por la ciencia y la tecnología

Arnaldo González Arias

Prólogo

La Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe de la UNESCO publicó en 2005 un extenso documento acerca de la necesidad de divulgar la ciencia. Se titula “*Cómo promover el interés por la cultura científica*” y se encuentra accesible en <http://www.oei.es/decada/libro.htm>. Es posible resumir los criterios allí expuestos expresando que la cultura científica es necesaria por las siguientes razones:

1. Para posibilitar el conocimiento de nosotros mismos y el mundo que nos rodea, creando así mejores condiciones de vida en lo individual.
2. Con el fin de promover la toma de conciencia y la participación en los problemas que afectan a la comunidad y a la sociedad, así como para:
3. Facilitar la toma de decisiones de todo tipo, a cualquier nivel, sobre la base de criterios sólidos.

Un criterio adicional sería el de instruir a todos en cómo diferenciar la ciencia de las pseudociencias y pseudotecnologías, bastante extendidas en muchos lugares gracias a los modernos medios de difusión masiva, para evitar así posibles daños a la economía y a las personas. Se considera pseudociencia cualquier método, técnica, receta, norma, práctica, recurso o procedimiento que se publicite como científico, sin serlo.

Y ante esta realidad, inmediatamente surge una pregunta: ¿existe alguna forma simple de conocer si una propuesta que se publicita como científica lo es en realidad? Aún más: ¿cuál es el criterio a seguir para identificar si una proposición concreta, incluso un determi-

nado campo o área del conocimiento, es científica o no? ¿Es posible hablar de cultura científica si se desconoce el método científico?

No son preguntas ociosas. En los medios de comunicación, y ante todo en la Internet, abundan las propuestas de productos, técnicas o procedimientos “novedosos” que se nos presentan como científicos sin serlo. Es usual que la aparente terminología científica con la que se adornan tales propuestas haga difícil discernir lo que hay de cierto en su discurso, aún para aquellos con formación científica en áreas no asociadas directamente al tema específico de que se trate.

El presente libro pretende contribuir a la divulgación de la cultura científica, y servir de ayuda a aquellos que se sienten atraídos por la ciencia y la tecnología para comprender mejor el quehacer científico, sin la pretensión de ser exhaustivo ni mucho menos. Consta de tres partes. En la primera se describen los aspectos más importantes que conforman en el medio en que vivimos, así como las principales amenazas que confronta actualmente el medio ambiente. La segunda hace énfasis en la energía y sus fuentes alternativas mientras que en la tercera se presentan un conjunto de materiales, instrumentos y dispositivos, algunos novedosos y otros no tanto, pero de uso común y que casi todo el mundo conoce, aunque sin tener una idea clara de cómo funcionan. También intenta contribuir a que el lector no especializado tenga una idea más precisa acerca de los procedimientos científicos y como diferenciarlos de la pseudociencia.

¿Cómo reconocer la ciencia? A primera vista parece una pregunta un tanto trivial; sin embargo, ha sido objeto de atención de filósofos

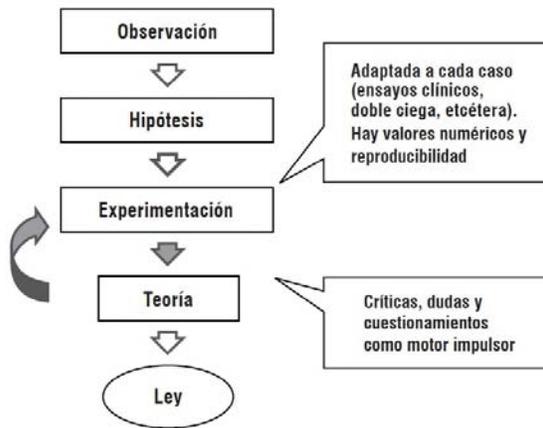
prominentes como Aristóteles, Descartes, Leibnitz y Kant. Es un tema que no puede ser respondido en pocas palabras sin incurrir en faltas y que, aún hoy día, se puede considerar controvertido.

En realidad, contestar a esta pregunta se divide en dos subproblemas, según se refiera a las ciencias formales (matemática y lógica) o las ciencias factuales o fácticas, que dependen de hechos, como la química, la física, la biología o las ciencias médicas (ver Bunge Mario, *Las pseudociencias, vaya timo*, Ed. Laetoli, 2010, pp. 70-75,130-133). Sin embargo, es posible señalar algunas características que permiten separar razonablemente la ciencia de lo que no es. Se muestran en la tabla siguiente, tomada de la Revista Española de Física, Nov.-Dic. 2008, <http://www.rsef.org>.

Comparación entre ciencia y pseudociencia		
	<i>Ciencia</i>	<i>Pseudociencia</i>
1	Incluye resultados favorables y desfavorables. Analiza argumentos a favor y en contra. Es escéptica. Duda continuamente de sus propios logros.	Solo toma en cuenta los resultados favorables. Cierra los ojos a la evidencia contraria. Es crédula. No duda.
2	La crítica es su forma normal de progresar.	Cuando se la crítica, usualmente sus promotores lo asumen como un ataque personal.
3	La mayoría de las referencias provienen de revistas internacionales arbitradas, bien reconocidas.	No hay referencias, o provienen de libros, congresos, o incluso de revistas, usualmente del mismo círculo pseudocientífico.
4	Utiliza conceptos y magnitudes bien definidas para describir y	Usa sus propios vagos conceptos, mezclándolos con conceptos de

	analizar los fenómenos.	la ciencia.
5	Siempre hay resultados experimentales, reproducibilidad y estadísticas.	Se satisface con ejemplos anecdóticos aislados. Si hay experimentos, están mal diseñados.
6	Trata de encontrar mecanismos que expliquen los hechos, basándose en los experimentos y el conocimiento científico anterior.	No propone mecanismos. Cuando lo hace, no se basa en el conocimiento científico previo, sino que los inventa de la nada.
7	No depende para nada de la opinión de "personalidades".	Busca la aprobación de "personalidades" individuales, casi siempre ajenas al campo específico de que se trate.
8	Los conceptos cambian y mejoran para ajustarse a los nuevos avances, con la contribución de muchos.	Defiende ideas preconcebidas e invariables, usualmente "descubiertas" por una sola persona, a veces con trasfondo religioso.
9	Rápida difusión y aplicación masiva de los nuevos descubrimientos prácticos.	Sus ideas no progresan porque "las grandes compañías perderían dinero si se aceptan".
10	Siempre toma en cuenta el efecto placebo (terapias y medicamentos).	El efecto placebo nunca se menciona.*
* El efecto placebo consiste en que un porcentaje significativo de pacientes alegarán sentirse mejor cuando se les proporcione una sustancia inerte y se les diga que es un medicamento efectivo para su dolencia.		

El otro factor de importancia es que los resultados científicos siempre provienen de la aplicación del método científico, cuyo esquema se muestra a continuación.



*El método científico (Tomado de **Elementos** 87 2012 p. 3-11).*

Cuando se tiene noción de un determinado fenómeno (observación), usualmente se establece una suposición acerca de por qué ocurre y cuáles son sus causas (hipótesis). Es necesario entonces repetir el fenómeno (o parte de él) controladamente (experimentación) con el fin de evitar la interferencia de agentes ajenos que afecten lo que se desea estudiar, y así poder obtener valores numéricos confiables y reproducibles. Una vez que se tiene el resultado de un experimento (que puede confirmar o negar la hipótesis), hay que buscar alguna explicación racional apoyada en los conocimientos previos que se poseen (teoría).

Y cuando se posee una teoría, a partir de esta siempre es posible tratar de predecir lo que ocurrirá en alguna otra situación parecida, e idear algún otro experimento que servirá de comprobación al anterior, y también a la teoría (de ahí la doble flecha curva en el esquema de la figura). De esta manera, se establece una interacción continua entre teoría y experimento, que constituye sin lugar a dudas el núcleo esencial y fuerza motriz del método científico.

Asociada a esta interacción hay todo un pro-

ceso de divulgación internacional de resultados a través de publicaciones en revistas científicas arbitradas, repetición de experimentos en diversos laboratorios, críticas, errores y rectificaciones. Cuando la teoría se hace suficientemente amplia y sólida, cuando es capaz de dar explicación a gran cantidad de sucesos e interrelaciones, y también de rebatir racionalmente cualquier crítica, se llega a la ley. Las leyes son relaciones de causa y efecto entre sucesos o eventos y no son eternas. Muchas veces se hace necesario generalizarlas para lograr explicar fenómenos no detectados hasta el momento.

En algunas ciencias como la astronomía y la arqueología u otras ciencias sociales es materialmente imposible llevar a cabo experimentos controlados en relación con un fenómeno determinado. En esos casos, la observación precisa y reproducible sustituye al experimento y las teorías solo se consideran válidas cuando:

- Son capaces de asociar racionalmente muchos hechos en apariencia independientes, y
- Logran predecir la existencia de relaciones y fenómenos no detectados hasta el momento.

Y siempre se debe tener presente que, al contrario de cómo muchos piensan, los resultados científicos no vienen de dados de manera invariable de una vez y para siempre. Según Richard Feynman, premio Nóbel de Física, precursor de la nanotecnología y reconocido divulgador científico:

“Cada generación debe transmitir los descubrimientos que logra a partir de su experiencia, pero buscando un equilibrio sutil de respeto e irrespeto, de manera que permita la transmisión que reconoce que lo transmitido podría no ser muy sabio. Es necesario enseñar a aceptar y rechazar el pasado en una

especie de equilibrio que exige gran habilidad. Solamente la ciencia contiene en sí misma la enseñanza del peligro que reside en creer en la infalibilidad de los grandes maestros de las

generaciones anteriores.” (Publicado en *Physics Teacher*, Septiembre de 1969).

El autor

Parte 1. El ambiente que nos rodea

1.1 - Ciencia y tecnología

No es lo mismo la ciencia que la tecnología; la ciencia se refiere a la obtención de nuevos conocimientos, la tecnología a su aplicación. Lo que aparece en este libro se refiere a ambas: a la ciencia y a la tecnología. El lector no especializado en alguna de ellas no hallará mucha diferencia entre una y otra, a pesar de que seguramente conoce que no es lo mismo licenciatura que ingeniería, y que incluso sepa que muchas veces se estudian en universidades diferentes. Sin embargo, a veces resulta difícil diferenciar una de la otra. El premio Nobel de Física de 2009 no fue a parar a manos de un físico, sino a la de tres ingenieros; el canadiense Willard Boyle, el norteamericano George Smith y el chino Charles Kao. En los años sesenta del siglo pasado, Boyle y Smith lograron desarrollar los sensores de imagen de las cámaras fotográficas digitales, mientras que Kao trabajó en la transmisión eficiente de información a larga distancia por fibra óptica. Según expresó el representante de la Academia de Ciencias sueca durante el anuncio del premio, "...son inventos que han cambiado completamente nuestras vidas y también han proporcionado herramientas para la investigación científica".

Por otra parte, clasificar siempre ha sido un asunto complejo; a medida que avanzan los conocimientos y la interacción entre las diferentes ciencias y tecnologías la clasificación resulta más difícil. Si hace algún tiempo era relativamente fácil encajar los conocimientos de acuerdo a la división convencional en ciencias formales, naturales, sociales y médicas, cada

vez resulta más difícil clasificar determinados sucesos como pertenecientes a una ciencia específica. Los conocimientos y métodos propios de una ciencia son cada vez más necesarios para llegar a conocer lo que antes se consideró privilegio exclusivo de alguna otra; surgen problemas cuya resolución necesita del concurso de diversas ciencias, sin que se pueda especificar con precisión cuál de ellas resulta la principal.

Obviamente, la dificultad de clasificar también se refleja en las políticas educativas, porque a pesar de que cada día son más y más los nuevos conocimientos en todas las ramas de la ciencia, no es posible aumentar indefinidamente lo que un estudiante debe aprender en el tiempo que se posee para ello. ¿Luego: qué enseñar? ¿Se debe proveer al estudiante con una amplia cultura científica en todas las ciencias básicas, que le permita alcanzar en el futuro nuevos conocimientos de manera autodidacta o, por el contrario, se debe incrementar la especialización, haciendo énfasis en los nuevos conocimientos y eliminando todo lo que no sea imprescindible? ¿Es posible llegar a un término medio entre ambos? Otra pregunta pertinente sería: ¿Hasta dónde la tecnología es técnica y no ciencia? (O viceversa).

Sobre este tema hay criterios muy disímiles en materia educativa, que van de un extremo al otro. Incluso, los que predominan en algunos casos no son los más racionales desde el punto de vista científico, sino los que se adoptan por situaciones coyunturales de diverso tipo: económicas, políticas, o incluso por las preferencias personales de quienes les tocó decidir en ese momento.

No es propósito del autor disertar ni tomar partido sobre este complejo tema, sino sólo llamar la atención sobre el mismo, advirtiendo al lector de cómo se han ido mezclando con el tiempo lo que antes eran campos bien delimitados del conocimiento.

Para ilustrar la idea, quizás lo más adecuado sea mostrar un ejemplo concreto.

En el siguiente estudio, aún en progreso, para alcanzar nuevos conocimientos en un tema aparentemente simple ha sido necesario aplicar técnicas pertenecientes a especialidades tan diferentes como la arqueología y la historia, por una parte (ciencias sociales) y dentro de las ciencias naturales la mecánica y la astronomía. Desde luego, con el apoyo de la matemática como ciencia formal. Al lector no le resultará difícil encontrar otros ejemplos en las restantes secciones de este libro.

El mecanismo de Antiquitera. Este es el nombre de una pequeña isla griega que se encuentra al sur del continente europeo, al noroeste de Creta. En el año 1900 Dimitrios Kontos, un humilde pescador de esponjas, descubrió los restos de un naufragio, que resultaron ser de un navío romano hundido 100 años antes de nuestra era.

En los restos aparecieron estatuas de mármol y bronce de la antigua Grecia, que continuaron su camino hasta el Museo Nacional de Arqueología en Atenas tras haber descansado unos 2000 años en el fondo del mar. Entre las piezas enviadas al museo se encontraba un pequeño objeto confeccionado con madera y bronce, que resultó ser un complejo dispositivo mecánico con muchos engranajes (figura 1.1).



Figura 1.1
Fragmentos del mecanismo de Antiquitera

Al profundizar en las investigaciones se comprobó que el dispositivo era empleado para calcular fenómenos astronómicos como los eclipses y la transición aparente de la luna por las constelaciones. Se estima que fue construido a finales del siglo II de a.n.e. (o principios del I), posiblemente en Siracusa. Actualmente se han identificado siete grandes fragmentos y más de 70 piezas pequeñas que lo integraban.

El resumen de los primeros intentos de reconstruir el mecanismo se publicó en 1974 por el físico británico Derek de Solla Price, quien más adelante pasó a ser miembro de la cátedra de Historia de la Ciencia en la Universidad de Yale. Con posterioridad muchos otros han participado en las investigaciones, incluyendo historiadores, curadores de museo y especialistas en computación, hasta lograr una reconstrucción bastante razonable de este extraordinario dispositivo mecánico de la Grecia antigua.

Se logró develar que funcionaba mediante un complejo mecanismo de engranajes (en la figura que se muestra se pueden contar hasta 27 ruedas individuales).

les). Todo estaba controlado por una manivela lateral, que regulaba el movimiento de varios indicadores en tres diferentes escalas. Una de ellas indicaba el movimiento de la luna al recorrer las constelaciones del zodiaco; las restantes mostraban el mes de acuerdo al ciclo Metónico (un calendario de 235 meses) y un ciclo de eclipses de 223 meses (el ciclo de Saros).

El ciclo de Saros aún se emplea para predecir los eclipses de luna y de sol. Ya era conocido por los antiguos astrónomos de Babilonia varios cientos de años antes de nuestra era. Tiene una duración de 18 años, más 11 días y $\frac{1}{3}$. Tras un eclipse, el Sol, la Tierra y la Luna regresan casi exactamente a la misma posición relativa después de transcurrido ese tiempo. Así, al conocer la fecha de un eclipse se puede predecir la de los inmediatos siguientes.

El nombre de ciclo Metónico proviene del astrónomo griego Metón, que vivió en el siglo V antes de nuestra era. Fue quien descubrió que las fechas de las fases de la Luna se repetían tras un intervalo de unos 19 años. Existe una relación entre el ciclo Metónico y el de Saros, pues los eclipses de Sol y de Luna sólo pueden ocurrir en Luna Nueva o Luna Llena, respectivamente.

Se valora la posibilidad de que otras escalas del mecanismo de Antikythera, aún no identificadas en su totalidad, indiquen la posición de los 5 planetas conocidos por los antiguos astrónomos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno.

El Proyecto de Investigación del Mecanismo de Antikythera (Antikythera Mechanism Research Project) es fruto de una

colaboración internacional entre Grecia, Reino Unido y EE.UU. donde participan científicos de diversas especialidades. Hasta el momento, los integrantes del proyecto han publicado en la revista Nature dos artículos detallando los pasos seguidos en la reconstrucción del mecanismo. El primer artículo fue publicado en 2006 (Nature, vol. 444, 587), mientras que el segundo tiene fecha de julio 2008 (Nature, vol. 454, 614).

1.2 Y sin embargo, se mueven

“En vez de mostrarse como una estatua inerte, la tierra es algo vivo y móvil”. Así escribió J. Tuzo Wilson, geofísico canadiense que en la década de los 50 del siglo pasado demostró la continuidad global de las *zonas de subducción*, donde la corteza oceánica penetra en el manto y se funde, generando actividad volcánica.

Hace más de 400 años el cartógrafo holandés Abraham Ortelius sugirió en su libro *Thesaurus Geographicus* (1596) que las Américas habían sido “...arrancadas de Europa y África... por terremotos e inundaciones...”, y que “...los vestigios de la ruptura se hacen evidentes cuando se mira el mapamundi y se consideran cuidadosamente las costas de los tres (continentes)”.

Pero no fue hasta principios del pasado siglo cuando la comunidad científica consideró seriamente la idea de los continentes en movimiento. Los criterios acerca de *la deriva de los continentes*, un antecedente de las teorías contemporáneas relativas a los procesos que realmente tienen lugar en la superficie de la tierra, fueron introducidos en 1912 por el meteorólogo alemán

A.L. Wegener. La teoría de la deriva establece que hace unos 200 millones de años todos los continentes formaban parte de un solo supercontinente, denominado *Pangea* (figura 1.2). La evidencia acumulada sugiere que el supercontinente se dividió inicialmente en dos grandes masas; *Laurasia* en el hemisferio norte y *Gondwana* en el sur. La subdivisión posterior de Laurasia y Gondwana habría conducido a la formación de los continentes tal como existen hoy en día.

La mencionada teoría tiene su base fundamental en la *paleontología*, que se dedica al estudio de los *fósiles*, término utilizado para describir cualquier evidencia de la existencia de un organismo con más de 10 000 años de antigüedad. Restos fósiles idénticos de animales y plantas, encontrados en diversos continentes, indican que estuvieron unidos hace unos 200 millones de años. La evidencia más antigua de vida en el planeta es el fósil microscópico de una bacteria que vivió hace 3600 millones de años.

Las variaciones en el clima también permiten deducir el desplazamiento de las grandes masas continentales. Por ejemplo, el descubrimiento en la Antártica de residuos de plantas tropicales, en forma de yacimientos de carbón vegetal, llevó a la conclusión de que esta tierra congelada debía haber estado situada más cerca del ecuador en alguna época anterior, en una región climática que favoreciera el crecimiento de una vegetación exuberante.

La teoría tectónica de placas. Pero no fue sino hasta la década de los 1960 cuando comenzó una verdadera revolución en el campo de las Ciencias de la Tierra, al quedar establecida la *Teoría Tectónica de*

Placas. A partir de ese momento la teoría fue verificada y mejorada muchas veces, de manera que actualmente se posee una imagen bastante completa de los procesos que han modelado nuestro planeta a lo largo de millones de años.

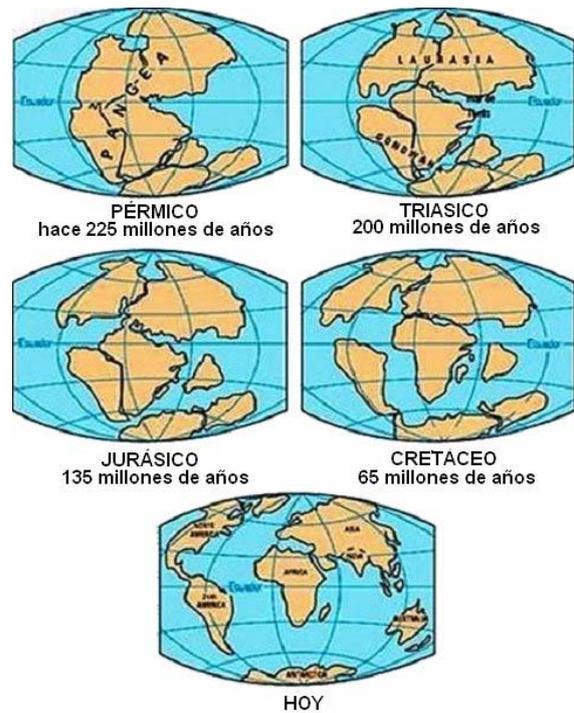


Figura 1.2
Deriva de los continentes

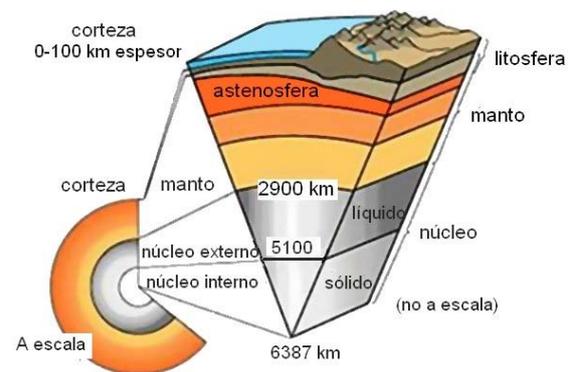


Figura 1.3
Corteza, manto y núcleo de nuestro planeta.

La tectónica de placas relaciona diferentes ramas de las ciencias de la tierra como

la paleontología, la geofísica, la sismología y la vulcanología. Ha logrado dar explicación a preguntas que habían preocupado a los científicos durante siglos como, por ejemplo, por qué los terremotos y las erupciones volcánicas ocurren solamente en regiones muy específicas del planeta, o cómo fue que se formaron cadenas montañosas tan impresionantes como los Alpes o los Himalayas.

La palabra *tectónica* procede del griego “construir”, y en geología una *placa* es un gran pedazo rígido de roca sólida. Tectónica de placas significa, por tanto, que la superficie de nuestro planeta está constituida por láminas rígidas de roca que “flotan” y se mueven encima de otras capas rocosas más profundas, que poseen mayor fluidez (figuras 1.3 y 1.4).

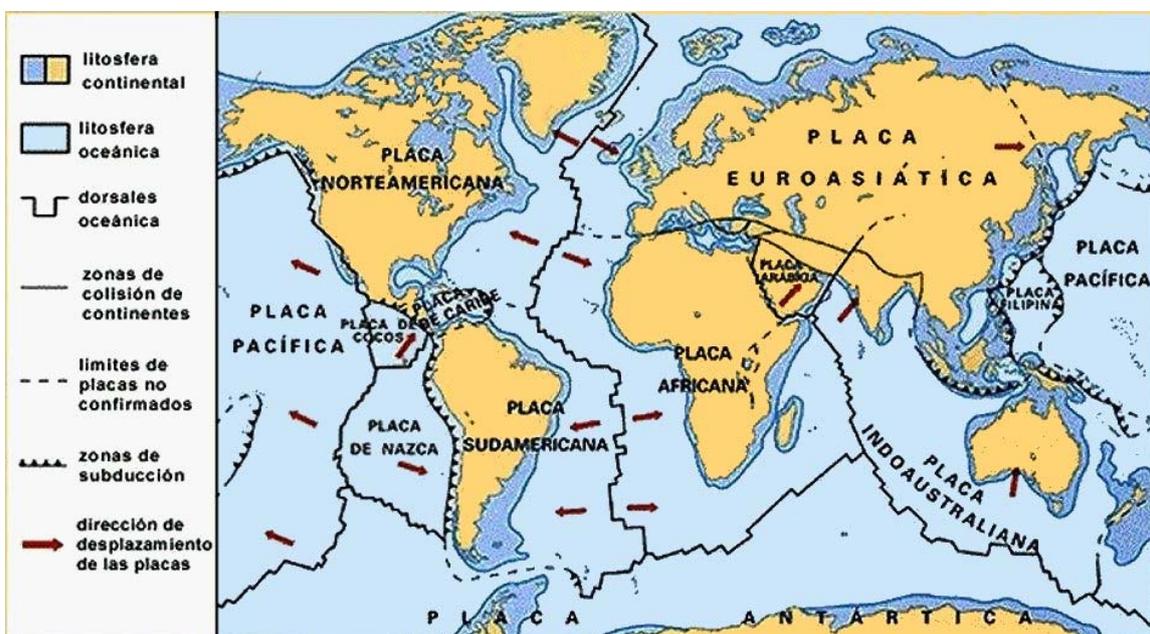


Figura 1.4
Placas terrestres

La superficie terrestre está formada por alrededor de una docena de estas placas, de espesor no mayor de 100 km. La inmensa mayoría de los terremotos y erupciones volcánicas tienen lugar en regiones muy específicas, a lo largo de las fronteras de placa. Una de estas regiones es el denominado “Anillo de Fuego del Pacífico”, la región vulcano-sísmica más activa del mundo, donde la Placa del Pacífico forma frontera con las placas adyacentes. Pero no todas las fronteras de placa se comportan de la misma forma;

los procesos que tienen lugar difieren cuando las placas convergen, divergen o se deslizan tangencialmente. De aquí que existan cuatro tipos de fronteras de placas (figura 1.5):

- *divergentes*, donde continuamente se forma nueva corteza mientras las placas se van separando.
- *convergentes*; una placa se hunde debajo de otra y desaparece corteza terrestre (subducción).

- *de transformación*; las placas se deslizan tangencialmente en la superficie y no aparece ni desaparece corteza.



Figura 1.5
Tipos de placas. La Falla de San Andrés marca el límite de frontera entre la Placa Norteamericana y la del Pacífico.

- *Zonas de frontera de placa*, correspondientes a regiones relativamente anchas donde las fronteras no están bien definidas ni está claro el efecto de la interacción entre las diferentes placas.

Fronteras divergentes. Un descubrimiento muy importante del siglo XIX fue

la detección de la existencia de una cordillera montañosa dorsal en medio del océano Atlántico. Hacia la década de 1920 los científicos llegaron a la conclusión que esta dorsal se extendía hacia el océano Pacífico y también por la tierra firme, dando casi una vuelta completa al planeta.

El estudio de los lechos marinos progresó cuando el *sonar*, dispositivo de sondeo por eco, fue modificado para medir las profundidades oceánicas. Con el sonar fue posible medir la topografía submarina y establecer su cartografía. Más tarde los geofísicos adaptaron los *magnetómetros* aéreos para poder medir variaciones de intensidad y orientación geomagnética en el fondo de los océanos.

Estas observaciones, añadidas a las del gran flujo de calor existente en la región, permitieron concluir que la dorsal es el lugar donde se crea nueva corteza oceánica. El material emerge del subsuelo en forma de lava caliente, pero se enfría y solidifica con rapidez al contacto con el agua fría del fondo oceánico. Y para dejar sitio a esta adición de nueva corteza, las placas deben separarse lenta, pero constantemente. En el Atlántico norte, la velocidad de separación es de sólo 1 cm al año, pero en el Pacífico llega a más de 4 cm por año.

Fronteras convergentes. Ya en la década de 1930, sismólogos estadounidenses habían detectado las características particulares de las costas del océano Pacífico, donde la corteza oceánica penetra en las capas más profundas de la tierra (el manto) y se funde. En la década de 1950 se le llamó a este proceso *subducción*. Se ha comprobado la existencia de regiones

de subducción a lo largo de diversas costas del Pacífico. Muchas de estas regiones tienen asociado un sistema montañoso que corre paralelo a la frontera de placas, donde son frecuentes los terremotos y los volcanes. Cuando la corteza subducida se funde, el magma de nueva formación asciende y puede llegar a hacer erupción en la superficie terrestre en forma de volcanes, a una distancia de hasta 100 km tierra adentro. Las erupciones de magma fundido por subducción han creado cadenas largas y arqueadas de islas volcánicas en Japón, las Filipinas y las Aleutianas en Alaska.

En las costas de Perú y Chile la Placa Nazca del océano Pacífico es subducida debajo de la Placa Suramericana, formando en el lecho marino la zanja o trinchera (trench) característica de la subducción en la frontera de las placas. La Placa Suramericana es entonces empujada hacia arriba, dando lugar a la cordillera de los Andes.

Aunque el hundimiento de la Placa Nazca es continuo, se producen saltos bruscos en regiones localizadas que quedan rezagadas, originando la brusca elevación del terreno, que puede llegar a ser de varios metros cada vez, y también terremotos intensos. La formación de los Himalayas se debe a un proceso similar.

Fronteras de transformación. El ejemplo clásico de una frontera del tipo de transformación es la denominada *Falla de San Andrés*, en California, donde las fronteras de la Placa Norteamericana y del Pacífico se deslizan una contra otra, causando terremotos de gran intensidad. Los más intensos han sido los de 1906, 1989 y 1994

en San Francisco, ciudad ubicada prácticamente sobre la frontera de placas. Las pérdidas han sido de miles de muertos y miles de millones de dólares en daños materiales.

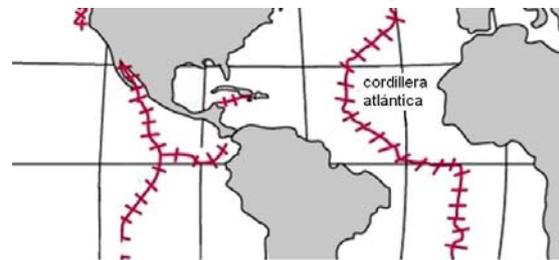


Figura 1.6
Fronteras de placa en el mar Caribe y regiones cercanas.

Como frontera de cuarto tipo se puede mencionar la que se encuentra en la región oriental de la isla de Cuba. La parte oriental de la isla está ubicada en el borde sur de la Placa Norteamericana, formando una zona de frontera poco definida con la Placa del Caribe. En el sur de las provincias orientales se registran anualmente decenas de sismos de poca intensidad (figura 1.6).

¿Y de donde sale toda esa energía? ¿Cuál es la fuerza motriz que causa el desplazamiento de las placas, que a su vez crea cadenas montañosas y da origen a volcanes y terremotos? Cuando el fondo de una vasija con agua se calienta, el agua que está cerca del fondo, más caliente y menos densa que la de las capas superiores, sube a la superficie y es sustituida por el agua más fría de la parte superior de la vasija por la acción de la gravedad. Este proceso de *convección* ocurre continuamente, dando lugar a corrientes circulares en el seno del líquido. Si en vez de agua se calienta otro líquido más espeso como, por ejemplo, una natilla, la convección también tiene lugar, pero el proceso ocurre

mucho más lentamente (figura 1.7).

Es conocido que la temperatura aumenta rápidamente en la medida que nos acercamos al centro de la tierra. Por tanto, una posible explicación al origen del movimiento de las placas es la de las corrientes de convección que surgen a causa de la diferencia de temperatura entre la corteza y las capas más profundas.

Se argumenta que la intrusión del magma dentro de las fronteras de las placas en separación puede proporcionar una fuerza adicional (el *empuje de borde* o "ridge push"). En el caso de las fronteras convergentes, el hundimiento de una porción oceánica en la frontera por la acción de la gravedad también puede proporcionar una fuerza adicional (el *tirón de faja costera* o "slab pull"). Algunos científicos opinan que, en vez de las corrientes de convección, el "ridge push" y el "slab pull" son las principales fuerzas motrices de las placas y de la deriva de los continentes.

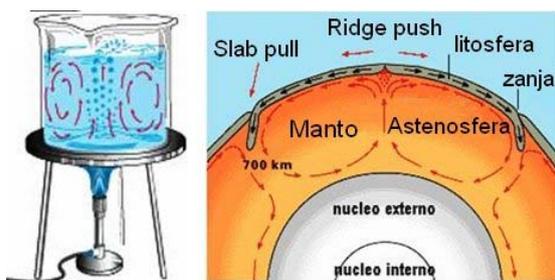


Figura 1.7

(Izq.) Corrientes de convección en un beaker con agua hirviendo; (Der.) Convección en el manto terrestre

1.3 El planeta por dentro

Géiseres, fuentes termales, fumarolas, volcanes que arrojan toneladas de lava

hirviente..., terremotos que destruyen puentes, carreteras, edificios y ocasionan la muerte de decenas y cientos de miles de personas. ¿Cuál es la fuente de toda esta energía? Algunos opinan que la fuente es la energía térmica liberada por la lenta desintegración del uranio y otros elementos radiactivos. Sin embargo, ésta no es la única explicación posible.

Cierta vez alguien me preguntó lo siguiente: si es el Sol quien calienta la tierra, entonces ¿por qué en la cima de las montañas, más cercanas al sol, hace más frío que en la base? Confieso que en aquel instante no supe que responder; sin embargo, la respuesta es en realidad muy simple. A pesar del conocido fenómeno del "calentamiento global" nuestro planeta, como un todo, no se calienta; en realidad se está enfriando desde hace miles de años. La energía fluye continuamente de su interior más caliente, a una temperatura que llega hasta los 4000 °C, hacia el exterior más frío.

Aclaremos.

En la superficie del planeta existe un equilibrio muy delicado entre la radiación que se recibe del sol y la que emite la tierra al espacio. En los últimos años este equilibrio se ha ido alterando, principalmente a causa de las emisiones del CO₂ gaseoso de los vehículos automotores, la industria y la tala de bosques (las plantas absorben CO₂), desplazando la temperatura de equilibrio hacia valores más altos. El CO₂ atmosférico tiene la propiedad de reducir la emisión de las radiaciones terrestres hacia el espacio sin bloquear las solares. En esto consiste el calentamiento global.

Ahora bien, la superficie habitable de

nuestro planeta, contando desde lo más profundo de los mares hasta las montañas más altas, es sólo una ínfima parte de su diámetro –piense el lector en la fina cáscara de una manzana. De ahí que los cambios en la superficie, de vital importancia para nosotros, son casi imperceptibles para el planeta como un todo.

Así, la Tierra se está enfriando desde hace cientos de miles de años, lo seguirá haciendo en el futuro, y es precisamente ese enfriamiento el que proporciona la fuerza motriz de volcanes y terremotos.

A medida que nos alejamos del centro del planeta la temperatura disminuye, y esta es la razón de que en la cima de las montañas la temperatura es menor que en la base, a pesar de que las cimas están “más cerca del sol”. Por encima de los 10 km entran a jugar otros factores tales como el enrarecimiento de la atmósfera y la interacción de la radiación solar con la capa de ozono (figura 1.8).

Teorías más recientes. Las hipótesis modernas acerca de la formación del sistema solar consideran que nuestro planeta se formó hace unos 5 mil millones de años a partir de los choques a alta velocidad de meteoritos y cometas que fueron aglomerándose en un sólo cuerpo celeste. Estos choques liberaron una gran cantidad de energía, suficiente para calentar todo el planeta, e incluso fundirlo y llevarlo a fase líquida. El proceso de enfriamiento y solidificación subsiste hasta el presente.

Durante la formación de la Tierra, las sustancias más densas como el hierro se hundieron hacia el centro del planeta, mientras que los compuestos más ligeros como

los silicatos y otros compuestos de oxígeno, incluyendo el agua, quedaron cerca de la superficie. Hoy día se conoce que la tierra está dividida en tres capas principales que difieren por su constitución química: la *corteza*, que alcanza una profundidad de 30 kilómetros; el *manto*, que se extiende desde la litosfera hasta una profundidad de unos 2900 km y el núcleo, de unos 2225 km de radio (figura 1.9).

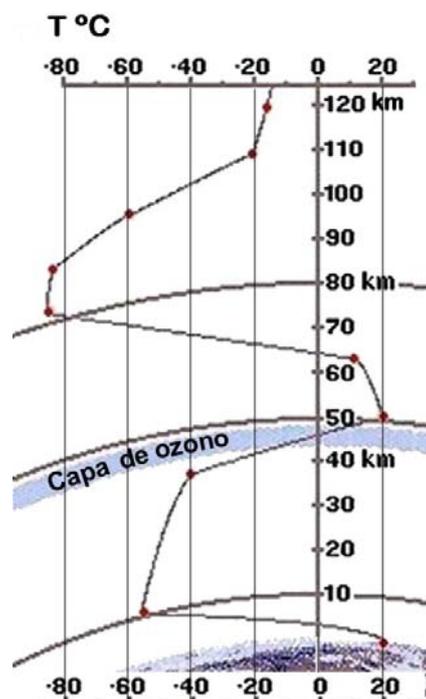


Figura 1.8
Variación de la temperatura con la altura

La corteza, mucho más delgada que cualquiera de las otras capas, está formada por minerales poco densos de calcio, sodio y silicatos de alúmina. Más fría y frágil que las capas inferiores, se fractura fácilmente para dar lugar a los terremotos. La corteza incluye las partes *oceánica* y *continental*, con características diferentes.

Es un hecho ampliamente comprobado que a medida que descendemos en una excavación la temperatura aumenta, independientemente de la latitud geográfica

donde se lleve a cabo el descenso. Si cerca de la superficie se pueden encontrar algunas diferencias entre un lugar frío y otro templado, a la distancia de 2.5 km bajo la superficie terrestre se encuentra invariablemente una temperatura de 100 °C en cualquier sitio geográfico, lo que representa un incremento promedio de 30 °C por km de profundidad. Suponiendo que el ritmo de incremento se mantenga aproximadamente igual, a 50 km por debajo de la superficie se debe alcanzar la temperatura de las rocas fundidas (entre 1200 y 1800 °C). (Note que 50 km representan solamente... ¡la mitad de la distancia entre la Habana y Varadero!).

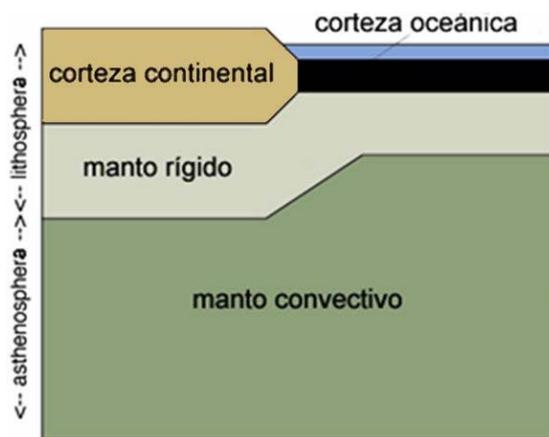


Figura 1.9

Corteza y manto terrestres

Si por el contrario nos alejamos de la superficie, la temperatura disminuye, aunque más lentamente (5.5 °C por kilómetro de altura). En los trópicos la temperatura media es de alrededor de 25 °C, pero a 10 kilómetros de altura (la altitud que alcanzan los vuelos intercontinentales) la temperatura puede disminuir hasta -30 °C o más.

El manto está formado principalmente de hierro, magnesio, aluminio, silicio y compuestos de oxígeno en forma de silicatos. A pesar de ser esencialmente sólido,

puede deformarse y fluir plásticamente de la misma forma que lo hace la pasta de dientes cuando apretamos el tubo con suficiente fuerza. Se divide en *manto superior* o manto rígido y *manto inferior* o manto plástico.

La corteza y el manto superior forman la *litosfera*, mientras que la zona de transición entre el manto superior y el inferior se denomina *astenosfera* (ver figura 1.9). La astenosfera representa un papel importante en la teoría *tectónica de placas*, que explica satisfactoriamente la deriva de los continentes y la existencia de las diferentes zonas sísmicas en nuestro planeta descritas en la sección anterior.

Las corrientes de convección dentro del manto trasladan la mayor parte de su energía térmica desde la profundidad de la Tierra a la superficie y constituyen la fuerza motriz de la deriva de los continentes. Este flujo de convección es quien proporciona rocas calientes y fundidas al sistema mundial de cadenas montañosas y suministra la lava que sale de los volcanes.

El núcleo también se subdivide en dos partes; una externa, compuesta fundamentalmente de hierro fundido con un pequeño porcentaje de azufre y otra más interna, que se encuentra a temperatura aún mayor (hasta 6650 °C) pero que, a causa de la alta presión que ejercen las capas superiores, se encuentra en estado sólido.

¿Cómo se sabe todo esto? ¿Y de dónde se obtiene toda esta información? ¿Cómo se sabe, por ejemplo, que una parte del núcleo de la Tierra es líquida y otra es sólida? No sólo con excavaciones en la tierra y en el mar, o analizando los lechos de

rocas y plegamientos. Si en un flujo estable de calor se conoce la diferencia de temperaturas entre dos puntos intermedios, es posible determinar con muy buena aproximación la temperatura de las fuentes, aún cuando estén muy alejadas. En cuanto al núcleo terrestre, las primeras indicaciones sobre sus características se obtuvieron a partir del registro de las *ondas sísmicas* que acompañan a los terremotos.

Las ondas sísmicas son ondas de gran alcance que se propagan por las rocas cuando un sismo tiene lugar. Hasta un 10% de la energía generada en el sismo se puede disipar en estas ondas, que se propagan en todas direcciones atravesando el planeta, no sólo en su superficie.

Existen dos tipos esenciales de ondas sísmicas. Las ondas primarias o de tipo P (pressure, presión) son ondas longitudinales de compresión y extensión; su velocidad de propagación varía entre 1.5 y 8 km por segundo en la corteza terrestre. Las ondas secundarias o de tipo S (shear, cizalla) son ondas transversales, que siempre viajan a una velocidad menor, del 60-70% relativa a la onda P.

Las ondas P hacen oscilar el terreno en la misma dirección en que se van propagando. Las ondas S lo mueven en dirección perpendicular a la dirección de propagación (figura 1.10). La diferencia de velocidad e intensidad entre los dos tipos de ondas permite a los sismólogos determinar rápidamente la distancia hasta el sismo desde cualquier estación de observación, computando la diferencia de tiempo en que tardan en llegar hasta la estación ambos tipos de ondas. Las ondas Para que exista magnetismo el núcleo de

la tierra debería estar formado por algún sólido magnético o, en su defecto, tendrían que estar presentes corrientes eléctricas continuas para producir un campo magnético similar al que aparece en una bobina o enrollado con corriente. se pueden registrar automáticamente mediante el *sismógrafo*.

Las ondas sísmicas se desvían y reflejan parcialmente al llegar a una frontera o interfase del terreno, de la misma forma que la luz se refracta al pasar del aire al agua o viceversa. Las ondas P son capaces de viajar tanto en líquidos como en sólidos, mientras que las ondas S no pueden propagarse en líquidos y gases.

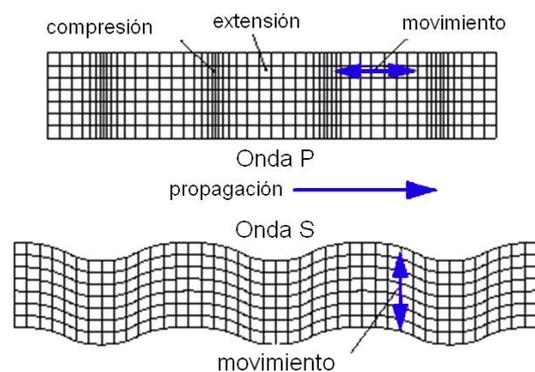


Figura 1.10
Ondas sísmicas

Detectando las ondas provenientes de un sismo específico mediante sismógrafos colocados en diferentes lugares del globo se comprobó que existía un *cono de sombra* de 105 grados. En este cono las ondas S desaparecen y las ondas P se desvían de su trayectoria. Se llegó así a la conclusión de que en el centro de la tierra existe un núcleo líquido que impide la propagación de las ondas S y cuya frontera desvía las ondas P. Conocido el radio de la tierra, el estimado del tamaño del núcleo se obtiene fácilmente por consideraciones geo-

métricas (figura 1.11). Se obtiene información adicional sobre el núcleo al considerar la existencia del campo magnético terrestre.

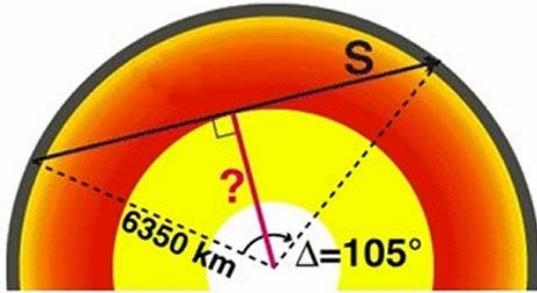


Figura 1.11

Determinación del tamaño del núcleo terrestre

Sin embargo, los materiales pierden sus propiedades magnéticas a alta temperatura (el hierro por encima de los 540 °C) y la temperatura en el centro de la Tierra es del orden de los 6650 °C. De aquí que las teorías sobre el origen del magnetismo de la tierra también consideren que el núcleo de hierro es líquido (excepto en el mismo centro de la Tierra, donde la presión es tan extremadamente alta que solidifica al núcleo). Las corrientes de convección dentro del núcleo líquido serían las que generan el campo magnético terrestre. El movimiento de deriva hacia el Oeste que se observa en los polos magnéticos se explicaría satisfactoriamente suponiendo que el núcleo sólido gira más despacio que el núcleo líquido exterior.

¿Se puede aprovechar la energía terrestre? ¿Es posible utilizar la inmensa energía acumulada bajo nuestras plantas? Pues sí, se puede utilizar y de hecho ya se utiliza, aunque en escala muy reducida. La geotermia es la ciencia relacionada con el calor interior de la Tierra; su principal aplicación práctica es la localización de yacimientos naturales de agua caliente para ser utilizada en la generación de

energía eléctrica, en calefacción o en procesos de secado industrial.

La energía geotérmica natural se utilizó por primera vez en 1904 en Toscana, Italia, para generar energía eléctrica, y aún se utiliza. Los fluidos geotérmicos provenientes de géiseres y fuentes termales se usan como calefacción en Budapest, en algunas zonas de París, en Reijavik y otras ciudades de Islandia, donde hay mucha actividad geotérmica; también en varias regiones de los Estados Unidos.

Las perforaciones modernas alcanzan reservas de agua caliente y vapor que se encuentran hasta 3 km bajo el nivel del mar. El vapor se purifica en la boca del pozo y es transportado en grandes tubos térmicamente aislados hasta las turbinas que generan la energía eléctrica. Las nuevas técnicas para el aprovechamiento de esta energía contemplan la perforación en lugares cercanos a sistemas volcánicos en reposo, con el fin de inyectar agua desde la superficie, que regresará como vapor caliente a presión, capaz de mover una turbina.

1.4 Magnetismo terrestre

¿Quién no conoce la existencia del campo magnético terrestre, que permite la orientación geográfica mediante la brújula? Junto a la estrella polar, ha servido de guía a los viajeros durante siglos (figura 1.12). Sin embargo, no muchos saben que el campo magnético terrestre realiza una segunda y más importante función que la de servir de orientación: protege nuestro planeta de los excesos de la radiación solar, hasta el punto que se ha estimado que, de no existir el campo magnético, la Tierra sería un sitio seco y árido como Marte. El

viento solar habría arrastrado al espacio su agua y su atmósfera desde hace muchísimos años.

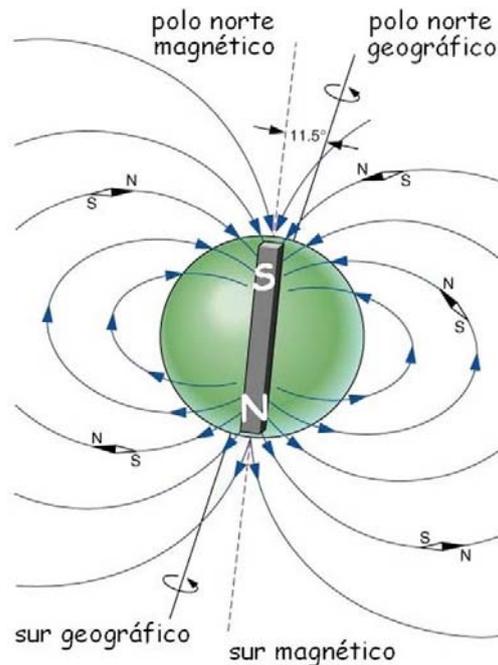


Figura 1.12

Campo magnético terrestre. Como los polos de distinto signo se atraen, para que el norte o positivo de la brújula apunte al norte geográfico, la Tierra debe comportarse como un imán con su polo norte ubicado en el sur.

¿Qué es el viento solar? Es un flujo de partículas cargadas –principalmente protones y electrones de alta velocidad- que inciden continuamente sobre la Tierra, provenientes del Sol. Las partículas logran escapar de la atracción gravitatoria solar porque alcanzan gran energía cinética y velocidad a causa de las altas temperaturas.

De manera similar a como el agua se desvía al chocar con la proa de una embarcación y la rodea, al interaccionar con el campo terrestre las fuerzas magnéticas hacen que el viento solar cambie de rumbo -sin modificar su energía- en una

región del espacio llamada el *arco de choque*. Las partículas prosiguen su movimiento formando una larga cola alrededor de la Tierra o girando a su alrededor, creando así una especie de cubierta o envoltura, la *magnetofunda*. Algunas partículas logran atravesar esa primera barrera magnética, pero son atrapadas más adentro, en los denominados *cinturones de radiación de Van Allen* (figura 1.13).

Otras logran finalmente ‘colarse’ y llegar hasta la atmósfera a través de las *cúspides* en los polos Norte y Sur, interaccionando con los gases de las capas superiores. La interacción se puede observar a simple vista y es la que da origen a las auroras (boreal y austral), fenómeno muy común en las regiones polares, pero que rara vez se manifiesta cerca de los trópicos. Un efecto adicional de esta interacción electromagnética es que modifica las corrientes eléctricas en la ionosfera, región donde se reflejan las ondas de radio. De aquí que, cuando la radiación es intensa puede perturbar notablemente las comunicaciones y afectar instrumentos electrónicos sensibles.

Tormentas magnéticas. Una tormenta magnética es una perturbación transitoria global del campo magnético terrestre. Consiste en un *descenso* bien definido de la intensidad del campo en todo el planeta, no mayor del 0.5%. Se mantiene de 12 a 24 horas, seguida por una recuperación gradual que persiste de 1 a 4 días. La disminución es causada por un campo magnético sobrepuesto que se suma al campo terrestre en dirección contraria, reduciendo su valor. Se genera en el cinturón exterior de radiación que circunvala al planeta, cuando la corriente de anillo es

reforzada por los protones procedentes de alguna erupción solar violenta. La corriente se encuentra a una distancia entre 3 y 5 veces el radio de la tierra, en su plano ecuatorial. Vista desde el norte el sentido de giro es el de las agujas del reloj (figura 1.14).

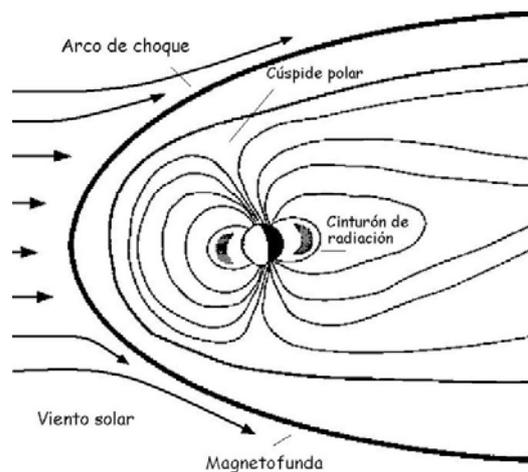


Figura 1.13
Magnetosfera y viento solar.

Existen laboratorios que monitorean continuamente la intensidad del campo magnético terrestre en la superficie; el observatorio Kakioka, en Japón, publica el registro diario en su sitio WEB.

La relación entre las tormentas magnéticas y las manchas solares es conocida desde finales del siglo XIX. Cuando son visibles grandes manchas solares es mucho más probable que aparezca una gran tormenta magnética. El intenso campo magnético asociado a las manchas va unido a fulguraciones y eyecciones de sustancia en la corona solar; es así como se proyectan nubes de plasma hacia el espacio interplanetario en direcciones bien definidas. Si una de esas eyecciones se orienta hacia la Tierra, su frente de onda dará origen a una tormenta magnética.

El 13 de marzo de 1989 una tormenta severa hizo colapsar las redes eléctricas en Quebec, Canadá. En cuestión de segundos muchos circuitos de protección se desconectaron y seis millones de personas quedaron sin energía eléctrica durante nueve horas, con grandes pérdidas económicas. Esta excepcional tormenta produjo auroras boreales a distancias tan lejanas del polo como es el sur de Texas. Fue el resultado de una gran una emisión de masa en la corona solar que tuvo lugar 4 días antes.

¿Son dañinas las tormentas magnéticas?
Se sabe que la exposición directa a la radiación de partículas de alta energía, como las que componen el viento solar, pueden causar enfermedad por radiación a personas y animales. El mecanismo es el mismo al que tiene lugar durante las explosiones o accidentes nucleares: las partículas atraviesan los tejidos causando daños microscópicos en las células. La radiación puede afectar los cromosomas, causar cáncer, o coadyuvar la aparición de otros problemas de salud. Dosis muy grandes que afecten todo el cuerpo son fatales de inmediato.

La atmósfera y la magnetosfera proporcionan un nivel adecuado de protección en la superficie terrestre, pero los cosmonautas que se encuentran en órbita están sujetos a dosis potencialmente letales si se exponen a una erupción solar. En la actualidad también hay preocupación acerca de los vuelos comerciales a grandes alturas, sobre todo si son cercanos a los polos. Se piensa que a esa altitud el incremento de la concentración de partículas pudiera afectar negativamente tanto a las personas como a los instrumentos. Los estudios

realizados hasta el momento no son concluyentes en uno u otro sentido.

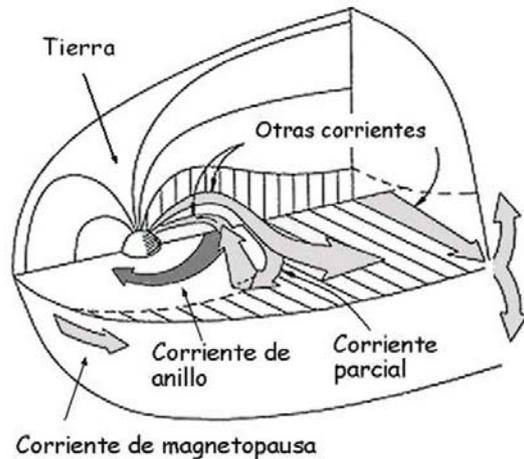


Figura 1.14
Corriente de anillo

Existe mucha especulación acerca de si la 'lluvia' de partículas asociadas a las tormentas magnéticas puede o no afectar a las personas en la superficie terrestre, pero los estudios realizados hasta el momento tampoco muestran resultados definitivos.

Los polos magnéticos. Los polos magnéticos cambian lentamente su posición geográfica con el transcurso de los años. Hay evidencias de que incluso han variado su polaridad en períodos de miles de años; el que ahora es polo norte antes fue un polo sur, y viceversa.

Y el lector escéptico seguramente se preguntará ¿Cómo se obtuvo esta última información? ¿Quién estuvo allí hace miles de años para atestiguarlo? La respuesta tiene mucho que ver con el análisis de la distribución de las rocas en el fondo de los lechos marinos.

El *basalto*, mineral de origen volcánico que se encuentra en el fondo de los océanos, tiene un alto contenido de magnetita (Fe_3O_4), mineral que espontáneamente

posee propiedades magnéticas. Cuando se encuentra en cantidades apreciables en el lecho marino es capaz de afectar la lectura de brújulas sensibles; esto último era ya conocido desde finales de la edad media por los marinos de los mares del norte, en regiones como Islandia, donde hay gran actividad volcánica.

En la década de 1900-1910, B. Brunhes en Francia y M. Matuyama, en Japón, encontraron que las rocas podían catalogarse en dos grandes grupos según su magnetismo. El primer grupo correspondía a las rocas de *polaridad normal*, con la magnetización orientada en la misma dirección y sentido que el campo magnético de la tierra. El segundo correspondía a las rocas con *polaridad inversa*, con la magnetización orientada en sentido contrario al del campo terrestre. Esta particularidad generó muchas interrogantes en su época, pues la existencia de estos dos tipos de orientaciones magnéticas en la corteza terrestre parecía totalmente arbitraria e inexplicable.

Durante la 2da guerra mundial (1940-1946) las reservas de petróleo disminuyeron notablemente a causa de las acciones bélicas. Al terminar la guerra se organizó una búsqueda intensa de petróleo en las plataformas marinas para tratar de remediar la escasez de combustible. Las compañías de petróleo construyeron buques con equipos especiales de perforación, capaces de cargar toneladas de tuberías y de perforar a kilómetros de profundidad. Los estudios relacionados a la geología también fueron estimulados por esta situación, y los oceanólogos comenzaron a estudiar en detalle las características magnéticas del fondo de los océanos. Uno de

los equipos utilizados con este fin fue un tipo de *magnetómetro*, desarrollado durante la segunda guerra mundial para detectar submarinos desde las aeronaves.

Las experiencias obtenidas a partir de los buques exploradores de petróleo se aprovecharon para construir el *Glomar Challenger*, un barco de investigaciones diseñado específicamente para los estudios geológicos marinos, capaz de tomar muestras de roca a gran profundidad. Con posterioridad, mediante métodos paleontológicos y estudios de isótopos radiactivos, se determinó la edad de esas rocas y su orientación relativa. Así fue posible obtener evidencias concluyentes en apoyo de las teorías que consideraban la continua formación de fondo oceánico a partir de la extrusión de magma en zonas muy localizadas del lecho marino. Se comprobó que la expulsión del magma durante decenas de miles de años ha dado lugar a las diferentes cadenas montañosas existentes en el fondo de los océanos, donde la corteza terrestre es más delgada. Allí el magma necesita recorrer un camino mucho más corto que por cualquier otra vía para salir al exterior (figura 1.15).

Los resultados fundamentales de las investigaciones de la post-guerra se pueden resumir de la forma siguiente.

La roca fundida o *magma*, que fluye de los volcanes y hendiduras de la corteza terrestre, contiene gases disueltos y partículas minerales sólidas, entre ellas las de magnetita mencionada anteriormente. Este mineral pierde sus propiedades magnéticas por encima de los 587 °C, pero vuelve a recuperarlas cuando la temperatura disminuye por debajo de ese valor.

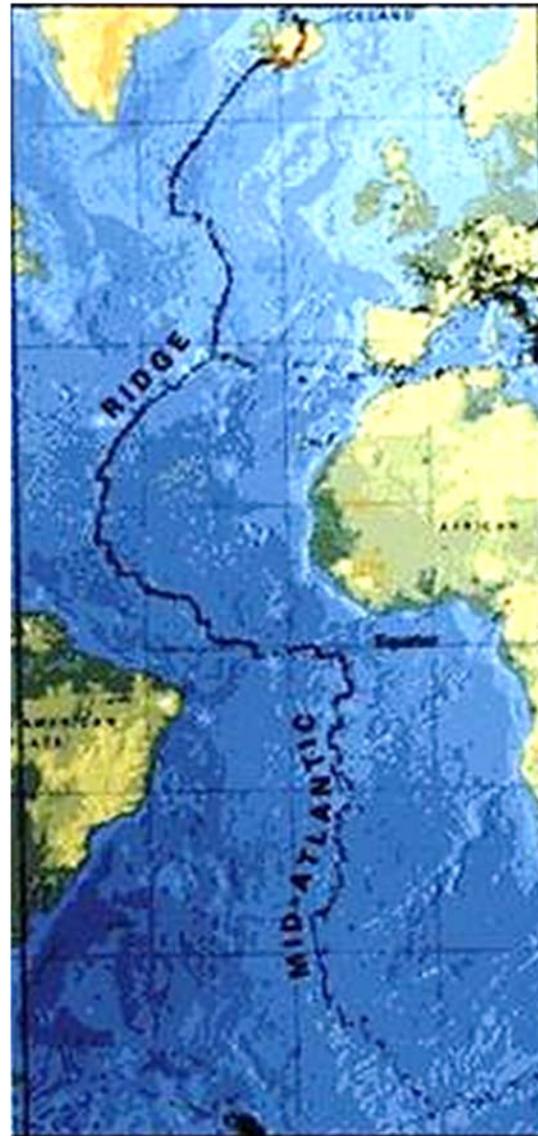


Figura 1.15

Cordillera del Atlántico. Se extiende a todo lo largo del océano, creando continuamente fondo marino a partir de la extrusión de magma en su cresta.

Cuando el magma se enfría y solidifica, las partículas de magnetita se magnetizan en la misma dirección que el campo magnético terrestre, y quedan “congeladas” en la posición original, señalando la ubicación del campo magnético de la tierra en el momento que el magma solidificó. De esa manera se llegó a conocer con exactitud cuál era la orientación del campo magnético terrestre en las diferentes eras geológicas.

En la medida que se fue revelando la distribución magnética en el fondo de los océanos, las diferencias magnéticas entre rocas con polaridad directa e inversa expuestas por Brunhes y Matuyama a principios de siglo dejaron de ser arbitrarias, y fue tomando forma un cierto patrón de distribución. Cuando la región analizada llegó a ser suficientemente extensa, se comprobó que las regiones magnéticas en los fondos oceánicos estaban conformadas en bandas, similares a las franjas de una cebra. Franjas de rocas, con magnetización alterna de polaridad directa e inversa, se alternaban a ambos lados de la cresta central del océano atlántico; las denominadas *bandas magnéticas*. A mayor distancias de la cresta aparecen regiones cada vez más antiguas, que fueron expulsadas antes (figura 1.16).

¿Cómo se formaron las bandas magnéticas? ¿Por qué son simétricas respecto a la cresta de la cordillera oceánica del océano atlántico?

La cresta oceánica es precisamente la región de formación de corteza oceánica, donde continuamente brota el magma líquido de las capas más profundas y se solidifica. Al invertirse el sentido del campo magnético global, el efecto de la inversión se refleja en la magnetización de las capas que se forman en esa época geológica. Las evidencias más significativas en apoyo de esta afirmación son las siguientes:

1. Lejos de la cresta las rocas son muy viejas y a medida que nos acercamos a la cresta son cada vez más jóvenes. Esta particularidad se comprueba analizando la cantidad de sedimentos depositados en el lecho oceánico. Sobre las rocas más

viejas descansa una mayor cantidad de sedimentos.

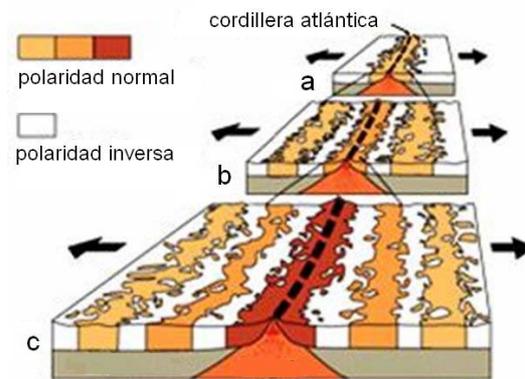


Figura 1.16

Representación artística de la formación de las bandas magnéticas. La corteza oceánica nueva se forma continuamente en la cresta o parte superior de la cordillera del océano atlántico: a) material en la cresta hace 5 millones de años, b) hace 2 millones de años, c) hoy día.

2. Las rocas más jóvenes, cercanas a la cresta, tienen polaridad normal, en coincidencia con la dirección actual del campo magnético terrestre.

Las bandas de rocas paralelas a la cresta alternan su polaridad de normal a inversa, y viceversa, indicando que el campo magnético de la tierra ha invertido su polaridad muchas veces a lo largo de millones de años. De aquí que hoy día la corteza oceánica se considere una especie de “cinta magnética”, donde ha quedado registrada la historia del movimiento de los polos y de las inversiones del campo magnético terrestre.

El estudio de estas particularidades magnéticas de nuestro planeta contribuyó grandemente a la teoría tectónica de placas, que explica satisfactoriamente la evolución de la Tierra, la deriva de los continentes y la localización de las regiones del planeta activas en volcanes y terremotos.

Aparentemente, hay una pregunta que queda en el aire. Si continuamente se forma corteza terrestre en el fondo de los océanos, ¿por qué no aumenta el tamaño de la tierra? Pues porque también existen regiones donde continuamente *desaparece* corteza terrestre, como ya se analizó con anterioridad al describir los diversos tipos de fronteras de placa.



Figura 1.17

Proceso de subducción de la corteza oceánica en la costa oeste suramericana. La litosfera se introduce por debajo de la corteza continental, elevándola e incrementando la temperatura de las rocas, dando origen a montañas y volcanes.

En la figura 1.17 se muestra con mayor detalle el proceso de hundimiento o subducción de la corteza oceánica en la costa suramericana del océano pacífico, junto con la trinchera característica, la formación de volcanes y las cadenas montañosas que surgen durante el proceso.

Anomalías magnéticas. La distribución del campo magnético terrestre se puede alterar por muchas razones: por la actividad solar, por la presencia de grandes objetos construidos con materiales de alto contenido de hierro como aviones, barcos o submarinos, o a causa de la influencia las estructuras geológicas formadas por minerales conteniendo sustancias ferromagnéticas como el hierro (Fe), el níquel (Ni) o el cobalto (Co).

Es posible detectar tales anomalías mediante los Sensores de Anomalías Magnéticas (SAM), instrumentos mucho más sensibles que la brújula, diseñados especialmente para detectar los pequeños cambios en la distribución del campo magnético terrestre (figura 1.18).

El funcionamiento de un SAM es diferente al de los detectores de tuberías soterradas o a los usados en aeropuertos para descubrir armas u otros objetos ocultos de metal. Los SAM son sensibles sólo a las perturbaciones magnéticas causadas por la presencia de Fe, Ni, Co y sus aleaciones, o por minerales que los contengan.

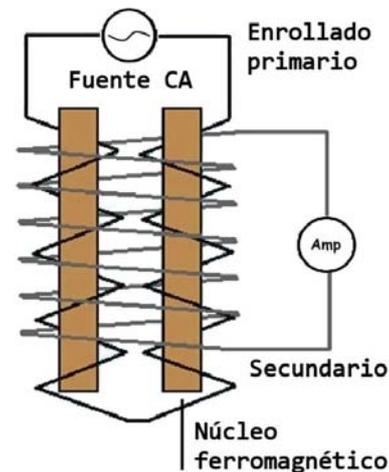


Figura 1.18

Magnetómetro de compuerta de flujo

De hecho, la primera aplicación de un magnetómetro capaz de detectar las variaciones de intensidad del campo terrestre fue la de localizar depósitos minerales que tuvieran componentes ferromagnéticos. El primer texto publicado al respecto, 'Examen de yacimientos de hierro mediante medidas magnéticas', data de 1879. Hoy día se siguen usando magnetómetros de muy alta sensibilidad en las prospecciones geológicas. Los más sensibles son capaces de detectar variaciones de 0.1 nanotesla, que representa sólo una

diezmilésima parte de la intensidad promedio del campo magnético terrestre.

Estos instrumentos son sensibles a cualquier acumulación de mineral ferroso con tal que no se encuentre muy alejado de la superficie, pero también detectan cualquier otro objeto ferromagnético cercano. A causa de la extrema sensibilidad, para no alterar las lecturas los operarios deben despojarse de los objetos que contengan materiales ferromagnéticos tales como cuchillos, hebillas, gafas de armadura metálica o llaveros. Es típico que los magnetómetros geológicos se coloquen en pértigas de 2 a 3 metros de longitud con el fin de atenuar cualquier influencia proveniente del operador (figura 1.19).

Otras posibles interferencias pueden ser causadas por construcciones cercanas, líneas de ferrocarril, autos o cualquier objeto ferromagnético bajo el suelo como, por ejemplo, el acero en los cimientos de un edificio. También pueden alterar las lecturas del magnetómetro las líneas de transmisión eléctrica y los transformadores de la red comercial, e incluso las variaciones propias del campo magnético terrestre, que siempre está sujeto a pequeñas fluctuaciones.

Cualquier variación brusca del campo magnético en los alrededores como, por ejemplo, la que tiene lugar en el motor de arranque durante el encendido de un vehículo, proporcionará una clara señal en el detector. Esta última particularidad se ha empleado durante los conflictos bélicos para detectar garajes o estacionamientos camuflados.

Durante la Segunda Guerra Mundial los

diversos contendientes emplearon magnetómetros para detectar submarinos.



Figura 1.19
Prospección de minerales mediante un sensor de anomalía magnética (SAM). El sensor se indica con una flecha.

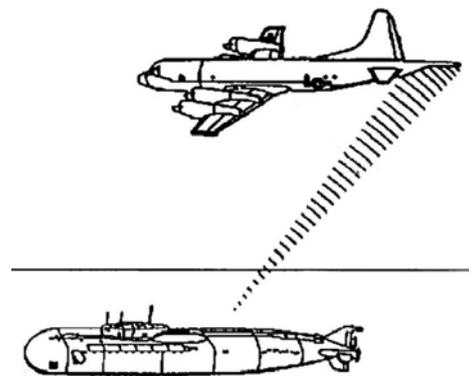


Figura 1.20
Detección de un submarino por magnetometría SAM

El instrumento era remolcado por un barco o se colocaba en un avión o helicóptero. El método aéreo es el habitual en la actualidad (figura 1.20). Para reducir la interferencia proveniente del propio avión y sus equipos eléctricos, el SAM se coloca en una proyección externa o botalón, como el que se muestra en la figura 1.21

en un avión P-3C de la Lockheed.



Figura 1.21
Botalón del avión de patrulla P-3C de la Lockheed.

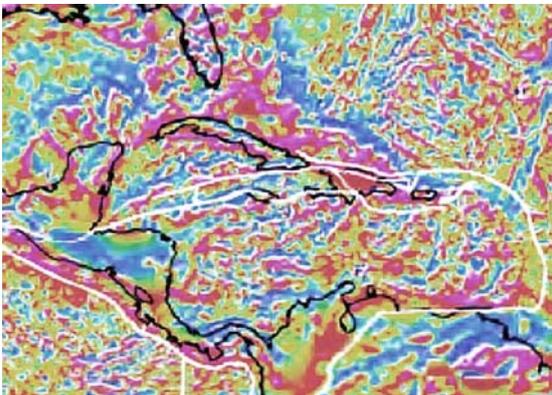


Figura 1.22
Sección del Mapa Mundial Digital de Anomalías Magnéticas

En los helicópteros el magnetómetro se cuelga de un cable. Lo usual es añadir circuitos electrónicos para neutralizar el ruido magnético de interferencia proveniente del propio avión o helicóptero; aún así, el submarino se detectará sólo si se encuentra cerca de la superficie y no demasiado lejos de la aeronave.

Existen submarinos nucleares contruidos de titanio, metal no magnético; no obstante, diversos instrumentos y equipos en su interior que incluyen las turbinas, el reactor y los motores diesel auxiliares posibilitan su detección magnética, pues contienen aleaciones que incluyen hierro

y níquel.

En la actualidad se construyen magnetómetros informatizados muy sensibles, capaces de detectar anomalías magnéticas desde los satélites en órbita. Otros magnetómetros se han incluido en naves espaciales para estudiar el magnetismo del sol y los planetas. En julio de 2007 se publicó el Mapa Mundial Digital de Anomalías Magnéticas, confeccionado a partir de determinaciones marinas, terrestres y por vía satélite, recopiladas por un largo período de tiempo empleando sensores SAM de diversos tipos (figura 1.22)

1.5 Espectros y exoplanetas

En la ciencia la palabra ‘espectro’ nada tiene que ver con apariciones, fantasmas, muertos-vivos o cualquier otra supuesta manifestación del “más allá”. Es un término que se usa para nombrar el conjunto de frecuencias de la radiación que emite o absorbe un cuerpo determinado.

Imagine el lector el tren de ondulaciones u ondas que se forma en la superficie del agua cuando se deja caer una piedra. La distancia entre las crestas sucesivas que aparecen es la *longitud de onda* (λ); el número de veces que se repite una cresta en una posición determinada, dividida entre el tiempo que tarda en hacerlo, es su *frecuencia* (ν). La longitud de onda y la frecuencia no son independientes; su producto es igual a la velocidad (v) con que la onda se propaga en la superficie del agua ($v = \lambda\nu$).

La radiación electromagnética viaja en el espacio de manera que asemeja una de estas ondas; pero en ese caso las ondas se componen de campos eléctricos y magnéticos entrelazados de forma compleja, que

viajan a la velocidad de la luz. Las posibles frecuencias abarcan un intervalo muy amplio, el *espectro electromagnético*, que incluye desde las ondas de radio hasta la

radiación gamma de alta energía, pasando por la infrarroja, visible, ultravioleta y los rayos X.

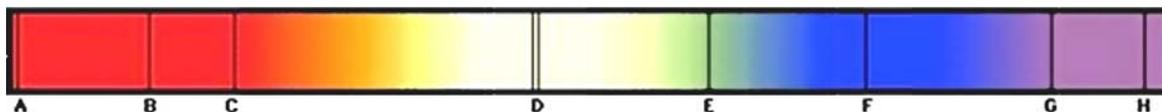


Figura 1.23 - Espectro solar

Todos los cuerpos emiten radiaciones en mayor o menor grado, con frecuencias que dependen de muchos factores, entre ellos la temperatura. De todas esas frecuencias, el ojo humano es capaz de detectar sólo un intervalo muy pequeño; el *espectro visible*. Las radiaciones de una frecuencia específica crean en el ojo la sensación de los diversos colores; la recepción conjunta de todas o gran parte de ellas produce la sensación de luz blanca.

Nosotros también somos capaces de detectar algunas frecuencias no visibles. Una hornilla eléctrica genera radiación infrarroja cuando funciona, aún cuando se vea oscura por completo. El ojo humano no es capaz de ver el infrarrojo, pero si nos acercamos a la hornilla lo suficiente podemos sentir en la piel el calor generado por la radiación.

Espectroscopía y astronomía. Los *espectrómetros* son instrumentos que permiten medir las diferentes frecuencias o *componentes espectrales* de la radiación. Los primeros datan del siglo XVIII; consistían en un prisma de vidrio que separaba la luz en sus componentes, acoplado a un sistema de lentes para lograr un enfoque nítido. Más adelante se añadió una placa fotográfica, con el fin de facilitar la comparación de los diferentes espectros.

Empleando uno de estos primitivos espectrómetros para enfocar el sol, Joseph von Fraunhofer descubrió que el espectro solar contenía una serie de inexplicables líneas oscuras, que indicaban la absorción selectiva a determinadas frecuencias. Después se comprobó que las líneas estaban asociadas al tipo de átomos específicos presentes en el sol. Como patrones de comparación se utilizaron los espectros atómicos obtenidos en los laboratorios terrestres. Se comprobó que algunas líneas tenían su origen en la absorción de la luz en las capas externas de la atmósfera solar; otras se formaban al atravesar la atmósfera terrestre. Un dato de interés es que las líneas del Helio se detectaron en el Sol en 1878, mucho antes que en la Tierra. No fue hasta 1895 que se encontró Helio en nuestro planeta.

El espectro visible del Sol muestra las líneas A y B en el rojo, causadas por la absorción del oxígeno presente en la atmósfera terrestre. Las restantes líneas son de origen solar: hidrógeno (C y F), esta última en el azul; el doblete amarillo del sodio (D), hierro (E y G) y calcio (G y H) en el extremo violeta.

El *análisis espectral* es la forma habitual de obtener información sobre las estrellas. No sólo se analiza el espectro visible;

también se examinan otras regiones (microondas, infrarrojo, rayos X). Se obtienen datos adicionales al medir la intensidad total de la radiación. Combinando estas informaciones se llega a conocer la composición química del astro que emite la luz, su temperatura, el grado de ionización de las sustancias que lo forman y la existencia de posibles campos magnéticos y eléctricos.

El espectro también es capaz de brindar otro tipo de información, gracias al *efecto Doppler-Fizeau*. Éste consiste en que las líneas características de cada elemento se desplazan ligeramente de sus posiciones habituales cuando una estrella se acerca o se aleja de la Tierra. Las mediciones precisas de ese corrimiento permiten determinar el valor de la velocidad de la estrella respecto a nuestro planeta.

Los exoplanetas. Son todos aquellos que no pertenecen a nuestro sistema solar, giran alrededor de otras estrellas y se encuentran a distancias tan grandes que en su mayoría no son visibles, aún empleando los telescopios más potentes. Hasta el momento sólo se han podido fotografiar unos 10, del tamaño de Júpiter o mayores, mediante el registro de su radiación infrarroja.

Sin embargo, aunque un exoplaneta no sea visible en los telescopios ópticos, su presencia se puede detectar por el movimiento de la estrella. Si el planeta tiene masa suficiente, planeta y estrella rotan alrededor de un centro común –su centro de masa–.

Esto hace que la posición de la estrella respecto a la Tierra varíe periódicamente. Cuando gracias al efecto Doppler-Fizeau

se detecta alguna oscilación reiterada en la velocidad de la estrella, se puede afirmar con certeza que hay un planeta orbitando a su alrededor.

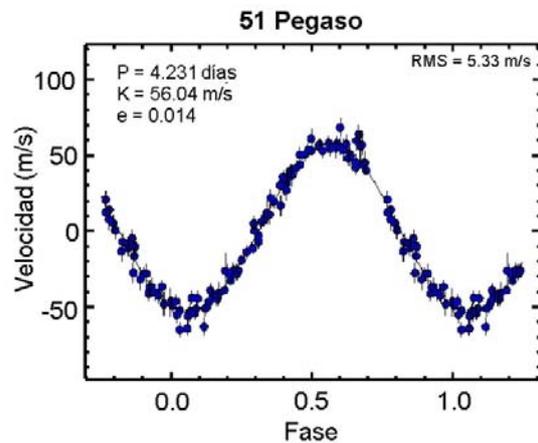


Figura 1.24

Variación de la velocidad relativa de la estrella 51 de la constelación de Pegaso, obtenida mediante espectroscopia Doppler, indicando la existencia de un exoplaneta rotando a su alrededor.



Figura 1.25

Observatorio La Silla, en Chile.

De los métodos conocidos para detectar exoplanetas no visibles éste es el más eficaz, pero no es el único. También se emplea la fotometría para medir los pequeñísimos cambios en la posición relativa de la estrella respecto a las que la rodean, o las variaciones de su intensidad luminosa cuando el planeta se interpone entre la estrella y el observador (lo que se conoce como *tránsito astronómico*).

Uno de los espectrómetros más modernos del mundo, el HARPS (siglas en inglés del *Buscador de Planetas de Alta Precisión por Velocidad Radial*) se encuentra en el observatorio de La Silla, una montaña de 2400 m al borde del desierto de Atacama, en Chile. El observatorio posee 18 telescopios y funciona desde 1970 bajo el auspicio de la organización europea ESO (European Southern Observatory).

1.6 La energía oscura y la expansión del universo

Los astrofísicos Saul Perlmutter (1959), Brian Schmidt (1967) y Adam Riess (1969) fueron galardonados en 2011 con el premio Nóbel de Física por descubrir, en 1998, que las galaxias se alejan unas de otras *aceleradamente*. Hasta el momento se sabía que se alejaban unas de otras, pero no que lo hacían cada vez más rápido. Según declaró el comité del premio: "Han estudiado varias docenas de explosiones de estrellas, llamadas supernovas, y han descubierto que el Universo se está expandiendo a un ritmo cada vez mayor". El jurado del Nobel apuntó que hace ya un siglo que se sabe que el Universo se expande (desde hace 14 mil millones de años), pero no había indicio alguno de su aceleración.

El Big Bang, el Big Crunch y el Big Rip. Cuando tiene lugar una explosión, es de esperar que la velocidad de los fragmentos sea grande en los momentos iniciales, pero que después se vaya reduciendo a medida que pasa el tiempo y los fragmentos se alejen unos de otros. La explosión originaria del universo, avalada por datos experimentales verificados ininidad de veces, es conocida como el "Big Bang" o la Gran Explosión. Ese era

el modelo del universo más popular en los años 80 del siglo XX, donde la supuesta desaceleración causada por la atracción gravitatoria lograría invertir la expansión. Se llegaría así al "Big Crunch", donde los fragmentos se reunirían nuevamente en una masa única.

Sin embargo, en 1998 las observaciones precisas en supernovas realizadas por los laureados –explosiones finales de estrellas con de la masa del Sol y sólo el tamaño de la Tierra– indicaron lo contrario. Los resultados mostraban un aparente absurdo: que los galaxias, es vez de ir retardando su movimiento de expansión, se iban acelerando. A esa conclusión se llegó casi simultáneamente en los dos equipos de investigación donde participaban los galardonados. La nueva teoría recibió el nombre de Big Rip o Gran Desgarramiento, pues según este resultado las galaxias seguirán separándose indefinidamente hasta hacerse invisibles unas de las otras.

Según ha declarado Perlmutter en su página WEB personal de la Universidad de Berkeley: "Nuestros estudios sobre las supernovas, encaminados inicialmente a medir la desaceleración de la expansión del universo bajo el efecto de la gravedad, demostraron en realidad su aceleración. Este resultado inesperado sugiere que la mayor parte del universo –alrededor del 75 por ciento– podría estar esencialmente constituida por una energía hasta ahora desconocida, la denominada *energía oscura*, que es responsable de la aceleración de su expansión". Lo de oscura no proviene de que sea más o menos 'visible' que otras energías, sino de que no existe en la actualidad la menor

idea acerca de su posible origen. De ahí la ‘oscuridad’.



Figura 1.26
Galaxia M100, a decenas de millones de años-luz de nuestro planeta.

Por su parte, Schmidt ha expresado públicamente: "Adam Riess y yo intentábamos comprender este resultado sorprendente, tratábamos desesperadamente de encontrar lo que no encajaba". Y más adelante: "Parecía demasiado increíble para ser verdad. Estábamos algo asustados". De momento, el problema de la existencia o no de la energía oscura sigue siendo uno de los grandes enigmas de la física contemporánea.

1.7 Ecología y medio ambiente

El creciente interés de la opinión pública respecto a los problemas del medio ambiente ha convertido el término *ecología* en una expresión a menudo mal utilizada, pues tiende a confundirse con los programas ambientales. Aunque la ecología contribuye al estudio y comprensión de los problemas del medio ambiente, es una disciplina científica diferente de la ciencia medioambiental. *La ecología estudia la relación entre los organismos vivos y su*

medio ambiente físico y biológico. El término fue introducido por el biólogo alemán Ernst Heinrich Haeckel en 1869; deriva del griego oikos (hogar) y comparte su raíz con economía.

El *medio ambiente* es el conjunto de elementos físicos o *abióticos* y biológicos o *bióticos* que integran la delgada capa de la Tierra llamada *biosfera*, sustento y hogar de los seres vivos. Usualmente se les denomina medio ambiente físico y medio ambiente biológico (Tabla 1.1). Los entornos terrestres y acuáticos con características particulares se denominan *ecosistemas*. Sus partes fundamentales son:

- a) los productores (plantas verdes)
- b) los consumidores (herbívoros y carnívoros)
- c) los organismos responsables de la descomposición (hongos y bacterias), y
- d) el componente abiótico, formado por materia orgánica muerta y nutrientes presentes en el suelo y el agua.

Tabla 1.1 Medio ambiente	
<i>Físico</i>	<i>Biológico</i>
Incluye la luz y el calor o radiación solar, la humedad, el viento, el oxígeno, el dióxido de carbono, los nutrientes del suelo y otros residuos, el agua y la atmósfera.	Formado por todos los organismos vivos.

Los ecosistemas no están aislados unos de otros; por el contrario, necesitan de un continuo intercambio de entrada y salida con el medio que los rodea. Las entradas son las que aparecen a la izquierda de la

tabla 1.1. Las salidas incluyen el calor producido por la respiración, agua, oxígeno, dióxido de carbono y nutrientes.

La *energía solar*, junto al continuo reciclaje de los nutrientes, es la fuerza impulsora fundamental del ecosistema. Las plantas utilizan la fotosíntesis para transformar la energía solar en energía química, bajo la forma de hidratos de carbono y otros compuestos. Esta energía es transferida a todo el ecosistema a través de una serie de pasos basados en el comer o el ser comido, la llamada *cadena trófica*. La energía del sol también hace que los vientos circulen continuamente, modificando el clima y las diferencias de temperatura entre las diversas regiones geográficas, además de ser el motor impulsor de la lluvia, la nieve y los ríos.

La *atmósfera* es una mezcla de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua, partículas de polvo y otros elementos y compuestos químicos en cantidades muy pequeñas. Protege a la Tierra del exceso de radiaciones ultravioleta, dañinas para la vida.

El *agua* se encuentra principalmente en los océanos (97%), un 2% es hielo y sólo el 1% restante es el agua dulce de los ríos, los lagos, las aguas subterráneas y la humedad de la atmósfera y el suelo.

El *suelo*. Es la delgada porción en la superficie del planeta que sustenta la vida terrestre. Se originó como resultado de la interacción de las rocas con la atmósfera y la vegetación a lo largo de miles y miles de años.

Los organismos vivos, incluyendo al hombre, dependen de estos factores. Las plantas se sirven del agua, del dióxido de

carbono y de la luz solar para convertir materias primas en carbohidratos por medio de la fotosíntesis. La vida animal, a su vez, depende de las plantas en una secuencia de vínculos fuertemente interconectados entre sí. Cada paso de la transferencia de energía proveniente del sol se compone de varios *niveles tróficos* o de alimentación:

1. plantas (que viven del suelo),
2. herbívoros (que sólo comen vegetales),
3. dos o tres niveles de carnívoros y
4. organismos de todo tipo responsables de la descomposición.

Sólo parte de la energía almacenada por las plantas sigue este camino, llamado *red o cadena alimentaria de producción*. En cada transferencia se pierde gran cantidad de energía como calor de respiración, que deja de ser utilizable o transferible al siguiente nivel trófico. Es por esto que cada nivel trófico contiene menos energía que el que le sustenta. A causa de ello, por ejemplo, los ciervos o los alces (herbívoros) son más abundantes que los lobos (carnívoros).

La materia vegetal y animal no utilizada en la cadena alimentaria de producción como hojas caídas, ramas, raíces, troncos de árbol y cuerpos muertos de animales originan la *red o cadena alimentaria de la descomposición*.

Las bacterias, hongos y animales que se alimentan de materia muerta se convierten en fuente de energía para niveles tróficos superiores. Dado que muchas plantas y animales no llegan a ser comidos, los nutrientes que contienen sus tejidos, tras

recorrer la red alimentaria de la descomposición, son en última instancia liberados por la putrefacción bacteriana y fúngica. Este proceso reduce los compuestos orgánicos complejos a compuestos inorgánicos sencillos que quedan en el suelo a disposición de las plantas, para así recorrer el ciclo nuevamente.

Esta es la forma en que la naturaleza aprovecha al máximo la energía solar.

La erosión, la tala de bosques y las cosechas extraen del suelo una cantidad considerable de nutrientes que deben ser reemplazados para no alterar el equilibrio ecológico. De no ser así, el ecosistema se empobrece. Por otra parte, si la entrada de un nutriente excede en mucho a su salida, el ciclo de nutrientes del ecosistema se sobrecarga, y se produce contaminación. Así, la contaminación puede considerarse una entrada de nutrientes que supera la capacidad del ecosistema para procesarlos. Los ecosistemas poseen una gran capacidad de recuperación. En ausencia de otros factores tales como la erosión, un campo devastado por el fuego, o despejado para usos agrícolas, recupera la vegetación con bastante rapidez. En los primeros años, surgen praderas, pobladas por especies oportunistas capaces de tolerar las peores condiciones ambientales. Después surgen arbustos y plantas más competitivas que no tardan en ser dominantes. Luego brotan los primeros árboles y, tras el primer siglo, un bosque llega a ocupar lo que fue una superficie sobreexplotada o calcinada (figura 1.27).

El bosque crea un nuevo entorno que, tras otro medio siglo, permite la competencia de otras especies de árboles que pueden llegar a reemplazar a los iniciales. De esta

manera, la sucesión debida a cambios ambientales no artificiales resulta ser un proceso recurrente e inacabable en la naturaleza.

1.8 Amenazas al medio ambiente

A lo largo de la historia de nuestro planeta, el medio ambiente ha ido variando muy lentamente, aunque en determinados períodos los cambios han sido más notables e importantes que en otros. De éstos últimos, el más reciente se produjo durante el pleistoceno, entre 2.5 millones y 10 000 años atrás, llamado también período glacial. Grandes capas de hielo avanzaron y retrocedieron cuatro veces en Norteamérica y tres en Europa, haciendo oscilar varias veces el clima de frío a templado y viceversa. Los cambios fueron de gran influencia en la vida animal y vegetal, y finalmente dieron lugar al clima tal como hoy lo conocemos. A partir de ese período, el medio ambiente del planeta ha permanecido más o menos estable.

Pero no son sólo las fuerzas naturales las que pueden afectar el medio ambiente. El propio desarrollo de los seres humanos y el incremento de su número también lo han ido afectando. Las previsiones muestran, sin lugar a dudas, que el futuro se comportará de forma similar, con una intensidad cada vez mayor si no se toman las medidas apropiadas. Mientras las poblaciones humanas fueron pequeñas y su desarrollo tecnológico modesto, su impacto sobre el medio ambiente fue sólo local y de poca importancia. Sin embargo, en la medida que el hombre primitivo comenzó a dominar el medio que lo rodeaba, la armonía que mantenía con el ambiente se fue reduciendo.

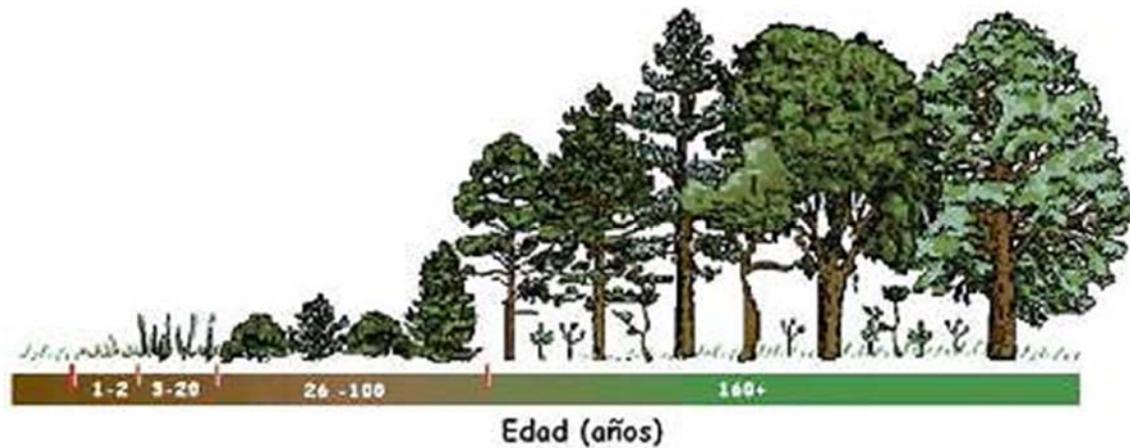


Figura 1.27 - Recuperación de los bosques tras un incendio

Al aumentar la población surgieron nuevas tecnologías para suplir las crecientes necesidades de alimentos, ropa, vivienda y transporte, que a la vez dieron origen a diversos problemas. La capacidad de controlar el fuego le permitió a la humanidad modificar o eliminar la vegetación natural y domesticar animales y pastorearlos, lo que trajo aparejadas la sobreexplotación y erosión de los suelos. Aprender a cultivar la tierra para producir más y mejores alimentos condujo a la destrucción de la vegetación natural para hacer espacio a las cosechas. La demanda de leña y madera para diversos fines causó la despoblación forestal de las montañas y el agotamiento de los bosques.

En un principio los animales salvajes se cazaban y pescaban por sus pieles y como alimento. El aumento de la población, junto a la caza y pesca indiscriminada, puso en peligro la población de diversas especies animales, hasta llegar en algunos casos a la extinción. Un elemento adicional en contra del desarrollo de muchas especies ha sido la deforestación, que reduce notablemente el acceso al hábitat indispensable para su vida. En la actualidad

no pocas especies se encuentran en peligro de extinción.

La Revolución Industrial de 1848 aceleró los procesos negativos para el medio ambiente al incrementar el descubrimiento, extracción y uso de los combustibles fósiles, así como la intensa explotación de los recursos minerales. Fue a partir de ese momento que el hombre comenzó con mayor rapidez a cambiar la faz del planeta, la naturaleza de su atmósfera y la calidad de su agua. Hoy día el desarrollo tecnológico y el rápido crecimiento de la población humana someten al medio ambiente a demandas sin precedentes. Tales demandas están produciendo un declive acelerado de su calidad y de su capacidad para sustentar la vida.

Problemas ambientales de alcance mundial.

Los problemas de alcance mundial relacionados con el medio ambiente son los siguientes:

1. aumento de las emanaciones de dióxido de carbono y las precipitaciones ácidas,
2. destrucción de la capa de ozono,
3. abuso de pesticidas y otras sustancias

tóxicas,

4. destrucción de tierras vírgenes y bosques tropicales,
5. erosión del suelo,
6. escasez de agua potable y
7. acumulación de residuos nucleares.

Aumento de las emanaciones de dióxido de carbono (CO₂) y lluvia ácida. Las investigaciones indican que la concentración de CO₂ permaneció estable durante siglos, con un valor de unas 260 partes por millón (ppm). Sin embargo, el uso indiscriminado del carbón, el petróleo y sus derivados ha causado el ascenso a 350 ppm en los últimos 100 años. Lo perjudicial de este cambio es que pudiera provocar un aumento importante de la temperatura promedio en la superficie de la Tierra, a causa del *efecto invernadero*, que consiste en lo siguiente.

El CO₂ en la atmósfera tiende a impedir el enfriamiento normal de la Tierra, pues es capaz de absorber parcialmente las radiaciones ésta emite y que usualmente escapan al espacio exterior. Se produce así un calentamiento adicional de la atmósfera y su temperatura promedio aumenta. Otro gas de efecto invernadero, el NO₂, posee un poder de absorción mayor, pero se genera en mucha menor medida que el CO₂.

Un aumento significativo de temperatura traería graves consecuencias sobre el medio ambiente. Se aceleraría la fusión de los casquetes polares, tal como ya está ocurriendo actualmente; el nivel de los mares se elevaría afectando a las ciudades costeras, cambiaría el clima en diversos lugares, se alteraría la vegetación natural y se verían afectadas las cosechas. A su

vez, estos cambios, a su vez, tendrían un enorme impacto sobre la civilización.

Desde 1850 hasta el presente se ha producido un aumento en la temperatura promedio global de cerca de 1 °C. Es cierto que nos encontramos en un período interglaciar, justamente en el intervalo de mayor temperatura antes que comience nuevamente a descender hacia otro período interglaciar. Pero no es menos cierto que los gases de efecto invernadero están contribuyendo a un incremento mayor del esperado en este período. Los estimados de incremento de temperatura van de 2 a 6 °C para mediados del siglo XXI, pero en los últimos tiempos el incremento se ha ido acelerando cada vez más.

La lluvia ácida, también se asocia al uso de los combustibles fósiles. Tiene su origen en la emisión de dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) por las centrales térmicas y por los gases de la combustión provenientes del transporte automotriz. Los gases interactúan el vapor de agua de la atmósfera y la luz solar para producir ácidos sulfúrico y nítrico, que más tarde caen a tierra arrastrados por la lluvia y la nieve, contaminando el suelo y dañando las cosechas.

La acidez de algunas precipitaciones en lugares muy industrializados como el norte de Estados Unidos y Europa es equivalente a la del vinagre ordinario. La lluvia ácida corroe los metales, desgasta los edificios y monumentos de piedra, daña y mata la vegetación y acidula los lagos, las corrientes de agua dulce y los suelos. También puede retardar el crecimiento de los bosques. Se atribuye a esta lluvia el empobrecimiento de los bosques a grandes alturas, tanto en Norteamérica como

en Europa.

Durante la década de 1980 y a comienzos de la de 1990, algunos países industrializados mejoraron la calidad de su aire reduciendo la cantidad de partículas en suspensión así como la de productos químicos tóxicos como el plomo, pero las emisiones de dióxido de azufre y óxidos nitrosos, precursores de la deposición ácida, aún son importantes.

Destrucción de la capa de ozono. El ozono es una molécula formada por tres átomos de oxígeno. La capa de ozono es una región de la atmósfera a grandes alturas, que protege al planeta de la radiación ultravioleta del sol. Si no existiera esa capa gaseosa, que se encuentra a unos 30-50 km de altitud sobre el nivel del mar, la vida sería imposible sobre nuestro planeta tal como la conocemos. Su debilitamiento haría que las personas se expusieran a altas concentraciones de radiación UV; se incrementaría así la probabilidad de aparición de cáncer en la piel, cataratas y otros problemas de salud. Esa radiación también es capaz de reducir la respuesta del sistema inmunológico, de interferir en el proceso de fotosíntesis de las plantas y de afectar al crecimiento del fitoplancton oceánico.

En las décadas de 1970 y 1980 se encontró que la actividad humana estaba teniendo un impacto negativo sobre el espesor de la capa. Los químicos F. Sherwood Rowland y Mario Molina, que estudiaban las propiedades catalizadoras de los compuestos halógenos en las reacciones fotoquímicas, llegaron a la conclusión colateral de que los clorofluorocarbonos (CFC) emitidos por la actividad humana podían causar la reducción significativa de la

concentración de ozono. El cloro de los CFC es capaz de descomponer la molécula de ozono (O_3) sin perder su capacidad de descomponer más moléculas. En aquel momento los CFC se empleaban en los equipos de aire acondicionado y como gas impulsor en los sprays de diferentes productos comerciales. Al tratar de verificar estas predicciones, se comprobó que realmente la capa de ozono se estaba reduciendo a una velocidad alarmante. En 1985 se descubrió la existencia de un gran agujero centrado sobre la Antártida.

Ante esta situación, la comunidad mundial tomó medidas urgentes para reducir las emanaciones, sustituyendo los CFC por otros compuestos. La gran mayoría de los países dictaron medidas para suprimir su fabricación y uso, buscando sustitutos adecuados. No obstante, los CFC pueden permanecer en la atmósfera durante más de 100 años, por lo que la destrucción de la capa de ozono continuará representando una amenaza real durante varias décadas. Las últimas predicciones fijan la fecha de 2015 para que comience la recuperación progresiva de la capa. Rowland y Molina recibieron el Premio Nobel de Química en 1995 por su descubrimiento.

Abuso de pesticidas y otras sustancias tóxicas. Pesticida o plaguicida es el término que se aplica a los agentes químicos usados para controlar las plagas de todo tipo (insectos, malas hierbas, enfermedades de las plantas). El uso extensivo de pesticidas sintéticos derivados de los hidrocarburos clorados ha tenido efectos desastrosos para el medio ambiente. Estos productos son muy persistentes y poco pro-

pensos a la degradación biológica. Interfieren en el metabolismo del calcio de las aves, adelgazando las cáscaras de los huevos y malogrando su reproducción. Como resultado de la proliferación de los pesticidas, algunas grandes aves depredadoras y piscívoras se encuentran al borde de la extinción.

Su efecto prolongado se debe a que presentan poca solubilidad en el agua y se adhieren a los tejidos de las plantas. Se acumulan en los suelos, en el fondo de los estanques, las corrientes de agua y en la atmósfera. Una vez volatilizados se dispersan en grandes regiones, contaminando áreas silvestres a gran distancia de las regiones agrícolas. Los herbívoros los ingieren, y también pueden penetrar a través de la piel de los peces y diversos invertebrados. Se concentran aún más al pasar de los herbívoros a los carnívoros.

El uso de insecticidas basados en hidrocarburos halogenados como el DDT está disminuyendo con rapidez en todo el mundo desarrollado, aunque en épocas recientes aún se usaban en los países en vías de desarrollo. Otro grupo de compuestos íntimamente vinculado al DDT, los bifenilos policlorados (PCB), se han utilizado durante años en la producción industrial y han acabado penetrando en el medio ambiente. Su impacto sobre el hombre y la vida silvestre ha sido similar al de los pesticidas. A causa de su extrema toxicidad, el uso de PCB ha quedado restringido sólo a los aislantes de los transformadores y condensadores eléctricos. El PCDD es el más tóxico de otro grupo relacionado de compuestos altamente tóxicos y carcinógenos, las dioxinas o dibenzo-*para*-dioxi-

nas. El grado de toxicidad para el ser humano aún no ha sido esclarecido totalmente. El PCDD puede encontrarse en forma de impureza en conservantes para la madera y el papel y en herbicidas. El *agente naranja*, un defoliante muy utilizado, contiene trazas de dioxina.

Existen otras muchas sustancias tóxicas cuya fabricación, procesado, distribución, uso y eliminación representan un altísimo riesgo para el medio ambiente y la salud humana. La mayoría son productos químicos sintéticos que se dispersan y persisten en el medio ambiente durante largos periodos de tiempo.

En los vertederos de productos químicos se producen concentraciones significativas de sustancias tóxicas. Si éstas se filtran al suelo pueden contaminar el suministro de agua, el aire, las cosechas y los animales domésticos. Muchos de estos productos han sido asociados a defectos congénitos humanos, abortos y enfermedades orgánicas. A pesar de los riesgos conocidos, el problema aun no se encuentra en vías de solución. Sólo a partir de los años 90 del siglo pasado a la fecha se han creado unos 4 millones de nuevos productos químicos sintéticos, y cada año que pasa surgen cientos o miles de productos adicionales.

Destrucción de tierras vírgenes y bosques tropicales. Un número cada vez mayor de seres humanos comienza a invadir las tierras vírgenes que quedan, incluso en áreas que eran consideradas hasta hace poco a salvo de la explotación. La insaciable demanda de energía ha impuesto la necesidad de explotar el gas y el petróleo de las regiones árticas, poniendo en peligro el

delicado equilibrio ecológico de los ecosistemas de tundra y su vida silvestre. Los bosques tropicales, sobre todo los del sudeste de Asia y los de la cuenca del río Amazonas, están siendo destruidos a un ritmo alarmante para obtener madera, despejar suelo para pastos y cultivos, plantar pinos y establecer asentamientos humanos. En la década de 1980 se llegó a estimar que las masas forestales estaban siendo destruidas a un ritmo de 20 hectáreas por minuto. Otra estimación daba una tasa de destrucción de más de 200 000 km² al año. En 1993, los datos obtenidos vía satélite permitieron determinar un ritmo de destrucción de casi 15 000 km² al año, sólo en la cuenca amazónica.

La deforestación tropical podría llevar a la extinción de hasta 750 000 especies vegetales, lo que representaría la pérdida de toda una multiplicidad de productos que incluyen alimentos, fibras, fármacos, tintes, gomas y resinas. Además, la expansión de las tierras de cultivo y de pastoreo para ganado doméstico en África, así como el comercio ilegal de especies amenazadas y productos animales podría representar el fin de los grandes mamíferos africanos.

Erosión del suelo. La erosión del suelo se está acelerando en todos los continentes, degradando entre la quinta y la tercera parte de las tierras de cultivo en todo el globo, lo que representa una seria amenaza para el abastecimiento mundial de víveres. Por ejemplo, a principios de siglo, la erosión minaba la productividad del 34% del total de las tierras de cultivo de EE.UU. En el Tercer Mundo, la creciente necesidad de alimentos y leña han

tenido como resultado la deforestación y el cultivo en laderas con mucha pendiente, lo que ha producido una severa erosión de las mismas. Para complicar aún más el problema, hay que tener en cuenta la pérdida de tierras de cultivo debido a la industria, los pantanos, la expansión de las ciudades y al desarrollo de la red de carreteras. La erosión, junto a la pérdida de los bosques y las tierras de cultivo, reduce la capacidad de conservación de la humedad de los suelos y convierte en desérticas las tierras que antes eran productivas.

Escasez de agua potable. Los problemas de erosión también están agravando el creciente problema mundial del abastecimiento de agua. Las poblaciones humanas en expansión requieren sistemas de irrigación y agua para la industria y los cultivos. El aumento de la población está agotando hasta tal punto los mantos acuíferos subterráneos que empieza a penetrar en ellos agua salada a lo largo de las áreas costeras, principalmente en Estados Unidos, Israel, Siria y los estados árabes del Golfo. En áreas de tierra adentro, las rocas porosas y los sedimentos se compactan al perder el agua, ocasionando problemas por el progresivo hundimiento de la superficie; este fenómeno ha causado problemas en Texas, Florida y California.

El mundo experimenta también un progresivo descenso en la calidad y disponibilidad del agua. En muchas regiones, las reservas de agua están contaminadas con productos químicos tóxicos y nitratos. Hace unos pocos años las estadísticas mostraban que casi el 75% de la población rural del mundo y el 20% de su población urbana carecen de acceso directo

a agua no contaminada. Las enfermedades transmitidas por el agua afectan a un tercio de la humanidad y matan a 10 millones de personas al año.

Residuos nucleares. Aunque las pruebas nucleares atmosféricas, fuente importante de lluvia radiactiva, están prohibidas en la mayoría de los países, la radiación nuclear sigue siendo un problema medioambiental. Las centrales nucleares liberan pequeñas cantidades de residuos radiactivos en el agua y la atmósfera, pero el principal peligro es la posibilidad de que se produzcan accidentes nucleares, que liberan enormes cantidades de radiación al medio ambiente, como ocurrió en Chernobyl en 1986 y en Fukushima en 2011.

Pero un problema aún más grave es del almacenamiento de los residuos nucleares, que conservan su carácter tóxico de 700 a 1 millón de años. La seguridad de un almacenamiento durante periodos geológicos de tiempo es, al menos, problemática; entre tanto, los residuos radiactivos se acumulan, amenazando la integridad del medio ambiente.

Conferencias de la ONU sobre medio ambiente. Comenzando en los años 90 del siglo pasado, hasta el momento se han llevado a cabo varias conferencias de la ONU sobre problemas del medio ambiente. Aunque se pueden señalar algunos modestos avances, estas conferencias no han cumplimentado las expectativas de las grandes mayorías. Para reducir la degradación medioambiental y salvar el hábitat de la humanidad, las sociedades deben reconocer que el medio ambiente es finito. Los especialistas creen que, al ir creciendo las poblaciones y sus demandas, la idea del crecimiento continuado

debe abrir paso a un uso más racional del medio ambiente -el desarrollo sostenible- pero que esto sólo puede lograrse con un espectacular cambio de actitud por parte de la especie humana.

1.9 El medio ambiente y la radiación electromagnética

En ocasiones se intenta atribuir efectos dañinos a la radiación electromagnética, cualquiera sea su intensidad y su frecuencia, incluyendo la proveniente de los tendidos eléctricos de la red comercial. Sin embargo, los niveles de densidad de corriente eléctrica inducida en los tejidos por la red comercial son, en casi todos los casos, mucho menores que los niveles que dan origen a perturbaciones detectables con los instrumentos más sensibles de laboratorio.

Esto no quiere decir que la radiación electromagnética no interaccione con los tejidos, sino que la intensidad de la radiación ambiental usualmente se encuentra muy por debajo de la necesaria para causar algún efecto notable. A intensidades mayores, y en dependencia de la frecuencia de la radiación, los resultados pueden llegar a ser dañinos. Los efectos sobre las células del organismo pueden ser muy diversos, como muestra una revisión de 400 artículos publicada en 2009 por R. Funk y colaboradores, de la Universidad Técnica de Dresden. La revisión incluye estudios bioquímicos y biofísicos bastante complejos sobre la interacción de la radiación con diversos tipos de células.

También hay quienes consideran todas las radiaciones electromagnéticas benéficas y las aplican indiscriminadamente a

las personas, sin que existan los correspondientes estudios y ensayos clínicos que avalen ese proceder.

Origen y representación de la radiación electromagnética. La radiación se puede originar de muchas formas. La generan las antenas radioemisoras de todo tipo como la televisión, el radar y la telefonía. También el sol, los teléfonos móviles, las luminarias, los equipos de TV, los satélites, los hornos de microondas y muchas otras fuentes. Sin embargo, a pesar de uso cotidiano y de la continua exposición del organismo a estas radiaciones, algunas de ellas pueden llegar a ser perjudiciales para los tejidos.

La radiación se puede representar satisfactoriamente en forma de ondas electromagnéticas, formadas por una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan de forma autosostenida a lo largo de una dirección en el espacio. En la onda están presentes dos componentes del campo, uno eléctrico de intensidad E y otro magnético de intensidad H, que son perpendiculares entre si y también a la dirección de propagación (figura 1.28).

El esquema de la figura representa una “foto” de la onda en un instante determinado. Las saetas o vectores representan las direcciones de E y H en ese instante. En la realidad habría que vislumbrar los campos E y H como una especie de nube difusa que se extiende por una cierta región del espacio; los vectores no son el campo, sólo indican su dirección e intensidad. Al transcurrir el tiempo, los campos oscilan variando su tamaño (amplitud) e invirtiendo continuamente su sentido entre los límites $\pm E_0$ y $\pm H_0$, pero

sin cambiar su dirección perpendicular en todo momento.

Un esquema o modelo más cercano a la realidad sería aquel formado por la superposición de múltiples ondas similares a ésta, con diferentes longitudes de onda λ (ver figura 1.28), cada una rotada un pequeño ángulo alrededor del eje correspondiente a la dirección de propagación.

Parámetros que describen la onda y espectro electromagnético. La vibración u oscilación del campo E (y también el de H, con sólo sustituir E por H) se puede representar matemáticamente como función del tiempo t por una ecuación del tipo $E = E_0 \sin 2\pi(x/\lambda - ft)$. La variable x representa un punto a lo largo de la dirección de propagación, f es la frecuencia de la oscilación (número de veces que E realiza una oscilación completa en una unidad de tiempo) y λ es la longitud de onda (espacio entre dos crestas, donde E toma su valor máximo E_0). Sin embargo, puede haber formas de onda mucho más complejas.

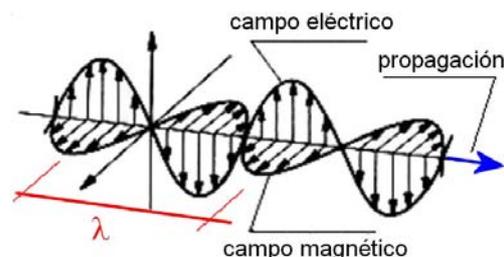


Figura 1.28

Esquema de una onda electromagnética

Los valores de E y H no son independientes, sino que están relacionados por una expresión del tipo $H = aE$, donde a es un factor constante que depende de las particularidades del medio donde se propaga la onda.

La velocidad de propagación en el vacío

es la velocidad de la luz, $c \sim 3 \times 10^8$ m/s (300 000 km/s) y su valor es algo menor en otros medios.

Tabla 1.2 Espectro electromagnético		
f (Hz)	λ (m)	Denominación
$10^2 - 10^{10}$	$10^6 - 10^{-1}$	Ondas de radio
$10^{10} - 10^{12}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	Microondas
$10^{12} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-6}$	Infrarrojo
$10^{14} - 10^{15}$	$10^{-6} - 10^{-7}$	Visible
$10^{15} - 10^{16}$	$10^{-7} - 10^{-8}$	Ultravioleta
$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-9} - 10^{-11}$	Rayos X
$> 10^{20}$	$< 10^{-11}$	Rayos gamma

Esta velocidad se relaciona con λ y f por la expresión $c = \lambda f$. Se le llama *espectro electromagnético* al conjunto de todas las posibles frecuencias con que se puede presentar la radiación. El espectro abarca una región muy amplia (tabla 1.2) desde unos pocos cientos de Hz hasta miles de millones de Hz (Hz: hertz = 1 oscilación por segundo).

Intensidad de la radiación. La onda electromagnética transmite energía a lo largo de la dirección de propagación. La energía por unidad de tiempo que atraviesa la unidad de área perpendicular a la dirección de propagación viene dada por el vector de Poynting, cuyo valor numérico puede expresarse en watt/m² en el Sistema Internacional de Unidades a partir de la expresión $S = E^2/120\pi$, (figura 1.29). El parámetro E indica el *valor eficaz* $E = E_0/\sqrt{2}$ de la intensidad de campo, medida en volt/m. La energía que la radiación electromagnética es capaz de transmitir al interactuar con la sustancia depende notablemente de su frecuencia.

La transmisión de energía se comporta como si la radiación estuviera compuesta por “paquetes” o “cuantos” independientes de energía llamados *fotoes*, cada uno de ellos con una energía $E = hf$, donde $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Joule-segundo (constante de Planck).

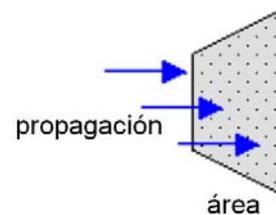


Figura 1.29
Vector de Poynting

Absorbancia y reflectancia de la radiación. Cuando la radiación incide sobre cualquier superficie de separación entre dos medios, una parte se refleja y la otra se transmite al otro medio, absorbiéndose en mayor o menor grado durante el proceso. Como consecuencia de la absorción de energía se produce una atenuación de la onda a medida que ésta avanza por el medio material (figura 1.30).

Un parámetro práctico utilizado comúnmente para caracterizar la absorción de la radiación es la profundidad de penetración d , que se define como la distancia en que la amplitud E_0 se reduce en 36.7% a partir de la superficie. Las fracciones absorbida, reflejada y transmitidas hasta el otro extremo de la muestra quedan determinadas por la frecuencia de la radiación junto con algunas características del medio material considerado (conductividad, permitividad, constante dieléctrica y espesor).

En la tabla 1.3 se muestra la profundidad de penetración de radiofrecuencias y mi-

croondas ($f < 300$ GHz) en diversos tejidos orgánicos. En dependencia de la frecuencia de la radiación, la absorción puede dar lugar a cambios físicos importantes en el medio considerado. Note que una *menor* profundidad de penetración indica una *mayor* absorción, pues hay más interacción, y un mayor efecto biológico en el tejido, aunque la cualidad de este efecto difiere para las diferentes frecuencias.

Por encima de 300 GHz se encuentra la región de frecuencias ópticas, ionizantes y no-ionizantes.

Radiaciones ionizantes y no ionizantes.

Las bajas frecuencias no son capaces de ionizar las estructuras moleculares. Esas frecuencias se corresponden con valores de $hf < 12.4$ eV. (El electrón-volt (eV) es una medida de energía que equivale a $1.6 \cdot 10^{-19}$ joule, unidad de energía del Sistema Internacional de Unidades).

Esta radiación es *no ionizante*. Pertenecen a este grupo entran las frecuencias de radio y TV, la luz infrarroja, el espectro visible y el ultravioleta cercano. Sin embargo, pueden causar vibración y rotación en átomos y moléculas, originado incrementos de temperatura en los tejidos (microondas e infrarrojo). Esta radiación también puede excitar diferentes reacciones fotoquímicas, tales como la fotosíntesis en las plantas.

Para frecuencias tales que $hf > 12.4$ eV las radiaciones son ionizantes. Este tipo de radiación puede ionizar las moléculas, extraer electrones de los átomos e incluso separar los núcleos atómicos, si la frecuencia es lo suficiente alta (radiación gamma). La radiación ionizante de gran intensidad causa daños irreparables en los

tejidos.

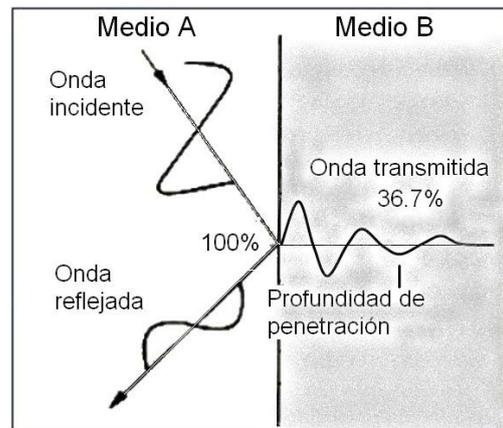


Figura 1.30
Penetración de la radiación

Efectos térmicos en los tejidos. Los principales efectos que pueden aparecer por la exposición a la radiación electromagnética de gran intensidad son el calentamiento o hipertermia, quemaduras, cataratas y esterilidad.

En la exposición a luz infrarroja como, por ejemplo, la proveniente del sol, el aumento de las vibraciones moleculares y el aumento de la temperatura sólo tiene lugar en la piel, pues no hay penetración de la radiación. En la exposición a microondas hay generación de calor y elevación de temperatura en la piel y también los tejidos más profundos, pues ésta radiación posee mayor penetración.

Si los incrementos de temperatura no pueden ser compensados por los mecanismos corporales de termorregulación (vascularización interna, evaporación del sudor) se produce la hipertermia y el estrés térmico.

Considerando que 1 watt = 1 joule/segundo, se citan casos de animales que han muerto por hipertermia en exposiciones a varios miles de miliwatt por centímetro cuadrado (mW/cm^2).

Tabla 1.3			
Bandas establecidas según las características de absorción	Frecuencia en MHz ^a	Profundidad de penetración (cm)	
		Músculos, piel y tejidos con alto contenido en agua	Grasa, huesos y tejidos con bajo contenido en agua
Banda de subresonancias f < 30 MHz Supera a la absorción superficial en el cuerpo, pero no en cuello y piernas. Decece rápidamente con la frecuencia	1 10 27.12	91.30 21.60 14.30	- - 159.0
Banda de resonancias 30 MHz < f < 400 MHz La absorción es alta debido a resonancias del cuerpo entero (~70 MHz), o parciales como la cabeza (~400 MHz)	40.68 100 200 300	11.20 6.66 4.79 3.89	118.0 60.4 39.2 32.1
Banda de puntos calientes 400 MHz < f < 2000 MHz Absorción localizada por resonancias o por enfoque cuasi-óptico del campo electromagnético incidente. El tamaño de los puntos calientes varía entre 1 y varios cm.	433 750 915 1500	3.57 3.18 3.04 2.42	26.2 23.0 17.7 13.9
Banda de absorción superficial 2 GHz < f < 300 GHz La energía se disipa en la superficie del cuerpo de forma similar a las radiaciones infrarrojas.	2450 3000 5000 5300 8000 10000	1.70 1.61 2.78 0.72 0.41 0.34	11.20 9.74 6.67 5.24 4.61 3.39
a) 1MHz (megahertz)= 10 ⁶ Hz; 1 GHz(gigahertz) = 10 ³ MHz = 10 ⁹ Hz			

En otros han aparecido lesiones en órganos internos después de exposiciones de larga duración en campos de menor intensidad. Son especialmente sensibles a los efectos térmicos las partes transparentes de los ojos, que por su bajo riego sanguíneo disipan muy mal el calor. Un incremento de temperatura en el cristalino puede dar lugar a una inhibición del proceso de mitosis y diferenciación celular, con la consiguiente aparición de cataratas. La elevación prolongada de temperatura en los testículos, que en condiciones normales permanecen a 4 °C por debajo de la temperatura corporal, podría dañar a las células germinales.

Efectos no térmicos. Se han observado ciertos trastornos asociados a la exposición radiativa sin que medie un incremento significativo de temperatura; por ello se les atribuye un origen no térmico, pero el mecanismo del proceso es poco conocido por el momento. En estos casos no siempre queda claramente establecida una correlación entre el efecto y la dosis de radiación recibida, y existe la opinión generalizada de que los conocimientos en este terreno deben ser ampliados en un futuro inmediato.

Un reporte del año 2005 encontró una correlación entre los campos de baja intensidad y baja frecuencia (60 Hz) y la rotura de cadenas de ADN en células del cerebro de ratones. Otros efectos reportados en animales o personas, pendientes de mayores estudios y verificación, son:

- Alteraciones celulares, cromosómicas y genéticas.
- Variaciones del ritmo cardíaco y de la

tensión arterial.

- Cambios del encefalograma.
- Efectos endocrinos y neuro-endocrinos (relativo a la liberación de hormonas en la sangre)
- Repercusiones hematopoyéticas (relativo a la formación de células sanguíneas)
- Secuelas sobre la audición.
- Efectos sobre la reproducción y el desarrollo.
- Aumento de las pérdidas de calcio (eflujo).
- Cambios de comportamiento en los individuos.

1.10 Rayos, destellos, gnomos y elfos

El rayo es una descarga eléctrica muy intensa acompañada de un sonido característico: el trueno. Ocurre mayormente durante las tormentas eléctricas, pero también puede aparecer cercano a las erupciones volcánicas o a las tormentas de arena (figura 1.31).

Los fenómenos secundarios asociados a la caída de un rayo pueden ser sorprendentes. Hace ya algunos años me encontraba en la azotea de mi casa tratando de asegurar la antena de TV, desorientada a causa de fuertes vientos de tormenta. Tronaba a lo lejos, el cielo estaba nublado, amenazaba lluvia y se veía algún que otro relámpago, pero ninguno lo bastante cercano como para tomar precauciones –al menos esa fue mi opinión en aquel momento.

Cayó un rayo algo más cercano que los anteriores y en el mismo instante sentí un ‘crack’ y un leve golpe en el medio del

pecho, tan leve que pensé era una contracción muscular involuntaria; un reflejo causado por la caída del rayo. Sin embargo, al terminar de asegurar la antena y dirigirme a la escalera mi hijo, que había estado observando desde lejos, me dijo que había visto claramente como una chispa había saltado de la antena hacia mi pecho en el mismo instante que el rayo cayó y yo sentí la rara sensación. Al ver la chispa, pensé que yo había obtenido un pasaporte instantáneo para el ‘otro mundo’, pero como seguí amarrando la antena como si nada, él tampoco dijo nada hasta que terminé.



Figura 1.31
Rayo cerca del Estadio Latinoamericano, La Habana

De no ser por eso, no hubiera sabido lo que en realidad ocurrió. Nunca he logrado encontrar una explicación razonable al suceso.

Una amiga nicaragüense me contó que, de pequeña, un rayo mató una vaca que estaba a su lado, mientras que a ella sólo lo dejó en la espalda la marca de la cremallera metálica o zipper del vestido que usaba en ese momento.

La corriente eléctrica asociada a un rayo varía entre 30 000 amperes y 10 veces ese valor. Genera temperaturas cercanas a los 20 000 °C, el triple de la existente en la

superficie solar y puede alcanzar una longitud de varios kilómetros. Su duración es de unos 30 microsegundos. Los rayos se desplazan a gran velocidad, hasta de 220 000 km/h, pero una vez que aparecen, el resplandor luminoso que los acompaña viaja a una velocidad mucho mayor, de unos 300 000 km/s (la velocidad de la luz) por lo que prácticamente se ven en el mismo instante que caen, cualquiera sea la distancia a que uno se encuentre. El sonido acompañante viaja a velocidad mucho menor y suele haber un intervalo notable entre la observación del rayo y la posterior audición del trueno acompañante.

Truenos y cañonazos. Es un error bastante común considerar que el sonido del trueno se difunde a la velocidad de las ondas acústicas ordinarias (aproximadamente 1 224 km/h, unos 300 metros por segundo). Eso no es cierto.

El tipo de onda que surge durante un trueno es diferente al del sonido ordinario; consiste en una *onda de choque supersónica* que viaja a una velocidad 40 veces superior a la del sonido ordinario, causando en el oído la sensación de un chasquido. Escuchar esos chasquidos indica que el rayo ha caído muy cerca. Además, la velocidad de las ondas supersónicas no es constante, pues disminuye rápidamente a medida que la perturbación se aleja de la fuente, hasta convertirse finalmente en una onda acústica ordinaria. De aquí que no sea posible estimar la distancia en metros hasta la descarga a partir del tiempo transcurrido entre la visión del rayo y la audición del trueno -como muchos piensan- por el simple procedi-

miento de multiplicar el número de segundos transcurridos por los 300 m/s de la velocidad del sonido.

La situación es muy diferente cuando, por ejemplo, se dispara un cañón. En ese caso la onda de choque se convierte en acústica a sólo dos metros de la pieza, por lo que sí resulta válido este tipo de cálculo para estimar la distancia aproximada que hay del cañón al observador.

¿Cómo surge el rayo? Existen varias hipótesis al respecto, aún no comprobadas; una de las más aceptadas es la siguiente. Las corrientes de convección dentro de la nube (las mismas que hacen subir el vapor de agua cuando ésta se evapora del mar o de otra fuente acuosa) empujan hacia arriba las gotas de agua que se van formando. Al llegar a las regiones superiores de la atmósfera, el agua se enfría hasta llegar a bajas temperaturas, creando una mezcla de agua con pequeños cristales de hielo, menos denso que el agua. Si el hielo que se forma aumenta demasiado de tamaño, surge el granizo.

El movimiento relativo agua-hielo origina choques que arrancan cargas negativas de la superficie del hielo pasándolas al agua, de manera que los cristales de hielo quedan cargados positivamente. La mezcla agua-hielo de carga negativa, más pesada que el hielo positivo, va quedando rezagada en la subida. El resultado total del proceso es que el hielo positivo se acumula en la parte superior de la nube y las cargas negativas en la inferior, creando una diferencia de potencial y un campo eléctrico que puede llegar a ser muy grande entre diferentes partes de la nube o en nubes adyacentes. Ese campo es capaz de ionizar el aire húmedo, usualmente

no conductor de la electricidad, y hacerlo conductor. Cuando la nube se descarga bruscamente aparecen los relámpagos.

Las cargas negativas en el inferior de la nube también crean cargas positivas en el suelo, por un proceso conocido como *inducción* (cargas de signo contrario se atraen). Si el campo eléctrico que se establece entre nube y tierra alcanza cierto valor, se crea una vía conductora para que pase la corriente eléctrica y surja el rayo (figura 1.32).

Cómo protegerse de los rayos. El promedio anual de muertes por rayo en Cuba es de unas 65 personas, no siempre atribuibles a descuidos o negligencias, pues los rayos pueden caer donde menos se les espera. Ocurre con frecuencia que el rayo no caiga sobre el objeto más alto, sino en otro lugar cercano a él. Es cierto que la probabilidad de que caiga sobre un objeto alto es mayor, pero la trayectoria que seguirá cada rayo individual es impredecible.

Si a Ud. lo sorprende una tormenta en un descampado, busque cobijo lo antes posible. No se arriesgue, pues el rayo puede usarlo como trayectoria a tierra de la misma forma que usa cualquier otro objeto. Un lugar apropiado sería dentro –no en la puerta– de un edificio, una cueva o un auto. No busque cobijo bajo un árbol, pues los árboles atraen los rayos.

De no existir otra posibilidad, agáchese con los pies unidos y baje la cabeza lo más posible, sin tocar la tierra. No se acueste sobre el suelo, pues cuando cae un rayo surge un potencial eléctrico que se radia desde el punto de contacto. Si su cuerpo

queda dentro de esa área, puede fluir corriente a través de su cuerpo, lo que podría causar un paro cardíaco, quemaduras u otros daños.

No permanezca dentro de una piscina, en el mar o en cualquier otra extensión de agua, pues ésta conduce la electricidad y puede ampliar e intensificar la región de daño. Si se encuentra dentro de un edificio no use teléfonos conectados a la línea; si un rayo cae sobre ella se transmitirá a todos los teléfonos cercanos. Aléjese de las tuberías metálicas, duchas y regaderas, que también pueden transmitir la electricidad del rayo.



Figura 1.32

Las nubes cargadas inducen sobre la superficie terrestre una carga eléctrica del mismo valor y signo contrario.

Rayos globulares. Como lo dice su nombre, son ‘globos’ de luz que pueden aparecer durante las tormentas tras la caída de un rayo. Se observan muy raramente y, aunque existen fotos y videos, la veracidad de muchos de ellos es controvertida. A diferencia de los rayos, estas ‘bolas de

fuego' flotantes pueden durar varios segundos y aparecer blancas, amarillas, naranjas, rojas o azules. Su tamaño puede variar desde el de una pelota de golf hasta el de una pelota de playa. La superficie no es lisa, sino que está cubierta de pequeñas chispas. Se mueven lenta y erráticamente dejando una estela de humo tras de sí y desaparecen sin dejar rastro.

Existen muchos testimonios e historias notables asociadas a los rayos globulares. El físico del siglo XIX Georg Wilhelm Richmann murió al ser lesionado en la cabeza por 'una bola de fuego azul pálida' durante una tormenta, y el joven Zar Nicolás II observó en el siglo XIX uno de estos fenómenos en una iglesia, durante un servicio religioso. Su existencia quedó comprobada sin lugar a dudas en 1963 cuando un grupo de científicos, en un vuelo comercial de New York a Washington, presenció una de estas bolas de fuego flotar por el pasillo central y desaparecer en la parte trasera del avión.

Aunque existen diversas hipótesis, hasta el momento no hay una explicación satisfactoria acerca de cómo surgen y que son en realidad los rayos globulares. La más aceptada es que, durante la caída de un rayo, el silicio que usualmente forma parte del suelo se vaporiza y posteriormente condensa como polvo fino que se recombina con el oxígeno del aire creando luminiscencia. Rayos globulares han sido creados en el laboratorio a partir de silicio pulverizado. En la Universidad Federal de Pernambuco la aplicación de 140 amperes a un substrato de silicio vaporizó el material, produciendo en algunos casos bolas de fuego del tamaño de una pelota de golf.

También se han obtenido por accidente bolas luminiscentes en experimentos realizados en la Universidad de Tel Aviv.

Destellos, gnomos y elfos. Los rayos no son los únicos fenómenos eléctrico-luminosos que se pueden observar en la atmósfera.

Los *gnomos* o *sprites* son descargas eléctricas que ocurren muy por encima de los cumulonimbos o nubes de tormenta, dando lugar a diferentes formas luminosas.

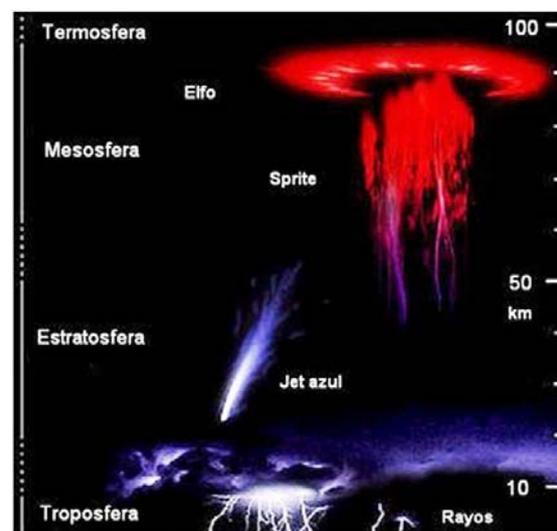


Figura 1.33
Jets, sprites y elfos

Aparecen cuando tiene lugar una descarga de rayos de carga positiva hacia la tierra (mucho menos frecuentes que los de carga negativa). Su color puede ser naranja-rojizo o verde-azulado y usualmente ocurren en racimos. Fueron fotografiados por primera vez en 1989 en la Universidad de Minnesota (figura 1.33).

Los *destellos azules (blue jets)* se proyectan hacia arriba desde la parte superior de los cumulonimbos como un spray estrecho luminoso y son más brillantes que los sprites. Ocurren a más baja altura y duran alrededor de un segundo. También fueron

registrados por primera vez en 1989, en este caso por los astronautas de un transbordador espacial.

Los *elfos* (*elves*) son luminiscencias que se expanden hasta diámetros de 400 km y duran sólo un milisegundo. Poseen un tinte rojizo. Fueron observados en otra misión de un transbordador espacial, en 1990.

1.11 Ionosfera y comunicaciones

Las características de la atmósfera cambian drásticamente a medida que subimos y nos alejamos del nivel del mar. La capa donde hay nubes, lluvias, vientos, huracanes, cambios de temperatura y fenómenos climáticos es la *troposfera*, que alcanza de 9 a 18 km de altura según sea sobre los polos o sobre el ecuador. En esta capa la temperatura disminuye con la altura hasta un valor límite de 70°C bajo cero en su borde superior, la tropopausa. Los vuelos intercontinentales de la aviación civil transcurren cerca de su límite inferior, a unos 10 km de altura. A esa altitud la presión atmosférica cae a una cuarta parte de lo normal, la densidad del aire se reduce a un tercio y la temperatura es de unos 50 grados bajo cero. La mitad del aire total

de la atmósfera se encuentra por debajo de los 9 km, la altura aproximada del monte Everest en los Himalayas (figura 1.34).

Más arriba se encuentra la *estratosfera*, hasta los 50 km de altura, donde la temperatura vuelve a subir, llegando a los 0°C. Esa capa está formada por estratos horizontales que no se mezclan entre sí, con vientos que pueden alcanzar los 200 km/h, aunque el aire casi no se mueve en la dirección vertical. Esta particularidad hace que cualquier sustancia que llegue a esa capa se difunda por todo el globo con mucha rapidez. En la parte superior de la estratosfera se encuentra la importante capa de ozono, que absorbe un 99% de las componentes dañinas de la radiación solar.

Aún más arriba se encuentra la *ionosfera*, que cubre de 80 a 160 km, lugar donde el aire está enrarecido en extremo. La concentración de gases es tan pequeña y las colisiones entre las partículas tan escasas, que cuando los remanentes atmosféricos se ionizan por la radiación solar tienden a permanecer largo tiempo en ese estado. Más allá se extiende la *exosfera*, límite exterior de la atmósfera, donde el hidrógeno escapa continuamente al vacío interplanetario.

Una vez atravesada la capa divisoria o estratopausa a los 50 km, se llega a la *mesosfera*, que alcanza hasta los 80 km, donde la temperatura desciende nuevamente hasta los -70 °C. Esta región (50-80 km de altura) contiene sólo el 0.1% de la masa total del aire de la atmósfera; no obstante, es allí donde comienza a tener efecto la fricción del aire sobre los meteoritos, haciéndolos incandescentes.

Reflexión de las ondas de radio. Las partículas ionizadas de la ionosfera poseen una importante propiedad: son conductoras y pueden reflejar parcialmente las ondas de radio, influyendo notablemente en las comunicaciones.

Cuando en esa capa incide la radiación emitida por algún transmisor terrestre de alta frecuencia en el intervalo 3-30 megahertz (MHz), una pequeña parte de la energía se absorbe y la restante se refleja de vuelta a la superficie (figura 1.35). Este

efecto permite la recepción de señales de radio a distancias de hasta miles de kilómetros, mucho mayores que si las ondas viajaran en línea recta por la superficie terrestre. Es el intervalo de frecuencias utilizado en la navegación y aviación de largo alcance, en las emisoras comerciales de onda corta y por los radioaficionados. Debajo de los 3 MHz se encuentran las frecuencias de onda media de los radioreceptores de amplitud modulada.

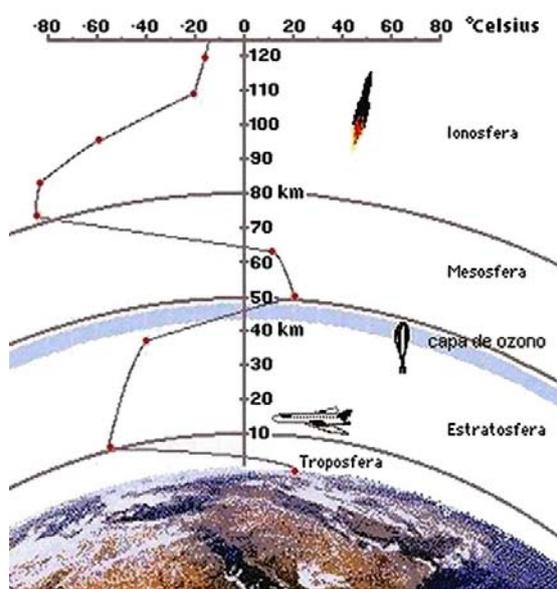


Figura 1.34
Capas de la atmósfera

En la medida que la frecuencia aumenta, la radiación es capaz de penetrar más profundamente en la ionosfera y su alcance sobre la tierra se reduce. En la región de muy alta frecuencia (Very High Frequency VHF, 30-300 MHz) la penetración en la capa llega hasta los 70-100 km. Las ondas VHF se emplean en la marina y en las comunicaciones aire-tierra a corta distancia, no más de algunos cientos de kilómetros. En los 300-3000 MHz las ondas de radio no se reflejan en la ionosfera y escapan al exterior; es por eso que su recepción se limita a la línea del horizonte.

Son las frecuencias de los teléfonos móviles, televisión y frecuencia modulada. Para lograr transmisiones a mayor distancia usando estas frecuencias, es necesario utilizar retransmisores terrestres que recojan la señal y vuelvan a transmitirla, o satélites como puntos intermedios de retransmisión.

Las ondas reflejadas en la ionosfera alcanzan el suelo sólo a determinadas distancias del transmisor, que dependen tanto de la frecuencia como del ángulo de reflexión y la profundidad de penetración. Es por eso que una señal de radio puede no ser detectable a 100 km de la emisora, pero sí a 500 km, fenómeno conocido como *skip*. En otras regiones, las señales terrestres y las refractadas por la ionosfera pueden alcanzar el receptor casi conjuntamente e interferir destructivamente, reduciendo la intensidad y claridad de la recepción (*fading*). Como la ionización de la capa atmosférica y su altura sobre la superficie varía con la actividad solar, es común que las características de reflexión de las ondas de radio difieran en forma apreciable del día a la noche.

1.12 El ruido y la contaminación sonora

A pesar de su importancia, éste es quizás uno de los problemas ambientales que menos atención recibe. El hombre primitivo no estaba expuesto de manera continua a los ruidos excesivos, quizás con la excepción de algún fenómeno natural intenso y reiterado, como los truenos. Hoy día el asunto es muy diferente. Y es un problema que no compromete la existencia o el bienestar de las generaciones futuras, sino de las actuales. Hay diferentes

acepciones para el ruido: sonido desagradable, perjudicial, perturbador o dañino para quien lo recibe, pero actualmente la

más aceptada parece ser ‘sonido no deseado’, cualquiera que éste sea (figura 1.36).

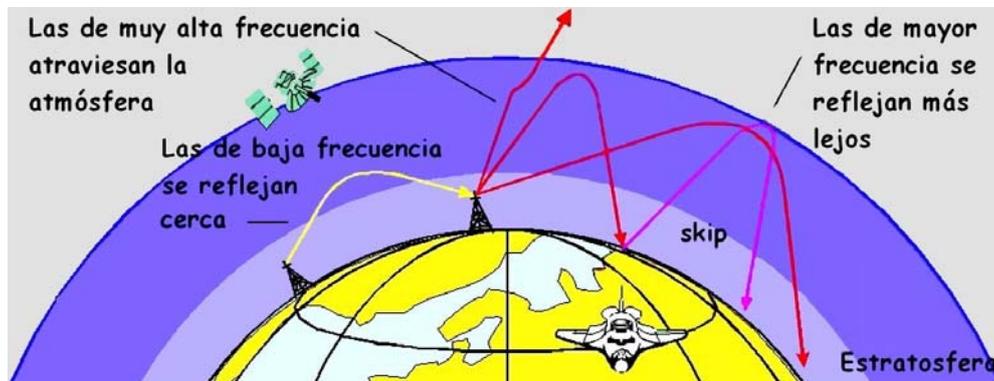


Figura 1.35 - Reflexión de las ondas de radio en la estratosfera.

Los animales reaccionen ante el ruido huyendo, escondiéndose o enfrentándose agresivamente a su fuente. Si anteriormente estaban dormidos, despiertan. La secreción de adrenalina que se origina es similar a la causada por cualquier otra señal de peligro. Es el comportamiento propio del miedo o del estrés, y el ser humano no es una excepción. En las personas se dan instintivamente las mismas reacciones, aunque a menudo modificadas o inhibidas por la voluntad, lo que por otra parte incrementa el nivel de estrés.

El decibel (dB) es una unidad relativa empleada en la acústica y las telecomunicaciones para expresar la relación entre dos intensidades del sonido, ya que la práctica indica que cualquier sujeto necesita escuchar al menos dos sonidos de diferente intensidad para dar una estimación confiable de su valor. La escala de medida no es lineal, sino logarítmica, que se ajusta mejor a la sensibilidad del oído humano.

Para evaluar el riesgo auditivo es preferible utilizar el decibel A ponderado (dBA), que se basa en determinaciones realizadas

aplicando un filtro.



Figura 1.36 Ruido equivale a sonido no deseado, cualquiera que éste sea.

El proceso elimina parte de las bajas frecuencias (sonidos graves) y las muy altas (sonidos agudos) dejando sólo las frecuencias medias, de mayor percepción en el oído. El oído humano no detecta diferencias menores de unos 3 dBA. Los efectos nocivos causados por el ruido se resumen en la tabla 1.4.

El ruido puede causar los siguientes efectos sobre las personas.

Malestar. Es el efecto más usual. Durante el día se suele experimentar moderadamente a partir de los 50 dbA, y más fuerte a partir de los 55. Al anochecer, en estado de vigilia, el malestar es mayor, y las cifras anteriores se reducen en 5 ó 10 dbA.

Tabla 1.4

A partir de este valor de intensidad en dBA	Se sienten estos efectos nocivos
30	Dificultad en conciliar el sueño Pérdida de calidad del sueño
40	Dificultad en la comunicación verbal
45	Probable interrupción del sueño
50	Malestar diurno moderado
55	Malestar diurno fuerte
65	Comunicación verbal extremadamente difícil
75	Pérdida de oído a largo plazo
110 - 140	Pérdida del oído a corto plazo

Interferencia con la comunicación. En una conversación normal, para que una palabra sea perfectamente inteligible, la intensidad debe ser superior al ruido de fondo en no menos de 15 dBA. La intensidad de una conversación normal a una distancia de un metro es de unos 50-55 dBA. Gritando es posible llegar a 75-80 dBA. De aquí que un ruido mayor de 35-40 dBA creará problemas en la comunicación. Con un ruido de 65 dBA la conversación se torna extremadamente difícil.

Pérdida de atención y concentración. El ruido de fondo, o los ruidos repentinos,

pueden causar la disminución del rendimiento en muchos trabajos, especialmente en aquellos que exigen concentración. Aparecen errores y se reduce la calidad y cantidad de las tareas realizadas. En algunos casos las consecuencias pueden ser duraderas. Por ejemplo, los niños sometidos a altos niveles de ruido durante la edad escolar aprenden a leer con mayor dificultad y tienden a alcanzar niveles inferiores en el dominio de la lectura.

Trastornos del sueño. Además de la imposibilidad de dormir cuando hay mucho ruido, a partir de un nivel de 45 dBA la probabilidad de despertar cuando se duerme es grande. Pero aunque no haya interrupciones en el sueño, el ruido puede afectar seriamente su calidad. Los estudios muestran que el sueño se vuelve intranquilo, se acortan sus fases más profundas, hay vasoconstricción y cambios en la respiración; también aumentan la presión arterial y el ritmo cardiaco. Como consecuencia, la persona no habrá descansado bien y será incapaz de realizar adecuadamente sus tareas cotidianas al día siguiente. Si la situación se prolonga, el equilibrio físico y psicológico se verá afectado seriamente.

Daños directos al oído. El ruido causa sordera transitoria (fatiga auditiva) o permanente en el caso de exposiciones prolongadas a niveles superiores de 75 dBA. El daño comienza por los receptores de las frecuencias más bajas y las mayores, (sonidos muy bajos y muy agudos) reduciendo con el tiempo el diapason de frecuencias que el oído puede recibir y la calidad de la audición. También causan sordera los sonidos de corta duración mayores de 110 dBA y la acumulación de fatiga

auditiva. Se necesitan unas 16 horas de descanso en situación de confort acústico para recuperarse totalmente de la fatiga auditiva. La sordera permanente es causada por lesiones en el oído interno.

Estrés. Las personas sometidas a cualquiera de las situaciones descritas anteriormente suelen desarrollar uno o más de los síndromes siguientes: cansancio crónico, tendencia al insomnio, hipertensión, cambios en la composición química de la sangre, isquemias cardíacas, trastornos del sistema inmune (responsable de la respuesta a las infecciones y a los tumores), trastornos psicofísicos tales como ansiedad, manía, depresión, irritabilidad, náuseas, jaquecas, y también neurosis o psicosis en personas predispuestas a ello. El ruido también de origen a cambios en la conducta, provocando comportamientos antisociales como hostilidad, intolerancia, agresividad, aislamiento social y disminución de la tendencia natural hacia la ayuda mutua. Especialmente sensibles al ruido son los niños, los ancianos, los enfermos, las personas con dificultades auditivas o visuales y los fetos.

¿Es posible habituarse al ruido? Sí, es posible. El proceso se denomina síndrome de adaptación. Hay casos de soldados que han dormido junto a un cañón que no cesaba de disparar, o comunidades que, a pesar de la cercanía de un aeropuerto, logran dormir regularmente. Esto es posible porque a mediano o largo plazo el organismo se habitúa al ruido mediante dos diferentes mecanismos. El primero es la disminución de la sensibilidad del oído,

comenzando por las frecuencias más altas y las más bajas, que trae aparejada la sordera temporal o permanente. El segundo se debe a que las capas corticales del cerebro se habitúan; oímos el ruido, pero no nos damos cuenta. Durante el sueño, las señales llegan al sistema nervioso y no nos despiertan, pero desencadenan consecuencias fisiológicas de las que no somos conscientes: cambios en la frecuencia cardíaca, del flujo sanguíneo y de la actividad eléctrica cerebral.

En la prensa aparecen esporádicamente denuncias de vecinos acerca del exceso de ruido a deshora en algún centro nocturno de recreación. Tampoco es muy raro que alguna persona agrede sónicamente a sus conciudadanos, a cualquier hora del día o la noche, al instalar una bocina de gran potencia en su balcón o en el interior del apartamento de un edificio múltiple. Otro tipo de agresión sónica algo extendida en el presente es la de algunos choferes del transporte público hacia sus pasajeros, quienes muchas veces se ven obligados a escuchar música que no les agrada, a niveles estridentes –estridencia que a veces no padece el chofer por no tener ubicada una bocina cercana, lo que, por otra parte, deben haber previsto los fabricantes para no distraer su atención de la conducción del vehículo. Si a la agresión sonora se suman los ineludibles ruidos ambientales, incluyendo el del propio motor del vehículo, se crean condiciones excelentes para el malhumor, el stress y las conductas insolidarias y antisociales de los pasajeros.

Parte 2. La energía y sus fuentes alternativas

2.1 ¿Qué es la energía?

Energía es un término pobremente definido en la literatura científica. Para verificar esta afirmación basta comprobar las diferentes acepciones que se le asigna en diferentes textos de Mecánica o Termodinámica, algunas de ellas fácilmente impugnables. De esa falta de precisión se aprovechan algunos para introducir supuestas terapias o medicamentos maravillosos que ‘curan’ casi cualquier cosa. La falta de precisión permite engañar con facilidad a quienes no son especialistas, pues estas personas alegan saber ‘controlar’ ciertas energías como la bioenergía, la energía piramidal, la universal, la vital, o cualquier otro nombre que se les ocurra, y así realizar las curaciones. Algunas de esas ‘energías’ simplemente no existen; son inventadas. Otras tienen significado esotérico, y a otras más se les tergiversa el significado real.

El problema parece provenir que al término energía se le asignan al menos 3 significados diferentes, en dependencia del contexto que se considere. Los significados son los siguientes.

1er significado. El de una energía física, real y medible: cinética, potencial electrostática, gravitatoria, de enlace, magnética, energía en reposo ($E_0=mc^2$), de la radiación ($E = hv$), etc. Estos términos se caracterizan porque tienen una expresión analítica y números asociados (tabla 2.1). Por tanto:

a) Es posible compararlas sin ambigüedad,

b) Se puede verificar que unas se transforman en otras, buscar su equivalencia y el cumplimiento del principio de conservación de la energía o 1er principio de la Termodinámica.

Las *energías de enlace* puede que no tengan expresión analítica única, pero sí poseen valores numéricos medibles y reproducibles computados a partir del experimento.

<i>Energía</i>	<i>Expresión analítica</i>	<i>Magnitud a medir</i>
Cinética	$\frac{1}{2}mv^2$	Masa (m) Velocidad (v)
Potencial gravitatoria	$G \frac{m_1 m_2}{r}$	Masa (m) Longitud (r)
Potencial electrostática	$k \frac{q_1 q_2}{r}$	Carga eléctrica (q) Longitud (r)
Del campo eléctrico (por u. de vol.)	$\frac{1}{2} \epsilon E^2$	Permitividad Intensidad de campo E
Del campo magnético (por u. de vol.)	$\frac{1}{2} \mu H^2$	Permeabilidad (μ) Intensidad de campo H
Energía en reposo E_0	mc^2	Masa (m), Velocidad de la luz (c)
Del fotón, del nivel energético (ΔE)	hv	Frecuencia (v)
Energías de enlace	Diversas	Diversas

2do significado. Para indicar de donde provienen o se almacenan determinadas energías: energía eólica (energía cinética del viento), energía solar (energía de la radiación electromagnética), energía nuclear, química, mareomotriz y otras. Es-

tos conceptos no tienen fórmulas asociadas ni valores numéricos ajenos a los de la tabla 2.1. Por tanto, no son realmente energías como las anteriores, sino conceptos o simplemente nombres que indican de donde provienen o donde se almacenan las energías físicas reales descritas en la tabla 2.1.

3er significado. Es el significado popular de energía que todos conocemos: “Me quedé sin energías”, para indicar cansancio o agotamiento o: ‘Me siento con mucha energía’, para indicar lo contrario. Ésta “energía” no es tal, sino un estado de ánimo que no se puede medir, ni asignarle números, por no estar definido el concepto con precisión. De aquí que no es posible hacer ciencia pensando en esta acepción de sentido popular.

Intentar explicar el efecto de supuestos medicamentos o procedimientos realizados sobre las personas o animales en base a este concepto conduce de inmediato a la pseudociencia.

Al llegar a este punto, el lector debe notar que si nos acostumbramos a hablar de ‘energía’ a secas, sin especificar su ‘apellido’, o la correspondiente expresión analítica, y como se mide su valor, le estamos haciendo un flaco favor al interlocutor. Sobre todo si es un estudiante, pues estamos mezclando en su conciencia las tres diferentes acepciones, dos de ellas sin un claro significado físico. De aquí que para evitar ambigüedades sea imprescindible esclarecer, en cada caso a) el ‘apellido’ de la energía, b) su fórmula o significado y, c) el cómo se mide a partir de la expresión analítica. Este último aspecto de la medición es primordial en cualquier ciencia factual. (*Aquellas que dependen de hechos,*

a diferencia de las formales como las matemáticas o la lógica, que se bastan a sí mismas; ver apéndice).

William Thomson (Lord Kelvin), uno de los padres de la Termodinámica moderna, opinó al respecto:

“Suelo repetir con frecuencia que sólo cuando es posible medir y expresar en forma numérica la materia de que se habla, se sabe algo acerca de ella; nuestro saber será deficiente e insatisfactorio mientras no seamos capaces de traducirlo en números. En otro caso, y sea cual fuere el tema de que se trate, quizá nos hallemos en el umbral del conocimiento, pero nuestros conceptos apenas habrán alcanzado el nivel de ciencia.”

Por otra parte, el principio de conservación y transformación de la energía no es un principio filosófico, como a veces algunos piensan. Es el resultado empírico, consecuencia de un proceso de inducción que resume los resultados de cientos o miles de experimentos de todo tipo a lo largo de cientos de años. Los hechos principales que marcaron pauta en esa evidencia experimental fueron:

- *Imposibilidad de crear un móvil perpetuo de primera especie* (un dispositivo que fuera capaz de entregar energía mecánica sin consumir otro tipo de energía), enunciado por la Academia Francesa de Ciencias en 1775, cuando los académicos se cansaron de revisar cientos de proposiciones de tales móviles que nunca funcionaron.
- *La determinación del equivalente mecánico del calor*; establecido por los experimentos de James Prescott Joule en 1840 (1 caloría \approx 4.1868 joule).

- *El principio de conservación de la energía*, derivado de los trabajos de Joule, Hermann von Helmholtz y Julius Robert von Mayer en 1842, también conocido como 1ra Ley de la Termodinámica. (Ver figura 2.1).

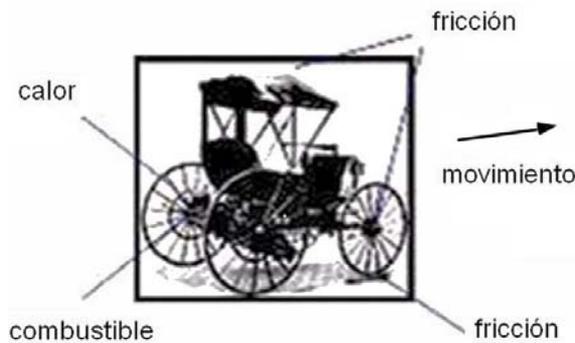


Figura 2.1

Transformación de las energías de enlace químico del combustible y el oxígeno en otros tipos de energía.

Definiendo la energía. ¿Cómo encontrar entonces una definición general de energía que cumpla los requisitos anteriores? Tratemos de buscar alguna analogía con la definición de otras magnitudes físicas. Considere, por ejemplo, la aceleración. Se define por la expresión $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ en un instante dado, y en forma promedio como $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$. Las expresiones nos dicen que la aceleración es la variación de la velocidad (Δv) en el intervalo de tiempo transcurrido (Δt). También nos dice que los valores de la aceleración se calculan a partir del cociente de esas magnitudes.

En la física, la mayor parte de las magnitudes se definen a partir de otras. Cuando esto no es posible se llega a las magnitudes fundamentales como el tiempo, la longitud o la temperatura. En estos casos se emplea el criterio operacional, que consi-

dera definida la magnitud cuando se describe en detalle el proceso de su medición.

Como la energía no es una magnitud fundamental, hay que definirla sobre la base de otras magnitudes previamente definidas. Para cumplir con rigor los requisitos anteriores es imprescindible introducir conceptos propios del cálculo elemental, que los interesados pueden consultar en el apéndice al final del capítulo. Allí se demuestra que una definición que cumple las exigencias anteriores es la siguiente.

Energía: Aptitud o capacidad de un cuerpo o sistema para ejercer fuerzas sobre otros cuerpos o sistemas o entre sus propios subsistemas.

En el apéndice se demuestra que fuerza y energía potencial E_p se relacionan por la expresión $\vec{F} = -\nabla E_p$ y en el caso de la energía cinética E_c como $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$, donde $|\vec{p}| = \sqrt{2mE_c}$. Cualquier otro tipo de energía se puede reducir a una de estas dos aplicando el principio de conservación y transformación. Esta definición es también cuantitativa, ya que las ecuaciones indican que el valor de cualquier energía se puede reducir a medir fuerzas y tiempos en forma directa utilizando un dinamómetro.

Formas de transmisión de la energía. Para completar la definición con criterios actualizados se puede añadir lo siguiente. Si las fuerzas ocasionan variaciones temporales microscópicas y desordenadas, hay transmisión en forma de *calor*. Si las variaciones temporales son macroscópicas o microscópicas ordenadas (fenóme-

nos eléctricos y magnéticos) hay transmisión en forma de *trabajo*.

La transmisión de calor puede ser por conducción, convección o radiación electromagnética (tabla 2.2), pero la radiación también puede entregar su energía en forma de trabajo (presión de la luz, efecto fotoeléctrico, recepción en antenas de las señales de radio y TV). La aparente dualidad e indeterminación acerca de si la radiación es una forma de transmisión de calor o de trabajo se resuelve considerando que la radiación electromagnética es un *sistema* que existe con independencia de la fuente que le dio origen. Aunque la fuente desaparezca, la radiación prosigue su movimiento de forma autónoma.

<i>Calor</i>	Conducción
	Convección
	Radiación
<i>Trabajo</i>	Mecánico
	Eléctrico y magnético

Ese sistema posee propiedades muy especiales: sólo existe a la velocidad de la luz y no tiene fronteras definidas. Como todo sistema, puede interactuar con otros intercambiando energía en forma de calor o de trabajo, según sean las condiciones. En resumen, no es correcto considerar la radiación como una forma de transmisión de calor. Es en realidad un *sistema* que se comporta como cualquier otro sistema a los efectos de la transmisión de energía.

2.2 La pila de combustible

Una batería o pila de combustible es un

dispositivo electroquímico capaz de convertir mezclas combustibles en energía eléctrica, proporcionando además calor adicional durante el proceso. A diferencia de las baterías convencionales, nunca se descarga, pero debe ser alimentada continuamente con algún combustible y un oxidante para que funcione. El proceso que tiene lugar es una especie de “combustión controlada” a temperaturas relativamente bajas, donde parte de la energía que usualmente se disipa en forma de calor se logra aprovechar para generar energía eléctrica de forma directa.

La primera pila de combustible fue inventada por el inglés William Robert Grove en 1839 y usaba hidrógeno como combustible. Poseía dos electrodos de platino, sumergidos por un extremo en ácido sulfúrico diluido y por el otro en vasijas selladas conteniendo hidrógeno y oxígeno. De esta forma Grove lograba establecer una corriente constante entre ambos electrodos. Sin embargo, esta pila resultó difícil de manipular y de muy poco interés práctico en su época.

No fue hasta 1960 que las pilas de combustible fueron revitalizadas, al emplearse en los vuelos espaciales tripulados para proporcionar electricidad y agua potable a los cosmonautas. Pilas de hidrógeno-oxígeno se utilizaron en los programas espaciales Géminis y Apolo; la Apolo 11 realizó el primer descenso en la Luna en 1969. En la actualidad las pilas de hidrógeno se utilizan en los transbordadores espaciales por una razón fundamental: el peso total de los instrumentos a poner en órbita es decisivo, y estas pilas son capaces de generar mucha más energía por unidad de peso que cualquier otro tipo de

batería.

La figura 2.2 muestra esquemáticamente una pila de combustible hidrógeno-oxígeno contemporánea. Posee un ánodo poroso al que se inyecta hidrógeno y un cátodo hecho de un material similar donde se introduce el oxidante, que puede ser aire u oxígeno. Los electrodos están separados por un electrolito conductor iónico de hidróxido de potasio. Los electrones producidos en el ánodo se mueven hacia el cátodo por el circuito externo, proporcionando la energía aprovechable de la pila. Los iones hidroxilo (OH^-) producidos en el cátodo son conducidos al ánodo por el electrolito; allí se combinan con el hidrógeno y forman agua, que debe ser extraída continuamente para evitar que la pila se inunde.

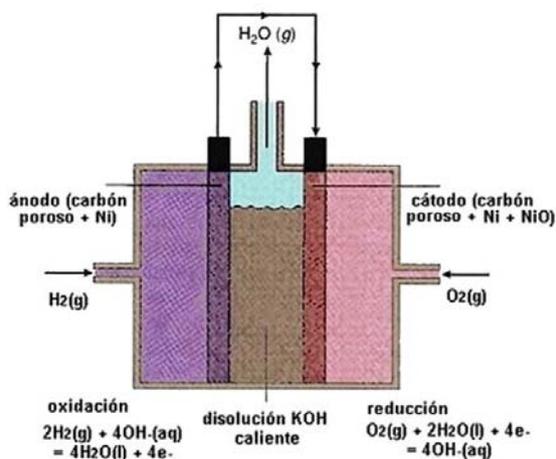


Figura 2.2

Esquema de una pila hidrógeno - oxígeno

La temperatura óptima de trabajo de esta pila varía entre los 60 y 90 °C. También puede funcionar a temperatura ambiente, pero con baja eficiencia. Es capaz de proporcionar una fuerza electromotriz de hasta 1.2 volt; usando grupos de baterías conectadas en serie y/o paralelo se pueden extraer hasta 2 kilowatt de potencia a bajo

voltaje.

Las pilas de hidrógeno resultan atractivas como fuentes de energía, porque aprovechan el combustible con relativamente alta eficiencia ($\sim 50/60\%$) y no contribuyen a la contaminación ambiental, pues sólo generan agua y calor como residuos. Para generalizar su aplicación como fuentes alternativas de energía limpia, el hidrógeno deberá ser obtenido por electrolisis a partir de otras fuentes no contaminantes como son las centrales hidroeléctricas, los molinos de viento o las celdas solares.

Las pilas de combustible pueden funcionar con una gran variedad de carburantes tales como metanol, etanol, gas natural, propano, gasolina, e incluso biogás. En estos casos la pila no es tan “limpia” como la de hidrógeno; no obstante, los niveles de contaminación son mucho menores que los aportados por las fuentes tradicionales, basadas en la quema de combustibles fósiles.

Algunas de las ventajas adicionales que se le señalan a las pilas de combustible cuando se comparan con otras fuentes de energía son las siguientes:

- El combustible se convierte en electricidad con más eficiencia que en cualquier otra tecnología accesible hoy día.
- No hay partes móviles, haciendo las pilas más confiables y mucho menos ruidosas que otros generadores convencionales.
- No se degradan con el uso como las pilas corrientes y pueden proporcionar energía de una manera continua con un mínimo de desgaste.

- Son ideales para uso portátil, residencial y de transportación.
- Como son limpias y eficientes, pueden ser ubicadas en casi cualquier lugar, incluyendo áreas urbanas de gran congestión, donde la necesidad de evitar al máximo la contaminación puede ser determinante.
- Proporcionan una variante adicional como fuente alternativa para las comunicaciones y otros servicios en caso de desastres o en lugares aislados.

Entre las desventajas de las pilas de combustible se encuentra que aún su tamaño es relativamente grande y su manufactura no es barata, aunque se espera que con el comienzo de su producción en serie los costos se reduzcan grandemente. Muchos opinan que aún se necesitan unos cuantos años de investigación y desarrollo para obtener una pila de combustible suficientemente perfeccionada como para ser utilizada a gran escala.

Existen otros tipos de pilas de combustible, con características y temperaturas de trabajo adecuadas para algunas aplicaciones, pero no para otras. Se designan según el electrolito utilizado, por ser éste quien determina las propiedades básicas de la celda, incluyendo su temperatura de trabajo. Los rangos de eficiencia varían entre el 40 y 60%, y las temperaturas de trabajo entre 50 y 950 °C. En algunos tipos, aprovechar el calor desprendido permite lograr eficiencias de hasta 90%.

Se han propuesto infinidad de aplicaciones para estas pilas, tanto en vehículos automotores de todo tipo como en la electrificación individual de las viviendas a partir del gas natural, con la posibilidad adi-

cional de obtener agua caliente y calefacción.

Un avión diseñado para volar a unos 30 km de altura utilizaría parte de la energía recolectada por celdas solares colocadas en sus alas para obtener hidrógeno y oxígeno por electrolisis del agua durante el día. Durante la noche el proceso inverso a través de una celda de combustible podría proporcionar energía eléctrica, recobrando el agua gastada para ser utilizada al día siguiente. Este avión se podría emplear con fines científicos o de comunicaciones por un largo período de tiempo sin tomar tierra.

2.3 Electricidad sacada de las olas

Hasta el momento, los indicios apuntan en el sentido de que no surgirá una única fuente energética capaz de sustituir a los combustibles fósiles como el carbón y el petróleo o los combustibles nucleares. Por el contrario, todo parece indicar que será necesaria una combinación de fuentes diversas para poder sustituirlos paulatinamente. Adicional a las pilas de hidrógeno y la energía eólica, geotérmica y solar, la energía proveniente de las olas y las mareas promete ser otra de las posibles fuentes alternativas de energía limpia y renovable en un futuro inmediato. Su desarrollo avanza aceleradamente.

En 2003 los investigadores de la Escuela de Planeamiento, Arquitectura e Ingeniería Civil de la Queen's University en Belfast, Irlanda del Norte, comenzaron las pruebas intensivas en el laboratorio de lo que han dado en llamar el Convertidor Hidroeléctrico de Energía de la Olas. El primer equipo a escala real fue desarrollado en 2008, a partir los modelos de tamaño

reducido estudiados en el laboratorio. Poco después, el 20 de noviembre de 2009, el Primer Ministro de Escocia inauguraba oficialmente en las Islas Orcadas las pruebas de campo de una planta hidroeléctrica basada en este convertidor.

La electricidad generada en la planta será distribuida entre los habitantes de las Orcadas y otros lugares cercanos, integrándose a la red eléctrica nacional. La nueva planta es única en el mundo, tanto por su potencia como por el sistema utilizado; se estima que podrá suministrar la energía necesaria para unas 9000 viviendas.

¿Cómo funciona? La idea fundamental en la que se basa el convertidor es simple. Un gran cilindro hueco flota en la superficie del agua, unido mediante articulaciones móviles a una base que descansa anclada en el lecho marino, a unos diez metros de profundidad. Cada vez que pasa una ola, el cilindro sube y baja transmitiendo su movimiento, mediante la articulación, a unos pistones hidráulicos sujetos a la base (figura 2.3). Los pistones bombean agua a presión, que se conduce por tuberías hasta una turbina generadora en la playa cercana. A su vez, la turbina produce energía eléctrica en forma similar a como lo hace el generador de una hidroeléctrica convencional. En resumen, el vaivén de la ola se convierte en energía eléctrica, usando solamente agua como intermediario. El único gasto a tomar en cuenta es el posible deterioro por el uso de las partes mecánicas del equipo.

La Aquamarine Power Ltd, empresa que ha tomado a su cargo la comercialización de estos equipos bajo la marca Oyster®, alega que su sistema posee grandes venta-

jas sobre otros que intentan hacer algo parecido. No hay generadores o equipos electrónicos bajo el agua, tampoco correas de transmisión o engranajes y muy pocas partes móviles. Todo lo necesario para generar la electricidad se encuentra en la playa, fuera del agua, bien protegido y con fácil acceso. Tampoco hay riesgo de contaminación, pues se utiliza la propia agua del mar como fluido hidráulico; además, el equipo es muy silencioso. Colocado en un sitio favorable, este convertidor hidráulico puede generar una potencia máxima de dos megawatt ante los embates de un oleaje promedio. La Aquamarine Power Ltd. piensa que construyendo parques de estos equipos en sitios adecuados se lograrán alcanzar potencias de 100 megawatt o más.

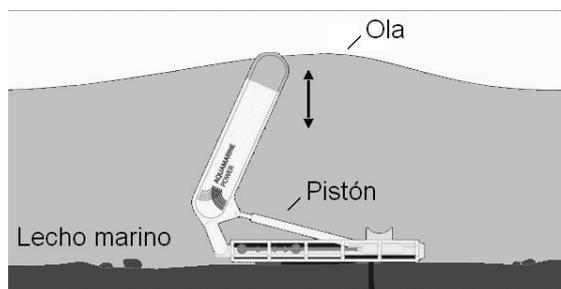


Figura 2.3
Esquema del Oyster



Figura 2.4 – *El generador Oyster*

Para encontrar los sitios adecuados donde colocar los Oyster, la compañía se ha en-

frascado en la confección de una base global de datos de recursos marinos. Su finalidad es inventariar los recursos del oleaje y las mareas en cualquier lugar del mundo para lograr predecir las posibilidades reales de aplicación de su tecnología. En particular, las aguas escocesas poseen alrededor de un diez por ciento del potencial energético total de las olas de Europa, y casi un veinticinco por ciento del potencial de las mareas. El proyecto también se muestra atractivo para los países tropicales, a pesar de la posible amenaza de los fenómenos meteorológicos de gran intensidad comunes en estas regiones. Bastaría sumergir o retirar el cilindro flotante para garantizar la protección del equipamiento ante la amenaza de uno de estos eventos.

El éxito de Oyster ha estimulado al Reino Unido a financiar una segunda etapa del proyecto, Oyster 2, que contará con casi un millón de libras esterlinas provenientes de fondos oficiales para la investigación y el desarrollo. La instalación de una nueva planta se prevé en un futuro inmediato.

2.4. Bioenergía: buscando al sucedáneo del petróleo

En la ciencia, bioenergía se refiere exclusivamente a la energía obtenida a partir de combustibles derivados de las plantas o residuos animales renovables. Es un sinónimo de biocombustibles. Existen al menos 4 revistas científicas dedicadas a este tema, entre ellas el *Journal of Biomass and Bioenergy*, de la Elsevier Pub. Co. y el *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, editada por la American Scientific Publishers.

El contenido bioenergético de los alimentos es bien conocido; cuando se expresa en kilojoule/gramo sus valores son:

Hidratos de carbono ~ 17 kJ/g

Proteínas ~ 17.5 kJ/g

Grasas ~ 39 kJ/g

El instrumento fundamental para la medición de la bioenergía es el calorímetro de bomba, que mide el calor de combustión de las sustancias (figura 2.5). La sustancia que se desea medir se coloca dentro de la bomba calorimétrica -un recipiente hermético de paredes gruesas- se inyecta oxígeno puro a una presión de 20 atmósferas y mediante un accesorio se inicia la combustión, haciendo pasar una corriente eléctrica por una resistencia. El oxígeno a alta presión garantiza la combustión total de la muestra. El incremento de temperatura asociado a la combustión se mide en forma precisa y de ahí se puede calcular el calor evolucionado durante el proceso y la energía contenida en la sustancia analizada.

Cualquier sustancia orgánica es capaz de entregar energía al reaccionar con el oxígeno del aire y combustionar. Esa es la idea fundamental detrás de la búsqueda de fuentes alternativas que sustituyan la hulla y el petróleo, pues estos combustibles liberan grandes cantidades de CO₂ en la atmósfera, causa principal del calentamiento global y las posibles afectaciones al clima en nuestro planeta.

Buscando fuentes alternativas. Desde el momento que el hombre descubrió el trueque y el comercio como medio de satisfacer sus necesidades, convirtió en prioridad el organizar de manera eficiente el transporte de personas, materias primas

y productos manufacturados. El desarrollo a lo largo de siglos hizo que las antiguas caravanas de mulas y camellos, las carretas tiradas por bueyes, las canoas y los barcos de vela, se convirtieran en los actuales portacontenedores, aviones, tre-

nes y demás vehículos automotores. Todos ellos consumen colosales cantidades de gasolina y otros derivados del petróleo, que se suman al combustible empleado en la calefacción, la industria, la agricultura y la generación de electricidad.

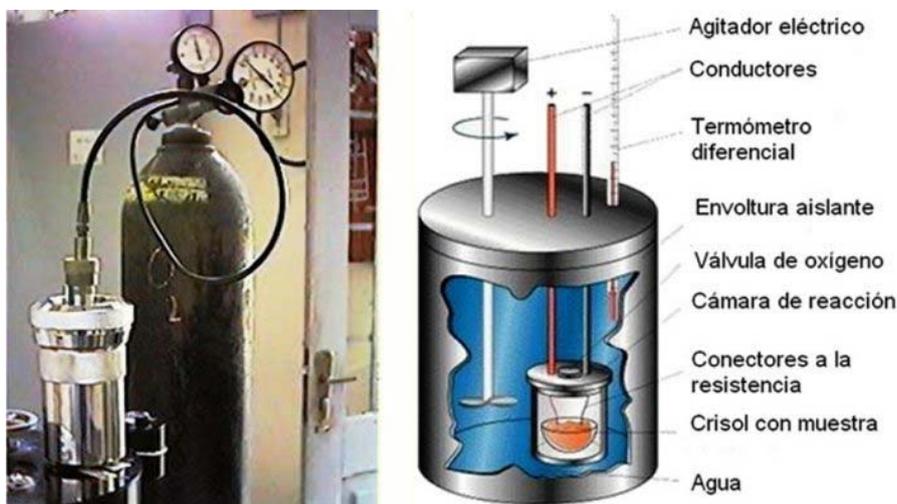


Figura 2.5 – Calorímetro de bomba

No es posible reponer el petróleo que se gasta, formado hace millones de años por plantas fósiles; es una fuente *no renovable* de energía. Por otra parte, el etanol obtenido de fuentes biológicas como el maíz o la caña de azúcar (bioetanol), es una fuente renovable que ha ido ganando popularidad en los últimos años.

Su producción se vio favorecida por muchos gobiernos en la última década, al tomarse conciencia de la necesidad de reducir las emisiones de gases contaminantes como el monóxido de carbono (CO), generado al quemar derivados del petróleo. Otro producto de la combustión, el dióxido de carbono (CO₂), es el principal gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global. Al producir y quemar bioetanol también se genera CO₂, pero durante la fotosíntesis las plantas absorben CO₂ de la atmósfera para generar

oxígeno y producir hidratos de carbono. Así, el CO₂ que genera el bioetanol se reabsorbe nuevamente en cada cosecha. Los altos precios del petróleo han servido en ocasiones de estímulo adicional.

En Latinoamérica y el Caribe la principal fuente de bioetanol es el azúcar de caña fermentada y destilada, de añeja tradición para producir licores (Figura 2.6). También se produce azúcar a partir de la remolacha, el sorgo dulce y las melazas. Biomásas alternativas son el almidón de maíz, yuca o papa, y la celulosa obtenida de la madera o residuos de cítricos. Los procesos para producir bioetanol a partir de estas fuentes son más complejos que en el azúcar y requieren más pasos. Al comparar, resulta mucho más simple y económico añadir un módulo de etanol al final del proceso en una fábrica de azúcar.

Brasil es el principal productor y exportador mundial de bioetanol de caña; en 2006 dedicaba a este fin el 1% de su tierra cultivable. Otros productores en la región son Colombia, Jamaica, El Salvador, Trinidad-Tobago y Costa Rica.



Figura 2.6

Proceso de obtención de etanol

Motores de bioetanol. Los primeros pasos para la producción de bioetanol combustible en Brasil datan de los años 70. Ya en 2003 la mayoría de los automóviles nuevos incorporaban la tecnología ‘flex’ -vehículo de combustible flexible- que permite utilizar mezclas etanol/gasolina en cualquier proporción. La mezcla se conoce como gasohol oalconafta. En 2008 existían en Brasil unos 6 millones de autos ‘flex’ y el consumo de bioetanol era tal que superó al de gasolina. En 2010 la cifra ascendió a 10 millones de vehículos ‘flex’. En la actualidad es obligatoria en Brasil la adición a la gasolina de un 20% de bioetanol, como mínimo.

El bioetanol se puede usar puro, pero lo usual es emplearlo como aditivo para incrementar el octanaje y reducir la contaminación, esto último estimulado y regulado por disposiciones legales. Los motores de gasolina convencionales no admiten altos contenidos de etanol; hay que modificarlos. Sin embargo, se argumenta que la mezcla con un 10 a 30% añadido no necesita que el motor se modifique,

aunque su desempeño y eficiencia puede tener alguna afectación.

Ventajas y desventajas. A pesar de las grandes reservas de gas y petróleo descubiertas no hace mucho en varios países, a la larga los hidrocarburos fósiles terminarán por agotarse. Otra ventaja del bioetanol es que, a diferencia del petróleo, ubicado en lugares específicos a los que no todos tienen acceso, cualquier país con suficiente terreno disponible puede producirlo. Además, cuando se compara con los recursos técnicos necesarios para extraer el petróleo, la biomasa proveniente de las plantas es muy fácil de sembrar y recolectar.

Algunos argumentan que aún no está bien definido si el balance energético es o no favorable. Es decir, se cuestiona si la cantidad de energía que genera un litro de bioetanol es mayor o no que la energía empleada para obtenerlo.

En dependencia del estudio particular realizado, algunos estimados de la energía almacenada en el bioetanol en relación a la energía consumida para producirlo oscilan entre 0.7 y 1.5. La variación se debe a que unos incluyen en el cómputo, y otros no, factores tales como el combustible empleado para roturar la tierra o la energía que consumen los trabajadores agrícolas en diversas actividades accesorias. Cuando se produce azúcar a partir de la caña, computar la energía que proporciona el bagazo usado como combustible en las calderas –como se hace en Brasil– produce un balance energético muy favorable (el valor se incrementa de 1.5 a 10, indican algunos).

El uso del bioetanol está aún sujeto a fuertes polémicas. Para unos es un recurso energético potencialmente sostenible, que puede ofrecer ventajas medioambientales y económicas a largo plazo, con la capacidad de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer los recursos y posibilidades de las futuras generaciones. Pero otros argumentan que la destilación del etanol genera residuos de vinazas tóxicas, que son fuente de contaminación del agua. Más importante aún, consideran que la producción de bioetanol es responsable de grandes deforestaciones, de la pérdida de biodiversidad y del aumento del precio de los alimentos. Al suplantar terrenos agrícolas dedicados a la alimentación por la producción de biomasa, se crearía escasez de alimentos y aparecería el hambre en grandes grupos de población.

No obstante, estos argumentos no parecen hacer mella en la producción mundial de bioetanol. En 2006 se produjeron unos 13 500 millones de litros y algunos estimados para 2011 alcanzaban la cifra de 75 000 millones, cantidad casi 6 veces mayor, con EE.UU., Brasil y China a la cabeza por amplio margen.

En enero de 2010 Brasil acondicionó una central eléctrica de 87 megawatt para trabajar indistintamente con gas natural y bioetanol, creando de esta manera la primera central en el mundo capaz de producir electricidad a partir de la combustión de bioetanol puro.

2.5 Molinos y turbinas eólicas novedosas

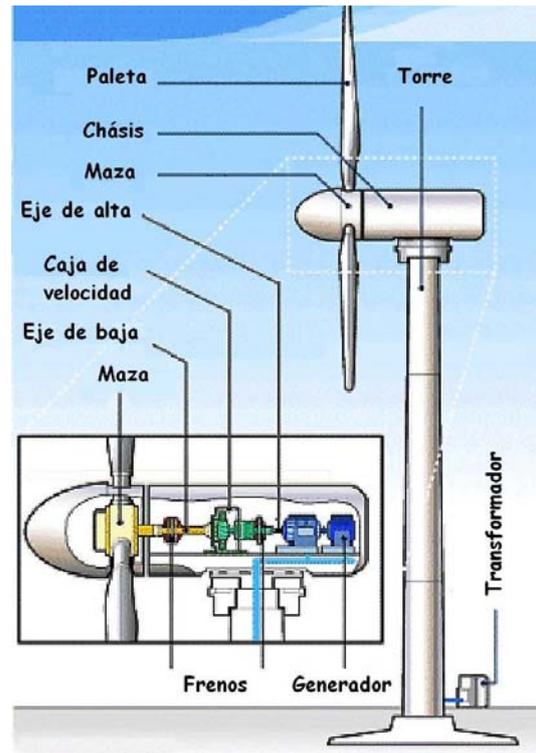


Figura 2.7 – Generador eólico

Los molinos de viento más recientes poseen diseños muy diferentes al de los convencionales. En un molino convencional como el de la figura 2.7, la disposición de las paletas alrededor de un eje horizontal es similar a la de las hélices de un avión o de un ventilador. Cuando las paletas se colocan de frente al viento, éste las golpea oblicuamente, empujándolas siempre hacia el mismo lado y dando lugar a la rotación del eje. La rotación se transmite a una caja con engranajes que regula la velocidad y de ahí a un generador que transforma la energía eólica en energía eléctrica. Esta última se puede almacenar en un acumulador o utilizarse directamente con fines diversos.

La figura 2.8 muestra un diseño de turbina eólica radicalmente diferente al anterior; la turbina tipo Darrieus. En este diseño las paletas, con un corte transversal simi-

lar al del ala de un avión, se colocan paralelamente alrededor de un eje vertical. Esta disposición da lugar a una diferencia de presión entre las caras de las paletas cuando sopla el viento, haciendo aparecer lo que se conoce en aerodinámica como *fuerza de sustentación*.



Figura 2.8 – *Generador Darrieus.*

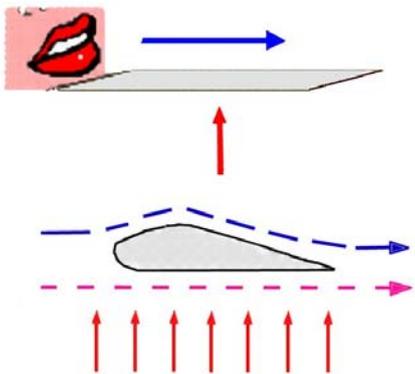


Figura 2.9 – *Sustentación dinámica.*

Es fácil comprobar la existencia de la fuerza de sustentación soplando una hoja de papel por la parte superior, sujeta sólo por el extremo más cercano a la boca (figura 2.9). La hoja tiende a elevarse al soplar en la dirección horizontal, a causa de la diferencia de velocidades del aire por

encima y por debajo. En los aviones ocurre algo similar; el diseño del ala es tal que el aire que pasa por encima debe recorrer una distancia ligeramente mayor que el que pasa por debajo en el mismo intervalo de tiempo, de aquí que el aire superior tenga mayor velocidad. La diferencia de velocidades ocasiona en el ala el mismo efecto que cuando se sopla la hoja; una fuerza ascensional. Si los ángulos que forman ejes y paletas en el molino son los adecuados, esa misma fuerza la hará girar, cualquiera sea la dirección del viento incidente.

Las turbinas Darrieus se patentaron en 1927, pero es ahora cuando han aparecido materiales ligeros y a la vez resistentes como para soportar las tensiones que se crean durante su funcionamiento. Algunos modelos poseen paletas de inclinación variable, que le permiten comenzar a girar con poco viento y ajustar el ángulo de inclinación para aprovechar al máximo la fuerza del viento cuando la velocidad de rotación se incrementa. Además, estas turbinas son capaces de soportar vientos turbulentos que serían inadecuados para un molino convencional. Un valor típico de la energía eléctrica suministrada por una turbina Darrieus comercial es de 500 watt a 24 volt.

Pero estos no son los únicos tipos de molinos y turbinas existentes. Uno diferente a los anteriores aparece en la figura 2.10, el diseño tipo barrilete, con un eje horizontal que se alinea en la dirección del viento de manera similar al molino convencional. Sin embargo, las paletas alabeadas se colocan horizontalmente. Los fabricantes aseguran que el barrilete apro-

vecha mejor la energía del viento, al generar una sobrepresión adicional por efecto Vénturi.



Figura 2.10 – Molino tipo ‘barrilete’.

El apellido Vénturi es bien conocido por los estudiantes de los cursos de dinámica de los fluidos; se refiere al físico italiano Giovanni Battista Vénturi (1746-1822), descubridor del efecto que lleva su nombre, y consiste en lo siguiente. Cualquier estrechamiento en una tubería ocasiona el aumento de la velocidad del fluido en ese punto y una correspondiente disminución de la presión. Si al estrechamiento se le acopla un conducto desde un recipiente que contenga otro fluido (que puede ser aire) éste será aspirado hacia la tubería. Muchos nebulizadores para rociar insecticidas o fungicidas funcionan sobre la base de este principio. Al pasar por un estrechamiento, el aire a gran velocidad aspira el fluido y lo dispersa en forma de gotas microscópicas.

Los carburadores forman la mezcla detonante aire/combustible gracias a este efecto, y el tubo de Vénturi es una tubería con un estrechamiento que permite medir la velocidad del líquido a partir de la diferencia de presión entre el tramo ancho y el estrecho. El diseño del barrilete es tal que durante su funcionamiento se origina

un descenso de la presión en su interior. La consiguiente succión del aire crea una ayuda adicional para hacer girar las paletas. Los diseñadores alegan que es muy silencioso y que se necesita muy poco viento para que se ponga en marcha, lo que hace que sus paradas sean escasas. Si la velocidad del viento baja a sólo 2 metros por segundo el barrilete seguirá funcionando; una turbina convencional necesita por lo menos el doble de esa velocidad para mantener el giro. Según una investigación llevada a cabo en la Universidad Técnica de Delft, Holanda, las turbinas basadas en el efecto Vénturi aprovechan mejor la velocidad del viento y son 40% más eficientes que las turbinas convencionales del mismo diámetro.

Actualmente estas turbinas se comercializan en tamaños de 1 y 2 metros de diámetro, con el fin de que puedan ser instaladas fácilmente en un mástil o en el tejado de una vivienda urbana. En lugares donde el viento sopla relativamente fuerte (unos 7 metros por segundo) el barrilete de 1 metro de diámetro genera más de 500 kilowatt-hora (kwh) en un año. La cifra sube hasta 1750 kwh en la turbina de 2 metros. Esa energía es un buen complemento para el hogar, ya que una vivienda convencional gasta en promedio unos 10 000 kwh al año. Tal cantidad de energía podría ser suficiente para garantizar la iluminación de la vivienda si sólo se utilizan lámparas fluorescentes compactas de alta eficiencia. Sin embargo, hay dos condiciones a cumplir para poder instalar un barrilete que limitan su aplicación; debe estar situado por lo menos a 12 metros sobre el suelo (la altura de un edificio de 3 pisos aproximadamente) y lejos de árboles o

edificios que bloqueen el paso del viento.



Figura 2.11 - Climate-Well 10, Lansolar

2.6 Enfriando con el calor solar

En la actualidad existen sistemas novedosos de climatización que usan como principal fuente energética la energía térmica solar (figura 2.11). Y si algo tenemos de sobra en los trópicos es sol y calor, de ahí que tales sistemas sean, en principio, muy promisorios para los países tropicales. Pero antes de describir brevemente el funcionamiento de estos sistemas, resulta conveniente revisar algunas ideas básicas sobre la refrigeración.

Cuando una sustancia en fase líquida pasa a fase vapor, absorbe el calor de vaporización; al condensarse, desprende el calor de condensación en igual cantidad. En el caso del agua, este calor tiene un valor de 560 calorías/gramo (figura 2.12). Ambos procesos ocurren esencialmente a la misma temperatura, que se mantiene constante durante el proceso.

Al calentarla mediante un régimen estable, el agua absorbe calor y eleva su temperatura (tramo azul en la figura). Sin embargo, al llegar a los 100 °C el incremento se detiene y el calor absorbido no se emplea en seguir elevando la temperatura,

sino en disgregar las moléculas del líquido para que pasen a fase vapor. Si el vapor se recoge y posteriormente se enfría, volverá a licuarse al llegar a los 100 °C, desprendiendo la misma cantidad de calor que fue absorbido anteriormente (calor de condensación).

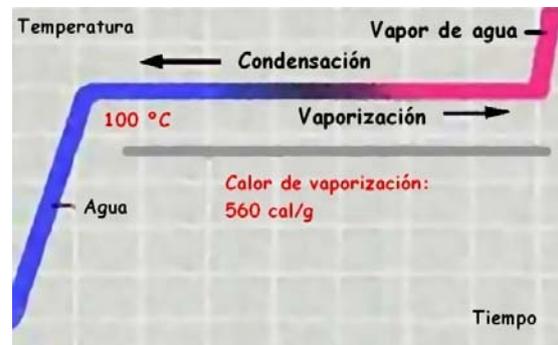


Figura 2.12

Vaporización y condensación del agua

Si durante el paso de líquido a vapor la presión en el sistema disminuye, se favorece el paso a la fase vapor, ya que las moléculas se pueden disgregar más fácilmente. Si la presión aumenta ocurre lo contrario; se favorece el paso a la fase líquida. Esta propiedad de las sustancias de absorber o emitir calor durante las transiciones de fase es la que se utiliza en la mayoría de los sistemas de enfriamiento para extraer calor de algún recinto cerrado.

El refrigerador convencional. La figura 2.13 muestra el ciclo recorrido por un refrigerador convencional. El sistema está formado por tuberías, un compresor B y una válvula de expansión C. Los tubos se llenan parcialmente con alguna sustancia cuya temperatura de vaporización sea adecuada. El compresor, movido por electricidad, mantiene una diferencia de presión constante entre el evaporador (arriba) y el condensador (abajo), extrayendo vapor de la región de baja presión en A e inyectándolo en la de alta presión en D.

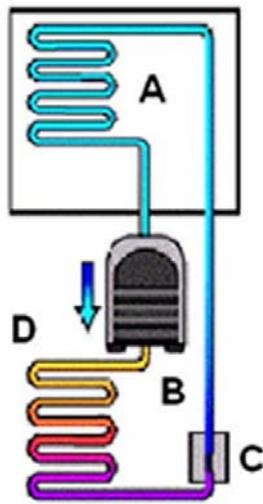


Figura 2.13 – Refrigerador convencional

En la transición sólido-líquido a 0 °C (hielo-agua) ocurre algo similar; en este caso tendremos los calores de fusión y solidificación, según la transición avance en uno u otro sentido.

El evaporador se coloca dentro del lugar que se desea enfriar (por ejemplo, el congelador) y el condensador se ubica en el exterior. La válvula de expansión, un pequeño agujero o estrangulación que limita el paso del líquido, contribuye a regular la diferencia de presión entre ambas regiones.

En el condensador el incremento de la presión causa la condensación forzada del líquido, con el correspondiente desprendimiento del calor de condensación, que es enviado al medio ambiente mediante un serpentín intercambiador. Por otra parte, en el evaporador, el líquido a baja presión es forzado a evaporarse, absorbiendo el calor de los alrededores. Esta extracción de calor es la que causa la disminución deseada de la temperatura y el consiguiente enfriamiento. En un equipo de aire acondicionado el condensador se ubica en el exterior del edificio y, dentro de la habitación, al evaporador se le añade un ventilador para hacer circular el aire.

Desde luego, es esencial la selección de la sustancia de trabajo para lograr que la condensación y la vaporización tengan lugar en el intervalo adecuado de temperaturas. Durante muchos años, los compuestos de clorofluorocarbono (CFC) fueron los más utilizados para estos fines. Actualmente se han ido sustituyendo por otros menos agresivos, pues al pasar al medio ambiente los CFC contribuyen de manera importante a la destrucción de la capa de ozono, sin la cual la vida en la tierra no podría existir.

El refrigerador solar. Este refrigerador es similar al convencional, pero emplea celdas solares para energizar el compresor. El proyecto Solarchill, promovido por un conjunto de instituciones internacionales, dio origen a un modelo de refrigerador solar capaz de funcionar sin baterías en los períodos de sombra. Mantiene el frío almacenando hielo en una serie de compartimentos en su parte más alta.

Cuando no hay sol y la celda solar no fun-

ciona, el aire frío y denso dentro del refrigerador desciende por gravedad hacia el compartimiento de almacenaje, manteniéndolo fresco. Al activarse la celda y el compresor, la circulación del aire se refuerza mediante unos ventiladores que contribuyen a distribuir el frío y crear hielo; un termostato ayuda a mantener la temperatura en los niveles deseados. Uno de los modelos, diseñado específicamente para almacenar vacunas, durante el ciclo de alta insolación mantiene la temperatura entre los 0 °C y 8 °C. Cuando hay baja insolación las temperaturas permanecen por debajo de los 15 °C hasta 5 días seguidos. Estos niveles térmicos permiten la adecuada conservación de las vacunas.

Calentar para enfriar: el refrigerador de absorción. La idea de enfriar con el calor no es nueva. La primera patente de un refrigerador de absorción, que trabaja sólo con la energía proveniente de una llama, data de 1922. Los más usuales emplean como sustancia de trabajo una mezcla de amoníaco, hidrógeno y agua; los de nueva generación utilizan bromuro de litio. El sistema no tiene partes móviles y quema kerosén o gas para funcionar. La presión total dentro del sistema de enfriamiento es aproximadamente constante; sin embargo, la presión parcial de los vapores de amoníaco puede variar de una región a otra del sistema, al disolverse una mayor o menor fracción en el agua. La función del amoníaco es absorber y entregar calor. La del agua, circular para mantener una baja presión de vapor de amoníaco en el evaporador y una alta presión en el condensador, mientras que el hidrógeno a presión evita la descomposición del amo-

niaco con el calor, de acuerdo a la reacción de equilibrio (puede ocurrir en ambos sentidos):



$$\Delta H^\circ = 91.8 \text{ kJ.}$$

El esquema simplificado de un sistema de este tipo se muestra en la figura 2.14. El proceso ocurre de forma continua, y el ciclo recorrido por cada porción de la disolución es aproximadamente el siguiente

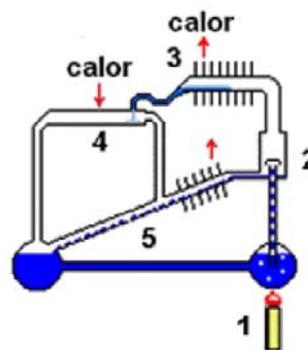


Figura 2.14 - Refrigerador de absorción

El calor de una llama alimentada por keroseno o gas se aplica directamente al agua con amoníaco disuelto en el generador (1) y el amoníaco es expulsado, arrastrando algo de agua hasta el separador (2). Allí el agua se separa del amoníaco por gravedad y se enfría, mientras que los vapores de amoníaco a alta presión viajan al condensador (3), donde pasan a fase líquida entregando calor al medio ambiente. El amoníaco licuado se dirige por un estrechamiento al evaporador (4) a menor presión y se evapora, absorbiendo calor y causando en enfriamiento de los alrededores. En el recombinador (5) los vapores de amoníaco generados en (4) se reabsorben en el agua ya enfriada proveniente de (2), manteniendo así la necesaria baja presión en (4). Finalmente, la

disolución que se forma regresa al generador (1) para comenzar un nuevo ciclo de enfriamiento.

Climatizando con el calor solar. El sistema introducido recientemente por la compañía hispano-sueca Climate-Well emplea directamente la energía térmica solar para enfriar, utilizando como sustancia de trabajo una disolución de cloruro de litio (LiCl) (figura 2.10). Como característica novedosa, adicional al cambio de estado líquido-vapor usado comúnmente para enfriar, emplea el cambio de estado sólido-líquido para almacenar energía.

El calor necesario para hacer funcionar el dispositivo se puede obtener de cualquier otra fuente térmica, no sólo del panel solar. El sistema emplea una fracción pequeña de la energía eléctrica consumida por los modelos convencionales equivalentes –sólo la usa para mover un ventilador– pues el ciclo de refrigeración no necesita compresor.

Según los fabricantes, el sistema está diseñado para aportar una solución sostenible para la climatización de todo tipo de inmuebles, pero su gran peso y tamaño (70x70x185 cm y peso de 740 kg) sugieren más bien un empleo en áreas amplias y de fácil acceso, tales como edificios comunitarios y oficinas.

También se puede utilizar como apoyo para reducir el consumo energético en centros comerciales, hospitales y similares. Entre los beneficios reportados se enumeran el ahorro de hasta 85% del consumo energético y una reducción anual en las emisiones de CO₂ que puede llegar a 15 toneladas por vivienda a causa de la reducción en la quema de combustibles,

pues el sistema se puede usar tanto para enfriar como para calentar cuando hay frío.

2.7 Celdas solares eficientes, flexibles... y baratas

La eficiencia de una celda solar se define como la fracción de energía luminosa incidente que realmente se convierte en energía eléctrica. A mayor eficiencia, menor área de celda necesaria para producir la misma energía, por lo que una de las metas principales de los fabricantes de celdas solares es mejorar su eficiencia. A igualdad de eficiencia pueden primar otros criterios como el costo de los materiales, la resistencia y durabilidad de la celda o la simplicidad del proceso tecnológico empleado para producirla.

Las celdas solares de primera generación se introdujeron comercialmente a principios de los años 80. Construidas a partir de obleas o tabletas finas de silicio semiconductor, aún se usan intensivamente en la actualidad. El silicio no absorbe la luz con mucha eficiencia, por lo que el grosor de las obleas no se puede reducir más allá de cierto valor. Además son frágiles, lo que complica el proceso productivo desde los mismos inicios hasta la instalación final del panel solar.

La segunda generación de celdas solares comenzó a producirse a finales de los años 90 con la introducción de la tecnología de láminas delgadas. Las celdas se construyen apilando capas muy finas de diferentes materiales semiconductores, por lo que el gasto de materia prima es mucho menor. A pesar de que su grosor es unas 100 veces más pequeño que las de silicio, poseen una eficiencia similar. Sin

embargo, presentan varios inconvenientes:

a) las capas semiconductoras se depositan mediante un proceso a alto vacío que resulta caro y complicado;

b) se colocan sobre un sustrato de vidrio, que requiere de procesos adicionales para establecer los necesarios contactos eléctricos (figura 2.15).

c) son frágiles.

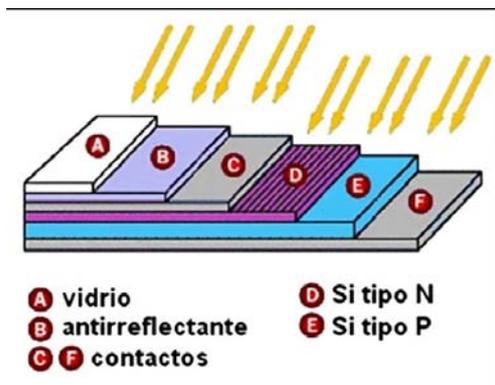


Figura 2.15
Diferentes capas en una celda solar.



Figura 2.16
La celda solar flexible

La actual tercera generación de celdas solares, también construidas a base de láminas delgadas, obvia las dificultades anteriores de la siguiente forma. Las capas de

material semiconductor se depositan directamente sobre metal, eliminando así los pasos adicionales para colocar los contactos. Además, el procedimiento elimina la fragilidad del dispositivo, proporcionando celdas solares con un alto grado de flexibilidad, lo que resulta altamente ventajoso desde el punto de vista de su manipulación mecánica.

En un proceso offset convencional las imágenes entintadas van ubicadas en la placa madre, se trasladan a un cilindro de goma (offset) y de ahí al papel. El procedimiento se basa en que la tinta aceitosa, inmisible con el agua, se pega sólo a las imágenes, mientras que el agua mantiene limpio el resto del cilindro.

La generación de energía de las nuevas celdas es comparable a las precedentes, e incluso superior. Una de las compañías que producen este tipo de celdas (accesible en www.nanosolar.com) alega que sus paneles son capaces de generar hasta 5 veces más corriente que cualquier otro panel en el mercado en condiciones similares.

La electricidad proveniente de paneles convencionales cuesta unos 3 USD por watt. El estimado óptimo de los paneles construidos con la nueva tecnología es de sólo 0.30 USD por watt, lo que haría la energía solar muy competitiva con el carbón y otros combustibles contaminantes.

¿Cómo funciona una celda solar convencional? Su funcionamiento se basa en la diferencia de potencial que surge en una juntura PN. En una celda convencional de silicio, tal juntura se construye poniendo en contacto íntimo silicio cristalino de alta pureza ‘dopado’ o contaminado con impurezas de diferente tipo

(frontera de las regiones + y – en la figura 2.18). En un caso las impurezas proporcionan un exceso de electrones en relación al material sin impurezas (silicio tipo N). En el otro, ocasionan un defecto de electrones (o la aparición de ‘huecos’) formando el silicio tipo P. Cuando se forma un contacto íntimo a nivel atómico entre ambos tipos de silicio, cierto número de los electrones en exceso migran hacia la región de ‘huecos’, formando pares electrón-hueco y dando origen a una ‘barrera’ de potencial interna que impide cualquier posible migración posterior.

Un haz de luz incidente sobre la juntura es capaz de separar los pares electrón-hueco y forzar los electrones a saltar la barrera de potencial, creando una fuerza electromotriz (FEM) en los contactos externos de la celda. Si los contactos se conectan a un circuito externo cualquiera (por ejemplo, que contenga una resistencia) la FEM se comportará igual a la de una batería convencional y aparece una corriente

eléctrica, contraria al movimiento de los electrones en la figura 2.18. La corriente se mantendrá todo el tiempo que la juntura esté iluminada, tomando energía de los fotones luminosos.

Hay elementos adicionales que se deben tomar en cuenta para garantizar el funcionamiento de la celda. El silicio es un material muy reflectante, y gran parte de la luz incidente se refleja en su superficie sin que se pueda aprovechar para generar corriente. Para evitar esto se utilizan capas antirreflectantes, que logran reducir las pérdidas luminosas a menos de 5%.

Las celdas se conectan en arreglos en serie y paralelo (usualmente de 36 celdas cada uno) para alcanzar niveles adecuados de voltaje y corriente. Finalmente, se colocan en un panel rígido con electrodos adecuados para ser conectados al circuito externo. Una cubierta de vidrio protege todo el dispositivo de la acción del medio ambiente.

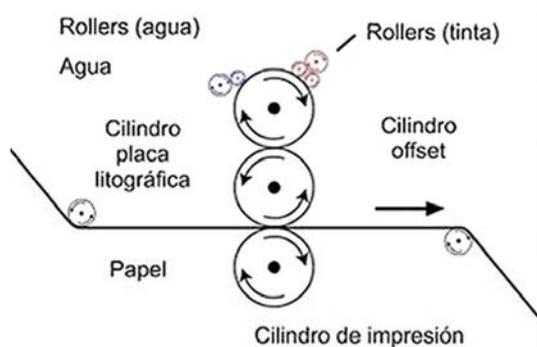


Figura 2.17

Sistema offset convencional (izquierda) y papel de aluminio para celdas solares (derecha) de producción industrial.

Características de las celdas flexibles.

Las capas absorbentes en una celda solar de silicio tienen un espesor de 0.35 milímetros; el espesor de una celda construida

a partir de láminas delgadas es de sólo 0.001 milímetros (1 micrómetro). Tal espesor es posible porque los materiales utilizados absorben la radiación solar con

mucha mayor eficiencia que el silicio cristalino.

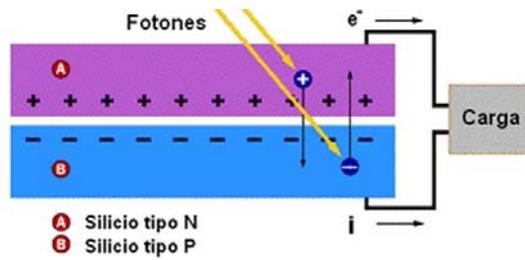


Figura 2.18
Esquema de una juntura PN

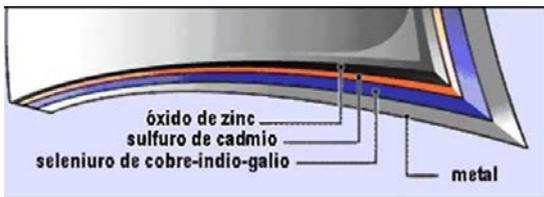


Figura 2.19
Componentes de una celda solar

Hay tres tipos diferentes de celdas a láminas delgadas según sea el material empleado en su construcción por los fabricantes: silicio amorfo (a-Si), cadmio-telurio (CdTe) y seleniuro de cobre-indio-galio (CuInGaSe). Todas se caracterizan por ser muy flexibles, pues cuando el espesor es muy pequeño tanto el metal como el vidrio poseen gran flexibilidad.

La figura 2.19 muestra el tipo de celda fabricada por la compañía Nanosolar inc., con tecnología basada en tinta de nanopartículas para depositar las diferentes capas semiconductoras sobre una lámina metálica fina. La capa adicional de óxido de zinc hace el papel de un electrodo; además, es transparente y no es reflectiva, permitiendo que la luz pase fácilmente. El otro electrodo lo constituye el sustrato metálico. Los diferentes tipos de silicio P y N son aquí sustituidos por el seleniuro y el sulfuro de cadmio.

Las celdas como la de la figura 2.19 alcanzan un 20 por ciento de eficiencia,

comparable al de las celdas de silicio, de eficiencia entre 15 y 25%. Poseen la enorme ventaja de construirse de forma mucho más sencilla que las anteriores. La tecnología desarrollada por Nanosolar. Inc. consta de los siguientes pasos fundamentales.

1. Papel de aluminio se hace pasar por grandes imprentas rotativas, similares a las utilizadas para imprimir periódicos (figura 2.17).
2. Una impresora de tinta, operando al aire, deposita una delgada capa de tinta del compuesto semiconductor CuInGaSe en el sustrato de aluminio.
3. Otras impresoras depositan las capas de óxido de zinc y sulfuro de cadmio. Después de cada proceso es necesario aplicar uno o más tratamientos térmicos para fijar las tintas y formar la juntura.
4. Finalmente, la lámina resultante se corta en el tamaño adecuado y se ensambla en circuitos, incluyendo algún proceso adicional de encapsulado en un polímero impermeable para proteger la celda.

Los fabricantes aseguran que las rotativas son cómodas de usar, de fácil mantenimiento y que se pierde muy poca materia prima durante el proceso productivo.

Las celdas solares flexibles obtenidas a partir de la impresión en rotativas son ya una realidad. En Saxony, Alemania, se construyó recientemente una planta solar eléctrica de 40 megawatt sobre la base de celdas de cadmio-telurio. Además de ser ecológicas, las plantas solares de nueva tecnología son competitivas con las de otros tipos de combustible y se pueden construir en lugares que no apropiados

para plantas eléctricas del tipo convencional. Con estos resultados no resulta difícil imaginar un futuro donde las azoteas y fachadas de los edificios estarán tapizadas con celdas solares flexibles, y que los arquitectos las emplearán cotidianamente como parte del diseño de obras de todo tipo.

2.8 Construyendo un sol en miniatura

Gracias a los procesos nucleares que tienen lugar en su interior, el Sol genera energía continuamente, emitiendo radiación electromagnética que proporciona luz y calor, más gran cantidad de diversas partículas subatómicas, el llamado ‘viento solar’. La pequeña parte de esa energía que llega hasta nosotros ha hecho posible la vida en nuestro planeta durante millones de años, pues la casi totalidad de la energía utilizada por los seres vivos proviene del Sol.

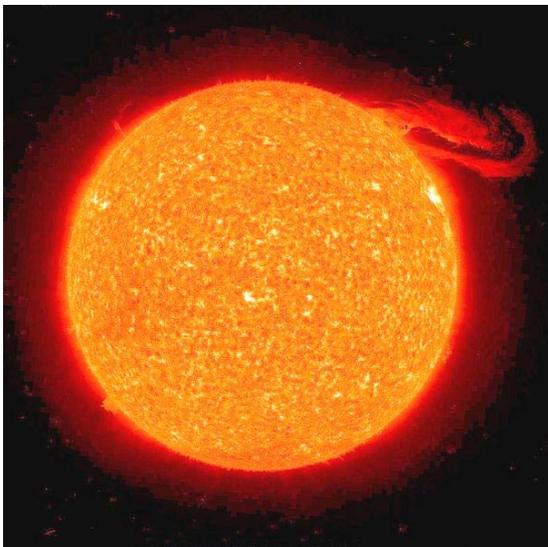


Figura 2.20
El sol y su corona

Las plantas absorben energía solar directamente en forma de radiación para realizar la fotosíntesis y desarrollarse; los herbívoros absorben esa energía indirecta-

mente nutriéndose de las plantas y los carnívoros recolectan una fracción cuando se alimentan de los herbívoros. Además, los combustibles fósiles como el petróleo y la hulla almacenan la energía solar capturada hace millones de años mediante la fotosíntesis. Por su parte, las hidroeléctricas aprovechan la energía potencial gravitatoria del agua que se condensó y precipitó desde las alturas creando ríos y embalses, tras evaporarse de mares y océanos por el calor solar. No obstante, el uso directo de la radiación solar para obtener energía aún no está muy extendido, principalmente porque los medios diseñados hasta el momento para aprovecharla no son muy eficaces.

¿Cómo se genera la energía solar? En lo esencial, el Sol ‘quema’ Hidrogeno (${}_1\text{H}^1$) pero no de la forma usual por combinación con el oxígeno, sino fusionando sus núcleos para formar núcleos de Helio (${}_2\text{He}^4$), también conocidos como partículas alfa (figura 2.21).

Esta típica reacción nuclear de fusión es el resultado de un ciclo complejo donde además intervienen núcleos de Deuterio (${}_1\text{H}^2$) y Tritio (${}_1\text{H}^3$), que no son más que isótopos pesados del Hidrógeno con uno y dos neutrones adicionales en el núcleo. Los isótopos poseen la misma cantidad de protones y electrones que el átomo original, y también sus mismas propiedades químicas.

Dos núcleos de Hidrógeno se unen a formar uno de Deuterio, que después reacciona con otro de Hidrógeno a formar Tritio; finalmente estos dos se unen para formar el Helio. Como resultado colateral se obtiene varias partículas elementales y se desprende energía en grandes cantidades.

Se ha calculado que el Sol produce en un segundo 760 000 veces el equivalente de la producción energética anual a nivel mundial. El proceso es muy eficiente: un pequeño volumen de Hidrógeno produce una gran cantidad de energía. No hay que preocuparse; la edad del Sol es de unos cinco mil millones de años y el combustible nuclear que aún posee durará al menos otro tanto.

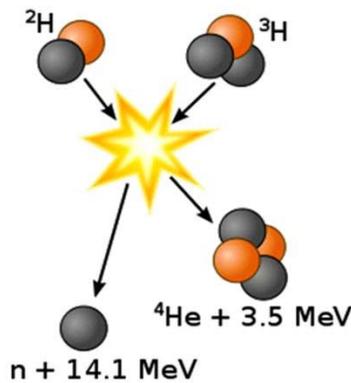


Figura 2.21

Deuterio y Tritio, fusionándose a formar un núcleo de Helio y un neutrón, más 14.1 megaelectronvolt de energía en forma de radiación electromagnética.

Además de la reacción anterior, existen otras donde intervienen núcleos de carbono y nitrógeno, llegando al mismo resultado final. No obstante, se sabe que un 75% de la energía solar es generada de la forma descrita más arriba.

El sol artificial. No son los millones de años que más o menos ha de durar el Sol lo que preocupa a la mayoría de científicos y tecnólogos dedicados a estudiar las reacciones nucleares; les interesa conocer hasta que punto será posible obtener en la Tierra una fuente de energía que funcione ‘quemando’ hidrógeno de forma eficiente, tal como ocurre en el Sol. El calor generado se emplearía en obtener electricidad

a bajo costo de una manera más limpia que los combustibles fósiles o la energía nuclear convencional, sin producir gases de efecto invernadero ni radiactividad. Esa energía provendría de fuentes prácticamente inagotables, pues se puede obtener hidrógeno por electrólisis a partir del agua de los océanos, empleando para ello parte de la propia energía generada por la reacción nuclear.

Sin embargo, hay una dificultad esencial para construir un sol artificial en la Tierra, y es la siguiente. Para que la reacción de fusión tenga lugar, es imprescindible que los núcleos se acerquen a una distancia muy pequeña, a lo que se opone el hecho de que los protones poseen igual carga (+) y, por tanto, se repelen, tanto más fuerte cuanto más cerca se encuentran. Una forma de conseguir que los protones se fusionen es elevar la temperatura. De esa manera se incrementa la velocidad de las partículas y, eventualmente, se producirán choques con suficiente energía como para iniciar la reacción. Una vez iniciada, será necesario controlarla y confinarla en un recinto adecuado para lograr que la energía liberada mantenga alta la temperatura del hidrógeno reaccionante. Sólo así el proceso podrá autosostenerse al introducir hidrógeno continuamente y generar energía adicional aprovechable.

Hasta el momento se han intentado diferentes procedimientos, pero ninguno ha dado resultado. La energía liberada es tan grande y el sistema se vuelve tan inestable que no se logra mantener la reacción más allá de fracciones de segundo.

Investigaciones contemporáneas. En abril de 2009 se inauguró en el Centro Nacional de Ignición (CNI) del Laboratorio

Nacional Lawrence Livermore, en California, el láser más grande y de más alta energía creado hasta el momento. Está compuesto por 192 láseres gigantes cuyos haces convergen en una cámara de reacción de 10 metros de diámetro. La instalación resume la experiencia acumulada durante más de 60 años de investigaciones sobre la fusión controlada. Las primeras pruebas a baja energía resultaron satisfactorias, y está planificado ir incrementando paulatinamente la potencia entregada. El nuevo láser ya ha generado 20 veces más energía que cualquier otro sistema anterior. Cuando todos los láseres se disparan a plena potencia emitirán 1.8 megajoule de radiación ultravioleta sobre un blanco de medio centímetro de diámetro con una pulsación láser de 20 nanosegundos, generando 500 billones de watt de potencia máxima, más que el pico mayor de producción eléctrica en todos los Estados Unidos en la actualidad. Esta energía es más que suficiente para fusionar el deuterio y el tritio en núcleos de helio y producir mucha más energía en el proceso que la usada para iniciar la reacción.

2.9 Redes eléctricas inteligentes

Recientemente se creó una nueva revista internacional científico-tecnológica: la 'Smart Grid and Renewable Energy' (Redes Inteligentes y Energía Renovable), accesible en Internet de forma gratuita para estudiantes, profesores e investigadores en todo el mundo. Esta publicación es una de las respuestas surgidas al impulso que diversos gobiernos han brindado a las investigaciones sobre el mejor aprovechamiento de la energía eléctrica en los últi-

mos años. Una breve revisión de los artículos publicados sobre el tema en diversas revistas especializadas desde principios de 2008 hasta finales de 2010 arroja una cifra del orden de diez mil. En su mayoría, se dedican a la discusión y divulgación de aspectos administrativos, comerciales, económicos y medioambientales relacionados con las redes.

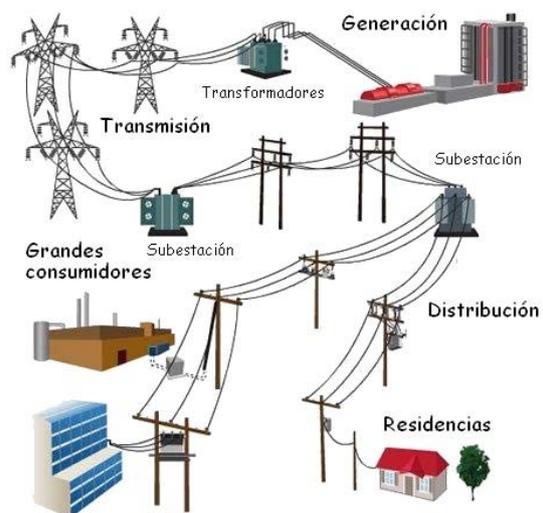


Figura 2.22 – Red de distribución

La implantación de las redes inteligentes presupone una serie de ventajas sobre las convencionales, tales como:

- Incluyen la participación activa del cliente en la regulación del consumo individual.
- Incorporan todas las posibles opciones de generación y almacenamiento de energías como la eólica y solar.
- Optimizan la eficiencia y el uso ventajoso de la energía.
- Previenen las posibles perturbaciones en la red, facilitando un mayor control y restauración de los problemas.
- Operan en un régimen de alta recuperación frente a daños físicos, cibernéticos y desastres naturales.

- Posibilitan la fácil introducción de nuevos productos o servicios y, finalmente,
- Serán capaces de proveer energía eléctrica adaptada a necesidades específicas, con diversa calidad y precio.

¿Cómo se verá afectado el consumidor?

La idea general es implementar medidas que funcionen tanto a nivel del consumidor como de los sistemas de distribución (figura 2.23). Para el consumidor, una de las principales medidas propuestas es la implantación de metros contadores ‘inteligentes’.

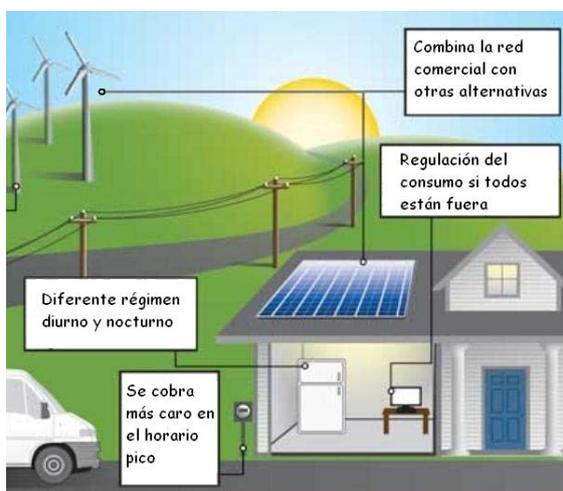


Figura 2.23

Ventajas para el consumidor

Estos metros reciben señales de la planta eléctrica para incrementar automáticamente la factura en el horario pico y reducirla fuera de él; así se tiende a limitar el consumo en los momentos que resulta más problemático para la red. Una variante simplificada consiste en incluir un reloj dentro del metro contador, de manera que se registre una mayor factura en las horas pico. Este sistema es más gravoso para el consumidor, pues la demanda no tiene que ser la misma en los días festivos que en los laborables; no obstante, en algunos lugares ya se utiliza desde

hace años.

Otra medida propuesta es la de facilitar a cada cliente información continua sobre su consumo en alguna pantalla o display, y no solo una vez al mes como ocurre hoy día, cuando llega el recibo de cobro del servicio. Se supone que si el consumidor está al tanto de sus gastos podrá tomar medidas oportunas sin tener que esperar a fin de mes.

Una tercera medida es la adición de circuitos simples a la red interna de la vivienda o empresa para controlar el gasto de equipos de alto consumo (aires acondicionados, bombas de agua en piscinas, sistemas de calefacción y refrigeración). Así se podría posponer para horarios fuera del pico eléctrico el lavado de la ropa o la vajilla, y se haría posible la desconexión de determinados equipos cuando sea oportuno, sin causar daños ni serios inconvenientes al consumidor. Actualmente existen versiones industriales que regulan el bombeo de piscinas, calentadores y sistemas de climatización, controlados directamente desde alguna subestación eléctrica.

Finalmente, una medida adicional es la automatización de la lectura de los metros contadores, sin necesidad de que un inspector visite la vivienda mensualmente. Se puede hacer de diversas formas: una es a través de la propia línea eléctrica, enviando una señal hasta el metro contador que ‘rebota’ con la información deseada hasta la subestación o el transformador y de ahí a la planta eléctrica. Otra forma es mediante una señal local de radio, y otra más utilizando algún vehículo que recorra el vecindario y vaya

‘interrogando’ por radio cada metro contador de forma individual.

Ya existen redes comerciales que emplean alguno de estos sistemas que, aunque tienden a eliminar puestos de trabajo, resultan económicamente ventajosos para el proveedor.

¿Cómo cambiarán los sistemas de distribución? El concepto de red inteligente también se aplica a las redes de distribución, que serán capaces de integrar por sí mismas, en el momento oportuno, la energía proveniente de fuentes alternativas como la eólica o solar.

Algunos opinan que su implantación contribuirá indirectamente a reducir la contaminación ambiental de la siguiente manera. Supongamos que en una estación de molinos de viento la velocidad de la brisa decae a niveles muy bajos, o que sobre una gran instalación de celdas solares aparecen nubes de tormenta, bloqueando la luz. Los sistemas actuales detectarían la caída de potencia, e incrementarían la energía entregada desde otras fuentes de inicio rápido como, por ejemplo, una termoeléctrica de gas natural. Esta última genera CO₂ y contribuye al calentamiento global.

Una red inteligente actuaría en forma diferente. Trataría de reducir la demanda de inmediato, enviando una señal a los metros contadores de consumidores comprometidos de antemano. Esos consumidores, a cambio de una reducción de las tarifas, permitirían que la red desconecte algunos de sus equipos para regular el consumo durante la caída de potencia. En

cuestión de segundos, equipos comerciales de climatización pasarían automáticamente a un régimen de menor consumo, variando la temperatura sólo unos pocos grados, o los sistemas de calefacción se desconectarían unos pocos minutos. Si la interrupción no es muy prolongada, no habría necesidad de incrementar el consumo de gas natural y la correspondiente emisión de CO₂ para mantener el servicio.

Una ventaja adicional es que el continuo monitoreo y la automatización de los sistemas permitirá reducir las interrupciones. Los problemas se podrán detectar y resolver antes que lleguen a ser críticos, minimizando los daños y el perjuicio causado a la red y los consumidores.

2.10 La energía hidráulica

Ni la energía eólica, ni la solar, ni la de las olas o las mareas, ni la energía geotérmica, ni los biocombustibles. La primera fuente renovable de energía limpia que se logró utilizar de forma controlada y a gran escala fue la energía hidráulica. Este término abarca tanto la energía cinética del agua de los ríos caudalosos como su energía potencial al ser embalsada a grandes alturas. Cuando esa agua se traslada por un conducto adecuado y cae atraída por la fuerza de gravedad, tiene lugar la conocida transformación de energía potencial gravitatoria en cinética. La energía cinética así obtenida se puede utilizar para mover una rueda y alimentar algún dispositivo mecánico, o para hacer girar una turbina acoplada a un generador eléctrico (figura 2.24).

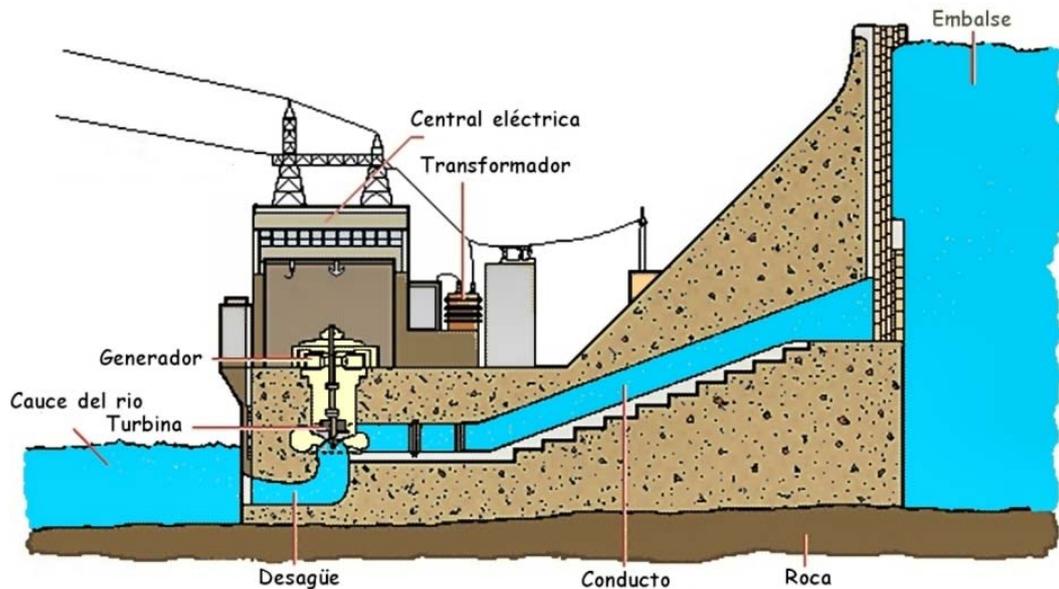


Figura 2.24 - Esquema de una hidroeléctrica moderna

Desde luego, si no fuera por el sol, que evapora el agua que ya pasó por la turbina y permite que de nuevo se almacene a gran altura, el proceso no sería renovable. Así que, en realidad, la conversión no es sólo de energía potencial a cinética; es la energía de la radiación solar la que hace que el agua se evapore y forme nubes para caer más adelante en forma de nieve, lluvia o granizo. Cuando esa agua queda atrapada a gran altura, parte de la energía entregada por el sol queda allí almacenada como energía potencial gravitatoria. De aquí que el ciclo completo renovable comprende los siguientes intercambios energéticos principales: 1. Radiación solar que calienta el agua y causa su evaporación (transformación de la energía de la radiación en energía cinética del vapor de agua); 2. Condensación en la troposfera y precipitación en forma de lluvia, nieve o granizo a formar embalses (conversión a energía potencial gravitatoria con pérdida de parte de la energía original en forma de calor durante la licuación o solidifica-

ción); 3. Transformación de energía potencial gravitatoria en cinética cuando el agua se deja caer libremente; 4. Conversión de la energía cinética en movimiento mecánico y de ahí en energía eléctrica; 5. Re-evaporación del agua por la radiación solar para comenzar nuevamente el ciclo.

Hay un intercambio energético adicional, rara vez tomado en cuenta por ser poco significativo. Es el causado por el empuje ascendente que recibe el vapor de agua proveniente de la atmósfera que lo rodea (empuje de Arquímedes). Al ser el aire más denso que el vapor, es atraído con mayor fuerza por la gravedad; al descender, el aire desplaza el vapor hacia arriba, con la consiguiente variación de alturas e intercambio de energía potencial. Otros intercambios tienen que ver con las pérdidas de energía a causa de la siempre presente viscosidad del líquido.

La finalidad de las presas es la de almacenar grandes cantidades de agua a gran altura y obtener así la mayor cantidad posible de energía potencial; de esta manera es posible utilizar la energía más adelante, en el momento y forma convenientes. No

obstante, el agua embalsada puede también tener diferentes usos, tales como el suministro de agua potable, el riego agrícola y diversas aplicaciones industriales o recreativas. De hecho, la primera presa de la que se tiene constancia no se usó con fines energéticos; se construyó en Egipto hace 4000 años para desviar el cauce del Nilo y proporcionar más terreno a la ciudad de Menfis. Con posterioridad, griegos y romanos aprovecharon directamente la energía cinética de agua en los ríos sin embalsarla previamente. Para ello empleaban grandes ruedas hidráulicas movidas por la corriente; se acoplaban a un molino para triturar el trigo. Esas ruedas se hacían de madera, y no fue hasta el siglo XVIII que el ingeniero británico John Smeaton construyó la primera rueda hidráulica metálica, de hierro colado.

La primera central hidroeléctrica se edificó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña. En muy breve tiempo la construcción de presas y centrales hidroeléctricas se vio impulsada por el aumento de la demanda de electricidad que tuvo lugar a principios del siglo XX, unida al desarrollo del generador eléctrico y el perfeccionamiento de la turbina hidráulica. Ya para 1920 las centrales hidroeléctricas generaban una parte importante de la producción mundial de electricidad, aunque la principal motivación para su desarrollo no fue ecológica, sino económica. Resultaban más ventajosas que los combustibles para generar vapor y alimentar así las turbinas y los generadores.

Para construir las presas se aprovechan las partes estrechas de los ríos con altas ribe-
 ras, lográndose una mayor diferencia de alturas y una mayor conversión de energía

potencial en cinética.



Figura 2.25
Presa de la central eléctrica de Aldeadávila en el río Duero, en la frontera de España (a la izquierda) y Portugal (a la derecha) vista desde el Mirador del Fraile. La parte superior de la cortina es una carretera que une ambos países (foto del autor).

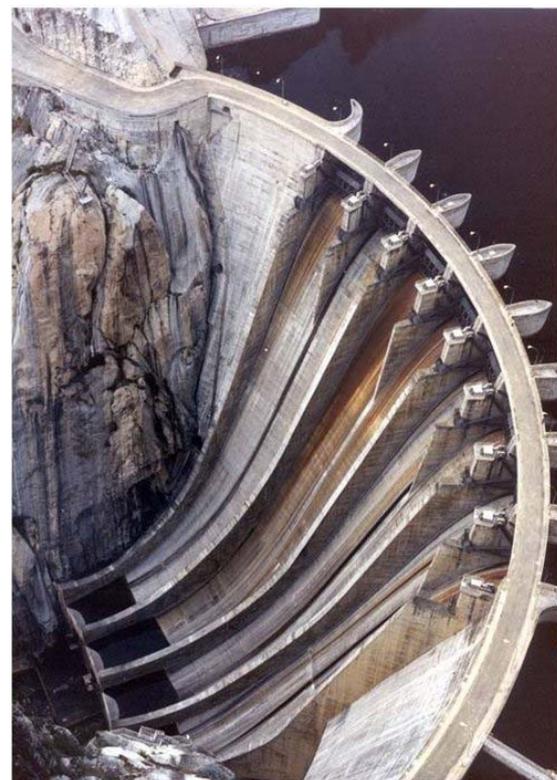


Figura 2.26
Cortina de la presa de Aldeadávila

En una hidroeléctrica moderna como la de Aldeadávila en el Duero, en la frontera de España y Portugal, la diferencia de alturas

desde la parte superior de la presa hasta los generadores puede llegar a cientos de metros (figuras 2.25 y 2.26).

En esta hidroeléctrica particular las turbinas se encuentran en una enorme cavidad horadada dentro de la montaña, del tamaño de una catedral. Posee 6 generadores con alturas de unos 3 pisos y ejes de conexión a la turbina que una sola persona no puede abarcar con los brazos, similares a los de la figura 2.27. La presa y planta generadora de Aldeadávila forma parte de un gran complejo construido en el río, a lo largo de la frontera, que consta de varias presas y centrales. La energía eléctrica generada es compartida por ambos países.



Figura 2.27. Eje de conexión turbina-generador en una hidroeléctrica

2.11. De los detritus al biogás y la electricidad

El empleo del biogás en quemadores de todo tipo como sustituto de los combustibles fósiles es actualmente algo bastante

común en los medios rurales. Sin embargo, la generación directa de electricidad usando el biogás en celdas de combustible no lo es tanto, y pudiera ser una vía económica para aprovechar, y al menos neutralizar parcialmente, los residuos contaminantes generados por diversas industrias (figura 2.28).

Un ejemplo concreto puede ser el de las vinazas residuales provenientes de las destilerías, pues por cada litro de alcohol producido a partir de las mieles finales se obtienen de manera adicional 15 litros de vinazas. Cuando estos residuos tóxicos contaminan las aguas superficiales y subterráneas causan trastornos en la producción agrícola y se convierten en una amenaza impredecible para la salud de la población. El efecto sobre los peces puede ser letal; estudios realizados muestran que, a partir de determinadas concentraciones, al ser expuestos a las vinazas el 50 % de los ejemplares de las dos diferentes especies analizadas murieron dentro de las 96 h, aunque algunos opinan que el tema no se ha estudiado lo suficiente y hay muy pocas referencias al respecto.

Para paliar el problema se han propuesto diversas soluciones, que tampoco son enteramente aceptables, pues pueden conducir a la acidez de los suelos o a la contaminación de los alimentos. La toxicidad pudiera llegar a la mesa de comer cuando se emplean como fertilizantes o para alimentar al ganado y las aves de corral. Aparentemente este último aspecto tampoco ha sido muy estudiado, pues no fue posible encontrar reportes que indiquen la posible concentración de elementos tóxicos en la carne, las grasas, los huesos, la

leche o los huevos provenientes de animales alimentados con vinazas. No obstante, el contenido relativamente alto de materia orgánica de estos residuos sugiere que quizás se puedan aprovechar con eficiencia para generar electricidad empleando celdas de combustible (sección 2.2). En la actualidad las investigaciones avanzan en

el sentido de reducir el tamaño de las celdas para que puedan ser utilizadas en dispositivos portátiles tales como las laptops y similares; una investigación de este tipo se lleva a cabo en la actualidad en la Harvard School of Engineering and Applied Sciences, usando el metano como fuente de energía.

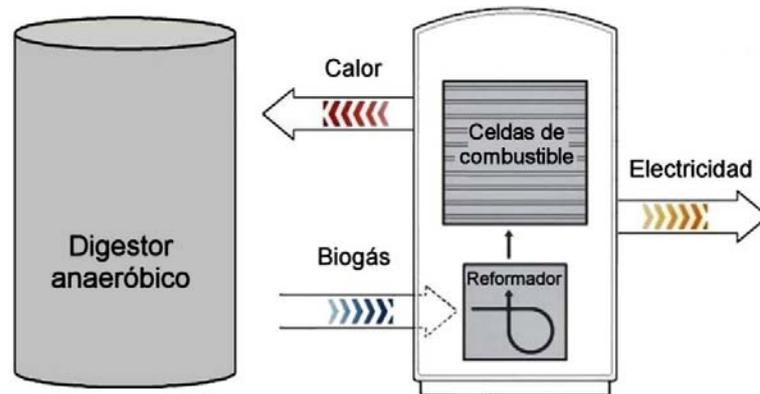


Figura 2.28

Esquema del proceso biogás- celda de combustible. Parte del calor generado se emplea en estabilizar la temperatura del digestor.

El metano es el componente mayoritario del biogás, en proporción del 50-80%. Le sigue el CO₂ con un 20-50% y, en dependencia de la materia orgánica empleada en el digestor, también puede incluir algunos componentes minoritarios como hidrógeno, vapor de agua, nitrógeno y monóxido de carbono (CO). En dependencia del tipo de celda y del detritus utilizado, a veces es necesario eliminar algunas impurezas para lograr obtener electricidad de manera eficiente.

Junto al CO₂, el metano influye grandemente en el calentamiento global gracias al efecto invernadero; su influencia es unas 20 veces mayor que la del CO₂ cuando se libera a la atmósfera sin quemarlo previamente. Es por eso que resulta ecológico emplear el biogás como combustible para uso doméstico o para mover

turbinas; sin embargo, en los últimos años se ha comenzado a extender su aplicación como materia prima para generar electricidad en forma directa usando celdas de combustible, lo que también resulta beneficioso para el medio ambiente. Las primeras instalaciones dedicadas a este fin datan de hace más de diez años; diversas compañías en EE.UU., Europa y Japón trabajan en nuevos proyectos para diversificar y mejorar su eficiencia en la actualidad, subvencionadas en ocasiones con fondos estatales.

Algunos sistemas incluyen purificadores para el biogás; otros, un 'reformador de combustible' que permite emplear celdas de hidrógeno usando cualquier hidrocarburo en vez de hidrógeno, incluyendo el biogás. Uno de estos proyectos, en California, incluye en su primera etapa la

construcción de una refinería para producir biometano purificado, que será transformado en electricidad mediante celdas de combustible de carbonato fundido, seguras para el medio ambiente.



Figura 2.29
Planta de electricidad por biogás a partir de los residuos de una fábrica de cerveza en la prefectura de Chiba, Japón, inaugurada en 1998.



Figura 2.30
Biogás para vehículos automotores en Barcelona.

En julio de 2001 la Fuji Electric Co. desarrolló una instalación similar en Kobe, y otra se construyó en marzo de 2002 en la ciudad de Yamagata, para generar energía

a partir del producto de una planta de tratamiento de aguas negras. Hay otros ejemplos (figuras 2.29 y 2.30).

Otro proyecto piloto, una granja lechera privada en Minnesota, ha estado produciendo electricidad usando los excrementos que generan sus 900 vacas desde el año 2000. La eficiencia o razón de conversión de gas en energía eléctrica es del 50%, y llega al 80% si se aprovecha el calor evolucionado en el proceso. En comparación, quemar el gas en un motor de combustión interna para generar electricidad proporciona sólo el 20% de eficiencia.

En muchas granjas se utiliza la digestión anaeróbica para tratar los residuos animales, aunque posteriormente el biogás no se convierte en electricidad; sin embargo, el uso del biogás para generar electricidad por diversos medios ha ido en aumento paulatinamente. Un estudio llevado a cabo en 2009 dio por resultado que en abril de 2008 existían en EE.UU. 114 granjas tratando sus residuos mediante digestores anaeróbicos aprovechando el 80% del gas producido en forma de electricidad; el 20% restante se quema como combustible o se inyecta en la línea de gas comercial después de ser refinado.

En promedio, la cantidad de gas diaria generada por los excrementos de cada animal en una granja de cerdos es de 4 pies cúbicos. Asumiendo un contenido de metano del 60% y la actual eficiencia del 47% de una celda de combustible, equivaldría a una generación de energía de 12.8 watt por animal. En las granjas lecheras las cifras son de 46 pies cúbicos y 147 watt por cabeza (46/147), en las de ganado de 28/90 y en las aviares de

0.29/1, respectivamente.

Si la granja es pequeña y no genera suficiente gas para operar la celda a plena capacidad, el proceso de conversión biogás-electricidad no resulta ventajoso. Los esfuerzos para lograr una conversión eficiente incluyen la creación de digestores comunitarios, con la participación de varias granjas para garantizar un suministro estable. Otra posibilidad es mezclar los residuos animales con desechos de otro tipo, capaces de generar una mayor cantidad de gas.

2.12. Bioenergía y ecológico no son sinónimos

Mucho se habla en estos días de los combustibles fósiles y la generación de CO₂, del efecto invernadero y el calentamiento global, de las fuentes renovables de energía, la bioenergía, la energía 'verde' o ecológica y temas similares. Continuamente se emiten alertas acerca del incremento acelerado de la concentración de gases de invernadero, el aumento de la temperatura promedio del planeta, la fusión de los hielos polares, el correspondiente incremento del nivel de los océanos y la posible afectación a muchas zonas costeras y a cientos de miles o millones de personas.

A pesar de todo, las emisiones de CO₂, principal gas de efecto invernadero, no se reducen; por el contrario, se incrementan continuamente.

Una de las soluciones propuestas para aliviar esta situación es la de sustituir el petróleo y sus derivados por combustibles provenientes de la biomasa vegetal, cuya producción va en aumento en todo el mundo. La biomasa absorbe CO₂ durante

el desarrollo de la planta al renovarse el cultivo, de manera tal que en un ciclo completo el balance de CO₂ añadido al ya existente es nulo. Con los combustibles fósiles sucede algo muy diferente, pues éstos se formaron hace millones de años y la adición de los residuos de su combustión a la atmósfera actual no se puede revertir, al menos de forma tan simple y económica como es el renovar un sembrado.

Sin embargo, pocas veces se menciona que los biocombustibles, que efectivamente contribuyen a reducir la acumulación de gases de invernadero, también pueden incidir de forma negativa en el medio ambiente. Hay diversas vías para que esto tenga lugar.

La actualización en 2012 de un estudio efectuado hace 5 años por los Laboratorios Federales Suizos para la Ciencia de Materiales y la Tecnología (EMPA) produjo resultados que reafirman y amplían los resultados previos. Junto a los laboratorios EMPA participaron en la investigación otras dos instituciones suizas, el Instituto de Investigaciones Agroscope Reckenholz-Tanikon y el Instituto Paul Scherrer. Se pudo comprobar que muchos biocombustibles que no incrementan la concentración neta de gases de invernadero en la atmósfera son dañinos para la salud o el medio ambiente de otra manera como, por ejemplo, incrementando la acidez de los suelos o la concentración de sustancias nocivas en ríos y lagos.

Sólo unos pocos biocombustibles se comportan mejor que el petróleo con el medio ambiente. El más 'verde' o ecológico de todos ellos es el biogás producido a partir de detritos u otros residuos, que reduce a

la mitad el impacto medioambiental. Los elaborados a partir de etanol tienen un menor impacto ambiental que los provenientes de aceites, mas su efecto es muy

dependiente de la tecnología particular empleada para obtenerlos.

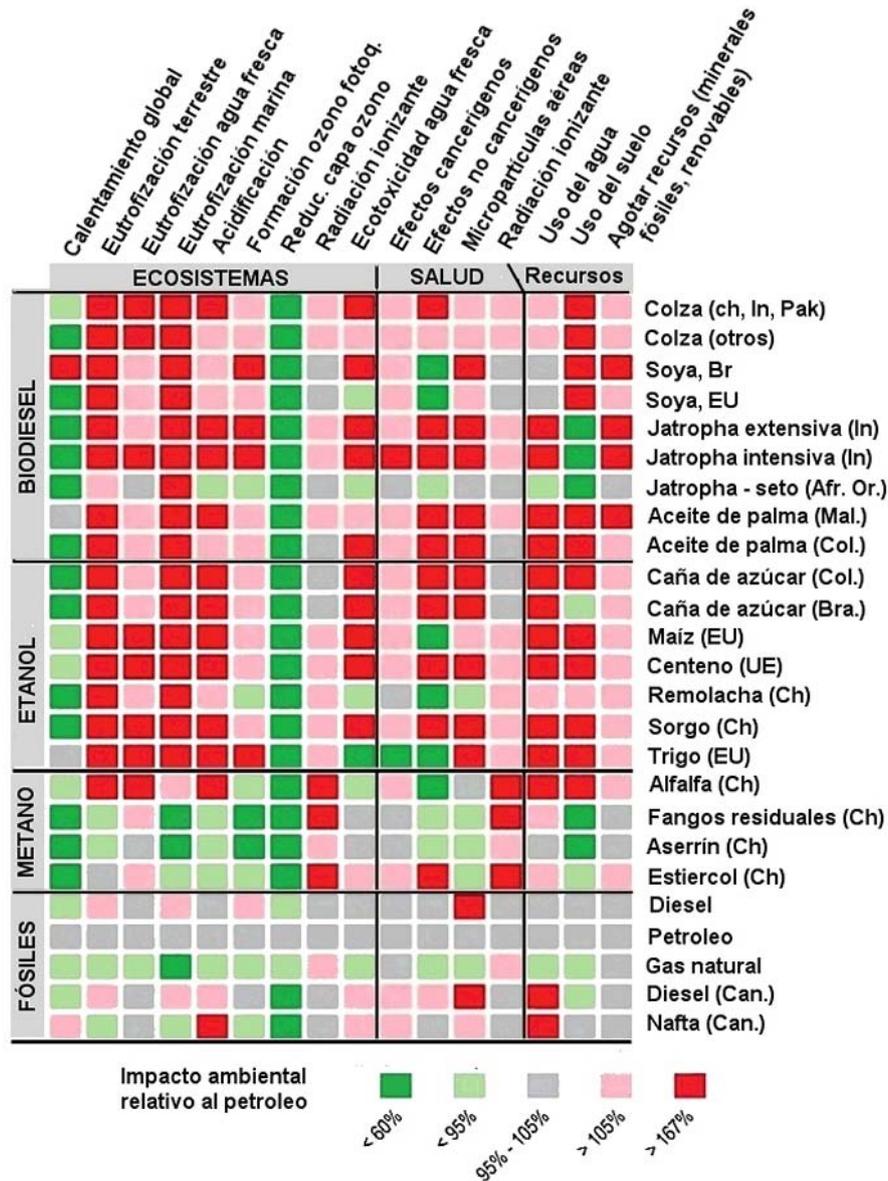


Figura 2.31 Impacto ambiental de diversos biocombustibles.

La investigación comparó el impacto de los diversos tipos de biocombustibles elaborados mundialmente a partir de productos tan disímiles como aserrín, estiércol, colza, soya, aceite de palma, caña de azúcar, maíz, centeno, remolacha, sorgo, trigo, alfalfa y jatropha. Esta última se produce extensivamente en la India; es un

árbol que forma parte de selvas con lluvia abundante o de bosques primarios tropicales y pertenece a la misma familia que el cacao o la cola; las semillas del fruto son comestibles y poseen un alto contenido de grasa (figura 2.31).

Junto a la India, otros productores importantes de cultivos y uso de residuales para

producir biocombustibles son China (colza, alfalfa, sorgo, remolacha, aserrín, estiércol y sedimentos de aguas residuales), Brasil (soya y caña de azúcar) la Unión Europea (centeno) los Estados Unidos (maíz), Malasia (aceite de palma) y Colombia (aceite de palma y caña de azúcar).

Si bien la mayoría de los combustibles que se obtienen a partir de estos cultivos reducen en más del 60% el aporte a los gases de invernadero, algunos de ellos se comportan de forma diferente. Por ejemplo, el informe sueco reporta que la producción de biodiesel a partir de la soya en Brasil contribuye a los gases de invernadero con un valor superior al 160% en comparación con el petróleo promedio.

Biocombustibles y eutrofización. Un resultado importante de la investigación del grupo suizo fue verificar que, casi sin excepciones, la producción agrícola necesaria para la fabricación de los biocombustibles contribuye notablemente al incremento de la *eutrofización* terrestre y marina. Éste es un proceso derivado directamente de la actividad humana, que consiste en el vertido de aguas negras o residuos industriales y de la agricultura en ríos y lagos. Los residuos contienen nutrientes tales como fosfatos y nitratos que favorecen el crecimiento de algas y otros componentes del plancton, pero hacen que el contenido de oxígeno en el agua se reduzca y la supervivencia de los peces se dificulte, además de convertir las aguas limpias en algo desagradable para las personas e incrementar su toxicidad.

La producción de biocombustibles también compromete el uso del agua y de los suelos, al consumir recursos que pudieran

aprovecharse para producir alimentos u otros productos de uso humano. En adición, algunos de ellos inciden negativamente en la salud humana en forma indirecta; diversas producciones de biodiesel y etanol pueden incrementar la concentración ambiental de micropartículas que, al alojarse en los pulmones, son prácticamente imposibles de eliminar. En su mayoría los biocombustibles tampoco proporcionan ventajas apreciables sobre el petróleo en otros aspectos negativos para la salud o el medio ambiente como, por ejemplo, en la formación de ozono fotoquímico o causando posibles efectos cancerígenos.

Además de reconocer el biogás como el combustible menos dañino para el medio ambiente, los investigadores suizos han propuesto algunas recomendaciones de carácter general al seleccionar un cultivo particular para dedicarlo a la producción de combustibles.

1. Se debe evitar la tala de bosques o arbustos para implementar estos cultivos, porque puede afectar el balance de gases de efecto invernadero e incrementar notablemente el impacto sobre el medio ambiente. Algo similar puede ocurrir al sustituir cultivos ya existentes por los nuevos cultivos.
2. Se considera ventajoso el uso de la maleza, el aserrín u otros residuos similares para producir biocombustibles, pero sólo si estos recursos no se aprovechaban con anterioridad o si la alteración del ciclo natural de las plantas no atenta contra la fertilidad del suelo y la biodiversidad.
3. El impacto de cada posible biocombustible sobre el medio ambiente, incluyendo

el de la tecnología usada para su producción, se debe analizar en detalle en cada caso particular.

2.13. Ahorro energético. De las turbinas marinas a los pastores de Yak

La producción de energía limpia mediante celdas solares y molinos de viento se ha convertido en algo cotidiano en muchos lugares. Los parques eólicos con de-

cenos de molinos de viento y las estaciones solares que ocupan grandes áreas y generan potencia de cientos o miles de kilowatt han dejado de ser noticia, aunque se sigue trabajando intensamente en mejorar su eficiencia. Pero en la actualidad los esfuerzos de la comunidad científica se han diversificado mucho; se exploran nuevas y muy disímiles posibilidades energéticas, algunas de ellas muy ingeniosas (figura 2.32).



Figura 2.32

Izquierda: Modelo de turbina oceánica. Derecha: Yak tibetano; su grasa se aprovecha como material PCM de cambio de fase.

Los grupos de investigación trabajan en propuestas novedosas para reducir el consumo, almacenar la energía en exceso, o producirla en forma limpia y a bajo costo. Puede que en muchos casos los resultados a obtener sean modestos; no obstante, si su empleo llegara a generalizarse, contribuirían a disminuir paulatinamente el uso de los combustibles fósiles contaminantes y a reducir el calentamiento global. Algunas posibles soluciones energéticas en las que se continuó trabajando en años recientes son las siguientes.

Energía piezoeléctrica. En el Instituto Tecnológico de Israel, un grupo de investigadores ha trabajado en un sistema ferroviario capaz de proporcionar electricidad a partir de las tensiones mecánicas

creadas en la línea al pasar el tren. El efecto piezoeléctrico es bien conocido como generador de chispas en los encendedores de las cocinas de gas. La chispa se produce cuando ciertas cerámicas se deforman y retornan bruscamente a su estado inicial. Al introducir discos piezoeléctricos en los soportes de los raíles, los investigadores pretenden generar electricidad suficiente como para alimentar las señales luminosas y mecánicas de la vía, además de recopilar información acerca de la velocidad y situación de los trenes. Resultados preliminares sugieren que en los lugares de intenso tráfico ferroviario sería posible generar más de la energía necesaria para cumplimentar estos fines. La

energía en exceso se almacenaría en baterías para ser usada más adelante donde fuera necesario.

Energía mareomotriz. Otra línea de investigación muy actual tiene que ver con el movimiento de las grandes masas de agua durante las mareas. La idea fundamental es aprovechar el flujo y reflujo del agua de mar y convertirlo en energía eléctrica. Para ello se colocan grandes turbinas ancladas al fondo marino en lugares adecuados, donde existan corrientes intensas. Las mareas son mucho más predecibles que otras fuentes de energía limpia como, por ejemplo, la eólica. Al estar causadas por la posición relativa de la Luna y el Sol respecto a nuestro planeta, ocurren de manera periódica y se conoce muy bien cuándo tendrán lugar, así como su intensidad. Es posible aprovechar tanto la energía cinética del agua en movimiento como la energía potencial causada por la diferencia de alturas. En el primer caso se usa la velocidad de la corriente marina, de manera similar a como se usa el viento en una turbina eólica. En el segundo método se busca un sitio geográfico adecuado en la costa para acumular el agua mediante una presa durante la marea alta. Al bajar la marea, el agua se deja fluir por una turbina para generar electricidad.

La primera planta de energía mareomotriz se terminó de construir en 1966 en La Rance, Francia, con una capacidad de generación de 240 megawatt. En 2009 había unas 50 compañías en todo el mundo desarrollando prototipos para la generación de energía mareomotriz. En la actua-

lidad la mayor planta del mundo, inaugurada en 2011, se encuentra en el lago Sihwa en Corea del Sur.

Energía almacenada en el aire comprimido. Otros grupos de investigación se dedican a buscar formas más eficientes de almacenar energía. “Las baterías son caras” alegan los investigadores, tienen vida limitada y cuando cumplen su vida útil se convierten en desechos contaminantes, difíciles de reciclar. El aire a presión no presenta esos problemas. En la universidad de Arizona, investigadores de la Escuela de Sistemas Ingenieros Sostenibles (School of Sustainable Engineered Systems) han propuesto la posibilidad de almacenar, a bajo costo, la energía sobrante de fuentes alternativas en forma de aire comprimido. El aire se almacenaría en grandes depósitos bajo tierra, o incluso en cavidades naturales subterráneas. Al aumentar la demanda de energía, el aire comprimido se calentaría ligeramente para provocar su escape a presión hacia turbinas de viento, generando nuevamente electricidad.

Electricidad a partir de pares termoeléctricos y sistemas PCM. Otros proyectos, que aún se encuentran en fase de investigación temprana, son el aprovechamiento del calor de los tubos de escape para producir electricidad mediante pares termoeléctricos y el relleno de las paredes de edificaciones con materiales de cambio de fase (Phase Change Materials, PCM). La generación de electricidad mediante pares termoeléctricos se basa en la propiedad de que dos alambres metálicos de diferente material, soldados por los extremos, generan una corriente eléctrica cuando las sol-

daduras se mantienen a diferente temperatura. En los tubos de escape no se usarían alambres, sino pequeñas losetas capaces de generar suficiente energía como para reducir el consumo de combustible del vehículo entre un 5 y 10%.

Los sistemas de cambio de fase PCM funcionan en ciclos de fusión-solidificación. Cuando una sustancia se funde, absorbe calor del medio ambiente; cuando se solidifica, devuelve ese calor al exterior a la misma temperatura constante (la temperatura de cambio de fase). Una investigación relacionada a los PCM pretende mejorar las condiciones de vida de los pastores de yaks en lugares fríos de China. Con ese fin se emplea un PCM obtenido a partir de aceites de plantas locales y mantquilla de yak; se encapsula adecuadamente y se inserta en la ropa tradicional de los pastores. Cuando los pastores realizan sus largas caminatas hasta los sitios de pastoreo el PCM se funde, absorbiendo calor. Al llegar al sitio de pastoreo y dejar de hacer ejercicio, el PCM contribuye a mantener caliente el abrigo mientras se solidifica y devuelve el calor que antes fue absorbido. Aplicando las cápsulas a las mantas de dormir de la familia, éstas se calientan durante el día en la cocina de la vivienda sin gasto energético adicional. Al restituir el calor a sus dueños durante la noche, se ahorra una parte importante del combustible empleado en la calefacción nocturna. Más detalles sobre las aplicaciones de los Materiales de Cambio de Fase PCM aparecen en la sección 3.9 (climatización pasiva).

2.10. Dilemas energéticos contemporáneos

Influido por el desastre nuclear de Fukushima en marzo de 2011, el gobierno alemán aprobó en junio de ese mismo año un paquete de leyes que convertirá al país en uno libre de energía nuclear para el año 2022. El paquete también contempla el desarrollo acelerado de las energías renovables.

Cuarta productora mundial de energía nuclear, Alemania no es el primer país europeo en tratar de implementar esa medida. Las primeras disposiciones prohibiendo la construcción de nuevas centrales nucleares se decretaron en Suecia en 1980, aunque más tarde fueron revocadas. Fue en 1999 que en Bélgica se dictó una ley, aún vigente, regulando la desmantelación de los siete reactores que existen en el país al alcanzar su vida útil de 40 años; la citada ley también prohíbe la construcción de nuevas centrales nucleares.

Los expertos predicen que el cierre de las plantas nucleares en Alemania traerá aparejado un incremento del consumo de gas, petróleo y carbón en sus termoeléctricas, lo que a su vez se reflejara en el incremento de 26 millones de toneladas anuales de gases de efecto invernadero, que contribuyen al calentamiento global. Esta cantidad representa un 10% de incremento en comparación con las emisiones actuales.

Ventajas y desventajas. Las termoeléctricas emiten CO₂, principal gas del efecto invernadero, pero también otros gases como el SO₂, que produce lluvia ácida. Adicionalmente envían a la atmósfera miles de toneladas de cenizas, residuos de carbón y metales pesados, e incluso concentrados de material radiactivo natural.

Por su parte, los reactores nucleares contemporáneos casi no emiten contaminantes al aire, aunque periódicamente expulsan pequeñas cantidades de gases radiactivos. Sus residuos son mucho menores en volumen (del orden de un millón de veces) y se controlan mejor que los residuos

de las termoeléctricas. Su principal desventaja radica en la alta peligrosidad de los posibles accidentes, sumada al riesgo de los residuos radiactivos y a su alto poder contaminante del medio ambiente, que puede extenderse a cientos y miles de años.

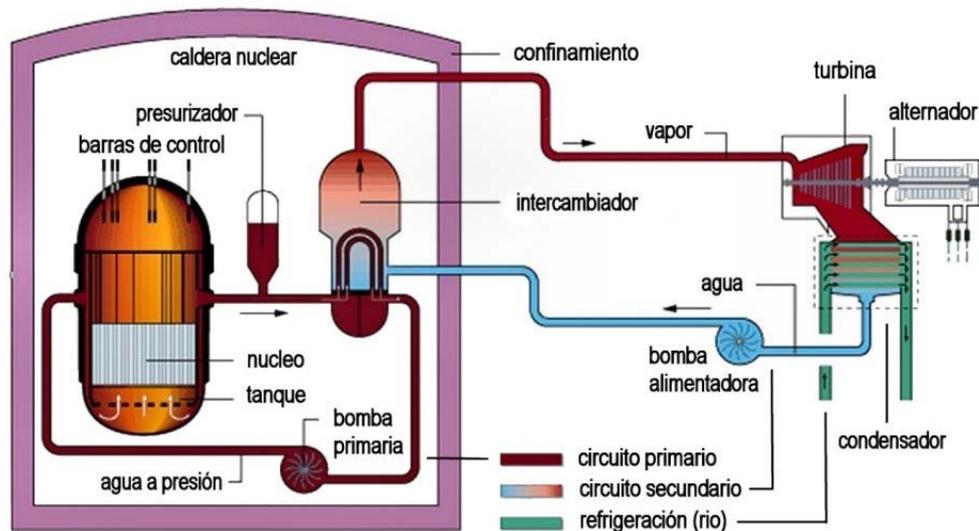


Figura 2.33 - Funcionamiento de un reactor nuclear

Una central nuclear como la recién accidentada de Fujushima, funciona como sigue (figura 2.13). Durante la reacción nuclear controlada que tiene lugar en el núcleo del reactor, el uranio enriquecido se divide o fisióna y se transforma en otros elementos, generando calor y gran cantidad de neutrones y otras partículas subatómicas durante el proceso. Los neutrones ‘chocan’ con otros átomos de uranio, que también se dividen y emiten más neutrones, y así continuamente. El calor generado se usa para calentar agua a presión, que se vaporiza sólo al alcanzar los 600 °C. El proceso es más eficiente que si se lleva a cabo a presión atmosférica, cuando el agua hierve a los 100 °C. El vapor pasa a un intercambiador, donde se li-

cua y regresa al núcleo del reactor para repetir el proceso. Un circuito secundario conteniendo agua limpia recoge el calor del intercambiador y genera vapor, que se envía a una turbina-generator para producir electricidad. Este último paso es similar al de una termoeléctrica convencional, donde el calor se genera quemando combustible.

El reactor y el agua a presión se confinan en un recinto de seguridad para evitar el escape de sustancias radiactivas. Los neutrones dañan gravemente las células; las altas concentraciones son letales de inmediato. Por otra parte, los residuos de elementos radiactivos, incluso a baja concentración, se alojan en los tejidos y pro-

ducen cambios en el ADN celular, causando enfermedades que pueden ser irreversibles a largo plazo.

El agua contaminada, en contacto con el núcleo radiactivo, nunca se mezcla con el agua que hace mover las turbinas, a no ser que ocurra un accidente. En ese caso, a pesar de las medidas previstas para estas contingencias, más de una vez la realidad se ha ido por encima de las previsiones. Después que se interrumpe la reacción para detener la central, el problema más importante es enfriar el núcleo, que se encuentra a alta temperatura, sin que cause daños. Para lograrlo se debe garantizar el suministro eléctrico a las bombas de agua y otros equipos auxiliares de enfriamiento. Incluso si el suministro eléctrico falla, existen sistemas alternativos, usualmente generadores diesel, para proveer la electricidad necesaria. Pero en la práctica, en un accidente múltiple como el de Fukushima, donde un tsunami se sumó al terremoto, todos los sistemas fallaron. No se pudo enfriar a tiempo el núcleo del reactor, la presión del vapor aumentó sobre lo previsto, hubo explosiones y el vapor contaminado y otras sustancias radiactivas escaparon al exterior.

Se prevén nuevos diseños de seguridad que, en caso de accidente, garanticen el enfriamiento del núcleo sin usar electricidad y sin operarios, mediante flujo de agua por gravedad. No obstante, el riesgo nunca podrá reducirse a cero.

Fuentes renovables de energía. La opción a la energía nuclear y a los combustibles fósiles es la energía limpia proveniente de celdas solares, olas y mareas, pilas de combustible o molinos de viento,

pues no todos tienen la opción de la energía hidráulica o geotérmica. Sin embargo, por el momento esta energía sólo alcanza para cubrir una ínfima parte de las necesidades energéticas. Otras fuentes renovables en pleno desarrollo, como la bioenergía proveniente del etanol extraído del maíz o de la caña de azúcar, han sido muy criticadas. La bioenergía no causa incrementos del CO₂ en la atmósfera, pues en cada cosecha se reabsorbe el que fue generado al quemar la cosecha anterior. Pero se la critica porque, al emplear tierras de cultivo para obtener combustible, su implementación masiva podría contribuir a incrementar la escasez de alimentos en muchos lugares del mundo y promover el hambre, así como causar contaminación por otras vías (sección 2.12).

Obviamente, el problema energético presenta muchos matices, y constituye una seria disyuntiva para el futuro inmediato, más aún para los países que cuentan con fuentes muy limitadas.

Apéndice

La energía cinética E_c se define a partir del Teorema del Trabajo y la Energía creando una cierta función que no depende de la trayectoria de la fuerza resultante aplicada, sino sólo de los estados inicial y final:

$$\Delta E_c = \int_1^2 \vec{F}_{res} \cdot d\vec{r}$$

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}.$$

Combinando esta expresión con la 2da Ley de Newton se llega a $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ donde p se puede expresar en función de la energía

cinética como $p = \sqrt{2mE_c}$.

Estas dos últimas expresiones reflejan algo también conocido; de acuerdo a la 3ra ley de Newton, un sistema cuya energía cinética varía con el tiempo genera fuerzas sobre otros sistemas. Como cualquier sistema mecánico se puede considerar formado por muchas partículas, lo que se demuestra para una partícula se extiende inmediatamente a cualquier sistema de partículas.

Pero también existe la energía potencial, y definida a partir del concepto de fuerza conservativa F_c .

$$\Delta E_p = -\int_1^2 \vec{F}_c \cdot d\vec{r} .$$

Igualmente se obtiene una integral cuyo valor depende sólo de la posición inicial y final, lo que permite definir la función energía potencial. La relación inversa

tiene la forma $\vec{F}_c = -\nabla E_p$.

Las relaciones anteriores nos dicen que aunque la posición de un sistema no varíe con el tiempo, si tiene la posibilidad de ejercer fuerzas, también tiene energía (potencial en este caso).

Cualquier otra energía, como las de enlace, se identifican por ser capaces de transformarse o compararse numéricamente con una de estas, cinética o potencial, y generar fuerzas; eso es lo que establece el principio de conservación de la energía. Por tanto, una definición de la energía acorde a todo lo anterior es la siguiente:

Energía: *Aptitud o capacidad de un cuerpo o sistema para ejercer fuerzas sobre otros cuerpos o sistemas o entre sus propios subsistemas.*

Parte 3. Nuevas técnicas, materiales e instrumentos

3.1 Grafeno

Cada día que pasa se reduce más el intervalo de tiempo entre un nuevo descubrimiento y la implementación de sus aplicaciones prácticas. El *grafeno* es un buen ejemplo de esta aseveración. Aunque la Unión Internacional de Cristalografía (IUPAC) lo bautizó formalmente en 1994, no fue hasta 2004 que se logró separar por primera vez una capa individual de grafeno del grafito volumétrico, lo que le valió el premio Nobel de Física de 2010 a los físicos de la Universidad de Manchester André Geim y Konstantín Novoselov.

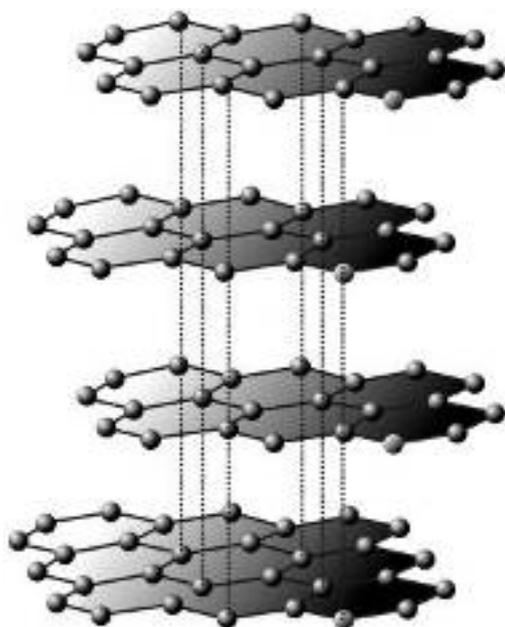


Figura 3.1

Cada capa en la figura es grafeno, esté o no unida al resto de las capas.

¿Qué es el grafeno? Los átomos de carbono forman tres tipos de sólidos estables a la temperatura ambiente con propiedades físicas diferentes; el diamante, los fullerenos y el grafito. La diferencia está en la forma que se ordenan los átomos a

nivel microscópico. En el diamante, el material más duro que existe, los átomos de carbono forman una malla tridimensional, entrelazada y compacta. Los fullerenos, descubiertos en 1985, forman estructuras espaciales huecas microscópicas que semejan balones de fútbol, tubos, etc. En el grafito, mucho más blando, los átomos se ordenan en estructuras hexagonales similares a las de un panal de abejas (figura 3.1). Esas celdas están fuertemente enlazadas por los costados; sin embargo, los enlaces entre capas adyacentes son muy débiles, de manera que cada capa se desliza fácilmente respecto a las demás. De ahí proviene la ‘blandura’ del grafito, que deja fácilmente una huella en el papel y nos permite escribir con él. Es tan blando que se usa incluso como lubricante sólido. Cada una de las capas de carbono es una capa de *grafeno*. Geim y Novoselov lograron en 2004 separar las monocapas y estudiar por primera vez sus singulares propiedades. Se obtuvo así un nuevo material, constituido por una sola capa bidimensional de carbono, con propiedades físicas muy diferentes a las del grafito volumétrico. El espesor de una capa de grafeno es tal que un solo gramo bastaría para cubrir totalmente un campo de fútbol.

El hallazgo del grafeno fue, sin lugar a dudas, algo sorprendente. Hasta ese momento, tanto la teoría como el experimento indicaban que no era posible la existencia de estructuras cristalinas bidimensionales desligadas del cristal volumétrico. Los cálculos indicaban que tal estructura sería inestable y que tendría que colapsar para formar una estructura

tridimensional normal.

A partir del descubrimiento de Geim y Novoselov comenzó una intensa investigación acerca de las propiedades del grafeno. Su alta transparencia óptica y gran conductividad eléctrica lo hace un buen candidato para la confección de electrodos transparentes, aplicables a dispositivos tales como pantallas de cristal líquido, celdas fotoeléctricas orgánicas y diodos orgánicos emisores de luz. Su flexibilidad y alta resistencia mecánica también resultan ventajosas en comparación con las de otros materiales que se emplean en la microelectrónica. Otra posible aplicación podría ser la confección de ultracondensadores, con una capacidad de almacenar carga eléctrica y energía mucho mayor que la de los existentes hasta el momento.

En diciembre de 2008 la IBM hizo público que habían logrado fabricar transistores de grafeno operando a frecuencias del orden de un gigahertz. Los transistores son la base de los circuitos integrados y de toda la electrónica moderna. Anteriormente, en ese mismo año, se había reportado la construcción de un transistor ultrapequeño (1 átomo de espesor, 10 átomos de ancho).

En enero de 2010 la revista *Science* reportó la síntesis del *grafano*, también en la Universidad de Manchester. El grafano posee una estructura monocapa similar a la del grafeno, con la diferencia de que los átomos de carbono, además de estar enlazados entre sí, lo están también a átomos de hidrógeno ubicados a ambos lados de la capa. A diferencia del grafeno, el grafano no conduce la corriente eléctrica. Los enlaces con el hidrogeno

‘amarran’ los electrones responsables de la buena conductividad eléctrica del grafeno, convirtiéndolo en un aislante. No obstante, el grafano mantiene las buenas propiedades mecánicas de su antecesor; súper-resistencia mecánica, alta densidad y flexibilidad. Al aumentar la temperatura lo suficiente llega un momento que el hidrogeno se desprende y el grafano se convierte de nuevo en grafeno.

En principio, controlando la ubicación de los átomos de hidrogeno en la malla del grafano sería posible construir materiales aislantes con regiones intermedias conductoras –principio de operación de infinidad de dispositivos microelectrónicos-. Pero quizás lo más importante sea que la obtención del grafano abre las puertas a muchas otras modificaciones. Con el grafano conductor en un extremo y el aislante grafano en el otro, no es difícil vislumbrar una gran familia de nuevos materiales que aparecerán al sustituir el hidrógeno por átomos de otro tipo. Por ejemplo, en principio parece posible sustituir el hidrógeno, o parte de él, con flúor, cuyas posibilidades de enlace con el carbono son similares a las del hidrógeno. Así se obtendría un nuevo material con propiedades diferentes al grafeno y al grafano.

Los galardonados con el premio Nobel, quienes dirigen el grupo de investigaciones de la Universidad de Manchester, han expresado: “La industria moderna de semiconductores utiliza todos los elementos de la tabla periódica, aislantes, semiconductores y metales. Pero ¿qué tal si un solo material pudiera ser modificado para cubrir el espectro completo necesi-

rio en todas las aplicaciones electrónicas?” Dada la gran cantidad de investigadores trabajando actualmente en este sentido, es muy posible que tales materiales aparezcan mucho antes de lo que se pueda imaginar. La gran importancia del descubrimiento de Geim y Novoselov es que abrió las puertas a todo un universo de nuevos dispositivos, con propiedades ópticas y eléctricas insospechadas.

3.2. Imanes modernos

El hierro (Fe) y el boro (B) son elementos abundantes en nuestro planeta. Por otra parte, el neodimio (Nd) pertenece al grupo de las Tierras Raras y no se encuentra libre en la naturaleza. Sólo aparece en algunos minerales, mezclado con otros miembros del grupo que poseen similares propiedades químicas.

“Tierras Raras” da a pensar que se trata de elementos muy escasos en la corteza terrestre, pero no es así. El nombre surgió en los inicios del siglo XX porque rara vez se usaban para algo, pues era muy difícil separarlos de sus compuestos. En realidad, el neodimio es más común que el plomo, y el más escaso del grupo -el tulio- abunda más que el oro. En 1982 la General Motors Corporation (GMC) y la compañía japonesa Sumitomo descubrieron como fabricar imanes muy potentes empleando una aleación de composición $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Hasta el momento, esta aleación posee mejores propiedades magnéticas que cualquier otra conocida y su fabricación es menos costosa que la de sus antecesores más cercanos, los de aleación Samario-Cobalto. Poco después la GMC fundó la empresa Magnequench para dedicarla exclusivamente a los imanes, y la Sumimoto pasó

a ser parte de la corporación Hitachi. Las tecnologías empleadas por ambas compañías eran diferentes, cada una con sus ventajas y desventajas.

¿Pegados o sinterizados? La GMC introdujo el método de solidificación rápida, donde el material fundido se vierte en un cilindro que rota a gran velocidad para ser enfriado bruscamente y evitar la oxidación. La cinta larga y fina que se obtiene está compuesta de granos nanométricos, orientados al azar en todas direcciones. Una vez pulverizada la cinta, se mezcla con un aglutinante estable y se conforma en prensas y moldes adecuados. Los polvos también se pueden conformar por inyección, en un extrusor similar a una máquina de hacer churros o fideos. Las piezas producidas por cualquiera de estos dos procedimientos se magnetizan para convertirlas en imanes permanentes usando un electroimán. Se conocen en el mercado como ‘imanes pegados’ (*bonded magnets*).

El método de la Sumimoto empleaba la sinterización, un procedimiento usual en la pulvimetalurgia. En este proceso, la mezcla de los polvos precursores, conformada en frío, se calienta a alta temperatura para que reaccione y solidifique sin llegar a fundirse. Durante el proceso se usa una atmósfera reductora para impedir la oxidación. Estos imanes se conocen como ‘sinterizados’ y son más sensibles a la corrosión que los pegados, pues carecen de la capa protectora que brinda el aglutinante. Para controlar la oxidación a largo plazo, se añaden al imán capas de laca o de alguna aleación protectora. Una posibilidad tecnológica adicional es la de aplicar a los polvos un

proceso de prensado en caliente (hot pressing) que proporciona imanes más densos y con mayor energía.

La energía magnética por unidad de volumen es una medida de la intensidad del campo magnético asociado al imán y de su habilidad para interactuar con otros materiales. Su valor en los imanes sinterizados llega a ser de 50 a 100 veces superior a la de los imanes convencionales de ferrita o aleación AlNiCo. Los de ferrita, formados a partir de la mezcla de óxidos de estroncio o bario con óxido de hierro, se comercializaron en los años 50 del siglo pasado y aún se usan intensivamente en audífonos, bocinas, microventiladores, cierres de refrigeradores y muchas otras aplicaciones. Las aleaciones magnéticas de aluminio-níquel-cobalto (AlNiCo) se conocen desde 1930 y también se siguen usando en la actualidad, aunque poseen mucha menor energía magnética.

La tecnología de los imanes pegados permite fabricar piezas de forma muy compleja, poco viables mediante sinterización, pero tiene la desventaja de proporcionar propiedades magnéticas inferiores. Su energía magnética alcanza, a lo sumo, sólo la cuarta parte del valor máximo que puede adquirir un imán sinterizado, aunque ese valor aún resulta mayor que la energía magnética de las ferritas o el AlNiCo. Se producen unas 50 000 toneladas de imanes de NdFeB todos los años, mayormente en China y Japón; de ellos un 90% son sinterizados.

La magnetización técnica. Los imanes sintéticos existen gracias a que muchos materiales tienen la propiedad de ‘recor-

dar’ su estado previo de magnetización. Un enrollado de alambre en forma cilíndrica (bobina o solenoide) por el que circula una corriente eléctrica, es capaz de generar un campo magnético que desaparece cuando la corriente cesa. Si uno de esos campos se aplica a un material con las propiedades magnéticas adecuadas hace que éste, a su vez, genere su propio campo magnético externo. Ese campo propio no desaparece al desconectar la corriente. Se obtiene así un imán permanente, que mantendrá un campo magnético residual en sus alrededores después de retirar la bobina. Existen diversas formas de magnetizar (lineal, radial, diametral u otras), en dependencia de la futura aplicación que tendrá el imán (figura 3.2).

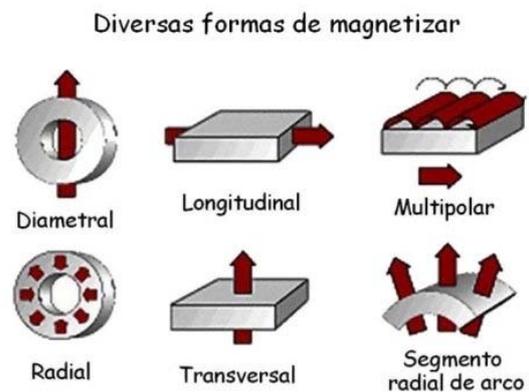


Figura 3.2
Diferentes formas de magnetizar.

El campo residual puede ser afectado por factores como la temperatura, los campos externos intensos, los choques, tensiones, vibraciones, radiaciones y el tiempo transcurrido. Los primeros imanes sintéticos tendían a desmagnetizarse muy fácilmente; los actuales conservan casi invariables sus propiedades magnéticas con el paso del tiempo; tampoco son afectados sensiblemente por los demás

factores mencionados, excepto en casos extremos.

¿Cuál es el origen del campo magnético?

Los electrones que integran átomos y moléculas poseen de por sí propiedades magnéticas (como también poseen masa y carga eléctrica). Cada electrón se comporta como un imán en miniatura, lo que confiere propiedades magnéticas intensas a los átomos de algunos elementos y compuestos a nivel microscópico.

En un sólido donde existan átomos de este tipo, su orientación al azar hace que la suma magnética promedio en todo el material se anule, y el magnetismo no se detecta fuera del sólido. Pero al aplicar un campo externo intenso se crea un orden magnético en el interior del sólido,

que crea el campo externo propio mencionado anteriormente. Si el material es el adecuado, ni el orden magnético interno ni el campo propio asociado desaparecen al retirar el campo externo, y el sólido se convierte en un imán.

Los imanes de NdFeB han reemplazado a los de otros tipos en muchas aplicaciones, pues se alcanzan las propiedades deseadas con mucha menor masa y volumen. Tales características han permitido reducir el tamaño de muchos dispositivos y emplearlos masivamente (figura 3.3). En algunos modelos de autos recientes, los pequeños y potentes motores que regulan los cierres de puertas y ventanillas o mueven los limpia-parabrisas contienen, en total, cerca de 1 kilogramo de imanes de NdFeB.

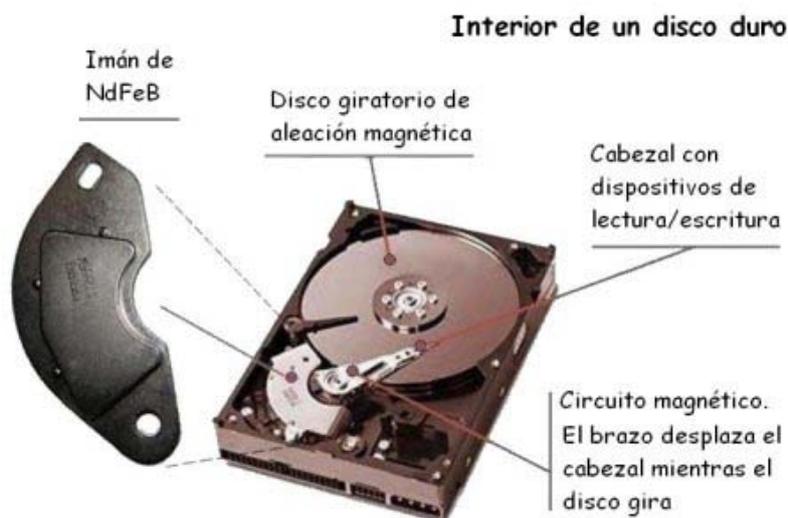


Figura 3.3

Interior de un disco duro mostrando el imán de NdFe.

3.3 Biomagnetismo cerebral

El cuerpo humano en estado normal genera pequeñas corrientes eléctricas, que a su vez dan origen a campos magnéticos y eléctricos de pequeñísimo valor. El biomagnetismo se refiere al estudio de las

componentes magnéticas de esos biocampos, que se alteran cuando aparecen anomalías en el organismo; se estudian con fines de *diagnóstico* exclusivamente, no con fines terapéuticos.

Cuando las corrientes son variables o

pulsantes, los biocampos generados aparecen en forma de *radiación electromagnética*: ondas invisibles capaces de atravesar limpiamente muchas sustancias y que se propagan en todas direcciones. Las funciones cerebrales y cardiacas generan impulsos de suficiente intensidad como para ser detectados. La componente eléctrica se puede medir con electrodos colocados en la piel y hoy día es una técnica muy popular; se denomina *electrocardiograma* cuando se refiere al corazón y *electroencefalograma* si se aplica al cerebro. La componente magnética es menos intensa que la eléctrica y mucho más difícil de detectar.

Para medir esos débiles campos magnéticos es necesario utilizar un instrumento muy sofisticado, el magnetómetro SQUID, siglas que en idioma inglés representan al Superconducting Quantum Interference Device (Dispositivo Superconductor de Interferencia Cuántica). Es capaz de detectar y medir cuantitativamente las componentes magnéticas con una intensidad 100 millones de veces menor que el campo magnético terrestre, pero sólo se puede encontrar en lugares muy específicos, capaces de proveer la alta tecnología que se necesita para su desempeño. No es un equipo que se pueda llevar en un maletín como el electrocardiógrafo, ya que el sensor superconductor requiere de muy bajas temperaturas para poder trabajar, del orden de la del Helio líquido, a unos 4 °C por encima del cero absoluto (-269 °C) (figura 3.4).

En la actualidad el SQUID se utiliza principalmente para diagnosticar y tipificar la

epilepsia, pues permite registrar cualquier actividad irregular en el cerebro cuando el electroencefalograma no detecta anomalías apreciables; la técnica se denomina *magnetoencefalografía MEG*.

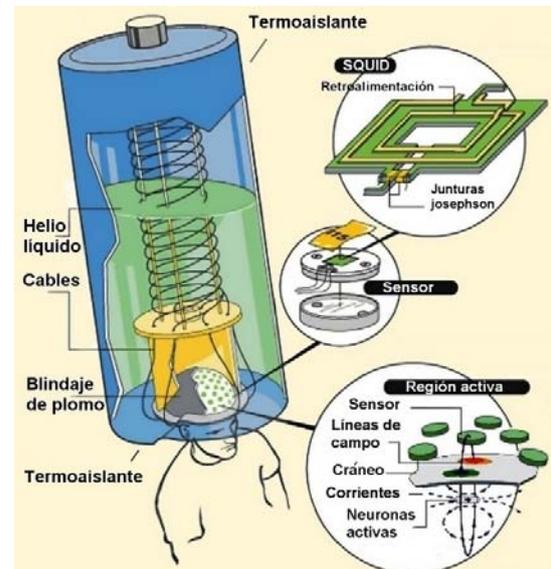


Figura 3.4
Biomagnetismo médico. Medición de la componente magnética de las ondas electromagnéticas generadas por el cerebro usando un magnetoencefalógrafo SQUID.

Posee la ventaja de que no es necesario colocar electrodos en la piel del paciente; basta con ubicar los sensores a corta distancia, en una posición fija. Su principal desventaja, además de la necesidad de trabajar a muy bajas temperaturas, es que la señal a medir es varios órdenes menor que los "ruidos magnéticos" ambientales. Esos 'ruidos' son generados por las lámparas de luz fría, los equipos electrónicos y las líneas de transmisión, por lo que resulta obligatorio aplicar la técnica en un recinto magnéticamente aislado.

Como las radiaciones electromagnéticas atraviesan fácilmente la mayoría de las sustancias, aislar al sujeto también resulta un asunto complicado. En los primeros modelos era necesario introducir

al paciente en una cámara totalmente cerrada, construida con aceros especiales capaces de desviar y reflejar las ondas electromagnéticas. Modelos más recientes como el de la figura, desarrollado en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en Nuevo México, emplean un casco detector que se asemeja a los secadores de los salones de belleza, con más de 150 sensores superconductores. El equipo es capaz de levantar un mapa completo del cerebro de una sola vez procesando los datos mediante una computadora (figura 3.5). Los sistemas más recientes alcanzan una resolución de $\frac{1}{4}$ de milímetro y un tiempo de respuesta de 1 milisegundo. El casco se aísla de las interferencias externas mediante una cubierta semiesférica de plomo, pues a la temperatura del Helio líquido el plomo también se vuelve superconductor y refleja como un espejo cualquier campo magnético que provenga del exterior.

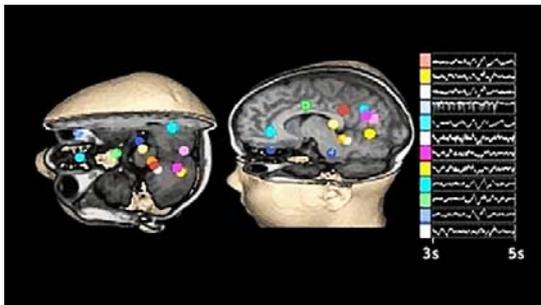


Figura 3.5

Mediante técnicas de computación se puede mapear la actividad eléctrica del cerebro en función del tiempo. Los mapas se utilizan para diagnosticar epilepsia, apoplejía, desórdenes mentales o para estudiar las funciones cerebrales.

Otras aplicaciones del SQUID han sido la de buscar micropartículas magnéticas contaminantes en los pulmones de mineros y soldadores, medir la cantidad de

sangre que fluye por el corazón y determinar el contenido de hierro en el hígado en pacientes afectados de anemia, ya que los glóbulos rojos o hematíes contienen hierro en forma de hemoglobina, que el SQUID puede detectar y cuantificar.

Una variante reciente de esta técnica se ha utilizado para analizar arritmias cardíacas en el feto (magnetocardiografía fetal), imposibles de detectar con un estetoscopio u otras técnicas como la electrocardiografía y el ultrasonido. Actualmente en Los Álamos se realizan investigaciones para perfeccionar la tecnología con la colaboración de las universidades de Nuevo México, Nebraska, Oregón y San Francisco.

3.4. Electricidad embotellada

Durante muchos siglos primero el barro, y después el vidrio, fueron los materiales preferidos para confeccionar botellas; hoy día los plásticos han tomado la delantera. Es posible embotellar productos muy diferentes: vinos, limpiadores, aceites, jarabes... en fin, cualquier líquido que a Ud. se le ocurra. Pero... ¿también la electricidad? Pues resulta que sí.

La electricidad -o mejor dicho, las cargas eléctricas- también se pueden ‘embotellar’. Pero las vasijas que se emplean con este fin se llaman de otra forma: condensadores o capacitores. El primer condensador de volumen relativamente pequeño de que se tiene noticia fue realmente una botella, inventada en 1745 por el holandés Pieter van Musschenbroek, profesor de filosofía natural de la Universidad de Leyden.

En la botella de Leyden (figura 3.6) las cargas generadas en una fuente adecuada

se conducen mediante un alambre conductor hacia la armadura de plomo en el interior de la botella, a través de un tapón aislante. Esas cargas inducen cargas de signo contrario en la superficie exterior, incapaces de atravesar el vidrio, también aislante. Al retirar el alambre, quedan almacenadas dentro de la botella.

Si posteriormente se une el interior a tierra con un conductor, las cargas de signo contrario tenderán a neutralizarse, estableciéndose una corriente eléctrica capaz de entregar energía, a veces en forma de chispa. De ahí que, al igual que las pilas y baterías, los condensadores son capaces de almacenar la energía eléctrica para ser utilizada cuando se le necesite.

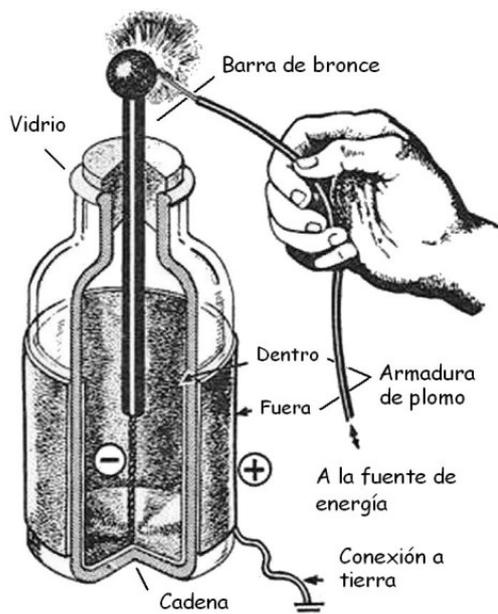


Figura 3.6
Botella de Leyden

La diferencia esencial entre un condensador y una batería es que los primeros pueden entregar la energía almacenada mucho más rápidamente (entre 10 y 1000 veces). Esto se debe a que los condensadores guardan la energía en el campo

eléctrico creado entre las cargas. La respuesta del campo es mucho más rápida que la de una reacción química, sistema utilizado en las baterías. Sin embargo, en igualdad de volumen, la capacidad de almacenamiento de un condensador no alcanza la de una batería, que actualmente es de 10 a 100 veces mayor.

Existen condensadores capaces de soportar voltajes muy altos sin dañarse, pero un voltaje en exceso puede provocar una chispa que perfora el aislante, destruyendo todo el sistema (voltaje de ruptura).

Supercondensadores. Los condensadores han evolucionado considerablemente a partir de la original botella de Leyden. Los de última generación, también denominados supercapacitores o ultracondensadores, pueden almacenar en un pequeño volumen una carga miles de veces mayor que la de sus predecesores inmediatos. En términos energéticos representa unas 10 000 veces más energía eléctrica que la de los condensadores convencionales, y miles de millones de veces más de la que se podía almacenar en la botella de Leyden aplicando el mismo voltaje.

La capacidad de almacenar carga de un condensador se mide por la relación entre la carga almacenada (Q) y la diferencia de potencial que esa carga crea entre sus armaduras (V). Se representa mediante una ecuación muy simple: $C = Q/V$, y se mide en farads. Una botella de Leyden tenía una capacidad de 1 nanofarad (10^{-9} ó 0.000000001 farad). La capacidad de los condensadores posteriores convencionales, de tamaño mucho menor, no pasaba

de un valor mil veces mayor (1 microfarad). Los supercondensadores actuales alcanzan capacidades de 3000 farad.

Un condensador convencional utiliza un aislante o dieléctrico entre las armaduras metálicas para incrementar la capacidad. En la botella de Leyden el aislante era el vidrio. En diseños posteriores se emplearon óxidos, otras sustancias y también disoluciones o lodo electrolítico. De no poseer el dieléctrico intermedio, el volumen del condensador aumenta considerablemente; para obtener una capacidad de 1 microfarad sin emplear dieléctricos y electrolitos se necesitaría una esfera metálica con un radio de unos 9000 km, superior al radio de la Tierra (≈ 6400 km).

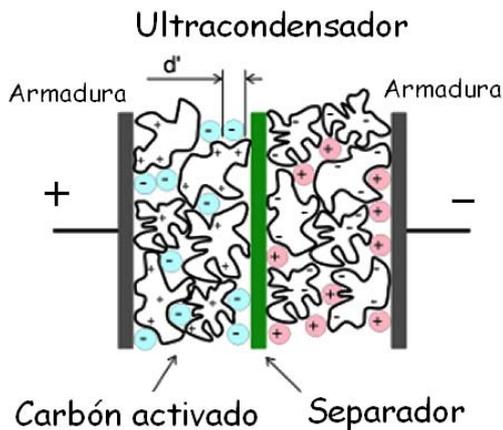


Figura 3.7
Ultracondensador contemporáneo.

Los supercondensadores no emplean aislantes convencionales como el vidrio entre las armaduras. Utilizan polvo de carbón activado bañado por un electrolito, en regiones divididas por un separador (figura 3.7). El carbón activado es una sustancia muy porosa, similar a una esponja microscópica. Gracias a esta estructura, la superficie por unidad de masa es mucho mayor que en una superficie

lisa. Equivale a un condensador convencional con un área de sus armaduras considerablemente mayor, lo que permite incrementar la capacidad de almacenar cargas en un volumen pequeño.

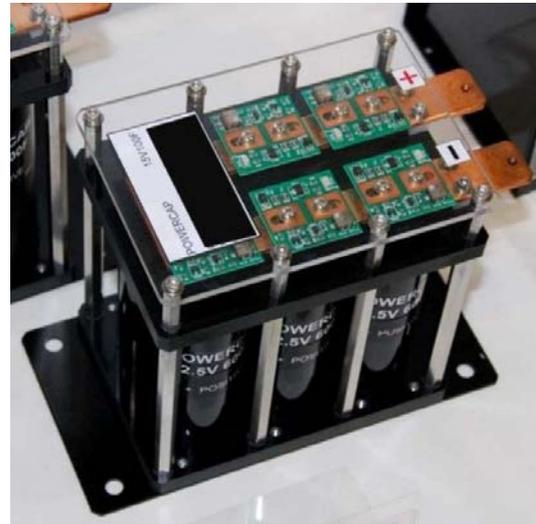


Figura 3.8
Batería de ultracondensadores de potencia, 100 farad a 15 volt.

Son fáciles de fabricar y se cargan por completo en apenas unos minutos. Pueden hacerlo más de un millón de veces, superando las baterías convencionales de plomo y ácido que no suelen llegar a mil ciclos de recarga. Su principal desventaja es que sólo pueden trabajar a un voltaje comparable al de una pila de linterna, no más de 2 ó 3 volt. Para voltajes mayores hay que usar arreglos en serie. La figura 3.8 muestra un arreglo de supercondensadores de potencia con una capacidad de 100 farad a 15 volt. El grosor de los contactos de cobre indica que es capaz de entregar una gran corriente a ese voltaje.

Los supercondensadores se emplean como capacitores de arranque en motores

de gran potencia como los de rastras y locomotoras. También se usan en los 'flash' de las cámaras fotográficas, en teléfonos celulares, linternas y equipos media player portátiles. En los prototipos de vehículos eléctricos de baterías se utilizan para aportar un empuje extra durante la aceleración o para subir una cuesta.

Nuevos proyectos. En los supercondensadores actuales los poros son irregulares en tamaño y forma, lo que reduce su eficiencia, pues no siempre se puede acomodar satisfactoriamente el componente electrolítico. Modelos experimentales recientes desarrollados en el Instituto Tecnológico de Massachusetts emplean nanotubos de carbono alineados verticalmente para multiplicar la superficie activa. Los nanotubos poseen una forma regular y una anchura de solo varios diámetros atómicos; su diámetro es la tercera parte de la diezmilésima de un cabello y su longitud 100 000 veces mayor que su espesor. Proporcionan un área efectiva mucho mayor y un incremento notable en la capacidad de almacenar cargas.

Usando una tecnología diferente, el proyecto europeo HESCAP (siglas en inglés de Sistema de Almacenamiento de Energía basado en Supercondensadores de Alta Energía y Densidad de Potencia) busca mantener la larga vida útil de los supercondensadores actuales y multiplicar casi por diez su capacidad de almacenamiento para crear sistemas más eficaces de reservas de energía. La nueva tecnología En 1971 León Chua, de la Universidad de Berkeley, predijo teóricamente la existencia de un nuevo elemento pasivo, ba-

sado en la relación entre ϕ y Q , que vendría a ocupar el cuarto lugar vacante hasta el momento. Pero no fue hasta abril de 2008, 37 años después, que la firma Hewlett-Packard anunció la creación del primer dispositivo práctico que funciona sobre la relación del flujo y la carga: el *memristor* (figura 3.9).

nología se basa en descubrimientos recientes sobre las propiedades de nanopartículas de óxidos. Estas partículas muestran un comportamiento promisorio cuando se conforman como una membrana nanoporosa. El proyecto se concedió a un consorcio de firmas de España, Francia, Estonia, Grecia y Ucrania. Comenzó a desarrollarse en abril de 2010 con una duración de 3 años y medio.

3.5 - El cuarto elemento

Los antiguos pensaban que sólo cuatro sustancias o elementos primigenios se encontraban en la esencia de todo lo que existe; ellos eran el agua, la tierra, el aire y el fuego.

Los circuitos eléctricos y electrónicos contienen elementos activos y pasivos. Los pasivos no requieren de una fuente de energía interna para funcionar, y tradicionalmente sólo se ha considerado la existencia de tres de ellos: las resistencias (R), las inductancias (L) y los condensadores (C), también conocidos como resistores, inductores y capacitores.

El funcionamiento de estos tres dispositivos está asociado a 4 magnitudes electromagnéticas: el voltaje (V), la corriente (I), la carga eléctrica (Q) y el flujo magnético (ϕ), que se pueden agrupar por parejas de 6 maneras diferentes. De esas

seis, dos de ellas (I,Q) y (V,φ) se relacionan por su variación en el tiempo (t); de forma simplificada, $Q = It$ y $\phi = Vt$. Otras tres relaciones, que no mostramos, definen los valores de R,L y C ya mencionados. Quedaba una sola pareja sin relacionar: el flujo ϕ y la carga Q.

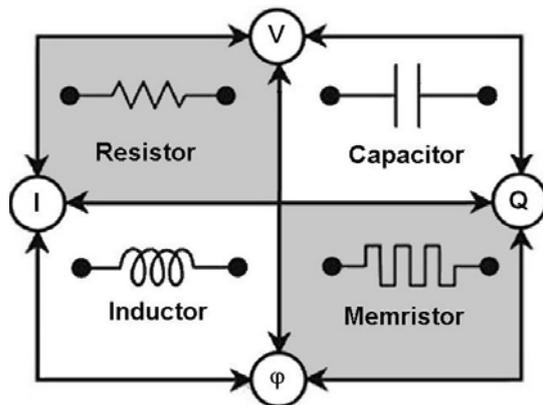


Figura 3.9
Los 4 elementos pasivos en los circuitos eléctricos

¿Qué es un memristor? El término proviene de la unión de memoria y resistor; es una especie de resistencia variable con memoria, pues su valor cambia (y con posterioridad permanece constante en el tiempo) cuando se le hace pasar un pulso de voltaje. Regulando el voltaje se pueden establecer dos valores de resistencia bien diferenciados, lo que permite almacenar datos empleando el sistema binario usual en las computadoras. Este sistema se basa en el empleo de sólo dos estados, ON/OFF ó “1” y “0”. Los datos pueden ser recuperados más tarde, ‘interrogando’ al memristor con otro pulso de voltaje.

Se puede pensar que el memristor es como una tubería por donde pasa una corriente de agua (el flujo Vt) pero de diámetro ajustable. Un resistor corriente equivale a una tubería convencional cuyo

diámetro no varía. Un memristor equivale a una tubería en la que el diámetro aumenta hasta un valor determinado cuando el agua pasa en un sentido (y la resistencia al paso de la corriente disminuye). Pero si el agua pasa en sentido contrario, entonces el diámetro se reduce hasta otro valor (y la resistencia aumenta). Si se corta el flujo de agua, el diámetro del tubo permanece en el último valor alcanzado (y la resistencia se mantiene constante al pasar el tiempo).

Se pronostican grandes avances gracias a estos dispositivos. Por ejemplo, las computadoras deben ser reiniciadas cada vez que se encienden, porque sus circuitos lógicos son incapaces de conservar sus estados ON/OFF una vez que se apagan. Los memristores podrían pasar a formar parte de los circuitos lógicos y ‘recordar’ voltajes, por lo que una computadora basada en memristores no debería necesitar reinicializarse en cada encendido. Se podrían dejar los archivos de texto y hojas de cálculo abiertas en la pantalla, apagar la computadora e irse a cualquier lugar. Al regresar y encender de nuevo el equipo, aparecerían los datos en la pantalla tal como se dejaron.

Se vaticina que al emplear los memristores el procesador y la memoria llegarían a ser la misma cosa, cambiando por completo las ideas presentes acerca del funcionamiento de las computadoras.

Desde 1960 se sabe que, gracias a la reducción de tamaño de los dispositivos, la cantidad de transistores que se pueden introducir en una ‘pastilla’ o chip de computadora se duplica cada dos años, lo que se conoce como la Ley de Moore. Los chips de última generación emplean

transistores con tamaños de unos 22 nanómetros (22 millonésimas de milímetro), pero está claro que la miniaturización no podrá seguir indefinidamente. Los memristores ofrecen un camino alternativo, que permitiría reducir aún más el tamaño tras alcanzar el límite máximo posible para los chips basados en transistores.

Por el momento, la velocidad de cambio de los memristores no alcanza para que se puedan emplear en la memoria principal de un ordenador (la que usa el procesador para almacenar programas y datos durante su funcionamiento). Sin embargo, estos módulos pueden ser utilizados en dispositivos de memoria secundaria como las memorias flash. La aspiración inmediata de la Hewlett-Packard es producir, para el 2013, una flash basada en memristores capaz de almacenar 20 gigabytes por centímetro cuadrado. Tal memoria también almacenaría la información unas 1000 veces más rápido que las memorias flash actuales.

También se especula hasta que punto podrían lograrse computadoras que imiten el funcionamiento del cerebro humano. Cada neurona del cerebro está conectada a otras 10 000 neuronas mediante las sinapsis. No es posible lograr este tipo de conectividad con la electrónica basada en los transistores actuales; sin embargo, los circuitos de memristores podrían llegar a superar este inconveniente.

Memristores de grafeno. En octubre de 2011 investigadores surcoreanos crearon memristores flexibles utilizando el novedoso grafeno (figura 3.10). Los memristores de grafeno tienen un tamaño 1000

veces mayor que los de la Hewlett Packard, contruidos con oxido de titanio, pero según expresan sus creadores, "...no están diseñados para confeccionar memorias ultradensas; aquí las palabras claves son *flexibles y baratos*". Asimismo, aseguran que los memristores de grafeno han mantenido estable el estado de memoria inicialmente inducido desde su creación, no se degradaron después de ser doblados unas 1000 veces y han resistido cambiar del estado 'ON' al 'OFF' unas 100 000 veces, cantidad similar a la permitida por una memoria flash convencional. Se espera que esa cifra aumente hasta un millón de veces en el futuro.



Figura 3.10
Memristores

3.6 Escuchando bajo el agua

Diseñado en sus inicios con fines esencialmente militares, el *sonar* se utiliza actualmente en un sinnúmero de aplicaciones científicas, tecnológicas y comerciales. El nombre proviene del inglés *Sound Navigation and Ranging* (Navegación y Detección por Sonido); es una técnica que emplea la propagación del sonido para navegar o detectar la presencia de navíos, peces u otros objetos bajo el agua. También se utiliza para construir mapas del fondo marino (figura 3.11).

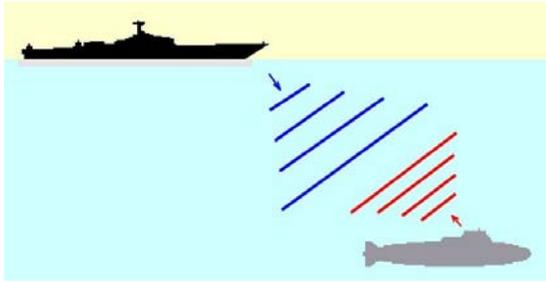


Figura 3.11

Detección por sonar

El matemático francés C. Sturm y el físico suizo D. Colladon midieron la velocidad del sonido en el agua por primera vez en 1826. Sturm golpeó una campana inmersa en un lago a la vez que hacía una señal visual a Colladon, quien usando un detector sumergido logró medir el tiempo que tardaba el sonido en llegar a la orilla opuesta (figura 3.12). El valor medido fue muy cercano al aceptado actualmente, unos 1440 metros por segundo.

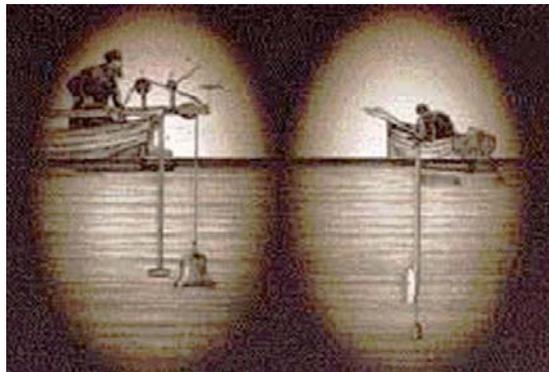


Figura 3.12

Medición de la velocidad del sonido en el agua a 2 °C. (Sturm y Colladon, 1826).

¿Cómo se transmite el sonido? En el aire, cualquier fuente vibratoria como un tambor o un altavoz, comprime y expande alternadamente las capas de aire colindantes, las que transmiten las vibraciones a las capas adyacentes y así sucesivamente, hasta que la perturbación recorre grandes distancias. La vibración se desplaza a una velocidad aproximada de

340 m/s, creando una *onda longitudinal* que se atenúa a medida que se aleja de la fuente. Escuchamos los sonidos cuando la perturbación llega a la membrana timpánica en el oído externo y la hace vibrar, generando señales nerviosas que van al cerebro.

Es posible describir las fases de compresión y expansión de las capas de aire en términos de su *frecuencia* en hertz (vibraciones o ciclos por segundo, abreviado Hz). Nuestras cuerdas vocales pueden generar sonidos entre 100 Hz (sonidos graves) y 10 000 Hz (sonidos agudos) y el oído humano puede detectar de 20 a 20 000 Hz. Perros y murciélagos pueden escuchar frecuencias ultrasónicas, inaudibles para los humanos, de hasta 160 000 Hz, mientras que ballenas y elefantes pueden generar infrasonidos de menos de 20 Hz, también indetectables por los humanos.

En el agua el sonido se propaga de la misma forma que en el aire, pero aquí las capas vibrantes, compuestas por moléculas de agua, transmiten la perturbación a una velocidad casi 5 veces mayor. Conociendo esa velocidad y midiendo electrónicamente el tiempo que tarda la onda en ir y regresar después de reflejarse (eco), se puede calcular la distancia hasta los objetos sumergidos. Comparando fuentes de similar intensidad, los sonidos de baja frecuencia tienden a recorrer mayores distancias que los de alta frecuencia.

La velocidad de propagación de las ondas submarinas varía ligeramente con la temperatura y la profundidad. Esas variaciones pueden crear ‘zonas de sombra’, porque en las capas más calientes las ondas se desvían o *refractan* hacia la

superficie, pero al llegar a regiones más profundas y frías, las ondas se refractan hacia abajo. Se crea así, a cierta distancia del emisor, una región intermedia ‘invisible’ (más bien *inaudible*) para el sonar (figura 3.13).

Aplicaciones militares. El primer dispositivo de localización por eco fue patentado en Estados Unidos por la compañía *Submarine Signal Company* en 1914. Consistía en un oscilador eléctrico que emitía sonidos a baja frecuencia y que, a continuación, se transformaba en un receptor para escuchar el eco. Lograba detectar icebergs por debajo del agua a una distancia de 3 km, pero no podía determinar su dirección de manera precisa. A partir de ese momento los sistemas de detección submarina se fueron perfeccionando rápidamente, y ya en los inicios de la Segunda Guerra Mundial existían sistemas de sonar que podían captar el ruido de las hélices o el eco reflejado por el casco de un submarino a miles de metros de distancia.

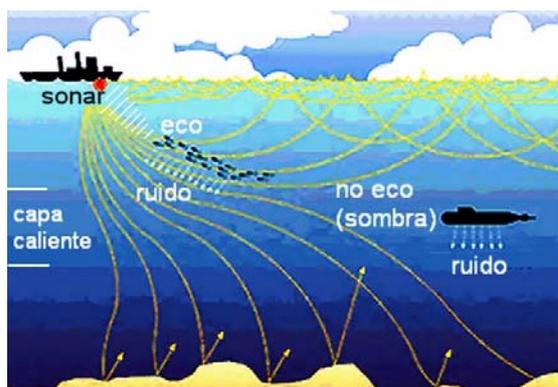


Figura 3.13
Difracción de las ondas sonoras

En el verano de 1937, durante maniobras militares en aguas costeras próximas a la bahía de Guantánamo, surgieron problemas con el sistema de sonar del buque

USS. Semmes que los técnicos de a bordo no podían explicar ni corregir. Por alguna razón desconocida, la eficacia del sonar disminuía sistemáticamente por las tardes; a veces hasta reducirse a cero. El ejército pidió ayuda a los oceanógrafos para investigar el desconcertante efecto, quienes encontraron que al comienzo de la tarde el sol ya había calentado una capa de agua superficial, de 5 a 9 metros de grosor, a una temperatura de 1 a 2 grados centígrados por encima de la del agua que se encontraba debajo. Bajo esta capa superficial caliente el agua se enfriaba rápidamente a medida que aumentaba la profundidad. Como la velocidad del sonido aumenta con la temperatura, los científicos descubrieron que las señales emitidas por el sonar se desplazaban con mayor velocidad a través de la capa caliente y disminuían drásticamente su velocidad al entrar en contacto con la capa inferior más fría. También encontraron que las ondas sonoras se refractaban alejándose de la región en la que la velocidad del sonido era mayor, desviándose hacia la región donde la velocidad era menor. Por esta razón, cualquier submarino que se encontrara situado justamente por debajo de la superficie que separa la capa caliente de la fría no podría ser detectado por las señales del sonar, a causa de región de sombra acústica ya mencionada.

En los años 50 se creó el sistema Sound Surveillance System SOSUS (Sistema de Vigilancia por Sonido), formado por un conjunto de micrófonos submarinos o *hidrófonos* colocados en el lecho oceánico en diversas partes del mundo y conectados por cables submarinos a centros de

procesamiento en tierra. Mediante el sistema fue posible no sólo detectar submarinos, sino también conocer cuántas hélices tenía, si era convencional o nuclear, e incluso el tipo de submarino de que se trataba. El SOSUS se utilizó recientemente para estudiar los movimientos de las ballenas, pues puede detectar sus sonidos a más de 1000 kilómetros de distancia.

El sonar en la naturaleza. La naturaleza creó su propio sistema de sonar mucho antes que lo hiciera el hombre. Los delfines poseen un sistema de ecolocalización que les permite diferenciar el tamaño de pequeños objetos metálicos del tamaño de una moneda. Para entender la naturaleza de un objeto, un delfín se moverá alrededor del mismo generando ondas mediante chasquidos que produce en un órgano vecino al conducto nasal. La vibración pasa primero por una cavidad en la frente del delfín, que la enfoca como si fuera una lente.



Figura 3.14
Sistema de ecolocalización de un delfín.

Cuando la onda resultante encuentra un objeto aparece un eco, que al regreso es detectado por una cavidad llena de grasa en el maxilar inferior del delfín. El eco llega hasta el oído interno y de ahí a su cerebro en forma de impulso nervioso (figura 3.14).

Además de diferenciar tamaños y evaluar la distancia hasta el objeto, el delfín es capaz de distinguir entre diferentes materiales y formas. Puede incluso cambiar la frecuencia de los chasquidos para adaptarse a diversas situaciones. Sin embargo, el sistema de sonar de los delfines no es capaz de detectar las redes de pesca, por lo que muchas veces quedan atrapados en ellas accidentalmente. Para prevenir estos accidentes se emplean actualmente redes equipadas con esferas plásticas, diseñadas para reflejar y amplificar las señales de su sistema de ecolocalización.

Otros detectores submarinos. El sonar no es el único detector submarino creado por la naturaleza. Los peces ciegos de caverna de la especie *Astyanax Fasciatus* pueden percibir su entorno mediante pelos cubiertos de gel que recubren sus cuerpos. Su habilidad para nadar en un ambiente sin luz y detectar objetos sumergidos motivó a un grupo de investigadores de la Escuela de Ingeniería y Ciencia de los Materiales del Instituto Tecnológico de Atlanta, Georgia, a tratar de imitar esos pelos con materiales sintéticos. Según un reporte de marzo de 2010 presentado en la American Physical Society, ya han logrado construir ocho microsensors que los imitan, demostrando que con ellos es posible detectar objetos oscilantes sumergidos. Los

miembros del grupo de investigación alegan que los pelos “son mejores que el sonar activo, que necesita mucho espacio, emite fuertes señales acústicas que podrían tener un efecto perjudicial en el entorno, y resulta inapropiado para aplicaciones que requieran silencio”. En su opinión, los sensores podrían tener una amplia variedad de aplicaciones submarinas, tales como seguridad portuaria, vigilancia marítima, detección temprana de tsunamis, inspección autónoma de plataformas petroleras, navegación de vehículos subacuáticos autónomos e investigaciones marinas de todo tipo.

3.7 Capturando al incapturable

El Cubo de Hielo ‘Ice Cube’ es un colosal detector de neutrinos recién terminado de construir gracias a la colaboración internacional. Está ubicado en el Polo Sur, muy cerca de la base Amundsen-Scott, y cuenta con 4200 sensores o detectores de partículas elementales ubicados dentro de 70 pozos muy profundos, perforados en una región donde el hielo es compacto y uniforme. Los sensores están distribuidos en un volumen de un kilómetro cúbico, a una profundidad entre 1.5 y 2.5 kilómetros (figuras 3.15 y 3.16). Participan en el proyecto Gran Bretaña, EE.UU., Alemania, Suecia, Bélgica, Holanda, Nueva Zelanda y Japón.

Los neutrinos son partículas elementales que no tienen carga eléctrica, poseen una masa ínfima, su interacción con la sustancia es casi nula y los contadores de partículas no los detectan directamente. Es por eso que el Ice Cube se diseñó para detectar partículas cargadas, tales como electrones o muones, que se muevan *hacia arriba*, originadas por las colisiones

de los neutrinos con otras partículas al atravesar el planeta.



Figura 3.15
Taladrando el hielo.

La gruesa capa de hielo de más de 1 km de espesor tiene la función de absorber los *rayos cósmicos* que vienen de arriba. Estos últimos son otro tipo de partículas que igualmente ‘bombardean’ la Tierra en todo momento y que interaccionan fuertemente con la sustancia por ser mucho mayores que los neutrinos. Tales partículas también serían detectadas por los sensores, alterando las mediciones.

Los rayos cósmicos tienen carga eléctrica, son afectados por los campos electromagnéticos y se desvían al viajar, lo que impide determinar su procedencia original. Los neutrinos, sin carga y casi sin masa, viajan en línea recta. Mediante el Ice Cube se podrá conocer su dirección de procedencia y el lugar de origen. Sumando este conocimiento a los que se obtengan por otras vías, será posible comprender fenómenos tales como la aparición de supernovas, huecos negros, formación de estrellas, y profundizar sobre los orígenes del universo.

El Ice Cube no es el único observatorio que ha sido concebido para detectar neutrinos. Los otros son Antares, con los

sensores inmersos en el mar en la costa de Tolón, Francia; el Gran Sasso de Italia, el Súper Kamiokande de Japón y el Subterráneo de Canfranc, en España.

¿Cuáles son las propiedades de los neutrinos? Los escurridizos neutrinos se mueven a velocidades cercanas a la de la luz, son extremadamente pequeños y su interacción con la sustancia es mínima. Atraviesan con facilidad nuestro planeta y pueden provenir de los confines del universo conocido; de ahí la necesidad de utilizar métodos muy complicados para detectarlos y contarlos.

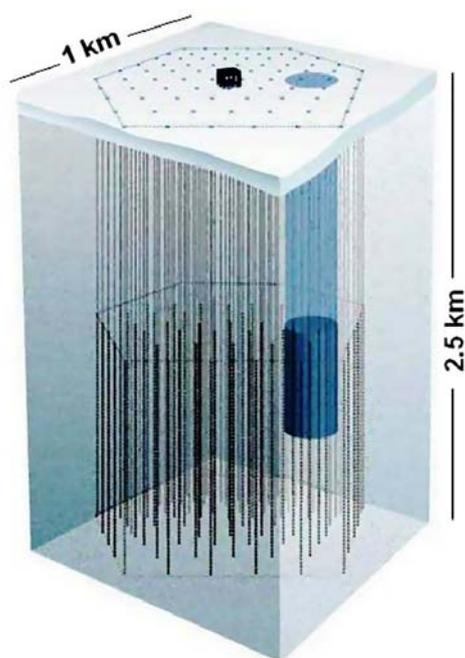


Figura 3.16
El cubo y los sensores.

Es posible hacer estimados de su tamaño, unas diez mil millones de veces menor que un átomo, a partir de cómo interactúan con otras partículas. Para que se tenga una idea: si el átomo tuviera un diámetro de 100 metros (1 cuadra o manzana) un electrón sería del tamaño de un guisante o una canica de ‘jugar a las bo-

las’ (0.5-1 cm) y el neutrino sería entonces un grano de polvo, invisible a simple vista (un millón de veces menor). Por otra parte, la cantidad de neutrinos en el universo es inmensa. A partir del estudio de las reacciones nucleares en el sol, se ha calculado que cada uno de nosotros es atravesado por miles de miles de millones de estas diminutas partículas cada segundo, sin que nada ocurra.

La existencia del neutrino fue propuesta como hipótesis en 1930 para tratar de explicar la supuesta violación de las leyes de la física que tenía lugar en la desintegración β de los neutrones; aparentemente, no se conservaban la energía ni el momento lineal. Para ajustarse a las leyes de conservación, la hipotética partícula no podría poseer carga eléctrica ni masa apreciable y moverse a gran velocidad. Éste tipo de neutrino se denominó más adelante neutrino electrónico (ν_e), porque posteriormente se encontraron los tipos muónico (ν_μ) y taónico (ν_τ), provenientes de otros tipos de desintegraciones.

Su poca interacción con la sustancia hizo muy difícil verificar su existencia. No fue hasta 1956 que su presencia se pudo demostrar experimentalmente y sólo en 1967 se logró encontrar un procedimiento bastante confiable y eficaz para registrarlo. El método era complejo; incluía un tanque de 380 000 litros de disolución de cloro-37, que al interactuar con los neutrinos genera partículas radiactivas detectables. El tanque se enterró en una antigua mina de oro a gran profundidad para protegerlo de los rayos cósmicos y el promedio de neutrinos re-

gistrados fue de uno cada dos días. Posteriormente estos experimentos se repitieron en otros laboratorios y se perfeccionaron hasta llegar al actual Ice Cube.

Pseudociencia neutrínica. Maravillan las fantasías sobre neutrinos que escriben en la Internet los pseudocientíficos contemporáneos. Y también en libros publicados por editoriales supuestamente ‘serias’. Por ejemplo, se puede leer que las pirámides tienen propiedades inexplicables –digamos, desecan a los muertos, pero preservan frescos los alimentos– porque ‘atrapan’ neutrinos, que son ‘atraídos por la negatividad cuántica del vórtice piramidal...’ (explicación que, desde luego, nada explica. Típico de la pseudociencia).

En el libro *Radiestesia integral*, de R.L. Gerula, p. 67, se expone la ‘teoría’ de que... ‘como los neutrinos se convierten fácilmente en electrones (¿de dónde habrá sacado esto?) y los electrones son los responsables de codificar nuestros pensamientos (¿y esto otro?) entonces, mediante los neutrinos, podemos recibir y emitir información codificada hacia el cosmos...’ ¡Hola! Y entonces, ¿por qué la tal ‘transmisión’ no ocurre regularmente entre nosotros? En realidad, si en algún momento los neutrinos lograran interactuar lo suficiente como para ‘codificar’ algo en nuestro cerebro, posiblemente no duraríamos vivos ni una fracción de segundo, literalmente cocinados por la radiación.

3.8. La tecnología No-Frost

Obligadas a descongelar regularmente el refrigerador para eliminar el hielo acu-

mulado, muchas amas de casa se sintieron muy aliviadas al sustituir su antiguo refrigerador por otro basado en una tecnología algo más compleja, pero más eficiente que la de sus antecesores: la tecnología No-Frost (del inglés *frost*: escarcha).

El vapor de agua, siempre presente en la atmósfera, tiende a depositarse como escarcha en las partes más frías de cualquier sistema de enfriamiento; en un refrigerador se deposita en el serpentín o parrilla que se encuentra en el congelador. En los modelos más antiguos, incapaces de auto-descongelarse, la capa de hielo que se forma al transcurrir el tiempo puede alcanzar un espesor de varios centímetros. El hielo reduce drásticamente el volumen real de almacenaje de los productos congelados; además, su conductividad térmica es unas mil veces más pequeña que la del aluminio y actúa como un aislante entre las paredes del congelador y su contenido. El poder aislante de la capa de hielo incrementa la diferencia de temperaturas entre las paredes del congelador y los alimentos, reduce la velocidad de enfriamiento de las diferentes partes del equipo y disminuye la eficiencia del refrigerador en todos los sentidos.

La formación de hielo y escarcha es un proceso continuo. Cada vez que se abre la puerta penetra más vapor de agua del exterior, que tarde o temprano irá a depositarse como escarcha en el congelador. El agua que forma parte de los alimentos también contribuye a este proceso. Cuando los alimentos no están hermetizados o bien tapados, se resecarán al tratar de equilibrar su contenido de agua con

el de la atmósfera que los rodea; la pérdida excesiva de agua puede cambiar su textura e incluso su sabor, como bien sabe toda ama de casa.

En los refrigeradores convencionales la circulación del aire en el equipo cerrado ocurre gracias a la convección: el aire frío, más denso y pesado, se mueve hacia abajo desplazando el aire caliente hacia la parte superior (figura 3.17). Es así como se logra reducir la temperatura en las partes más alejadas del congelador. Algunos modelos poseen un pequeño ventilador para forzar el movimiento del aire y acelerar el intercambio de calor.

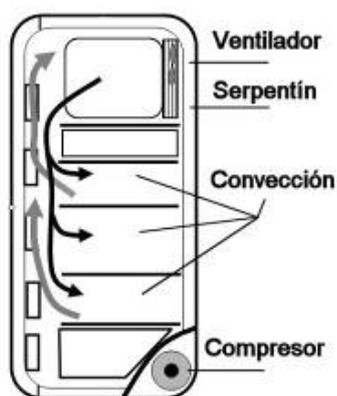


Figura 3.17
Esquema de refrigerador con un solo serpentín

Refrigeradores sin escarcha. Los refrigeradores No-Frost evitan la aparición de escarcha calentando regularmente el congelador para impedir la formación de hielo. Además de los elementos usuales de cualquier refrigerador^a un No-Frost incluye un reloj o *timer*, una *resistencia calefactora* y un *sensor de temperatura* accesorio. Cada 6 horas aproximadamente el timer conecta la resistencia calefactora, que se encuentra distribuida alrededor del serpentín de enfriamiento,

^a Disipador, compresor, regulador, etc. Más detalles

hasta lograr que el hielo desaparezca. En ese momento el sensor accesorio detecta que la temperatura ha subido por encima de la congelación del agua (0° C) y la resistencia se desconecta hasta cuando le toque nuevamente su turno. Así se mantiene el congelador prácticamente libre de hielo todo el tiempo.

Una variante del sistema no-frost convencional es la tecnología *dupla* o *gemela* de la Samsung (*Twin Refrigeration System*), ya desde hace algún tiempo en el mercado. Los fabricantes aseguran que esta tecnología mejora la eficiencia energética y reduce las pérdidas de humedad en los alimentos. En vez de poseer un solo serpentín en el congelador, este sistema posee dos serpentines, dos controles de temperatura y dos ventiladores en compartimientos aislados térmicamente con puertas independientes. La temperatura de cada uno se regula por separado; un compartimiento se usa para congelar y el otro para preservar los alimentos a una temperatura adecuada, sin llegar a congelarlos y researlos (figura 3.18). Según la Samsung, este procedimiento soslaya el inconveniente de incluir conductos complejos que intercambien el aire entre los compartimientos, como ocurre en otros equipos de dos puertas; posibilita un mejor control de la temperatura, una mayor eficiencia en el gasto de energía y evita el intercambio de olores entre las diferentes partes del refrigerador.

¿Por qué el frío húmedo ‘enfriá’ más que el seco? “Se te mete hasta los huesos”;

en la sección 2.6.

expresión que he escuchado muchas veces cuando alguien se refiere al frío acompañado de la humedad que deja un día lluvioso, aunque la persona se encuentre muy bien abrigada. ¿Será acaso que al llover la temperatura disminuye? ¿O es un asunto puramente psicológico, causado por la impresión de la lluvia sumada al frío?

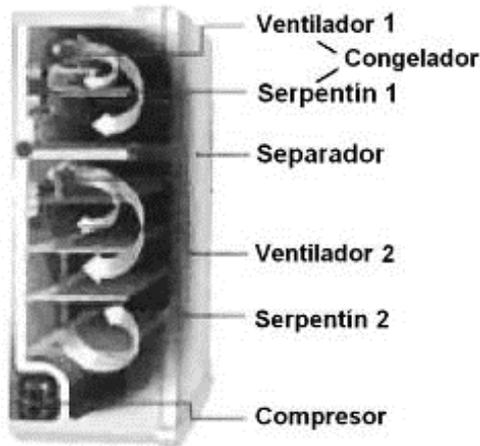


Figura 3.18
Sistema de refrigeración 'twin' con dos compartimientos independientes

NI lo uno ni lo otro.

La respuesta tiene que ver con el aire, el vapor de agua y la conducción del calor.

El aire es un buen aislante del calor. Los tejidos sintéticos impermeables empleados en la confección de abrigos, o los que son mullidos como la lana, mantienen el aire caliente alrededor del cuerpo e impiden que sea sustituido por aire frío proveniente del exterior; así evitan que el calor escape al exterior por difusión o *convección*.^b La lana de vidrio, las espumas

de plástico y los materiales de construcción porosos también son aislantes térmicos por la misma razón, limitan la transmisión del aire contenido en sus poros, que a su vez funciona como un buen aislante del calor.

El aire está compuesto en su mayor parte por oxígeno (O₂) y nitrógeno (N₂). Sus moléculas biatómicas son relativamente grandes, con un diámetro de unos 0.35 nanómetros. El diámetro de la molécula de agua en fase vapor no llega a la mitad, a pesar de estar formada por tres átomos en vez de dos (H₂O). Es por eso que al vapor de agua le resulta más fácil difundirse a través de las rendijas y microporos del abrigo, llegar a la piel y extraer su calor al regresar al exterior. Aunque la temperatura en el exterior sigue siendo la misma, la protección que brinda el abrigo se reduce, y el frío se 'siente' más. (No es éste el único factor que influye; la velocidad del viento también acelera la pérdida de calor, sobre todo en la parte de la piel que está expuesta a la intemperie).

Las prendas sintéticas impermeables impiden el paso del aire y evitan la transmisión del calor por difusión, pero es usual que posean gran facilidad para intercambiar calor mediante otro mecanismo, el de *conducción*. En este caso el calor se transmite directamente de un lado a otro de las superficies del material.^c

La cantidad de agua que se encuentra presente en la atmósfera en forma de vapor se suele indicar mediante la *humedad*

^b Nombre que recibe la conducción del calor por el flujo de aire o líquido que ocurre espontáneamente desde los lugares más calientes hasta los más fríos.

^c Existe un tercer mecanismo de conducción del ca-

lor; la radiación. El cuerpo humano en reposo genera una energía de unos 80 joule cada segundo. Una parte importante de esa energía se emite como radiación electromagnética en la región infrarroja del espectro.

relativa, parámetro usualmente reportado en los partes meteorológicos, pero con un significado de poco conocimiento público.

¿Qué es la humedad relativa? Para contestar esta pregunta es necesario revisar previamente algunos conceptos básicos de la química-física. Considere un recipiente con agua en un recinto cerrado a la temperatura ambiente, al que previamente se le ha extraído el aire. Las moléculas en la superficie del agua tienden a pasar espontáneamente a la fase vapor, y una parte de ellas regresa a la superficie del líquido o se deposita en las paredes del recinto, de donde también se pueden evaporar. Cuando la cantidad de moléculas que se evaporan en la unidad de tiempo es igual a la cantidad que se deposita, se alcanza el *equilibrio líquido-vapor* a la temperatura dada (figura 3.19).

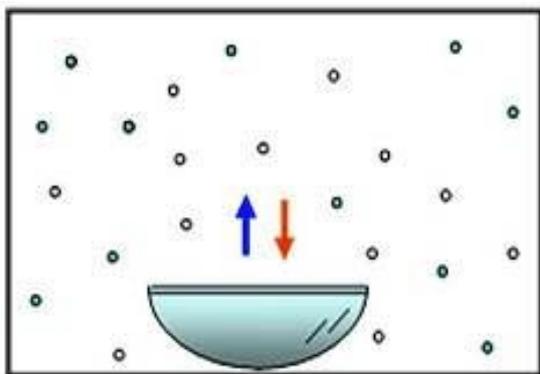


Figura 3.19
Intercambio líquido-vapor

Las moléculas en fase gaseosa ejercen presión sobre las paredes del recipiente, la *presión de vapor saturado* P_s . Lo de 'saturado' viene del hecho que si se inyecta más vapor de agua la presión no aumenta; el vapor en exceso se condensa,

pasando a fase líquida. El valor de P_s aumenta con la temperatura; por ejemplo a 27°C tiene un valor de 3.5 % de la presión atmosférica, que se eleva al 4.3 % a 30°C. Es posible comprobar que estos resultados no dependen de si hay o no aire en el recipiente, por lo que es común hablar de la presión *parcial* del vapor de agua para significar que esa presión es independiente de la presencia de otros gases (tanto en el recipiente como en el medio ambiente, si nos referimos a la atmósfera).^d

Si a una temperatura específica el agua de la vasija se consume antes de que se alcance el valor de P_s correspondiente, la presión alcanzada P será menor que la saturación P_s ; no hay agua suficiente en el recipiente para generar todo el vapor necesario para alcanzar la saturación. Se define entonces la *humedad relativa* (H) por la siguiente expresión:

$$H = (P/P_s) \times 100 .$$

Así, un 80% de humedad relativa significa que la presión (parcial) de vapor de agua en la atmósfera es igual a 0.8 de la presión de saturación, a la que el agua en exceso comenzaría a condensarse sobre cualquier superficie.

Si el vapor se encuentra en contacto con superficies que están a diversa temperatura, el agua comenzará a condensarse sobre las más frías, porque a menor temperatura le corresponde una presión de vapor saturado menor. Eso es lo que ocurre, por ejemplo, en las rejillas de enfriamiento de los equipos de climatización, o en el interior de las ventanas de vidrio

^d La presión total es la suma de las presiones parciales (Ley de Dalton).

cuando llueve y la temperatura del vidrio disminuye ligeramente a causa de la lluvia. Algo parecido ocurre en la madrugada, cuando es usual que la temperatura se reduzca bruscamente y se alcance el *punto de rocío*. En ese momento el vapor de agua en la atmósfera se encontrará por encima de la presión de vapor saturado y se condensará sobre cualquier superficie,

incluyendo las hojas de los árboles (figura 3.20).

¡Ah! Y si la temperatura en la madrugada baja hasta los cero grados centígrados, el vapor de agua se deposita en fase sólida, formando *escarcha*, muy común en los refrigeradores de modelo antiguo que carecían de la tecnología ‘No-Frost’.



Figura 3.20. Rocío y escarcha

3.9 Climatización pasiva

Durante el verano, el cambio de temperatura del día a la noche en las islas tropicales rara vez sobrepasa los 10 ó 15 grados centígrados; sin embargo, en territorios de clima continental esas variaciones alcanzan con facilidad 25 grados o más. En Cuba la temperatura máxima en el verano no suele sobrepasar los 35° a la sombra, mientras que es poco frecuente que las mínimas diurnas descendan más allá de los 20°. No obstante, un termómetro colocado en una azotea o en una pared expuesta al sol en las horas de mayor insolación puede alcanzar fácilmente más de 50 grados. Cuando el techo de un inmueble es de baja altura, o su grosor o el de las paredes es pequeño, el calor y la alta temperatura se propagan con facilidad hacia el interior. Si además la ventilación es pobre y no hay climatización, la

sensación de calor puede llegar a ser mayor dentro del edificio que fuera de él. La construcción se convierte así en una especie de almacén térmico – y en una tortura para quienes estén en su interior.

Es posible reducir el calor excesivo y hacer más frescos los edificios, o contribuir a reducir en un por ciento significativo la energía gastada para climatizarlos, empleando cubiertas y paredes externas gruesas, construidas con materiales de baja conductividad térmica y que reflejen lo más posible la radiación solar. El inconveniente principal es que se requiere un gasto mayor de material, con el correspondiente incremento de los costos de fabricación.

Existe una posibilidad adicional para atenuar el calor, que a la larga pudiera resultar menos costosa y más eficiente. Consiste en redistribuir el calor absorbido por

las paredes insertando en ellas materiales de cambio de fase (Phase Change Materials, PCM).

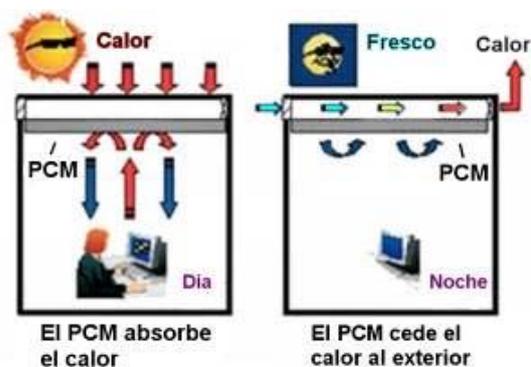


Figura 3.21

Sistema de climatización pasiva usando un material PCM. Las corrientes de convección envían el aire fresco, más denso, hacia abajo.

Estos materiales son capaces de absorber el calor durante el día para devolverlo al medio ambiente en la noche, cuando la temperatura ha disminuido y muchas construcciones como edificios públicos o escuelas se encuentran desocupados (figura 3.21). Un PCM puede absorber de 5 a 14 veces más calor por unidad de volumen que el hormigón u otro material similar, lo que permite reducir el grosor de las paredes y cubiertas sin afectar su comportamiento térmico. El PCM se puede seleccionar de acuerdo a las condiciones locales para que absorba el calor en el momento que más se necesita. Por regla general, estos materiales son más eficientes en aquellos lugares donde las diferencias de temperatura entre el día y la noche son de mayor amplitud.

¿Cómo funciona un PCM? Cuando una sustancia capaz de existir en fase sólida y líquida en condiciones normales se coloca en algún recipiente y se somete a la acción del calor, su temperatura aumenta

continuamente hasta alcanzar el punto de fusión-solidificación. A esa temperatura el sólido pasa a fase líquida, pero la temperatura de la mezcla sólido-líquida no sigue aumentando; se mantiene constante en el punto de fusión hasta que el sólido desaparece totalmente. Sólo entonces la temperatura del líquido seguirá creciendo (figura 3.22). En la práctica, lo usual es que la transformación no ocurra exactamente a una temperatura dada, sino en un pequeño intervalo de 1 ó 2 grados centígrados. Obviamente, la duración del proceso dependerá de la cantidad de sustancia presente.

La causa de este comportamiento es que se necesita energía para romper los enlaces cristalinos del sólido y aumentar la movilidad de las moléculas al pasar a la fase líquida. Mientras quede sólido en el sistema, el calor suministrado será absorbido por esos enlaces. El proceso es reversible: si la temperatura del líquido disminuye, cuando se alcance el punto de fusión-solidificación ocurrirá el proceso inverso; los enlaces se vuelven a formar y el calor que se absorbió con anterioridad ahora será expulsado al medio ambiente, a temperatura constante (calor de solidificación).

Los materiales habituales empleados como PCM son los hidratos salinos inorgánicos y las parafinas y ácidos grasos orgánicos. Cada grupo posee sus ventajas y desventajas. Las sales hidratadas poseen altos valores del calor de fusión, no se inflaman y son de bajo costo. Sus desventajas consisten en que muchas de ellas son corrosivas, poco estables y suelen presentar problemas de subenfria-

miento. Durante los ciclos de fusión-solidificación tienden a recristalizar parcialmente formando hidratos con menor contenido de agua que modifican las propiedades físico-químicas del material como un todo; este último proceso no es reversible y tiende a reducir la eficiencia térmica del PCM con el tiempo.

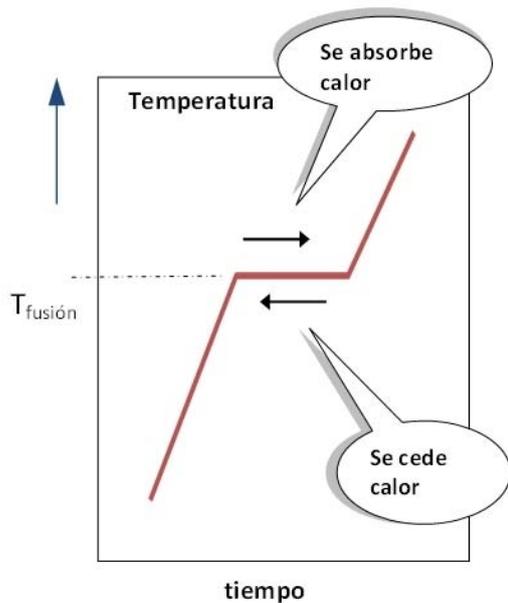


Figura 3.22
Transición sólido-líquido en un PCM. A la izquierda de la línea horizontal sólo hay fase sólida. A la derecha sólo hay líquido. En la región horizontal coexisten el sólido y el líquido. La fusión es endotérmica; la solidificación, exotérmica.

Los materiales orgánicos son más estables que los inorgánicos, no presentan problemas de subenfriamiento, no son corrosivos y no segregan otras fases durante las transformaciones.

Son más caros que los inorgánicos, aunque no excesivamente, pero también tienen otros inconvenientes: su calor de fusión-solidificación es menor que el de los hidratos, son inflamables y pueden generar vapores dañinos durante un incendio; unos pocos han mostrado la posibilidad

de reaccionar con los productos que forman el hormigón. Otros problemas que pueden presentar los PCM orgánicos son el envejecimiento térmico oxidativo, un cambio de volumen apreciable durante la transición, o incluso la emanación de olores indeseables. Una selección apropiada del material puede obviar muchas de estas características negativas.

Tabla 3.1		
Sales hidratadas y compuestos orgánicos PCM		
	Punto de fusión (°C)	Calor de fusión
Fluoruro de potasio tetrahidrato KF. 4H ₂ O	18.5–19	231
Cloruro de calcio hexahidrato CaCl ₂ .6H ₂ O	29.7	171
Estearato de butilo CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COO(CH ₂) ₃ CH ₃	18–23	140
Dodecanol CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OH	17.5–23.3	188.8
Octodecano (grado técnico) CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CH ₃	22.5–26.2	205.1
Palmitato de propilo CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOC ₃ H ₇	16–19	186
Mezcla 45/55 Acido cáprico-acido láurico 45% CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH/55% CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	17-21	143
El punto de fusión-solidificación de las ceras parafinas depende del número de átomos de carbono en la cadena principal. Su calor de fusión es superior a los 200 kJ/kg.		

La tabla 3.1 muestra algunas sustancias usadas como PCM. Sus puntos de fusión varían entre 16 y 30 °C, alrededor del promedio de 22-23 °C, temperatura que resulta agradable para la mayoría de las personas. Para que el proceso de absorción-emisión de calor sea realmente eficaz también es necesario garantizar una buena conductividad térmica entre el PCM y sus alrededores.

Los primeros intentos de emplear estos materiales para regular la temperatura se

toparon con el siguiente problema. Para incluir al PCM en el material de construcción era necesario encapsularlo en una bolsa de material adecuado (impermeable, inerte, no degradable), pero al comenzar la recristalización el sólido se depositaba en la superficie interna de la cápsula, apantallando su interior.

La capa sólida resultante dificultaba la transmisión del calor y, tras varios cientos de ciclos de fusión-cristalización, el PCM no lograba transformarse en su totalidad a la temperatura deseada. Se reducía así notablemente la eficiencia del proceso a causa de la pobre conductividad térmica y el insuficiente intercambio con el medio ambiente.

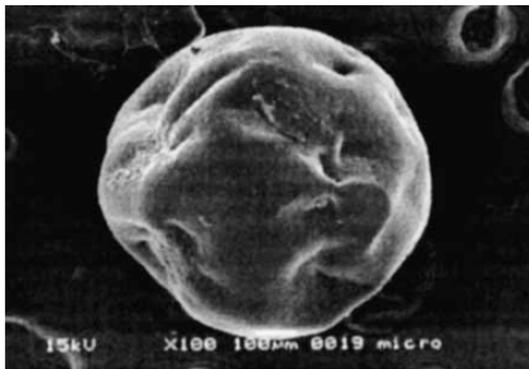


Figura 3.23
Microcápsula de parafina para composito.



Figura 3.24
PCM comercial compuesto de yeso, cápsulas de parafina y cubierta de fibra de vidrio.

Se logró obviar este inconveniente al introducir la técnica de micro-encapsulado, que proporciona una buena conductividad gracias al incremento de la superficie de contacto de la cápsula con el medio que lo rodea, pues cualquier material finamente dividido incrementa notablemente su cociente superficie/volumen. La tecnología del microencapsulado permite incorporar el PCM con facilidad en diversos materiales de construcción, incluyendo el hormigón (figuras 3.23).

Aunque posee menos conductividad térmica que cualquier sal inorgánica, la parafina ha sido un material muy estudiado para estos fines. Funde alrededor de los 22-24 grados Celsius, posee un calor de fusión-solidificación aceptable, y se puede encapsular en acrílico a formar esferas de 5 a 10 micrómetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$) (figura 3). Los ensayos han mostrado que la parafina encapsulada no pierde sus propiedades tras realizar 10 000 ciclos de fusión-solidificación, lo que equivale a unos 30 años de uso continuo. Con estas microesferas se construyen materiales compuestos (compositos) como el de la figura 3.24, formado por yeso y parafina con cubierta de fibra de vidrio, para ser usado como revestimiento en cualquier local.

Otras aplicaciones. Los PCM ya se aplican en procesos tan disímiles como la protección térmica de equipos electrónicos, para ayudar a proteger los alimentos en los frigoríficos, o para atenuar los picos exotérmicos en reacciones químicas industriales. También se incorporan microcápsulas de PCM en la ropa y otros géneros con el fin de regular la temperatura corporal.

Una persona en reposo genera un calor de unos 80 watt y esa cantidad aumenta cuando la persona se encuentra en movimiento. *Una idea aproximada del significado de esta cifra se puede obtener comparando con el hecho de que una docena de personas en reposo genera aproximadamente un calor igual al de una hornilla eléctrica de 1000 watt.*

En los lugares fríos los PCM microencapsulados permiten almacenar el calor generado por el cuerpo al hacer ejercicio y recuperarlo más adelante si fuera necesario, cuando la persona se encuentra en reposo y genera menos calor.

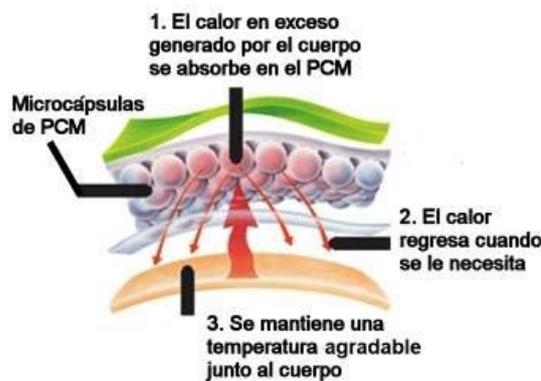


Figura 3.25

Edredón con tecnología PCM incorporada.

Promovida como una tecnología desarrollada por la NASA para usar en los trajes espaciales, ya existen en el mercado edredones y almohadas que se publicitan como efectivos para atenuar los cambios de temperatura corporal durante el sueño. La madrugada es más fría que la medianoche, y cada persona posee su propio ritmo natural de cambios de temperatura. La finalidad que se persigue es que el cobertor se adapte automáticamente a los cambios, evitando calentamientos o enfriamientos excesivos y manteniendo en todo momento una temperatura agradable para quien duerme (figura 3.25).

3.10 Láser, arte y arqueología

Durante el proceso de restauración y conservación de los objetos de arte, la limpieza de las superficies suele traer aparejados una serie de problemas espinosos. Por ejemplo, no es raro que la incrustación que se desea remover sea más resistente a los tratamientos de limpieza que la capa a recuperar, que se encuentra a mayor profundidad. Aunque no sea así, los diferentes tratamientos químicos o mecánicos (por abrasión) que se emplean de forma usual suelen atacar las diferentes capas con similar eficacia, de aquí que al limpiar una siempre exista la posibilidad de dañar seriamente la otra que se desea preservar.

La experiencia indica que la solución del problema está en una mezcla de fina observación por parte del restaurador, control del tiempo de exposición al tratamiento y, desde luego, habilidad y experiencia. De esa forma se llega a un compromiso, eliminando lo indeseable y causando el menor daño posible a la superficie de la obra de arte. Una consideración adicional es el posible perjuicio al operario, causado por la exposición continua a los vapores de las diversas sustancias químicas manipuladas en la limpieza. Usar un equipo de protección no siempre es aconsejable, pues puede impedir al especialista la cuidadosa observación y el control necesarios para el tratamiento óptimo de la superficie.

Dada la sensibilidad y fragilidad de las superficies en las obras artísticas, lo anterior explica el por qué, durante mucho tiempo, se buscaran – y aún se busquen – nuevas técnicas que soslayan los incon-

venientes de los métodos químicos y mecánicos convencionales. Ya desde hace más de 30 años diferentes técnicas ópticas, que incluyen el uso del láser, han mostrado su utilidad en la conservación de las piezas de arte. Estas técnicas incluyen la limpieza y decapado, análisis no destructivo, display holográfico, caracterización de superficies mediante fluorescencia láser y ultrasonido inducido por láser (figura 3.26).

La ablación láser. El mayor impacto de las técnicas láser en la restauración de piezas artísticas ha sido, sin lugar a dudas, su aplicación al decapado y limpieza, mediante el método conocido como ablación (extirpación, remoción) por láser. Se utiliza la energía luminosa del láser para volatilizar puntualmente, de forma controlada, las sustancias indeseables.



Figura 3.26

Interferogramma holográfico láser que resalta los detalles de la superficie de una obra de arte.

El decapado con láser muchas veces es menos costoso y de menor riesgo que los métodos tradicionales de limpieza química o mediante abrasivos. El procedimiento se ha utilizado para eliminar todo

lo indeseable (suciedad, sedimentos, materiales envejecidos) en obras de arte confeccionadas tanto con sustancias orgánicas como inorgánicas, tales como piedra, cerámicas, metales, madera, pergamino, papel, cuero, telas y superficies pintadas.

Los contaminantes removidos incluyen todo tipo de incrustaciones como depósitos de calcio, sulfatos y óxidos. También musgo, líquenes, hollín, tierra, barnices deteriorados y pinturas superpuestas. La remoción con láser se ha empleado en prácticamente cualquier tipo de objeto museable, incluyendo numerosos edificios históricos y contemporáneos. Pero no todo es color de rosa. Durante el decapado con láser se emiten gases y partículas microscópicas de posible daño para el operador, por lo que también es necesario tomar este factor en consideración.

Los primeros intentos de remover la suciedad en monumentos de piedra con este procedimiento ocurrieron en Venecia, alrededor de 1975. Se logró limpiar con láser muchas esculturas de piedra y edificios como el Palacio Ducal. Más adelante la técnica fue extendiéndose poco a poco a otros usos, con algunos altibajos. Con posterioridad se encontró que podrían crearse problemas por las variaciones térmicas bruscas en la superficie, por la redeposición de los contaminantes o por la velocidad a que ocurría el proceso. Entonces se añadieron técnicas adicionales como son las de enfriar el punto caliente con un chorro de gas inerte (argón), humedecer la superficie previamente a la aplicación del láser, o llevar a cabo el tratamiento con la pieza sumergida en agua o algún otro líquido.

El caso de mayor complejidad que se conoce hasta el momento es el de recobrar el color de pigmentos calcinados, como ocurrió en la restauración de los famosos Guerreros de Terracota de la Dinastía Qin. Por regla general, los resultados se comprueban comparando las superficies antes y después del tratamiento mediante diversas técnicas, como pueden ser la Fluorescencia o Difracción de Rayos X y la Microscopía de diversos tipos.

Aplicaciones arqueológicas. Los láseres también se aplican en el mundo de la arqueología. Un artículo reciente de investigadores argentinos del Museo Mario Brozoski y del Centro de Investigaciones Ópticas de ese país, reporta el uso de la técnica LIBS (Láser Induced Breakdown Spectroscopy) para limpiar diversos objetos recuperados de un naufragio y estudiar su composición (figura 3.27),

Los objetos pertenecían a la corbeta de guerra HMS SWIFT, construida por el ejército británico en 1762 y hundida en la Patagonia el 13 de marzo de 1770 durante una tormenta. Hasta el momento de la publicación del reporte, las técnicas láser habían permitido identificar la composición de 8 piezas de metal rescatadas del naufragio. Conocer la composición permite seleccionar adecuadamente los tratamientos de conservación específicos para cada pieza.

3.11 Microscopios contemporáneos

Los microscopios logran hacer visible lo invisible; aumentan el tamaño aparente de los objetos y permiten observar lo que a simple vista pasaría inadvertido a causa de su pequeñez.



Figura 3.27
Hebilla rescatada de un naufragio de 1770 en la Patagonia. Antes (izquierda) y después (derecha) del tratamiento con láser.

Hasta hace pocos años la única posibilidad era la de utilizar un *microscopio óptico*, que emplea un complejo sistema de lentes creado con ese fin. Hoy día esos microscopios son una herramienta de trabajo imprescindible para estudiar tejidos animales o vegetales, revelar la existencia de microorganismos y otras muchas

aplicaciones biológicas. También existen los microscopios metalográficos, que se usan para analizar la superficie de minerales, aleaciones, cerámicas o cualquier otro material. Logran visualizar la microestructura superficial de una muestra, que siempre resulta ser muy diferente de lo que se puede observar a simple vista.

La *microscopía electrónica* es posterior a la microscopía óptica. Para conseguir el aumento se usa la propiedad que tiene un haz de electrones de comportarse como si fuera un rayo de luz. Con este microscopio se alcanza un mayor grado de detalle que con el óptico (y también un mayor aumento). Adicionalmente, posibilita estudios que no son factibles de llevar a cabo con el microscopio óptico. El microscopio electrónico no usa lentes; en su lugar emplea campos electromagnéticos para enfocar el haz de electrones y obtener las imágenes aumentadas de los objetos.

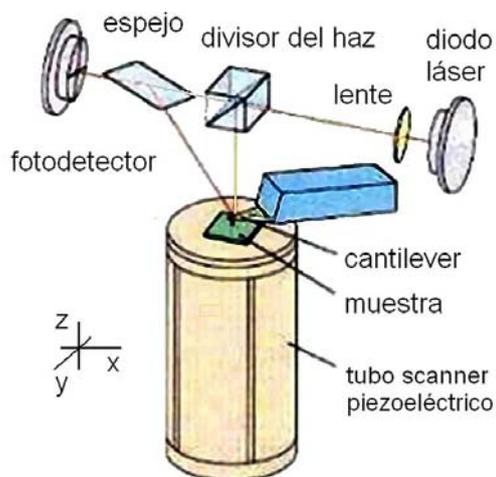


Figura 3.28. Esquema del microscopio de fuerza atómica

Los microscopios de última generación – los microscopios de *fuerza atómica*

MFA- poco o nada tienen que ver con lentes o campos electromagnéticos. El MFA es un instrumento mecano-óptico capaz de detectar fuerzas del orden de los nanonewton. Al analizar una muestra, se puede registrar continuamente la altura de una sonda o punta cristalina al deslizarse sobre la superficie a analizar. La sonda, de forma piramidal, va acoplada a un listón microscópico (cantilever) muy sensible a la acción de las fuerzas; tiene unos 200 μm de longitud (figura 3.28).

La fuerza atómica se puede detectar cuando la punta está muy próxima a la superficie de la muestra; es posible entonces registrar la pequeña flexión del listón mediante un haz láser reflejado en su parte posterior. Un sistema auxiliar piezoeléctrico desplaza la muestra mientras que la punta recorre ordenadamente la superficie. Todos los movimientos son controlados por computadora.

La resolución del instrumento es menor de 1 nm, y la pantalla de visualización permite distinguir detalles en la superficie de la muestra con una amplificación de varios millones de veces.

Moviendo átomos con el microscopio. Ya en 1989 un equipo de la IBM había demostrado que se podía usar la punta de un Microscopio de Efecto Túnel (MET) para mover átomos. Usando uno de estos microscopios el equipo logró deletrear las letras "I-B-M" a partir de 35 átomos individuales de xenón sobre una superficie de níquel. El microscopio de efecto túnel funciona mediante propiedades eléctricas; mide la corriente entre la aguja y la muestra a partir de una diferencia de potencial que se establece entre am-

bas. A partir de ese momento los microscopios túnel se popularizaron para mover átomos en situaciones aún más complicadas, pero sólo en materiales conductores, capaces de conducir la corriente eléctrica. No se podían manipular átomos individuales en una superficie no conductora.

No fue hasta mayo de 2003 que se logró utilizar la aguja de un Microscopio de Fuerza Atómica para levantar un átomo de una superficie no conductora y reemplazarlo por otro. Fue el primer experimento donde se manipularon átomos individuales usando un método puramente mecánico, en vez de uno que empleara la corriente eléctrica.

La figura 3.29 muestra el resultado del experimento. A la izquierda se indica el átomo que se extrajo posteriormente, y a la derecha el 'hueco' dejado por él en la red cristalina. El átomo extraído no se muestra.

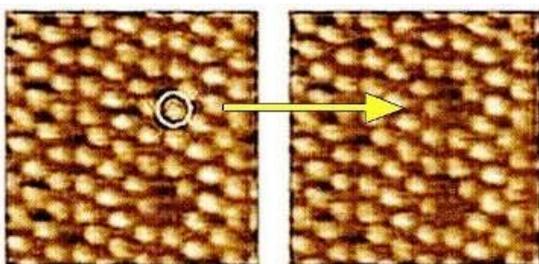


Figura 3.29
Extrayendo un átomo de su lugar.

El modo de trabajo usual en un MFA es el de barrido por contacto. El sistema se regula de modo que la repulsión entre el listón y la muestra se mantiene constante todo el tiempo; midiendo la fuerza necesaria para mantener la repulsión constante es posible determinar la altura.

Otros modos de funcionamiento son el de

altura constante, que posibilita una mayor velocidad de barrido; el modo sin contacto, de menor resolución y el dinámico, muy parecido al modo común, pero sin contacto con la muestra.

Midiendo energías cuánticas. Cuántica (del latín quantum –cantidad-) significa 'cuantificada'. El término surgió del hecho, ampliamente comprobado en la práctica, de que en los sistemas ultramicroscópicos, con tamaños del orden atómico/molecular, la energía no puede tomar cualquier valor. Tales sistemas sólo admiten valores de energía que sean múltiplos enteros de otro valor único. Como si la energía viniera en 'paquetes' o cantidades muy bien definidas: los cuantos o 'quanta' de energía.

Se denominan quantum dots (puntos cuánticos) los cristales semiconductores que poseen dimensiones del orden del nanómetro (la millonésima parte de un milímetro). Se investigan intensamente en la actualidad, porque los especialistas consideran indispensable develar sus propiedades para crear las computadoras de la próxima generación.

Cuando las dimensiones son tan pequeñas, los efectos cuánticos se manifiestan en toda su plenitud, pero las energías involucradas en los procesos son ínfimas, por lo que resulta imposible medir sus valores usando métodos convencionales. Conocer esos valores es muy importante, pues sólo así será posible llegar a comprender las propiedades eléctricas del quantum dot, algo indispensable para poder diseñar componentes con mejores propiedades.

Las computadoras actuales trabajan sobre la base de dispositivos semiconductores que, al funcionar, sólo pueden ocupar uno de dos posibles estados estables: encendido y apagado (ON/OFF). Las computadoras cuánticas de nueva generación estarían basadas en dispositivos capaces de trabajar con estados múltiples. Si tales dispositivos se logran construir, se podría reducir aún más el tamaño de los procesadores y, a la vez, incrementar muchas veces la velocidad de operación de las computadoras. Los quantum dots tienen mucho que ver con la creación de las computadoras cuánticas.

A principios de mayo de 2010 investigadores de la universidad McGill, en Montreal, reportaron el desarrollo de un sistema para medir las energías asociadas al intercambio de electrones en un quantum dot. Con ese fin emplearon el sensor cantilever de un microscopio de fuerza atómica, con una longitud de medio milímetro (el grosor de una uña) y un espesor 100 veces menor.

El principio físico sobre el que se basa la medición es simple. El cantilever se pone a oscilar y se mide su amortiguamiento mientras interacciona con el 'quantum dot'. Como refiere el Dr. Peter Grütter, Decano de la Facultad de Ciencias de la McGill, el procedimiento "...equivale a medir cuan fuerte se debe empujar a un niño en una hamaca para que, al columpiarse, alcance siempre la misma altura. El tratamiento matemático es equivalente en ambos casos." Al cambiar las condiciones de la muestra, también cambian las condiciones de oscilación y el correspondiente amortiguamiento. A partir de ahí es posible obtener

la información necesaria para calcular los niveles energéticos asociados a la transferencia de electrones.

El grupo de investigación de la McGill espera que este nuevo método de medición tenga múltiples e importantes aplicaciones, tanto en la investigación teórica como en la aplicada.

El microscopio de fuerza magnética. Este microscopio utiliza un pequeñísimo listón ultrafino de silicio (al centro de la parte superior en la figura 3.30) de menos de 0.1 mm de longitud, con una punta magnética nanométrica capaz de detectar la señal asociada a un electrón individual que se encuentra debajo de la superficie de la muestra. El listón o cantilever vibra a baja frecuencia (unos 5 kHz) mientras la muestra se desplaza mediante un mecanismo auxiliar.

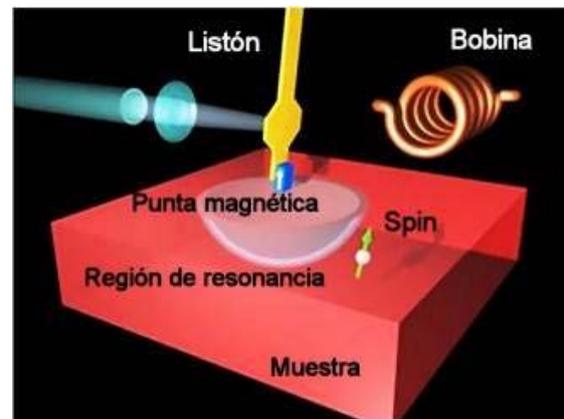


Figura 3.30
Microscopio de fuerza magnética

El momento magnético de spin de cada electrón (representado por la flecha) se comporta como un pequeño imán, y puede atraer o repeler la punta magnética según su orientación. La interacción magnética tiene lugar en la región sombreada en forma de tazón, la "región de resonancia". Un campo magnético de

alta frecuencia, generado por una bobina (arriba a la derecha), hace variar continuamente la orientación del electrón mientras la zona de resonancia pasa por su posición. Entonces, la fuerza magnética entre el electrón y la punta magnética se alterna continuamente entre atracción y repulsión. Esto hace que la frecuencia original de oscilación del listón se altere ligeramente.

Un haz láser (izquierda) se utiliza para medir con precisión las variaciones de la frecuencia del listón, y de aquí se obtiene la información requerida (estado de la magnetización en regiones nanométricas de la muestra).

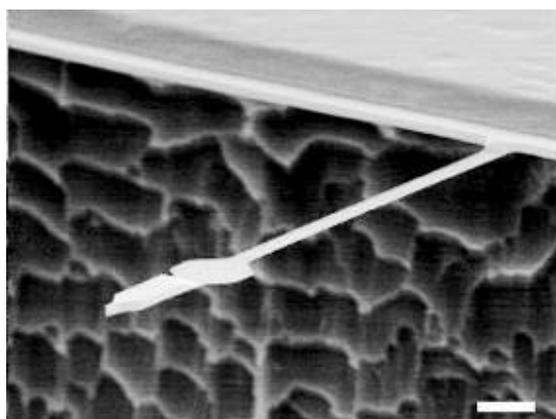


Figura 3.31
Listón o cantilever. La barra blanca indica una longitud de 10 μm .



Figura 3.32
Cabezal. La barra blanca indica 1 μm .

Conformado como un trampolín en miniatura, el listón MFM de la figura 3.31 tiene una longitud de 85 μm , equivalente al diámetro de un cabello y un espesor de solamente 100 nm, la milésima parte de un cabello. A causa de su delgadez, el listón es extremadamente flexible y puede detectar fuerzas del orden del attonewton (10^{-18} newton). El listón vibra con su frecuencia natural de 5000 Hz y las variaciones de frecuencia inducidas por la presencia del spin electrónico, del orden de 1 en un millón, son detectadas por el sensor láser.

La punta magnética adosada al listón del MFM es el principal elemento para la detección (figura 3.32). Con un espesor de sólo 150 nm, es capaz de generar un campo magnético lo suficiente intenso y muy localizado. Es la interacción de este campo con el momento magnético de spin lo que causa que el listón sea atraído o repelido por el electrón de acuerdo a su orientación relativa. La región engrosada al final del listón tiene la finalidad de añadir masa para reducir las vibraciones mecánicas de alta frecuencia que pudieran perturbar la medición.

3.12 Luminarias de nueva generación

Aún estábamos acostumbrándonos a las lámparas fluorescentes compactas LFC cuando se nos echó encima la nueva generación de luminarias, los bombillos LED, del inglés ‘Light Emission Diode’ ó Diodo Emisor de Luz (figura 3.33). En estas luminarias, cada ‘bombillo’ está en realidad constituido por muchos “bombillitos” o LEDs, cuya luminosidad se suma hasta ser suficiente para un alumbrado normal.

Los LEDs se han venido utilizando desde hace años como indicadores en equipos de radio, TV, relojes, videos y computadoras, pero su costo no les permitía rivalizar con las luminarias convencionales en otras aplicaciones (figura 3.34). Sin embargo, el precio ha ido disminuyendo lo suficiente como para que ya sean capaces de competir seriamente en

el mercado. Hay modelos tanto para baterías como para corriente alterna convencional de 110 ó 220 volt.

Un precio típico de un bombillo LED de baja potencia en el mercado minorista europeo era en 2010 de unos 3 euros aunque, desde luego, hay modelos de muy diversos tipos, tamaños, potencias y precios.



Figura 3.33 - Lámparas LED

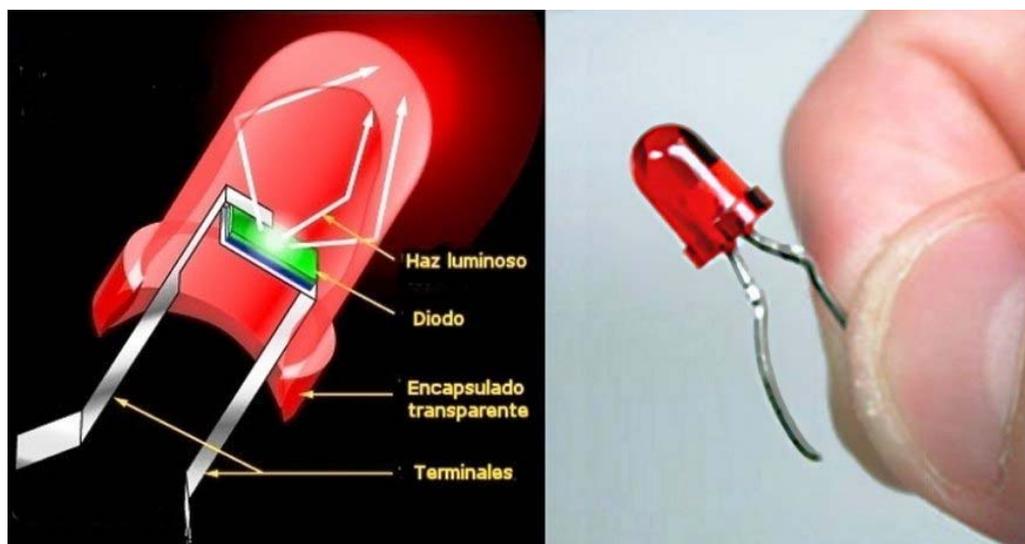


Figura 3.34 – LED encapsulado

Una unidad común de medida para medir la eficiencia de cualquier luminaria es el lumen/watt; el lumen mide la intensidad

luminosa y el watt la cantidad de energía por unidad de tiempo que hay que gastar

para generar esa intensidad. Las lámparas LFC, similares en su funcionamiento a los tubos fluorescentes o luz fría, generan de 48 a 60 lumen/watt. Su eficiencia, también comparable a la luz fría, es mucho mayor que la de los antiguos bombillos incandescentes, que sólo proporcionaban entre de 6 a 17 lumen/watt.

La eficiencia promedio de un bombillo LED es algo menor que la de un LFC (unos 30 lumen/watt) aunque ya hay lámparas que generan hasta 100 lumen/watt, pero con un precio que puede resultar prohibitivo. Por ejemplo, un LED de 8 watt con el mismo poder de iluminación que un incandescente de 60 watt costaba 120 USD en 2010.

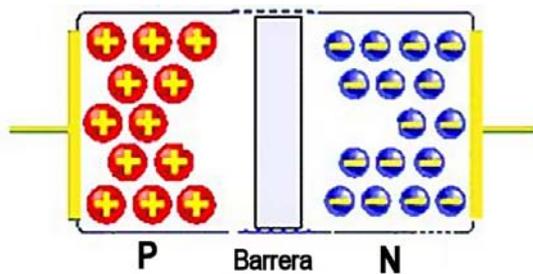


Figura 3.35 – Unión PN

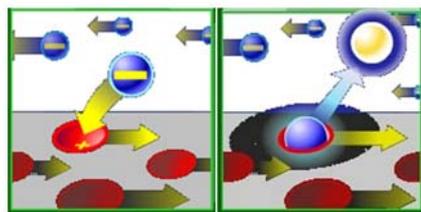


Figura 3.36
Recombinación de un par electrón-hueco y emisión de un fotón.

A cambio de este alto precio el fabricante garantiza 30 000 horas de servicio (7 años a 12 horas diarias). Otros mencionan hasta 50 000 y 60 000 horas de uso efectivo. Ventajas adicionales son la resistencia a los golpes y a los cambios de temperatura, la ausencia de filamentos y

ruido (recordar la vibración de algunas lámparas fluorescentes), encienden al instante y pueden trabajar directamente con bajo voltaje.

Su empleo resulta más eficaz en sistemas que sean difíciles de sustituir o reparar, o que estén sometidos a golpes o vibraciones y que no requieran gran luminosidad. Ejemplos son los semáforos y señales de tránsito en carreteras o en sistemas ferroviarios, señales en automóviles y bicicletas, linternas, interior de viviendas, anuncios y carteleras, escenarios, galerías e iluminación externa de edificios. Para poder trabajar al voltaje de la red comercial se añade un circuito miniaturizado resistor-capacitor-rectificador, encapsulado en la misma lámpara, para reducir el voltaje a niveles adecuados.

¿Cómo funciona un LED? El diodo emisor de luz funciona a partir del fenómeno conocido como ‘recombinación del par electrón-hueco’ en una unión PN, ya descrita en la sección 2.5 al explicar el funcionamiento de las celdas solares.

El diodo creado por una unión PN posee tres regiones bien diferenciadas en el entorno de la unión: la región N con electrones en exceso, la P con defecto de electrones, y una región intermedia de transición: la ‘barrera’ aislante, de unas pocas capas atómicas de espesor (figura 3.35). Para hacer pasar un electrón (o un hueco) a través de la barrera hay que hacer un trabajo contra las fuerzas ejercidas por los núcleos atómicos del material soporte.

Con este fin se aplica una pila o batería a electrodos colocados en los extremos, para así crear una diferencia de potencial

a través de la juntura (el borne positivo de la batería se conecta a la región P). De esta manera se logra que los electrones ‘salten’ la barrera, se cierre el circuito y se establezca una corriente eléctrica continua mediante la recombinación ininterrumpida de electrones y huecos. Como cada recombinación tiene asociada la emisión de un fotón o cuanto de luz, durante el proceso se genera luz visible (figura 3.36).

Los valores típicos de la corriente en el circuito oscilan entre 2 y 20 mA. Note que los electrones no desaparecen durante la recombinación, sino que sencillamente pasan a ocupar un ‘hueco’ durante su recorrido y siguen contribuyendo a la corriente.

Cuando la batería se conecta con la polaridad invertida, los electrones son atraídos hacia el contacto más cercano y los huecos hacia el opuesto: la corriente no puede pasar y no hay luz. De hecho, la primera aplicación de las junturas PN fue en dispositivos rectificadores de la corriente alterna, ya que solo dejan pasar la corriente del lado P hacia el N y no en sentido contrario, -siempre que la diferencia de potencial inverso no sea excesivamente grande (entre 2 y 5 volt máximo), lo que destruye la juntura-.

Variando los materiales del substrato y las impurezas se pueden lograr LEDs que emitan luz de diferentes colores, en un intervalo que varía desde el infrarrojo (como en los mandos de los televisores) hasta el ultravioleta, pasando por todo el espectro visible. La obtención de luz blanca es relativamente reciente, e involucra técnicas como la de usar un LED

ultravioleta para excitar una mezcla adecuada de sustancias fluorescentes, que a su vez emiten una combinación de muchos colores del espectro (luz blanca), similar a lo que ocurre en los tubos fluorescentes convencionales.

3.13. Teflón, material maravilloso

Teflón es el nombre comercial empleado universalmente para designar al politetrafluoretileno (PTFE) y otros materiales de la misma familia. Su estructura microscópica es la de un polímero, formando largas cadenas de una sección básica elemental que se repite (el monómero). La fórmula química de cada sección elemental es similar a la del polietileno $\text{CH}_2=\text{CH}_2$, con los hidrógenos (H) sustituidos por flúor (F) (figura 3.37).

Fue creado accidentalmente en 1938 por el químico Roy J. Plunkett, de la transnacional DuPont, mientras investigaba la forma de obtener nuevas sustancias refrigerantes. Al tratar de caracterizar el nuevo material, Plunkett descubrió que era inerte a todos los disolventes, ácidos y bases disponibles.



Figura 3.37. Teflón

Inicialmente, aunque se reconocía que el teflón era un material inusual, no se sabía

muy bien qué hacer con él. Las primeras evaluaciones técnicas y económicas sobre los costos para fabricar productos útiles fueron desalentadoras; resultó muy difícil justificar las primeras inversiones para su producción a gran escala, lo que retardó bastante la aparición de productos basados en el teflón.

La virtud principal del Teflón es que resulta ser prácticamente inerte y no reacciona con otras sustancias químicas, excepto en situaciones muy especiales. Sólo es atacado por metales alcalinos en estado elemental, por trifloruro de cloro y por flúor elemental a altas temperaturas y presiones. La carencia de reactividad hace que su toxicidad sea prácticamente nula.

Otra cualidad característica es su imper-

meabilidad; además, mantiene inalterables sus cualidades en ambientes húmedos. Piezas de teflón, expuestas durante veinte años a condiciones climáticas extremas, no han mostrado alteraciones en sus propiedades. Es también un excelente aislante eléctrico y sumamente flexible, no se altera por la acción de la luz y es capaz de soportar temperaturas desde $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Su cualidad más conocida es la antiadherencia y es por eso que, en cualquiera de sus variantes, se utiliza para recubrir el interior de sartenes y cazuelas (figura 3.38). Desde luego, se necesita un tratamiento especial a alta temperatura para que la fina capa quede adherida al material de la sartén. Una propiedad adicional, no menos importante, es que resulta ser el material con el coeficiente de rozamiento más bajo que se conoce.



Figura 3.38 - Aplicaciones domésticas del teflón.

La fricción es una fuerza mañosa. Cuando los referimos al contacto entre dos sólidos se habla de rozamiento. Si el contacto se refiere al de un sólido con un líquido o un gas, entonces tenemos viscosidad. Ambos términos, rozamiento y viscosidad, se refieren a las fuerzas de fricción, pero las propiedades no son las

mismas. La viscosidad depende exclusivamente de las propiedades del líquido y de la velocidad relativa de las superficies en contacto. El rozamiento es prácticamente independiente de la velocidad una vez que las superficies han comenzado a moverse.

La fricción por rozamiento es una fuerza

mañosa. Siempre que dos superficies están en contacto, la fricción está presente. Pero a diferencia de otras fuerzas que actúan siempre en el mismo sentido como la gravitatoria, que invariablemente tira de los cuerpos hacia la tierra, la fricción no lo hace así. Si se coloca la mano ejerciendo presión sobre la superficie de una mesa y se intenta deslizarla hacia adelante, la fricción actuará hacia atrás. Pero si desea mover la mano hacia atrás, entonces la fricción actuará hacia adelante. Siempre contraria al movimiento.

La fuerza de rozamiento depende a su vez de la fuerza de interacción perpendicular a las superficies en contacto. (Mientras más fuerte se haga presión sobre la mesa, más difícil será deslizar la mano) y también depende de otro factor, el coeficiente de fricción o rozamiento. Para cada par de superficies sólidas existe un coeficiente diferente, y mientras mayor sea este coeficiente también será mayor la fuerza de rozamiento. Así, por ejemplo, el coeficiente toma un valor entre 0.4 y 0.6 para dos superficies de acero pulido (como en los ejes de una carreta sin caja de bolas). Ese valor se reduce a 0.05-0.1 si el eje se engrasa adecuadamente (porque el rozamiento cambia a viscosidad, con otras leyes). Sin embargo, si una superficie es de acero y la otra de teflón, el valor del coeficiente de rozamiento se reduce unas 10 veces, hasta 0.04.

Con el transcurso de los años el teflón se ha convertido en un material de amplias aplicaciones domésticas, industriales y aeroespaciales. Además de la fabricación de cazuelas, sartenes, moldes para hornear y otros utensilios de cocina, a

causa de su bajo coeficiente de fricción la industria mecánica lo emplea en la producción de engranajes y diferentes mecanismos autolubricados. La industria automotriz lo usa para fabricar diferentes tipos de mangueras, frenos, filtros de aceite y escobillas de limpiaparabrisas que no hacen ruido. También se utiliza ampliamente en la industria eléctrica y electrónica como aislamiento externo o forro de alambres y cables, como dieléctrico para separar las chapas de los condensadores variables de los radioreceptores, en la fabricación de semiconductores y, en general, como material aislante de la electricidad.

3.14 Desinfectando con el Sol

La inventiva de cuatro estudiantes de ingeniería de la Universidad de Washington, C.J. Cheng, C. Matlack, P. Huang y J. Linnes, les valió para ganar un premio de 40,000 dólares en diciembre de 2010, en un concurso organizado para beneficio de los menos favorecidos. Convocado por la Fundación no gubernamental SODIS, con sede en Bolivia, el certamen buscaba cómo verificar en el terreno la efectividad del tratamiento solar para desinfectar el agua y hacerla apta para el consumo humano.

El número de muertes infantiles por desórdenes intestinales a causa del agua contaminada supera el millón y medio anual; la Fundación SODIS promueve desde hace años un método solar sencillo y barato para potabilizar el agua y reducir esa cifra.

En el concurso colaboraron y aportaron fondos otras tres organizaciones no gu-

bernamentales sin fines de lucro. Se evaluaron más de 70 propuestas antes de que

el proyecto de los estudiantes se escogiera como ganador.



Figura 3.39. Método SODIS de desinfección

El método SODIS. SODIS, del inglés *Solar Disinfection*, propone una forma de salvar vidas infantiles casi sin costo alguno, que también puede ser útil en situaciones de desastre, cuando el agua potable escasea. Una botella plástica transparente, de capacidad no mayor de 3 litros, se llena de agua, se recuesta en una azotea o en cualquier otro sitio sobre una teja corrugada y se expone al sol durante al menos 6 horas. Las botellas con un ligero tono azulado también sirven para este fin. La radiación solar ultravioleta, más el calentamiento que se genera durante la exposición, aniquilan a la mayoría de los microorganismos contaminantes en el agua (figuras 3.39 y 3.40).

No es imprescindible una alta temperatura; el método funciona incluso cuando está nublado, pero necesita un tiempo de exposición mucho mayor, de 2 días. Se asegura que el proceso elimina más del 99.9 por ciento de las bacterias y los virus, resultado similar al que proporciona la cloración del agua.

La Fundación SODIS presenta en su sitio WEB un listado de unos 20 artículos científicos que dan fe de la eficacia del método. Según esos reportes, la luz solar elimina con efectividad bacterias, virus y

la mayoría de los parásitos, mientras que el pesquisaje médico en el terreno muestra que las diarreas son mucho menos frecuentes entre la población que usa SODIS que en sitios vecinos, donde se ingiere el agua sin aplicar el tratamiento solar.



*Figura 3.40
Desinfectando el agua*

Algunas objeciones como, por ejemplo, que el polietileno de las botellas puede ser dañino a la salud, también han sido investigadas y halladas sin fundamento.

Verificando el proceso. No obstante sus ventajas manifiestas, y a pesar de los esfuerzos de las organizaciones humanitarias, la adopción del método solar de desinfección ha avanzado muy lentamente a escala global. El grado de contaminación, la turbidez del agua y la intensidad promedio de la radiación pueden diferir de un lugar a otro, y lo usual es que no se pueda verificar de inmediato si el agua tratada está de veras apta para el consumo. Esas razones llevaron a convocar el concurso, con vistas a encontrar un procedimiento adecuado para comprobar en cada sitio la eficacia de la desinfección.

Al acometer la tarea, los estudiantes intentaron en un inicio medir la calidad del agua usando una tira de prueba química, pero más tarde se decidieron por un sistema optoelectrónico que combina conocimientos de distintas especialidades ingenieras. La técnica adoptada finalmente emplea un sensor sensible a la luz para hacer el trabajo. El equipo ideado posee los mismos componentes que se encuentran en una calculadora solar de las más económicas, pero acoplados y programados de forma diferente. Cuenta con un indicador que se mantiene encendido al inicio y comienza a parpadear cuando se inserta una botella. El parpadeo cesa y el indicador se apaga cuando el agua ha alcanzado suficiente irradiación y se encuentra lista para el consumo. Al retirarse la botella, se regresa a la condición inicial.

Entre las características que influyeron en la decisión del jurado se encuentra que el equipo premiado toma en cuenta el material de la botella y la turbidez del

agua. Además posee un diseño robusto, una larga vida y su costo es muy competitivo. Las bases del concurso estipulaban diseños que costaran menos de 10 USD; los estudiantes calcularon que el costo de las piezas utilizadas era de sólo \$3.40 a precios minoristas, valor que deberá reducirse a precios mayoristas.

Desinfectante... ¿También descontaminante? En el pasado mes de junio la edición Internet de la revista *Catalysis Today* reportó una nueva técnica, basada exclusivamente en la luz solar, que elimina los restos de contaminantes que aún quedan a la salida de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Los contaminantes pueden ser, por ejemplo, residuos de fármacos (analgésicos o antibióticos) o plaguicidas. En relación a ellos, la coordinadora del grupo de investigación que trabajó en el proyecto, la profesora Ana María Amat, ha declarado: ‘Todos estos compuestos tienen en común que son poco o nada biodegradables, y por tanto refractarios a los tratamientos biológicos convencionales.’

Desarrollado por un grupo de investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia, el método se basa en el empleo de la luz solar UV para la degradación catalítica de los contaminantes (*proceso fotofenton*). Se destaca por su alta rentabilidad y bajo gasto energético; sólo se consume energía en el imprescindible bombeo de agua en el interior de la planta. Las primeras pruebas han proporcionado resultados muy positivos, reduciendo la concentración de contaminantes por debajo del límite de detección ‘en cantidades que ya no afectan a los ecosistemas’.

3.15 Las matemáticas y la tomografía

Por insólito que pueda parecer a algunos, las ideas básicas que se emplean como fundamento de los modernos métodos tomográficos tienen casi 100 años. Fueron descritas en 1917 por el matemático Johann Radon, en un trabajo estrictamente teórico donde presentó lo que hoy se conoce como la Transformada de Radon.

Pero vayamos por partes.

De las más de veinte técnicas tomográficas que existen en la actualidad sin dudas las más conocidas son la Tomografía Axial Computarizada (TAC) y la formación de Imágenes por Resonancia Magnética (IRM), muy comunes en los hospitales para obtener información visual e inmediata del interior del cuerpo humano. Sin embargo, es menos conocido que las técnicas tomográficas también se aplican en otras muy diversas áreas del conocimiento como la arqueología, la geofísica, la oceanografía, la astrofísica, la biología y la ciencia de materiales.

El término tomografía proviene del griego *tomos* (corte o rebanada) y *grafein* (escribir). El procedimiento mediante el cual se obtienen las imágenes del interior de los objetos, en dos y tres dimensiones, se denomina *reconstrucción tomográfica*.

La formación de Imágenes por Resonancia Magnética sigue un principio similar a la Tomografía Axial Computarizada, descrita en detalle más adelante, pero en vez de rayos X la IRM emplea ondas de radio de alta frecuencia para escanear al paciente. También existen técnicas médicas tomográficas que usan una fuente

emisora de radiación dentro del sujeto, no en su exterior. Ese es el caso de la Tomografía de Emisión de Positrones (TEP), que mide la radiación gamma emitida durante un proceso de aniquilación electrón-positrón en el interior del organismo. Los compuestos radiactivos que generan la radiación se inyectan al paciente en el momento del análisis tomográfico y tienen un período de actividad muy corto.

Otras técnicas emplean distintos agentes o principios físicos. También existen, entre otras, la Tomografía de Microscopía Confocal Láser, la de Inducción Magnética, la de Capacitancia, la de Resistividad, la de Impedancias, la Acústica Oceánica, la Sísmica, la Zeeman-Doppler y la Tomografía Cuántica.

En la Tomografía de Impedancias se obtiene una imagen de la conductividad eléctrica interna de una parte específica del cuerpo humano a partir de múltiples mediciones superficiales. Para ello se colocan electrodos en la piel del sujeto y se aplica una corriente alterna muy pequeña. Los voltajes resultantes se registran y el proceso se repite para muchas configuraciones diferentes de los electrodos.

La Tomografía Óptica se emplea de forma similar a la de Rayos X cuando el objeto de estudio es semi-transparente. Emplea pulsos de luz de gran intensidad en la región roja o infrarroja del espectro, donde el coeficiente de transmisión luminosa de los tejidos es mayor. Funciona mejor en tejidos que poseen mayor transparencia; por ejemplo, en los mamas o en el cerebro.

En la Tomografía Sísmica se usan explosiones controladas para registrar las ondas T (transversales o de cizallamiento) y las ondas P (longitudinales o de presión) que acompañan a los terremotos, usando un conjunto de sismómetros como sensores. Al medir las diferencias del tiempo de llegada de las ondas de diverso tipo a cada sensor, se logra identificar las regiones del subsuelo donde éstas avanzan más lento o más rápido. Con esos datos se puede levantar un mapa tridimensional de las características físicas del terreno en profundidad. Si el procedimiento se aplica a las ondas sísmicas naturales se obtiene información sobre las características térmicas del planeta en las capas más profundas.

En la actualidad algunas de estas técnicas se emplean de forma simultánea en un mismo instrumento, como es el caso de la TAC y la IRM combinadas.

¿Cómo se adquieren los datos en un tomógrafo? Resulta conveniente seleccionar la Tomografía Axial Computarizada como ejemplo ilustrativo de la reconstrucción tomográfica de imágenes.

Radiografía convencional. En una radiografía convencional, la región del cuerpo que se desea ‘fotografiar’ se irradia empleando una fuente emisora de Rayos X en reposo, capaz de ‘iluminar’ de forma más o menos homogénea la región deseada.

Al atravesar el cuerpo, la radiación forma una imagen en la placa fotográfica o pantalla detectora ubicada del otro lado del sujeto, que también se encuentra en reposo. Las regiones claro-oscuras de la radiografía ya procesada corresponden a la menor o mayor opacidad de los Rayos X en cada región atravesada por el haz; es mayor en los huesos y menor en los tejidos blandos.

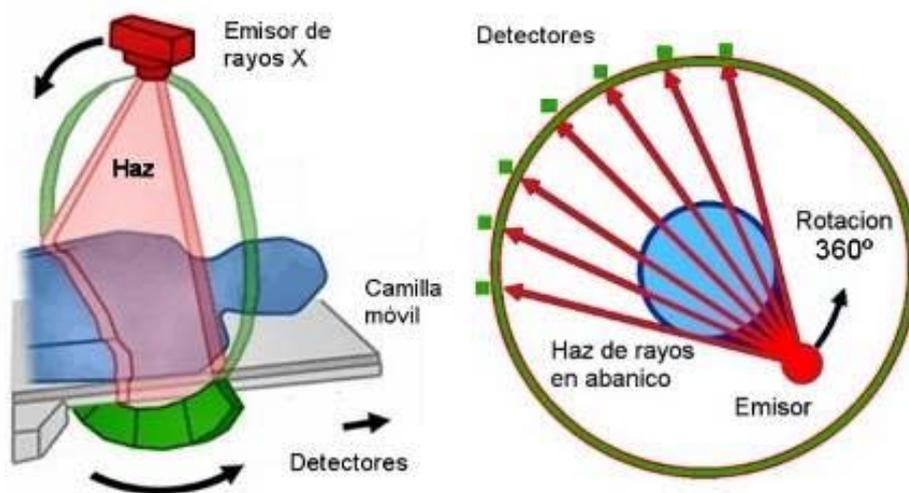


Figura 3.41. Geometría básica de un equipo de Tomografía Axial Computarizada de cuarta generación.

Note que en las radiografías convencionales siempre se emplea el negativo de la foto, por lo que los contrastes aparecen invertidos. Es por eso que los huesos,

más opacos a los Rayos X, se ven más claros que el tejido blando que los rodea. En resumen: en una radiografía convencional la fuente emisora genera un haz de

Rayos X capaz de iluminar la región deseada en su totalidad. El sujeto, la fuente emisora y el detector no cambian de posición mientras se realiza la radiografía.

Tomografía. En un tomógrafo de Rayos X tanto el paciente como la fuente y el detector están en movimiento durante el registro de datos. Una camilla móvil desplaza la región de interés a través de una abertura circular, donde se encuentra el sistema de formación de imágenes (figura 3.41). Mientras la camilla y el paciente avanzan, la fuente de Rayos X rota en la parte interior de la abertura, generando un haz de pequeño grosor en forma de abanico. Este haz cubre una sección

transversal muy estrecha del paciente, de 1 a 10 mm según el equipo de que se trate, y es perpendicular al movimiento de la camilla. Los tomógrafos de primera generación usaban un emisor simple de Rayos X y un solo detector; ambos se trasladaban formando un pequeño arco. En la segunda y tercera generaciones se añadieron emisores y detectores múltiples para formar un haz de poco grosor en forma de abanico y así reducir el tiempo de exposición; también se amplió el recorrido circular. En la cuarta generación el recorrido se extendió hasta cerrar el anillo. En los equipos más modernos cada barrido circular tarda menos de 0.4 segundos.

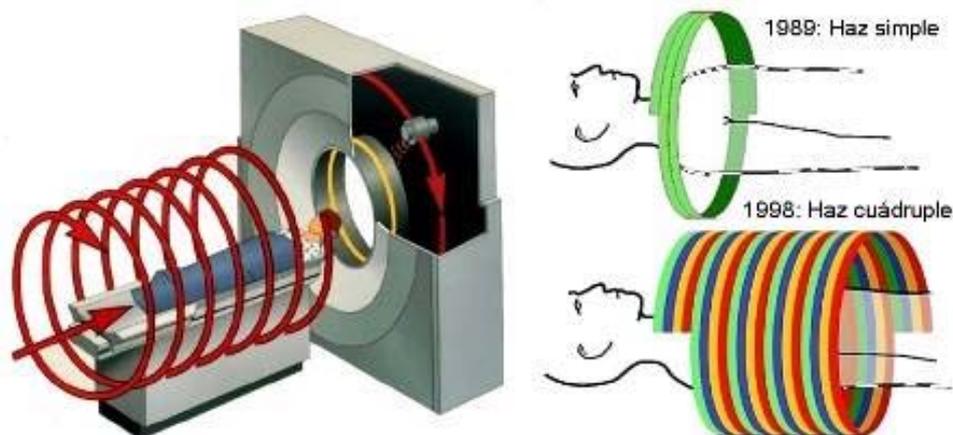


Figura 3.42. Al avanzar la camilla el haz va barriendo la parte del cuerpo a analizar. La información que se obtiene al barrer cada circunferencia se procesa matemáticamente para formar una imagen en dos dimensiones (una ‘rebanada’ o ‘corte’ transversal del paciente). Combinando las imágenes en dos dimensiones se crea una imagen tridimensional

El resultado de los movimientos combinados produce una espiral que permite recoger información de la parte deseada del cuerpo en forma continua, desde todas las direcciones posibles en cada plano de rotación (figura 3.42). Los datos tomados en cada circunferencia, después de procesados, proporcionan una imagen

bidimensional de la correspondiente sección transversal, denominada ‘rebanada’ o ‘corte’ (figura 3.43). Estos ‘cortes’ se recombinan posteriormente para formar una imagen de tres dimensiones que se puede proyectar en un monitor, almacenar en algún soporte, o imprimirse.



Figura 3.43 “Corte” tomográfico del abdomen de una persona. Se observan claramente las costillas, riñones, columna vertebral y otros órganos

Componer la imagen tomográfica del ‘corte’ a partir de los datos registrados en los detectores requiere de una enorme cantidad de cálculos que hacen imprescindible el uso de una computadora; de ahí el nombre ‘computarizada’. Algo similar sucede con la formación de la imagen tridimensional a partir de los ‘cortes’.

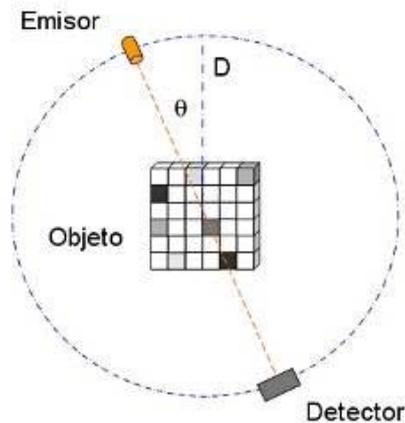


Figura 3.44 El detector registra la opacidad promedio μ a lo largo de una dirección dada, representada por el ángulo θ . Mediante la transformada de Radon se puede obtener la opacidad de cada cubo individual siempre que se procesen los datos correspondientes a una gran cantidad de pares de valores μ, θ .

¿Cómo se forma la imagen a partir de los

datos? Para ilustrar cual fue el problema matemático resuelto en 1917 que permitió la existencia de la tomografía, considere un objeto plano dividido en pequeños cubos como aparece en la figura 3.44 y un fino haz de Rayos X que atraviesa el objeto en una dirección arbitraria. La mayor o menor opacidad a la radiación está representada por cubos oscuros y claros respectivamente. A mayor cantidad de cubos oscuros a lo largo de una dirección dada, menor cantidad de radiación llegará al detector. Obviamente, el procedimiento sólo proporciona información sobre la opacidad de los cubos que se encuentran a lo largo de esa dirección particular. Además, la información sobre cada cubo individual es parcial, porque el detector sólo registra un promedio de la opacidad de todos los cubos atravesados por el rayo en cada dirección (la que corresponde a un valor particular del ángulo θ y la distancia D en 3.44).

Al rotar el emisor y el detector alrededor del objeto, se obtiene un conjunto de valores promedio para distintas direcciones, que obviamente difieren entre si y contienen información sobre los cubos restantes. Mientras más direcciones o mas valores de θ se consideren, mayor información existirá para procesar los datos posteriormente y más precisos serán los resultados, aunque la complejidad del problema a resolver aumenta enormemente, por el gran número de variables que aparecen. Como resultado final se obtiene una gran cantidad de datos sobre ángulos y opacidades promedio, que contiene información sobre todos los cubos, pero sin que se conozca la opacidad particular de cada uno de ellos.

Y la pregunta que surge de inmediato es la siguiente: ¿existirá alguna forma de obtener la opacidad de cada cubo a partir del conjunto de promedios medidos para los diferentes ángulos θ ? Pues sí, existe. De hecho, la descripción anterior es una forma de presentar el problema resuelto por Radon en 1917. Sin embargo, no fue hasta más de 40 años después que Allan M. Cormack y Godfrey N. Hounsfield, investigando de forma independiente, lograron construir el primer equipo práctico que trabajara sobre la base de este principio. Ambos compartieron el premio Nobel de medicina en 1979.

No es posible explicar o representar en forma sencilla las matemáticas que se requieren para procesar los datos y resolver el problema de los cubos. El resultado se basa en nociones de cálculo avanzado, que incluyen tanto la transformada de Radon como la de Fourier. Se puede encontrar información adicional sobre estas funciones matemáticas en

<http://plus.maths.org/content/saving-lives-mathematics-tomography>.

La Tomografía de Haz Electrónico. La Tomografía de Haz Electrónico (THE) es una variante reciente de la Tomografía Axial Computarizada. Se creó para lograr un barrido del haz muy rápido y así conseguir imágenes más nítidas del corazón, que nunca deja de latir. Si el objeto de estudio no permanece en reposo durante el barrido la imagen saldrá borrosa, en forma similar a lo que a veces sucede en una fotografía ordinaria.

En la Tomografía de Haz Electrónico un valor típico de barrido es de 0.025 segundos, más de 10 veces menor que en los

mejores equipos TAC contemporáneos.

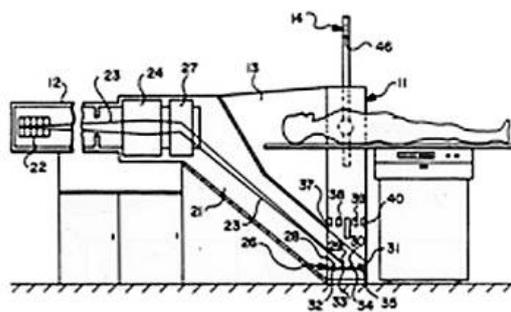


Figura 3.45

Tomógrafo de Haz Electrónico. 11.- Tubo gigante de Rayos X; 14.- Detectores; 22.- Generador del haz (cañón de electrones); 23.-Haz de electrones; 24,27. Lentes magnéticas; 28-31. Anillos de tungsteno para generar los Rayos X (ánodos); 37-40; Ventanas colimadoras. (El haz de Rayos X no está representado en la figura).

En vez de usar un tubo de Rayos X convencional rotando alrededor del sujeto, la THE emplea un tubo de Rayos X gigante, con una geometría que rodea la cabeza y torso de paciente (figura 3.45). Los Rayos X se crean de la misma manera en cualquier tubo convencional, generando electrones que chocan con un ánodo metálico a gran velocidad (radiación de frenado). La diferencia estriba en que ahora el ánodo ya no es una pequeña placa metálica, sino que está formado por secciones semi-circulares de tungsteno que se ubican rodeando parcialmente al paciente. El haz de electrones se hace recorrer las secciones de tungsteno por medios electrónicos, y al impactar sobre ellas generan haces de Rayos X, que también hacen un recorrido semi-circular, en este caso a través del paciente hasta llegar al detector

La supresión de los movimientos mecá-

nicos de emisores y detectores es el 'ar-did' que permite al haz de Rayos X sondear al paciente en diversas direcciones y recolectar los datos a mucha mayor velocidad que en un tomógrafo convencional. Sin embargo, los equipos de Tomografía por Haz Electrónico son caros; cuestan el doble y su tamaño es mayor que el de sus antecesores. En 2004 existían solamente unos 120, una cantidad muy pequeña comparada con los miles de tomógrafos TAC que existen en todo el mundo.

3.16. La tomografía de emisión de positrones

En agosto de 2005 la reconocida revista The Journal of Neuroscience publicó un artículo proveniente de la Universidad de Michigan sobre los mecanismos de liberación de *endorfinas* analgésicas en el cerebro. Estas sustancias, también conocidas como *mu-opioides* endógenos, las genera el propio organismo en respuesta a determinados estímulos externos.

Las endorfinas son capaces de unirse a los denominados *receptores mu-opiáceos* de las células cerebrales para anular la transmisión de las señales de dolor de una a otra célula. La heroína, morfina, metadona y otros narcóticos calman el dolor actuando de manera similar. Estudios previos habían demostrado que el cerebro reacciona liberando endorfinas cuando las personas reciben algún tratamiento simulado contra el dolor. El fenómeno es bien conocido desde los años 50 y se denomina *efecto placebo*. Es norma común tomarlo en cuenta al realizar ensayos clínicos con nuevas terapias o medicamentos. Sin embargo, el estudio realizado en Michigan es el primero en asociar el efecto placebo a un mecanismo

químico específico en el cerebro. Y proporciona una posible explicación, sólidamente argumentada, a la pregunta de por qué tantas personas alegan recibir alivio de terapias y remedios que no aportan algún beneficio físico real.

"Se trata de un duro golpe a la idea de que el efecto placebo es un fenómeno puramente psicológico, no físico", ha dicho a la prensa el autor principal Jon Kar Zubieta, médico y Ph.D. en psiquiatría y radiología. "Hemos podido comprobar que el sistema de endorfinas de los sujetos analizados se activó en las esferas del cerebro relacionadas con el dolor, y que La PET utiliza pequeñas dosis de *carfentanil*, un producto unido a un isótopo de carbono radiactivo de corto período de desintegración, que al desintegrarse libera partículas subatómicas conocidas como positrones, y también rayos gamma. Estos últimos se detectan con un escáner y se registran digitalmente. El carfentanil compite con los mu-opioides para ocupar un lugar en los receptores de las células nerviosas. Mientras más débil sea la actividad del carfentanil y la correspondiente señal emitida por una región del cerebro, mayor será la actividad de los mu-opiáceos, y viceversa.

ocurrió un aumento de la actividad cuando se les dijo que estaban recibiendo un supuesto calmante. Cuando eso ocurrió ellos dijeron sentir menos dolor. La relación mente-cuerpo es muy clara."

Las conclusiones se basan en complejos análisis del cerebro de 14 voluntarios, hombres jóvenes sanos a los que se les inyectó en la mandíbula una dolorosa disolución concentrada de agua salada. La

inyección salina se les suministró mientras sus cerebros eran escaneados por Tomografía de Emisión de Positrones (Positron Emission Tomography, PET), técnica que permite detectar la actividad de los mu-opioides en el cerebro.

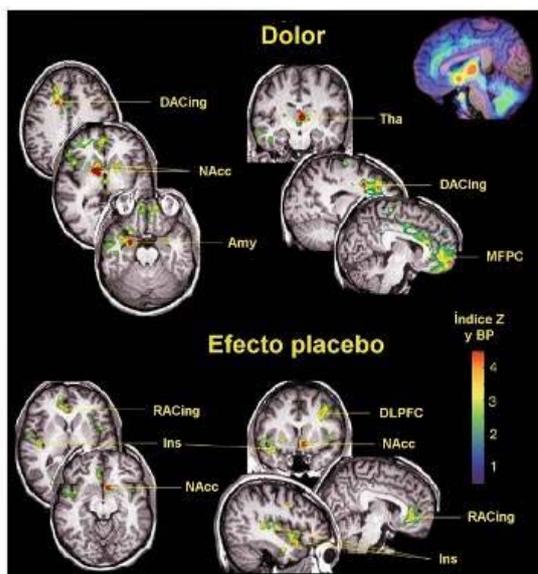


Figura 3.46
 Imágenes del cerebro antes y después de suministrar un placebo inerte utilizando técnicas combinadas de Tomografía por Emisión de Positrones y Resonancia Magnética.

Posteriormente, cada 4 minutos, se les suministró una inyección intravenosa calmante -en realidad, un placebo inerte- diciéndoles que podría aliviarles el dolor, y se les pidió que cada 15 segundos calificaran la intensidad de sus sensaciones dolorosas en una escala de 0 a 100. A continuación los investigadores incrementaron lentamente la concentración de la sal inyectada en el maxilar para lograr mantener a los participantes con un mismo índice de dolor, mientras el escaneo proseguía. Todos los participantes mostraron un aumento de la activación de su sistema de endorfinas después de que se les administró el placebo. La cantidad de agua salada adicional que se necesitó

para mantener la misma sensación de dolor fue en aumento -indicando una reducción en la sensibilidad al dolor de la que el sujeto no tenía conocimiento.

Los investigadores también obtuvieron imágenes por resonancia magnética (Magnetic Resonance Imaging, MRI) del cerebro de los voluntarios y las compararon con sus sensaciones de dolor y con las imágenes PET, logrando determinar con precisión cuales fueron las regiones del cerebro que se activaron durante el experimento, y cuando lo hicieron. La figura 3.46 se compuso utilizando ambas técnicas de escaneo (PET y MRI); la parte superior muestra la actividad de los mu-opioides cuando los voluntarios experimentaban dolor, mientras que en la inferior aparece lo que ocurrió cuando pensaban que estaban recibiendo la inyección calmante (en realidad el placebo). La actividad cerebral reflejó perfectamente los cambios en la intensidad del dolor que los participantes dijeron sentir.

Tras cada exploración se hicieron preguntas adicionales a los voluntarios acerca de sus estados de ánimo y sus emociones, lográndose establecer relaciones entre las sensaciones percibidas y áreas específicas del cerebro. Nueve de los participantes fueron clasificados como de "alta respuesta al placebo", ya que había más de un 20 por ciento de diferencia, en promedio, entre los resultados con y sin placebo; en otras palabras, el efecto placebo era fuerte. Los otros cinco fueron clasificados como de "baja respuesta al placebo".

El estudio se realizó con varones sanos

con edades entre 20 y 30 años, para descartar el posible efecto de dolores crónicos, trastornos del estado de ánimo o variaciones hormonales, que también pueden afectar el sistema de endorfinas. Serán necesarias más investigaciones para determinar el efecto en las mujeres y en sujetos con diversas enfermedades. Estos resultados sugieren que muchos procedimientos no comprobados por la ciencia, que alegan “sanar” o curar un sinnúmero de diferentes dolencias, en realidad sólo logran aliviar por un breve tiempo a algunos pacientes al activar los muopioides de su cerebro, sin algún otro efecto real sobre su enfermedad.

3.17 ¿Se atrevería Nostradamus?

Ni siquiera Nostradamus, médico de la corte de Carlos IX de Francia y el más célebre y reconocido adivino de la edad media, se atrevería a predecir con razonable exactitud el camino que seguirá la ciencia en el futuro. Sus famosas “profecías” son en realidad terriblemente nebulosas. Escritas en un lenguaje enrevesado y confuso -quizás para evitar que lo acusaran de tener un pacto con el diablo-, son factibles de las más diversas interpretaciones. Usualmente sus intérpretes ven en ellas lo que desean ver. Unos ven una cosa; los otros, todo lo contrario (figura 3.47).

La historia está llena de ejemplos, algunos muy recientes, que demuestran cómo la realidad es mucho más prolífera que cualquier ficción, y esa realidad nos dice repetidamente lo difícil que resulta vaticinar acertadamente cualquier evento futuro. Tienen lugar sucesos que a nadie en

su sano juicio le hubieran pasado por la mente unos pocos días antes.



NOSTRADAMUS

Figura 3.47

Michel de Nostredame (Nostradamus)

De ahí que pretender trazar pautas o sentar cátedra sobre lo que vendrá siempre resulta ser extremadamente arriesgado. Sin embargo, es perfectamente válido analizar cuál es la situación presente, y la realidad actual acerca del desarrollo es que en este momento los países con grandes recursos para la investigación están apostando fuerte por la *nanotecnología*. Entre 2007 y 2008, sólo en los EE.UU., se inauguraron 5 importantes centros de investigación. Además de realizar sus propias investigaciones, estos centros dan apoyo a quienes investigan en universidades y otros centros, proporcionando libre acceso a sus instrumentos, técnicas y colaboración para estudios de síntesis, caracterización y teoría de nanomateriales, tanto en nanotecnología “blanda” (materiales biológicos y poli-

méricos) como “dura” (inorgánica y microfabricada).

Usualmente poseen la última tecnología disponible en todas las ramas de la ciencia. Así, por ejemplo, en Argonne se ha instalado un “cluster” o racimo de computadoras de alto rendimiento, capaz de realizar 12 trillones de operaciones por segundo. Según uno de los colaboradores del centro, “cuando se desean resolver problemas de la nanociencia computacional, no es posible hacer las aproximaciones usuales de que los átomos pertenecen a un cristal periódico o, por el contrario, que se trabaja con un número pequeño de moléculas. Los nanomateriales se encuentran justamente entre estos dos extremos, por lo que estos problemas requieren de una capacidad muy grande de cómputo y de memoria”.

Tecnología. Las predicciones tecnológicas acerca de las posibles aplicaciones de la nanotecnología son casi infinitas. Desde moléculas vivas, “entrenadas” para construir dispositivos microelectrónicos, hasta nanorobots con aplicaciones médicas, ecológicas y de otros muy diversos tipos (figura 3.48).

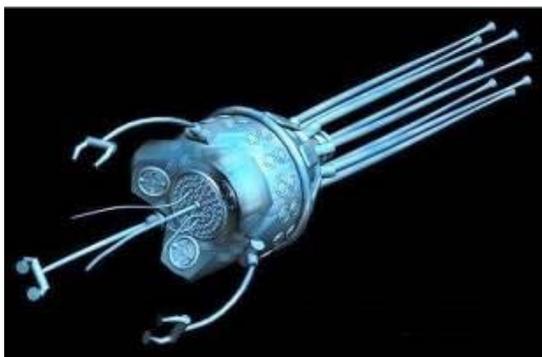


Figura 3.48
Nanorobot médico

Ya se fabrican transistores de capas delgadas impresos en láminas flexibles de

plástico utilizando la nanotecnología, así que es de esperar que no esté lejos el día en que aparezcan dispositivos electrónicos “irrompibles”, resistentes a golpes e impactos, y con mejor posibilidad de adaptación para ser insertados dentro del organismo. Los pronósticos de los especialistas son muy diversos:

- materiales más fuertes y ligeros que los que se conocen actualmente
- sensores químicos más eficientes
- materiales prácticamente indestructibles
- dispositivos para almacenar trillones de bits en el volumen de la cabeza de un alfiler
- computadoras cuánticas, billones de veces más rápidas que las actuales
- materiales biocompatibles para implantes
- sensores microscópicos para detectar enfermedades
- robots miniaturizados para “destupir” vasos sanguíneos
- síntesis molecular de alimentos
- reintroducción de plantas y animales extintos
- reducción y control de la contaminación ambiental
- pinturas y telas más resistentes y duraderas.

En fin, casi cualquier cosa que a Ud. se le ocurra.

Medicina. La identificación de los genes causantes de enfermedades, o de propensión hacia ellas, seguirá su curso. Llegará un momento en que el “mapa genético” llegue a conocerse totalmente. Lo mismo ocurrirá con la clonación de seres humanos, pues si algo enseña la historia

es que el desarrollo de la ciencia puede ser retrasado, pero no detenido. Se irán haciendo cada vez más comunes las operaciones sin sutura, a través de los orificios naturales del cuerpo, similares a la ya bastante común apendicetomía a través del ombligo.

También una breve reseña histórica puede darnos una idea de lo que vendrá después en algunos campos. Así, en la cirugía:

De 1900 en adelante: Se comienzan a utilizar espejos, lentes e iluminación unidos a tubos endoscópicos para examinar el interior del cuerpo.

1930: Los endoscopios se afinan y se hacen flexibles. Se comienza a utilizar la fibra óptica.

1970: Se acoplan cámaras de TV y láseres a los endoscopios, de manera que los cirujanos pueden hacer operaciones mirando las imágenes proyectadas en una pantalla.

Actualmente se trabaja en el perfeccionamiento de estos equipos. Un equipo médico del Imperial College de Londres trabaja en el perfeccionamiento de un endoscopio especializado que posee motores, sensores de presión, navegación y TV para la cirugía del corazón y otras aplicaciones. Los sensores proveerían retroalimentación acerca de la interacción de los instrumentos con los tejidos. En 2007 se realizó exitosamente una extirpación endoscópica de la vesícula a través de la vagina, tras los correspondientes ensayos clínicos con animales. Según el Dr. J. Marescaux, del Hospital Universitario de Estrasburgo, Francia, "...la vía transgástrica nos parece la más

prometedora; todos los animales sometidos a la experiencia evolucionaron sin ningún problema,... o lo que llamamos en el argot médico: ausencia de peritonitis postoperatoria". Ya hay equipos de investigación trabajando en la obtención de riñones e hígados artificiales, e incluso tejidos nerviosos, construidos sobre la base de materiales nanotecnológicos. También se trabaja en la reformulación de medicinas ya existentes, con el fin de encontrar métodos más efectivos al actuar dentro del organismo. Sin embargo, para el futuro los expertos predicen la creación de nanoestructuras novedosas que servirían para tratar el cáncer, el mal de Parkinson y las enfermedades cardiovasculares. Pero no todo es color de rosa. Algunos médicos opinan que dado el pequeño tamaño de las nanopartículas, ellas podrían constituir un peligro potencial para el organismo. Al incluirse masivamente en telas, pinturas y otros productos similares, podrían atravesar fácilmente la barrera protectora del cerebro, que lo resguarda de la presencia de productos químicos dañinos.

Recursos energéticos. El uso de la bioenergía en sustitución de las fuentes energéticas tradicionales, basadas en combustibles fósiles como el petróleo y la hulla, es ya una realidad. Se vislumbra un desarrollo acelerado de combustibles derivados de fuentes energéticas renovables como el etanol obtenido a partir del maíz o de la caña de azúcar. La aparición de nuevas tecnologías, o el perfeccionamiento de las ya existentes, permitirá sin dudas utilizar con efectividad otras fuentes renovables.

De las diversas variantes existentes para

el transporte, quizás la más promisoría sea la tecnología híbrida, que combina el motor de gasolina con otro adicional eléctrico movido por baterías. Los híbridos recargan las baterías con la energía que se genera durante el frenado o directamente a partir del motor de gasolina. El motor eléctrico es ventajoso en los viajes cortos, pero la recarga es lenta, mientras que el de gasolina permite la recarga rápida y se reserva para los viajes largos.

La transición de los combustibles fósiles a los biocombustibles ocurrirá lentamente, pues aún aparecen en el mundo grandes reservas de combustibles fósiles adicionales a las existentes, como son las recientemente aparecidas en la franja del Orinoco, Brasil y Sajalín, en Rusia. La capacidad estimada de esta última es similar a todo el petróleo almacenado alrededor del Golfo de México en el presente. Los rusos planean enfriar el gas natural a -160°C para poder transportarlo licuado, en lo que sería la primera acción de gran envergadura de este tipo llevada a cabo en la historia.

Se seguirán perfeccionando otras fuentes alternativas de energía como la eólica, solar y geotérmica.

Las celdas de combustible también ofrecen un futuro prometedor como fuentes de energía no contaminante. La compañía Intelligent Energy Inc. (www.intelligent-energy.com) anunció recientemente un prototipo de celda de combustible que funciona con etanol derivado de la caña de azúcar capaz de producir energía totalmente “limpia”. Según el comunicado, los ensayos demuestran que la celda puede generar suficiente electricidad para abastecer una vivienda rural a

partir de un equipamiento no mucho mayor que una caja de zapatos. Esto sería muy importante para el desarrollo autosostenido de comunidades rurales como, por ejemplo, en Brasil, que actualmente genera una parte muy importante del total de bioetanol producido en el mundo. La experiencia podría extenderse fácilmente a otros países de América Latina en vías de desarrollo.

Ciencias básicas. La nanotecnología también traerá aparejada la ampliación o generalización de algunas ciencias que hasta hoy día consideradas “intocables”, como la termodinámica, que trata sobre los intercambios de energía entre sistemas. Todo lo que ocurre en el universo, algún cambio de estado, de ordenamiento o de composición, está asociado a alguna transformación de energía. De aquí que la termodinámica es una ciencia que de alguna manera tiene que ver con todo lo que sucede en cualquier lugar. Paradójicamente, la naturaleza de la energía en sí misma adolece de cierta indeterminación. Resulta difícil dar una definición generalizada de energía suficientemente precisa como convencer a todos; un intento razonable de definición aparece en la sección 2.1.

No obstante, es posible describir perfectamente cómo se comportará la energía en determinadas situaciones, gracias a los conocidos primero y segundo principios de la termodinámica. El primero nos dice que no es posible crear o destruir energía. Proviene de la imposibilidad de crear el llamado “móvil perpetuo de primera especie”, que sería una máquina térmica capaz de crear energía, gene-

rando trabajo sin absorber energía previamente de algún lugar. El segundo nos dice que tampoco es posible construir máquinas que transformen toda la energía recibida en trabajo útil, sino que necesariamente también deben existir algunas pérdidas de energía durante el proceso. Este último principio está asociado a otro, el del crecimiento de la entropía. Una manera de interpretar este principio es que la energía no puede usarse y reusarse indefinidamente para obtener trabajo útil. Hay algo que se va perdiendo por el camino; ese algo no es la energía, sino la posibilidad de aprovechar de alguna manera sus infinitas posibilidades para realiza un trabajo útil.

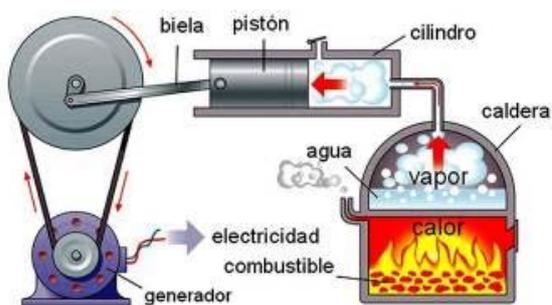


Figura 3.49
Máquina de vapor

Los pioneros de la termodinámica desarrollaron sus leyes estudiando sistemas macroscópicos que podían describirse en función de valores “promedio”, tales como la presión y la temperatura. Los procedimientos macroscópicos sirven perfectamente para las máquinas térmicas convencionales como el típico motor de vapor, que maneja centenares de litros de vapor y posee un número inmenso de moléculas, del orden de 10^{24} o más (figura 3.48). En cualquier máquina térmica como la de la figura 3.49 se emplea el calor para realizar un trabajo; el calor no utilizado pasa al medio ambiente. En

tales sistemas las magnitudes promedio son totalmente aceptables; las excentricidades de algunas pocas moléculas son irrelevantes.

Los avances recientes de las técnicas microscópicas han permitido echar una mirada cercana a los sistemas más complejos que se pueden encontrar en la naturaleza: los organismos vivos. Al igual que cualquier otro proceso en el universo, la vida también se rige por leyes de transformación de la energía, similares a las que tienen lugar en las máquinas térmicas. Una parte de la energía se emplea en crear movimiento o en contraer un músculo; el resto de la energía se desecha. La pregunta obligada es entonces: ¿cómo funcionan las “máquinas térmicas” vivientes? Por ejemplo, una proteína típica mide unos pocos nanómetros y contiene algunas decenas o miles de átomos, por lo que no es posible describir su funcionamiento con los criterios termodinámicos macroscópicos. Al ser tan pequeñas es necesario tomar en cuenta las desviaciones y fluctuaciones individuales en su energía y movimiento causadas por el bombardeo continuo de las moléculas que la rodean (el conocido movimiento Browniano). Un valor típico de estas desviaciones a partir del valor promedio viene dado por el factor $k_B T$, donde T es la temperatura Kelvin y k_B la constante de Boltzmann.

La proteína kinesina es una “máquina térmica” viviente, vital para transportar productos químicos dentro de las células (figura 3.50). Utilizando modernos sistemas de microscopía y empleando marcadores fluorescentes ha sido posible estudiar su movimiento y seguir sus huellas.

La kinesina transforma la energía química en movimiento mecánico enlazando el trifosfato de adenina para cambiar de forma. Esto le permite “caminar” a través del citoesqueleto celular. La molécula de kinesina necesita unos 12 $k_B T$ para dar un paso, de manera que una fluctuación del orden de $k_B T$ es casi un 10% de esa energía. Como resultado, a menudo la molécula no logra dar el paso correspondiente cuando debiera hacerlo. Las fluctuaciones son visibles en el experimento, donde incluso se observan retrocesos en el movimiento.

Las células también dependen de otras proteínas, desde “bombas” en las membranas que controlan el flujo de nutrientes, hasta polimerasas que construyen cadenas de ADN (ácido desoxirribonucleico). Todas estas moléculas gastan energía para mover la sustancia y realizar un trabajo - en otras palabras, son máquinas térmicas-. Y una pregunta muy actual en el desarrollo de la termodinámica parece ser: ¿Hasta qué punto las fluctuaciones de energía impiden aplicar a los sistemas nanométricos las leyes de la termodinámica clásica convencional?

Una forma de abordar el problema es estudiar un sistema más simple que una proteína, separándolo de su estado de equilibrio, y registrando lo que sucede cuando el sistema regresa espontáneamente al equilibrio. Un experimento de

este tipo consistió en estirar una sola molécula de ADN, liberarla posteriormente y estudiar su contracción. Los investigadores lograron estudiar las fluctuaciones de energía mientras la molécula se contraía después de ser liberada, encontrando que en cada ocasión el retorno al estado de equilibrio era diferente. Lo que ocurre aquí a nivel microscópico sería, desde el punto de vista macroscópico, como si al dejar libre un resorte estirado, durante el proceso de regreso al equilibrio el resorte absorbiera energía bruscamente del medio ambiente, y en vez de encojerse continuamente se estirara un poquito durante cortos períodos de tiempo, en forma casual, aleatoria.

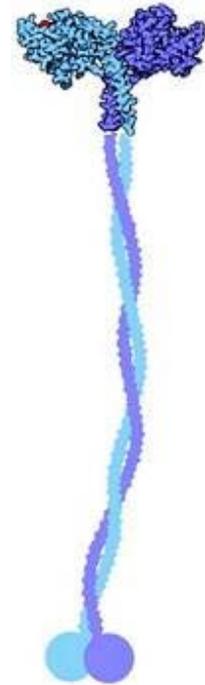


Figura 3.50
Kinesina.

Por el momento, todo indica que en el futuro será necesario adaptar las antiguas leyes macroscópicas a los nuevos conocimientos microscópicos, lo que a fin de cuentas, no es más que adecuar lo viejo a lo nuevo, como ha sido siempre la norma usual en el desarrollo científico.

Bibliografía

- Alternativas para el tratamiento del residual de la destilería Paraíso (Cuba). <http://www.monografias.com/trabajos15/tratamiento-destileria/tratamiento-destileria.shtml>
- Astronomía Educativa. Tierra, Sistema Solar y Universo. Capas de la atmósfera. <http://www.astromia.com/tierraluna/atmosfera.htm>
- Asmus J.F. Thirty-seven years of lasers in the conservation of art. *Rev. Cub. Fis.* vol. 27 No. 1 (2010) p.3-8.
- Atkins P. *Four Laws that Power the Universe*, (Oxford University Press), 2007
- Balzani V. et al. Molecular devices and machines, *Physics World*, November pp39–42, 2004
- Bergmann R.B. Crystalline Si thin-film solar cells: a review, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, Volume 69, Number 2, 1999, 187-194.
- Biogas Fuel Cell Could Offer an Affordable Alternative to Short-Lived Batteries. <http://oilprice.com/Alternative-Energy/Fuel-Cells/>
- Bosque Suárez R., Merino T., Fundora J. Cultura científica y ambiental en el Decenio de la educación por el desarrollo sostenible, V Congreso Internacional Didáctica de las Ciencias, Didáctica de las Ciencias, nuevas perspectivas, segunda parte, Palacio de las Convenciones de La Habana, Marzo 17-21 2008.
- Breus TK, Ozheredov VA, Syutkina EV, Rogoza AN. Some aspects of the biological effects of space weather. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2008; (70):436–41.
- Cormack A.M. Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications I. *J. Appl. Phys.* 34 (1963), 2722-2727
- Cormack A.M., Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications II. *J. Appl. Phys.* 35 (1964), 2908-2913.
- Chávez, I. Desarrollo mundial de la energía solar fotovoltaica, *Energía y tú* No. 13, Ene-Mar 2001, pp. 19-24.
- CHEN Shu-yong, SONG Shu-fang, LI Lan-xin, SHEN Jie. Survey on Smart Grid Technology, *Power System Technology* 2009-08
- Differences in RF energy absorption in the heads of adults and children. *Bioelectromagnetics Supplement*. 2005(7):S31-S44.
- Documento NTP 234 del Instituto de Seguridad e Higiene del Trabajo,

Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España.

- Efectos del ruido sobre la salud, la sociedad y la economía.
<http://www.ruidos.org/>
- EfW: could biogas be used to power fuel cells?
<http://www.renewableenergyfocus.com/view/2525/efw-could-biogas-be-used-to-power-fuel-cells/>
- Feynman, R. P., Leighton, R. B. and Sands, M., The Feynman Lectures on Physics Vol. 1, Cap. 4, (Addison-Wesley Pub. Co, 6th, Ed., USA, 1977).
- Floderus B, Persson T, Stenlund C, Wennberg A, Houmlst A, Knave B. Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukaemia and brain tumors: a case-control study in Sweden. *Cancer Cause Control* 1993;4:465.
- Foger K., Baldwall SPS. Solid oxide electrolyte fuel cell review, *Ceramics International*, 1996, vol. 22, nº3, pp. 257-265
- Funk R.H.W, T. Monsees and N Ozkucur, Electromagnetic effects – From cell biology to medicine, *Progress in Histochemistry and Cytochemistry* 43, 177–264, 2009.
- González Arias A. Dilemas energéticos contemporáneos, *El Correo de Guanajuato*, miércoles 29 de junio de 2011.
- González Arias A. y Horta Antonio. El año de la química y su influencia en la física y otras ciencias. *Elementos* 84 (2011) 47-51
- González Arias A. Y Ud... ¿Cómo mide la bioenergía? *Latin Am. J. Physics Education*, Vol. II, No. 2, Mayo 2008, 137-140.
- González Arias A. Use and misuse of the concept energy. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 6, Suppl. I, August 2012.
- González Arias A. Calor y trabajo en la Enseñanza de la Termodinámica, *Rev. Cub. Fis.* Vol. 20, No. 2, p.129 (2003).
- Guenél P, Raskmark P, Andersen JB, Lynge E. Incidence of cancer in persons with occupational exposure to electromagnetic fields in Denmark. *Br. J. Ind. Med.* 1993; (50):758.
- HAARP. <http://www.haarp.alaska.edu/haarp/gen1.html>
- http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/WDMAM/project/perugia/WDMAM_1.02_2007_Edition_low_resolution_reduced1.pdf
- http://www.lanl.gov/quarterly/q_spring03/squid_text.shtml
- <http://www.gatech.edu/newsroom/release.html?id=2697>

- http://www.ruidos.org/Noise/WHO_Noise_guidelines_3.html
- <http://www.newscientist.com/special/worse-climate>
- http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/125606
- http://www.empa.ch/plugin/template/empa/3/125595/---/l=2/changeLang=true/lartid=125595/orga=/type=/theme=/bestellbar=/new_abt=/uacc= High Frequency Active Auroral Research Program, accesible en <http://www.haarp.alaska.edu/>.
- Hounsfield G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography): Part I. Description of system. *Brit. J. Radiol.* 46 (1973), 1016-1022.
- How Stuff Works. <http://science.howstuffworks.com/ball-lightning.htm>
- How Stuff Works. <http://science.howstuffworks.com/lightning.htm>
- International Commission on Radiation Protection. Recommendations New York, Pergamon Press 1991; Report 60.
- Kious W. Jacquelyne y Tilling Robert I., This Dynamic Earth: the Story of Plate Tectonics, U.S. Government Printing Office, SSOP Washington DC 20402-9328, ISBN 0-16-048220-8, mayo 1996.
- Körner Markus et al. *MDRadioGraphics* 2007; 27: 675-686
- Krebs Frederik C., Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques *Solar Energy Materials and Solar Cells* Volume 93, Issue 4, April 2009, Pages 394-412.
- Kurzynski M. *The Thermodynamic Machinery of Life* (Springer, Berlin), 2005
- Laboratorios Federales Suizos para la Ciencia de Materiales y la Tecnología (EMPA) (I) http://www.empa.ch/plugin/template/empa/3/125595/---/l=2/changeLang=true/lartid=125595/orga=/type=/theme=/bestellbar=/new_abt=/uacc=
- Laboratorios Federales Suizos para la Ciencia de Materiales y la Tecnología (EMPA) (II). http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/125606
- Las vinazas de destilería de alcohol. Contaminación ambiental o tratamiento para Evitarlo. VIII Encuentro de Nutrición y Producción de Animales Monogástricos, accesible en http://avpa.ula.ve/eventos/viii_encuentro_monogastricos/memorias/conferencia-7.pdf
- Lai H, Singh NP. Environmental magnetic-field-induced DNA strand breaks in brain cells of the rat. *Health Perspectives* 2004 May; 112(6):687-94.

- Lightning. <http://en.wikipedia.org/wiki/Lightning>
- Lindley D., Degrees Kelvin (Henry Joseph, Washington, DC) 2004
- Lopez Bravo S. Revista de Física Médica 2001; 2(2): 99-110
- Marko J. F. and Cocco S. The micromechanics of DNA, Physics World, March pp37–41, 2003
- McKinlay AF, Allen SG, Cox R, Dimbylow PJ, Mann SM, Muirhead CR, et al. Advice on limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz). Health Protection Agency, Document of the National Radiological Protection Board UK, ISBN 0-85951-532-X, NRPB 2004;15,(2). Disponible en http://www.hpa.org.uk/web/HPAweb&HPAwebStandard/HPAweb_C/1254510609795.
- Medical imaging. <http://www.fda.gov/radiation-emittingproducts/radiationemittingproductsandprocedures/medicalimaging/medicalx-rays/ucm115318.htm>
- New Scientist. <http://www.newscientist.com/special/worse-climate>
- Novosad V., et al., IEEE Trans Magn, 37, 2088 (2001)
- Organización Mundial de la Salud; "*Guidelines for Community Noise.*" Ginebra, 1999, http://www.ruidos.org/Noise/WHO_Noise_guidelines_3.html
- Pérez Zoloza N. Orsettib A. y Bilmesc G.M. Libs y limpieza con láser aplicada a la conservación de objetos rescatados de la corbeta HMS Swift. Rev. Cub. Fis.vol. 27 No. 1 (2010) p.80-83
- Petersen RC. Radiofrequency/microwave protection guides. Health Physics1991; 61:59-67.
- Pongsid Sriksirin, Satha Aphornratana and Supachart Chungpaibulpatana. A review of absorption refrigeration technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 5, Issue 4, December 2001, Pages 343-372. Accesible en http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&_tokey=%23T0C%236163%232001%23999949995%23254321%23FLA%23&_cdi=6163&_pubType=J&view=c&_auth=y&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=480d07c2fab731d770c3743d7cb736ea
- Radon J. Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. Ber. König Säch. Aka. Wiss. (Leipzig), Math. Phys. Klasse 69 (1917), 262-267.
- Science **320**: 356, 2008
- Science, **323**, 5914, 2009

- SQUID magnetometry. Los Alamos National Laboratory.
http://www.lanl.gov/quarterly/q_spring03/squid_text.shtml#MEGh_m
- Tenford T.S. E, Biological Interactions and Potential Health Effects of Extremely-Low-Frequency Magnetic Fields from Power Lines and other Common Sources. *Annu. Rev. Publ. Health* 13:173 (1992)
- The ice cube. <http://icecube.lbl.gov/index.html>
- The planetary society. Extrasolar planets.
http://www.planetary.org/explore/topics/groups/extrasolar_planets/
- Tomography.
http://en.wikipedia.org/wiki/Tomography#Types_of_tomography
- Toxicity of distillery waste to punts sophore (Ham) and *Mystinvittatus*. Prt 3 Bioassay studies and TLM determination. *Act hidrochins /Hidrobiol* 4, 547, 1976.
- Tynes T, Andersen A, Langmark F. Incidence of cancer in norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 1992;136(81).
- Yahoo news. Warning on cell phones and children.
http://news.yahoo.com/s/ap/20080724/ap_on_he_me/cell_phone_warning.
- Zalba Belén, Marín José M^a, Cabeza Luisa F. and Mehling Harald. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, Volume 23, Issue 3, February 2003, Pages 251-283