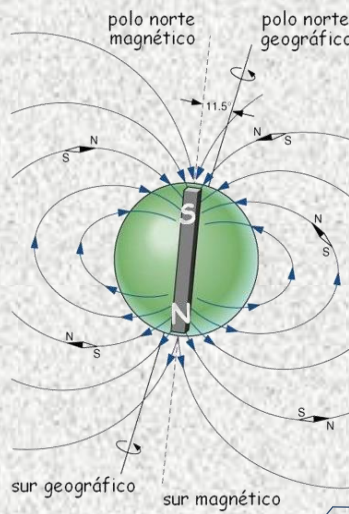
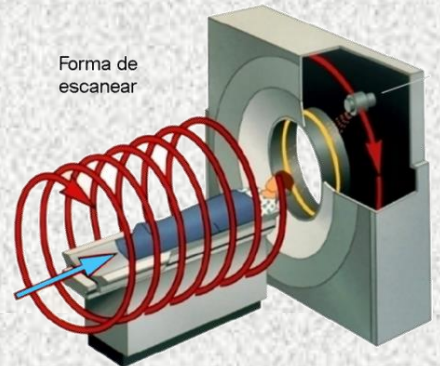
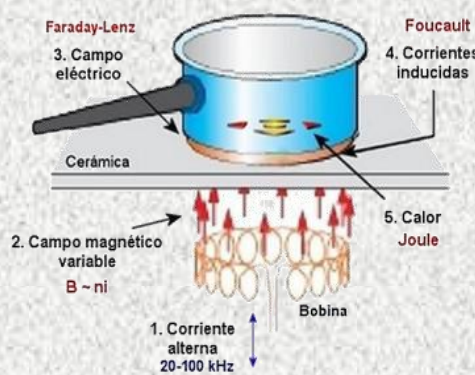
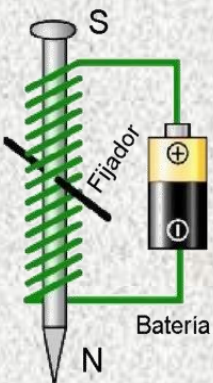




MAGNETISMO COTIDIANO; ORÍGENES Y APLICACIONES

ARNALDO GONZÁLEZ ARIAS



MAGNETISMO COTIDIANO; ORÍGENES Y APLICACIONES

ARNALDO GONZÁLEZ ARIAS

2da Edición, 2024

Esta 2da edición incluye algunas mejoras en las figuras, así como la inclusión de referencias recientes asociadas a la aplicación terapéutica de los campos electromagnéticos.

ÍNDICE

Capítulo 1. El ‘misterioso’ magnetismo

Algo para recordar. El engaño de las pulseras. ¿Qué será una ‘frecuencia en sí’? El asesino invisible. Magnetismo terrestre y campo magnético. A los polos magnéticos les gusta el movimiento. La magnetosfera y el viento solar. Magnetismo planetario y solar. La teoría del dinamo autosustentable.

Capítulo 2. El campo magnetostático

Magnetismo microscópico. Diamagnetismo. Paramagnetismo. Magnetismo macroscópico. Ferromagnetismo. Materiales ‘duros’ y ‘blandos’. El magnetismo en los organismos vivos. Magnetización técnica. Grabación magnética. El sistema internacional de unidades.

Capítulo 3. La corriente eléctrica

La carga eléctrica. El campo eléctrico. Conductores y dieléctricos. Sustancias polares y no polares. Corriente continua y fuerza electromotriz. Circuitos de corriente continua. Superconductividad. Corriente alterna.

Capítulo 4. Interacciones electromagnéticas y ondas de radio

Magnetismo y corrientes eléctricas. Dinamos. Transformadores e inductores. Radiación electromagnética. Transmisión de señales. Transmisión de potencia y hornos de microondas. Cocinas de inducción. Estimación de distancias: radar. Detección de metales. El radar de penetración terrestre.

Capítulo 5. Radiaciones de más alta frecuencia

Interacción de la radiación con la sustancia; fotones. La radiación y los organismos vivos. Radiación infrarroja y visible. Radiación ultravioleta. Rayos X. Rayos gamma.

Capítulo 6. Otras aplicaciones del magnetismo

Diagnóstico médico. Levitación magnética. El tratamiento magnético del agua. Aceleradores de partículas. Cuando el magnetismo es indeseable. Anomalías magnéticas.

Capítulo 7. Terapias magnéticas reales e ilusorias

Magnetostática y electromagnetismo. Campos magnéticos estáticos: magnetoterapia. El campo magnetostático es conservativo. Campos electromagnéticos. Breve historia de las terapias electromagnéticas. Reportes negativos. Nanomagnetismo y medicina. ¿Tratamientos magnéticos contra el dolor? ¿Son dañinos los campos magnéticos? Efectos biológicos. Investigaciones clínicas. Normas de seguridad.

Capítulo 8. Placebos y pseudociencia

El efecto placebo. La ciencia... y lo que no lo es. ¿Qué es la pseudociencia? ¿Cómo funciona la pseudociencia? Pseudociencia magnética contemporánea.

INTRODUCCIÓN A LA PRIMERA EDICIÓN

Hace unos 15 años presentamos en Salamanca un pequeño libro de divulgación científica titulado *Qué es el magnetismo*, que vio la luz gracias al apoyo en la revisión de las pruebas de impresión de los profesores Ana García Flores y José Ignacio Iñiguez de la Torre y Bayo, del departamento de Física Aplicada de esa universidad española. De allá hasta acá han surgido muchas novedades en el campo del magnetismo. En esta nueva edición, aparte de que se subsanan algunas omisiones, se presenta un enfoque diferente y un contenido mucho más actualizado, aunque respetando en todo momento el perfil de libro de divulgación.

- ¿Hacia dónde apunta el norte de la brújula, al norte o al sur?
- ¿Qué hay de común entre un radar, un horno de microondas y un teléfono celular?
- ¿Cómo funciona una cocina de inducción?
- ¿Existen en realidad las tormentas magnéticas? ¿Y el viento solar?
- ¿De qué se compone la luz? ¿Y las ondas de radio?
- ¿Cómo se mide el campo magnético del sol y los planetas?
- ¿El agua se magnetiza? ¿Y los combustibles?
- ¿Para qué sirve la Tomografía de Emisión de Positrones?
- ¿Cómo funcionan los trenes magnéticos?
- ¿Se puede aliviar el dolor utilizando un imán?
- ¿Daña la salud vivir cerca de una línea

de alta tensión?

- ¿Es posible medir los biocampos generados por las personas?
- ¿Se orientan los animales mediante el campo magnético terrestre?
- ¿Qué es la pseudociencia magnética?

El libro pretende dar respuesta a estas y muchas otras preguntas, todas relacionadas de una u otra manera con el magnetismo o el electromagnetismo.

Nuestro trabajo durante muchos años en la Universidad de La Habana, como profesor e investigador en el campo de los materiales magnéticos, nos permitió constatar que desde siempre ha existido un gran interés hacia manifestaciones o propiedades magnéticas que pudiéramos llamar ‘no convencionales’. Este interés aún se mantiene, y se extiende desde la búsqueda de posibles aplicaciones en la industria hasta el ensayo de diversas terapias electromagnéticas. No obstante, también hemos comprobado que no siempre se dispone de la información adecuada sobre estos temas y que, cuando de magnetismo o electromagnetismo se habla, a menudo afloran serias confusiones en cuanto a separar lo real de lo ficticio.

A veces se trata de copiar lo que no se comprende bien, sin llevar a cabo investigaciones o ensayos previos que permitan conocer la efectividad real del dispositivo propuesto, los parámetros que se deben controlar o el régimen de operación recomendable. Lo anterior se agrava por el hecho de que es fácil encontrar materiales impresos, en revistas y periódicos o en la *World Wide Web*, cuya objetividad científica deja mucho que desear. Puede que estas

informaciones sean divulgadas tanto por personas quizás ingenuas, entusiastas de los tratamientos magnéticos (pero tan ignorantes en la materia que confunden propiedades magnéticas con propiedades eléctricas con facilidad), como por fabricantes y comerciantes inescrupulosos, más interesados en vender su producto que en presentar al posible comprador una información veraz. Algunos de estos reclamos han resultado ser timos comprobados, sancionados por los tribunales.

Estas son las razones fundamentales por las que decidimos recopilar una información mínima sobre las particularidades esenciales de los campos magnetostáticos y electromagnéticos, así como algunas de sus aplicaciones presentes y futuras más importantes. Pensamos que el lector sin formación científica, pero interesado en estos temas, podrá así valorar con mayor efectividad cualquier proposición magnética que se le presente. De aquí que se ha tratado de utilizar un lenguaje simple y, dentro de lo posible, sin tecnicismos y con la cantidad mínima de fórmulas y ecuaciones pero, a la vez, en todo momento se ha mantenido la rigurosidad científica del contenido.

La ciencia y la falsa ciencia

El libro también tiene la pretensión de ayudar al lector a distinguir entre lo que es ciencia y lo que no lo es, tanto dentro de los temas magnéticos como fuera de ellos.

En las últimas décadas se ha generalizado el uso del término *pseudociencia* para designar un conjunto de teorías, leyes, descripciones y procedimientos que pretenden ser científicos, pero que en realidad no lo son. Según *Carl Sagan* (1934-1996), astrónomo

y divulgador científico:

“...cada campo de la ciencia tiene su propio complemento de pseudociencia. Los geofísicos tienen que enfrentarse a Tierras planas, Tierras huecas, Tierras con ejes que se balancean desordenadamente, continentes en rápido ascenso y hundimiento y profetas del terremoto. Los botánicos tienen plantas cuyas apasionantes vidas emocionales se pueden seguir con detectores de mentiras; los antropólogos tienen hombres-mono supervivientes; los zoólogos, dinosaurios vivos y los biólogos evolutivos tienen a los literalistas bíblicos pisándoles los talones. Los arqueólogos tienen antiguos astronautas, runas falsificadas y estatuas espurias. Los físicos tienen máquinas de movimiento perpetuo, un ejército de aficionados a refutar la relatividad y quizá la fusión fría. Los químicos todavía tienen la alquimia. Los psicólogos tienen mucho de psicoanálisis y casi toda la parapsicología. Los economistas tienen las previsiones económicas a largo plazo. Los meteorólogos, hasta ahora, tienen previsiones del tiempo de largo alcance... La astronomía tiene como pseudociencia equivalente principal la astrología, disciplina de la que surgió. A veces las pseudociencias se entrecruzan y aumenta la confusión, como en las búsquedas telepáticas de tesoros enterrados en la Atlántida o en las previsiones económicas astrológicas”.

(Sagan, 2000)

Se podría pensar que una educación técnica o universitaria es una salvaguarda contra la

pseudociencia: nada más lejos de la realidad. La esencia del problema no está en la cantidad de conocimientos que alguien pueda acumular, sino en la forma que se incorporan, se analizan y se usan estos conocimientos. El desconocimiento sobre ciencias que no son afines a la especialidad de la persona en cuestión también puede favorecer la confusión. Cuando se desconoce la esencia del método científico (que se expone en el capítulo 8) resulta muy difícil, por no decir imposible, separar la ciencia de la pseudociencia.

La ciencia y la pseudociencia se caracterizan, respectivamente, por el escepticismo y la credulidad. Mientras no encuentre una explicación satisfactoria a la manifestación de un proceso o evento determinado, con resultados verificables en cualquier momento y lugar, la ciencia no estará satisfecha.

La pseudociencia está saturada de credulidad. No exige demostraciones, y se contenta con conceptos y explicaciones vagas. Presenta sus resultados terminados, de una vez y para siempre, y de una forma que no admite verificación.

Cuando la pseudociencia tiene que ver con la medicina puede llegar a ser peligrosa; a veces por promover falsos diagnósticos, otras por aplicar remedios no adecuados. El posible daño al paciente casi siempre no proviene de la aplicación del tratamiento pseudocientífico (aunque en ocasiones el tratamiento en sí pudiera ser perjudicial), sino porque su aplicación impide que el paciente se someta al tratamiento médico convencional que mejoraría su salud. Con regularidad aparecen en la prensa interna-

cional casos que ilustran lo anterior, que a veces incluso llegan a los tribunales, al aplicarse a las personas terapias y medicamentos que no han sido validados por los correspondientes ensayos clínicos.

Leyes y teorías

Durante la revisión del original, un colega me llamó la atención que en las Ciencias Sociales muchas veces se antepone la ley a la teoría (y en este libro se ha considerado lo contrario). Bajo ese punto de vista, se considera que la teoría resume un conjunto de leyes y resulta ser algo más bien acabado, terminado. Aquí se considera una acepción diferente, común en las ciencias naturales que, a nuestro entender, no entra en contradicción con el punto de vista anterior, pues más bien representa un nivel diferente de gradación. Existen teorías... y teorías. Y también algo de tergiversación semántica cuando se les llama teorías a lo que no son más que hipótesis; i.e., suposiciones no contrastadas con la realidad.

En las ciencias físicas y otras ciencias naturales, muchas veces la teoría no se refiere a algo terminado, sino al nivel primario de investigación. Es un método de trabajo, una herramienta que complementa al experimento. Es la forma en que se logra explicar *cualitativa y cuantitativamente* un resultado experimental, lo que permite diseñar nuevos experimentos y predecir de antemano lo que es posible que ocurra. Si la predicción es correcta, el conocimiento se amplía y la teoría se refuerza. Sirva de ejemplo la infinidad de artículos teóricos que se publican día tras día en las revistas científicas especializadas, donde no se reportan resultados experimentales, sino solo su posible inter-

pretación teórica, proponiendo relaciones o leyes particulares para esclarecer el por qué el resultado de un determinado experimento.

Las teorías novedosas no son estáticas; cambian y mejoran de manera continua, acercándose paso a paso a la realidad. Cuando se alcanza una armonía total entre la teoría y la práctica se llega a la ley, como resumen final de esa continua interacción. Cuando eso ocurre las teorías pierden lo que les quedaba de hipótesis para convertirse en certezas, porque ya no se basan en la suposición o especulación, sino en la práctica, en la interacción con la realidad, en deducciones e inducciones rigurosas y en una amplia evidencia experimental. Y, des-

de luego, muchas hipótesis se desechan cuando se comprueba que son ajenas a la realidad que pretenden describir.

Y coincidiendo con la interpretación mencionada más arriba, lo que una vez fue teoría, y pasó a ser ley, puede sin dudas llegar a formar parte de una teoría más general, que incluya varias leyes, sin que haya contradicción alguna, pues en el universo científico todo es perfectible.

¿Y las respuestas a las preguntas que aparecen al inicio de esta introducción? Esperamos que el lector las encuentre en las páginas siguientes.

CAPÍTULO 1. EL MISTERIOSO MAGNETISMO

El progreso, lejos de consistir en el cambio, descansa en la retentiva. Cuando el cambio es absoluto no queda ente alguno al que mejorar y no se establece dirección para una posible mejora; y cuando la experiencia no se conserva, como entre los salvajes, la infancia es perpetua.

Quienes no pueden recordar el pasado están condenados a repetirlo.

En la primera etapa de la vida la mente es frívola y se distrae con facilidad, no consigue el progreso por falta de constancia y consecuencia. Así son los niños y los bárbaros, su instinto no ha aprendido nada de la experiencia.'

Jorge Agustín Nicolás Ruiz de Santayana y Borrás (1863-1952), poeta y filósofo español-norteamericano.

Algo para recordar

En alguna ocasión a todos nos ha llamado la atención la propiedad que poseen los imanes de interactuar a distancia, de repelerse o atraerse entre sí, o de atraer objetos que no son imanes – como clavos o hebillas – sin tocarlos. Aún más, en determinada posición los imanes son reacios a unirse; en otra, no quieren separarse.

Esta misteriosa acción a distancia, sin contacto directo, que tanto atrae como repele, resulta aún más equívoca por cuanto algunos objetos son atraídos por el imán y otros muy parecidos no. Cuando un imán atrae un objeto, se puede interponer una lámina de cartón o madera entre el imán y el objeto ¡y lo seguirá atrayendo! Y para acrecentar aún más el misterio, cuando algunos objetos se

frotan una y otra vez con un imán... ¡también se vuelven magnéticos! Como si alguna especie de “espíritu” o “presencia inmaterial”, contenida en el imán, fuera capaz de transferirse al otro objeto. Por cierto, si alguna vez necesita insertar un tornillo en una posición incómoda, pruebe a frotar con suavidad el destornillador con un imán desde el mango hacia la punta (o al revés), pero siempre en el mismo sentido. Una vez hecho esto, si el tornillo tiene hierro en su composición quedará adherido a su extremo, facilitando la inserción en el sitio deseado.

No es posible hacer un compendio de las manifestaciones magnéticas más habituales sin mencionar las “mágicas” propiedades de los imanes. Han sido invocadas por iluminados, falsos expertos y curanderos de todo tipo, para intentar curar o sanar a la gente mediante pases o influencias magnéticas, atribuyendo al magnetismo propiedades que de ninguna manera posee. Tal comportamiento ante lo desconocido parece ser innato a la naturaleza humana. Hace 2 mil 500 años, Cleóbulo de Lindos, uno de los siete sabios de la Antigua Grecia, afirmaba: “...nada hay tan común en el mundo como la ignorancia y los charlatanes”.

Tales prácticas quizás pudieran tener alguna excusa en épocas remotas, cuando no se tenía la menor idea del origen de las propiedades magnéticas. Hoy no tienen otra explicación que la irresponsabilidad de quienes intentan aplicarlas sin tener información previa, negando el pasado y el avance de los conocimientos científicos por todos los medios a su alcance.

Ejemplos concretos abundan en la historia.

Cada vez que aparece una técnica novedosa y poco conocida, o una nueva propiedad física, química o biológica, es casi una regla que al poco tiempo aparezcan terapeutas que afirman poder curar una u otra dolencia aplicando la nueva técnica. Pero las afirmaciones nunca van acompañadas por los correspondientes estudios o ensayos clínicos que corroboren la efectividad de la propuesta; simplemente se enuncia una suposición como si fuera una realidad, lo que muchas veces resulta suficiente para que los incautos caigan en las redes del “iluminado” de turno.

Los ejemplos incluyen los intentos de aplicar imanes para curar diversas dolencias desde los tiempos antiguos, o la de utilizar la recién surgida electricidad a principios del siglo pasado con los mismos fines. Ejemplos más recientes incluyen el novedoso neutrino (ya no tan novedoso como poco

conocido) para intentar justificar las absurdas curaciones a distancia, o las fotos Kirlian para probar la existencia de la tergiversada bioenergía, que se supone asociada solo a lo vivo y capaz de regular los estados de salud o de ánimo de las personas.

Se intenta así explicar lo ilusorio con algo falseado, que no es del dominio público o aún no se conoce bien, sin aportar evidencias concretas de lo que se afirma. Paradigma de lo absurdo aunque, por increíble que parezca, muchas veces funciona en determinados círculos, incluso autodenominados científicos – pero que en realidad no lo son.

El engaño de las pulseras

En febrero de 2010 se publicó en el Diario Sur un informe sobre la venta en España de las pulseras holográficas ‘Power Balance’ (Figura 1.1). Según el artículo:



Figura 1.1 Izq. Pulsera Power Balance y ampliación del holograma. A la derecha, Cristiano Ronaldo con una pulsera holográfica en su muñeca derecha. Tomadas de *Diario Sur*, <http://www.diariosur.es/20100210/mas-actualidad/sociedad/negocio-redondo-201002100844.html> y *El País.com*, https://elpais.com/sociedad/2010/04/28/actualidad/1272405605_850215.html.

“...las pulseras se agotan nada más llegar a las tiendas y el número de reservas excede con creces las unidades que salen

al mercado. Aunque la importadora es reacia a facilitar datos sobre sus ventas en España, un cruce de cifras permite

aventurar que estarían en torno a las 100 000 unidades diarias. Un negocio redondo si se tiene en cuenta que cada brazalete vale 35 euros”.

Es decir, una sola pulsera cuesta más que el ingreso mensual promedio de cualquier necesitado en un país pobre. El precio de costo de los materiales con que se confeccionaba la pulsera era de alrededor de 1 euro.

El negocio fue tan fructífero que enseguida surgieron muchos competidores para tratar de coger su parte del pastel. Las marcas de pulseras se multiplicaron: EFX, Equilibrium, Ion Balance, Powerplus, Power equilibrium, Trion-Z, Energy balance, Harmony zen...

¿Y cuál era el supuesto beneficio que brindaban estas pulseras?

Josh Rodarmel, de Orange County, California, quien junto a su hermano Troy las introdujo en el mercado en 2007, había declarado con anterioridad haber implantado en hologramas “frecuencias que reaccionan positivamente al campo magnético del cuerpo”, afirmando que “todo tiene una frecuencia, al igual que los móviles, el wifi, las ondas de radio y cosas por el estilo”, y que todas reaccionan entre sí. Según Rodarmel, existían frecuencias que reaccionaban de forma negativa con el cuerpo, pero otras lo hacían de manera positiva. Él y su hermano habían descubierto cómo meterlas en un holograma que, en contacto con el cuerpo, proporcionaba equilibrio, fuerza y flexibilidad.

En realidad, la tal pulsera no era más que un aro de goma que incorporaba dos hologramas, como los que pueden aparecer en

cualquier tarjeta de crédito o en algunos sellos. El modelo que tuvo más éxito estaba hecho con silicona, aunque también había otro de neopreno. La publicidad añadía que Power Balance no contiene ninguna fuente de energía por sí sola, sino que son “las energías bio-eléctricas de cada uno las que cargan el holograma quantum, sintonizando con el biocampo y armonizando con tu chi interior”.

En otro sitio se expresaba que Power Balance era una *frecuencia en sí*, almacenada en un medio (el holograma), que restauraba el equilibrio electromagnético del cuerpo aislando a cada célula viva de los factores externos que le impiden funcionar al 100 % de sus capacidades.

Desde luego, lo anterior no era más que palabrería sin sentido, donde se combinaban palabras de significado real como frecuencia, sintonía y holograma con otras inventadas, de contenido semirreligioso o esotérico como chi, o tergiversadas o ficticias como biocampo. Obviamente, se seguía un patrón similar al de otros timos del mismo corte: tergiversando palabras conocidas por el gran público cuyo verdadero significado es manejado solo por los especialistas.

Todos sabemos lo que es sintonizar la radio, pero solo los entendidos saben que al sintonizar se está haciendo resonar un circuito del equipo con una señal electromagnética específica, de las muchas que llegan provenientes de diferentes emisoras.

¿Qué será una ‘frecuencia en sí’?

Una frecuencia es el número de veces que cualquier evento se repite por segundo u otra unidad de tiempo (rotaciones, oscilaciones, latidos, etc.). Es un número que re-

presenta un concepto inmaterial, y no se puede almacenar como si fuera un objeto tangible. El tiempo también tiene valores numéricos, pero tampoco se puede almacenar para gastarlo después. La noción de almacenar una frecuencia es un engaño total, sin contar el hecho de que los hologramas no se cargan y descargan como si fueran pilas reversibles.

El Instituto Nacional del Consumo de España, adscrito al Ministerio de Sanidad, respondió de forma satisfactoria ante las alertas de los periodistas y asociaciones de consumidores, enviando el 28 de mayo de 2010 una circular a las comunidades alertando sobre un posible fraude con las pulseras:

“Las pretendidas propiedades terapéuticas o potenciadoras que los fabricantes y comercializadores atribuyen a determinadas pulseras, incumplen lo establecido en la normativa que regula la publicidad y promoción comercial de los productos. El Real Decreto 1907/96 prohíbe cualquier clase de publicidad o promoción directa o indirecta, masiva o individualizada, de productos, materiales, sustancias, energías o métodos con pretendida finalidad sanitaria cuando sugieran o indiquen que su uso o consumo potencian el rendimiento físico, psíquico, deportivo o sexual”.

Finalmente, el 18 de octubre de 2010 la Junta de Andalucía impuso una multa de 15 000 euros, calificada de irrisoria por algunos, a la Power Balance en España por ‘falta grave de publicidad engañosa’, sanción tipificada en el art. 35 b, 1º de la Ley General de Sanidad.

En enero de 2011 un grupo de consumidores norteamericanos, disgustados con la obvia estafa a que habían sido expuestos, presentaron una demanda en los tribunales contra los hermanos Rodarmel. Éstos se vieron forzados a hacer una declaración afirmando que no existía evidencia científica para sus afirmaciones, y llegar a un acuerdo con los demandantes por el monto de 57 millones de dólares.

La realidad es que estos emprendedores fabricantes-timadores no hicieron más que modernizar con hologramas la vieja superchería de la magnetoterapia y los ilusorios “benéficos” campos magnéticos y electromagnéticos. Ya en 2006, un juez de Estados Unidos había condenado al distribuidor de una pulsera magnética similar a rembolsar a 100 000 compradores el dinero gastado a causa de la publicidad engañosa. Entre otros beneficios, las pulseras presumían de controlar la hipertensión. El precio de cada una podía llegar a los 250 euros. Entre 2000 y 2003 los vendedores lograron recaudar unos 18 millones de euros.

Durante la vista pública, el juez Morton Denlow citó un estudio de la Clínica Mayo que atribuía la eficacia referida por algunos usuarios al efecto placebo (expresión de sugestión bien conocida, que hace que los síntomas declarados por el enfermo puedan mejorar con un falso tratamiento). El magistrado argumentó que las supuestas propiedades de la pulsera, un aro de metal terminado en dos pequeñas esferas, eran “... más ficción que ciencia” (Figura1.2).

La versión opuesta del efecto placebo, el nocebo, también existe. Consiste en el empeoramiento de los síntomas o signos de

una enfermedad por la expectativa del paciente de sentir efectos dañinos, dolorosos o desagradables ante una falsa medida terapéutica. El tema se trata con mayor detalle en el capítulo 8.

Vale la pena hacer notar que los timadores cuestan muy caro. Fue necesario un proceso judicial que duró tres años, sumado a una investigación de la Clínica Mayo, para poder desinflar el enorme globo generado por la pequeña empresa española Bio-Ray con sus pulseras magnéticas. Y a pesar de todo, es muy posible que a la larga los empresarios hayan sacado en la jugada ganancias de unos cuantos cientos de miles (o millones) de euros.



Figura 1.2 Pulseras magnéticas antiguas y recientes. Tomadas de *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba* Vol. 3, No. 2, Año 2013 y <https://www.gray.ca/store/>.

En el último capítulo se muestran otros ejemplos del uso desatinado de los imanes y la radiación electromagnética. Es de notar que en algunos círculos se ha extendido, de forma confusa e incorrecta, el término *magnetoterapia* para designar lo que debería llamarse electromagnetoterapia, pues se aplica radiación electromagnética y no campos magnéticos estáticos. En la radiación electromagnética están presentes de forma inseparable ambos tipos de campo, el

eléctrico y el magnético, interaccionando de manera continua entre sí. De aquí que la ilusoria magnetoterapia se refiera (o debiera referirse) de forma única y exclusiva al uso de campos magnéticos estáticos como el de los imanes permanentes, sin componente de campo eléctrico. Los modernos magnetoterapeutas ni siquiera están al tanto de esta realidad elemental y aplican el término magnetoterapia, indistinta y confusamente, a uno u otro caso.

El asesino invisible

El caso de las pulseras magnéticas puede haber dañado el bolsillo de muchos, aunque se reconoce la dificultad de que hayan dañado su salud, puesto que no causan efecto alguno, a no ser que actúen por sugestión, como placebo. El efecto placebo puede sedar, pero no cura, por lo que el posible daño causado de forma indirecta siempre estará presente, ya que el paciente puede dejar de utilizar los medicamentos adecuados confiando en la eficiencia del falso remedio. Es este quizás el mayor peligro que ofrecen en el presente las terapias magnéticas espurias, desviar la atención del paciente de la medicación adecuada (que a la larga pudiera ser fatal en algunos casos). No estamos exagerando; ya ha ocurrido en el pasado que la aplicación innovadora e indiscriminada de nuevos descubrimientos ha traído por consecuencia graves daños a las personas, e incluso la muerte. Un ejemplo muy instructivo, aunque no el terreno de los imanes sino en el de la radiación electromagnética de alta frecuencia, es el de la aplicación incontrolada de los rayos X en sus comienzos.

Al poco tiempo de aparecer los primeros equipos para hacer radiografías surgieron

en Estados Unidos salones de belleza que usaban los rayos X para depilar los vellos en diversas partes del cuerpo, en lo esencial a mujeres jóvenes. El tratamiento era promocionado, entre otros, por el médico Albert C. Geyser, quien se presentaba con los siguientes atributos, según el original en idioma inglés:

“Medical Director of the Tricho System, Formerly, Professor of Physiological Therapy and Chief of Clinic at Fordham University, Lecturer and Chief of Electro and Roentgenray Clinic at Cornell College, Lecturer and Chief of the Electro and Radio Therapy Clinic at the New York Polyclinic, etc.”.

En fin, como para creer a pie juntillas todo lo que él afirmara.

En 1925 existían en Estados Unidos alrededor de 75 máquinas Tricho diseñadas para eliminar los molestos e indeseables vellos en las mejillas y el labio superior de señoras y señoritas (y quizás de algún que otro insatisfecho caballero, figura 1.3). Sin embargo, al cabo de unos pocos años se comprobó que una gran dosis única de radiación, o muchas dosis pequeñas repetidas en largos períodos, podían causar serios daños a los tejidos sin que el daño se notara de inmediato, causando lesiones que salían a la luz meses o años después. Las lesiones se manifestaban como cambios en la pigmentación, queratosis, úlceras y la aparición de carcinomas que conducían a la muerte.

En 1930, el doctor *Henry H. Hazen* publicó un artículo titulado “Daños como Resultado de la Irradiación en los Salones de Belleza” (*American Journal of Roentgenology and Radium Therapy* Vol.23, No.4, 409-412;

1930), donde aparece escrito lo siguiente:

“Hace alrededor de 5 años cierto número de salones de belleza en varias ciudades instalaron máquinas Roentgen con el propósito de tratar el vello superficial... (también) se aplicaron tratamientos para otras condiciones... En mi lista hay una paciente que alegaba haber sido tratada por acné, y otra por pecas”.



Figura 1.3 El sistema Tricho para eliminar el vello facial mediante los rayos-X. Leyenda: Pello eliminado de forma permanente. Paciente recibiendo tratamiento en la mejilla. Ni dolor ni sensación de algún tipo. El método INFALIBLE usado con éxito por 16 años por el Dr. Albert C. Geyser, finado profesor de Tera-péutica Eléctrica en la Universidad de Cornell y refrendado por muchos médicos destacados. No agujas, no cera, no reactivos. Indoloro e inocuo. – Garantizado que es permanente.

En su gran mayoría eran mujeres con edades entre 18 y 30 años. Más adelante resume el doctor Hazen:

“En varios congresos han aparecido mu-

chos reportes de daños a la piel causados por los tratamientos de rayos Roentgen en los salones de belleza... En esta serie de 10 casos no menos de 7 mujeres han recibido serios daños...”

“Es de notar que en cada caso apareció una irritación a partir de la tercera o cuarta sesión y que, no obstante, se continuó la aplicación de los tratamientos. No podemos dejar de maravillarnos de la estupidez de los operadores y de la persistencia e ignorancia de las víctimas. Cualquier medida para proteger de su propia tontería a las mujeres que buscan mejorar su apariencia es recomendable. Es asombroso que en muchas comunidades las actas de práctica médica incluyan solo la prescripción de medicamentos y permitan a cualquier fisioterapeuta aplicar sus prácticas sin permiso o interferencia, con un total desprecio por los peligros potenciales de su proceder”.

Lo que resulta aún más sorprendente es que situaciones similares se produzcan en la actualidad, no con los rayos X, sino otros procedimientos que prometen un máximo de beneficios con un mínimo de incomodidad, pero que no curan nada y a la larga pudieran resultar dañinos para el paciente. La situación es mucho peor cuando los practicantes se ven estimulados por la indiferencia, la tolerancia, y a veces el apoyo oficial sumado a criterios de autoridad para intentar acallar las críticas. Una vez introducidos, los supuestos tratamientos o terapias son muy difíciles de erradicar. A pesar de que el procedimiento de Tricho podía llegar a causar la muerte, reportes de víctimas dañadas aparecieron en las revistas médicas

hasta unos 15 años después, bien entrada la década de 1940.

Magnetismo terrestre y campo magnético

¿Qué es a fin de cuentas, el magnetismo? ¿Y un campo magnetostático? ¿Y la radiación electromagnética? No es posible contestar estas preguntas en pocas palabras.

Ante todo es necesario insistir y dejar bien establecido que una cosa son los campos magnetostáticos, propios de los imanes permanentes y que no varían con el tiempo, y otra muy diferente la radiación electromagnética. Sus propiedades difieren enormemente. De aquí que en este primer capítulo se comience por los campos magnetostáticos, describiendo el magnetismo mineral, el campo magnético terrestre, sus principales propiedades y su relación con el Sol y otros planetas.

Magnetita. Las propiedades magnéticas del óxido de hierro se conocen desde los tiempos antiguos. La magnetita o piedra imán, un óxido natural de fórmula química Fe_3O_4 ; tiene la propiedad de atraer los objetos elaborados con hierro metálico o sus aleaciones, cualidad que le era familiar a los antiguos egipcios, griegos y romanos (figura 1.4, izq.). La magnetita no es el único óxido de hierro que existe, pero la *hematita* ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), la *maghemita* ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) y la *wüstita* (FeO) no poseen propiedades similares a la magnetita.

Los primeros yacimientos de magnetita de los que se tiene noticia se encontraban cerca de *Magnesia de Tesalia*, en Grecia, junto a menas de óxido y carbonato de magnesio. Al parecer de ahí se derivó el nombre *magnetismo*, del griego $\mu\alpha\gamma\eta\epsilon\varsigma$ (magnés =

imán).

Cuando se frota varias veces un pedazo de hierro alargado con una piedra imán, este adquiere a su vez la capacidad de atraer débilmente otros pedazos de hierro; se convierte en un imán permanente. Al igual que los trozos del mineral magnetita, los imanes producidos por frotamiento están polarizados, es decir, cada uno de ellos tiene dos regiones o extremos donde las propiedades magnéticas se manifiestan de forma más intensa. Las dos regiones se designaron de forma arbitraria como polo norte (o positivo) y polo sur (o negativo). Es fácil comprobar que los polos de igual signo se repelen y los de signo opuesto se atraen.

Una propiedad del hierro magnetizado es que cuando se le da una forma alargada o de aguja y se le permite girar con libertad (por ejemplo, suspendido de una cuerda por su centro, o flotando en agua sobre un corcho) la aguja siempre tenderá a alinearse en la dirección aproximada norte-sur, y de ahí los nombres polo norte para el extremo que se orienta al norte, y polo sur para el contrario. Existen evidencias de que los chinos utilizaban estas brújulas rudimentarias para guiarse en la navegación desde hace unos mil años. El instrumento se comenzó a utilizar en occidente unos 300 años después. En la figura 1.4 a la derecha se muestra una brújula moderna.

Cuando Cristóbal Colón cruzó el Atlántico en 1492 en busca de las Indias, notó que la aguja de su brújula se desviaba ligeramente de la dirección norte indicada por las estrellas y que la desviación cambiaba a medida que se alejaba del continente. Pero no fue hasta unos 100 años después que el médico

de la reina Isabel I de Inglaterra, William Gilbert, logró explicar la desviación al considerar que la tierra era un imán gigantesco, con sus polos magnéticos situados a cierta distancia de los polos geográficos. Estos últimos son los puntos de la superficie del planeta por donde pasa su imaginario eje de rotación (figura 1.5). El polo norte o positivo de la brújula siempre apunta al polo magnético norte, no al geográfico; además, la posición de los polos magnéticos no es inalterable; varía con los años. La diferencia entre la dirección que indica la brújula y la del norte geográfico o verdadero se llama *declinación magnética*.



Figura 1.4 Izq. Mineral magnetita. Der. Brújula de orientación moderna. Tomadas de <https://www.fabreminerals.com/LargePhoto.php?FILE=Magnetite-ND36AK8f.jpg&LANG=ES> y <http://acivro.blogspot.com/2009/05/orientacion-mas-compleja-1-el-mapa-un.html>

Los imanes son capaces de atraerse o de repelerse y de atraer al hierro sin que haya contacto directo entre ellos, aunque se encuentren separados a gran distancia. La aguja de la brújula gira a causa del magnetismo terrestre, alineándose en la dirección norte-sur, a pesar de que los polos magnéticos de la tierra se encuentren a miles de kilómetros. Para explicar la existencia de esta interacción a distancia, sin contacto directo entre los cuerpos, los físicos introdujeron el concepto de *campo magnético*.

Esta forma de pensar considera que cualquier imán tiene asociado un campo magnético estático que modifica las propiedades del espacio que lo rodea. Ese campo se extiende en todas las direcciones, y es el medio de interacción con otros imanes, con el hierro y con cualquier otro cuerpo que se considere. Se representa mediante una flecha o *vector* de longitud proporcional a su valor o intensidad en cada punto (*vector intensidad de campo*).

Es usual representar la distribución del campo magnético alrededor de cualquier objeto mediante líneas imaginarias; las *líneas de inducción magnética*, tal como se muestran en la figura 1.5. Se dibujan de forma tal que son paralelas a la dirección del vector intensidad de campo en cada punto; donde aparecen más unidas es mayor el valor o la intensidad del campo. Como los polos magnéticos de igual signo se repelen y los de diferente signo se atraen, el polo magnético terrestre situado al norte resulta ser en realidad un polo negativo (o sur) magnético, aunque se le denomine “polo magnético norte” para diferenciarlo del polo geográfico, lo que a veces induce a confusión.

La figura 1.5 muestra con claridad que las líneas de inducción magnética solo son paralelas a la superficie de la tierra en las regiones cercanas al ecuador. En cualquier otra locación están algo desviadas, formando un cierto ángulo con la horizontal (lo que no impide que la brújula siga apuntando al norte). Es fácil comprobar el ángulo que forman las líneas con la horizontal utilizando una brújula. Una vez que haya sido orientada hacia el norte en posición horizontal, basta con girarla $\frac{1}{4}$ de vuelta alrede-

dor de la dirección paralela a la aguja, de manera que quede perpendicular a su posición anterior. La aguja girará apuntando hacia la tierra en el hemisferio norte y hacia el cielo en el hemisferio sur, quedando paralela a la línea de inducción y a la dirección real del campo en ese punto.

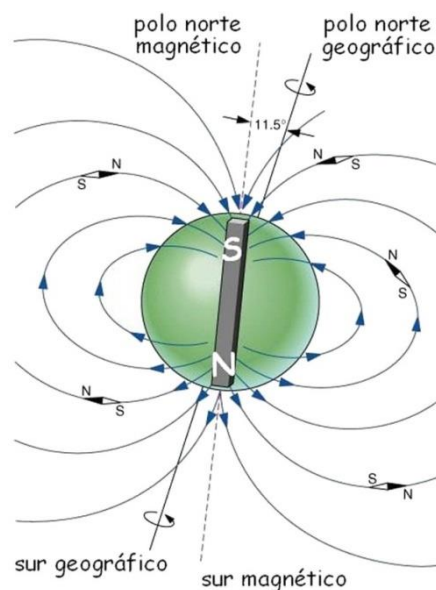


Figura 1.5 El extremo de la aguja imantada que apunta al norte magnético se denomina polo positivo o norte del imán y se designa con el signo (+), mientras que el otro es el polo negativo o sur y se designa con el signo (-).

El ángulo que forman las líneas de inducción con la horizontal en cada punto de la Tierra es la *inclinación* del campo magnético en ese punto. (No confundir con la *declinación* mencionada antes)

Los polos magnéticos se encuentran a una distancia considerable de los polos geográficos. En la actualidad el polo norte magnético se encuentra cerca de la isla de Bathurst, en el norte de Canadá, a unos 1 600 km del norte geográfico; el polo sur magnético se encuentra cerca de la Tierra

Adelia de la Antártica, a unos 2 600 km del polo sur geográfico, pero no siempre ha sido así. La ciencia que estudia las particularidades magnéticas asociadas a la Tierra y su atmósfera se conoce como *Geomagnetismo*.

A los polos magnéticos les gusta el movimiento

Los polos magnéticos cambian de posición con el tiempo, propiedad conocida como *deriva polar*, y se ha dado el caso de que la deriva polar se invierta; es decir, que el desplazamiento de los polos cambie de sentido o retroceda (Figura 1.6). Pero, además de desplazarse, a lo largo de la historia geológica la polaridad de los polos terrestres también se ha invertido en forma periódica; el norte magnético se ha convertido en sur, y viceversa. La razón de estas inversiones no es conocida; sin embargo, han quedado registradas en las rocas de origen ígneo que se van creando, tanto en la superficie de la tierra como en los fondos marinos de nueva formación.

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 de acuerdo con sus propiedades magnéticas. El primer grupo correspondía a las rocas de polaridad normal, con su magnetización orientada en la misma dirección y sentido del campo magnético de la Tierra. El segundo estaba constituido por las rocas con polaridad inversa, con la magnetización orientada en sentido contrario a la del campo terrestre. Esta particularidad generó muchas interrogantes en su época, pues la existencia de dos orientaciones magnéticas con sentido contrario pa-

recía algo totalmente arbitrario e inexplicable. Los estudios en diversas locaciones geográficas permitieron conocer con exactitud cuál era la orientación del campo magnético de nuestro planeta en las diferentes eras geológicas.

Hoy se sabe que 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 partículas de magnetita. La magnetita pierde sus propiedades magnéticas por encima de los 587 °C, pero vuelve a recuperarlas cuando la temperatura disminuye por debajo de ese valor. Cuando el magma se enfría y solidifica, las partículas de magnetita se magnetizan en la misma dirección que el campo magnético terrestre, y su magnetismo queda “congelado” en la posición original. Así quedó grabada en la roca la ubicación del campo magnético de la tierra en el momento que el magma solidificó.

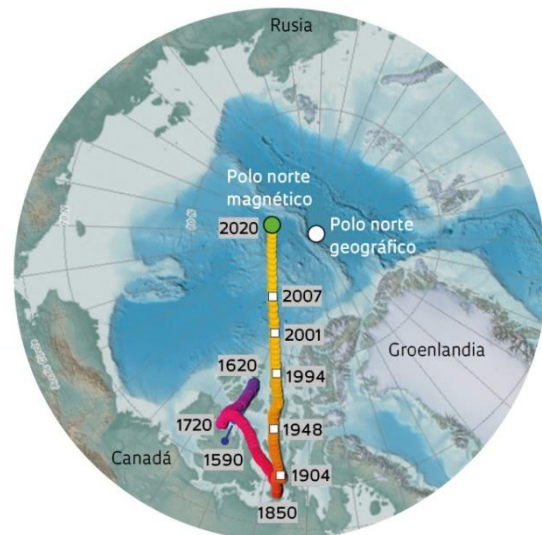


Figura 1.6 Deriva del polo magnético norte a partir de 1590 hasta la actualidad. Tomada de <https://www.tiempo.com/ram/polo-magnetico-tierra-se-desplaza-hacia-el-oeste.html>.

Durante la 2da. Guerra Mundial (1939-1945), las reservas de petróleo disminuyeron de manera considerable a causa de las acciones bélicas. Al terminar la guerra se organizó una búsqueda intensa en las plataformas submarinas 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 con la oceanología 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 muy sensible, desarrollado para equipar a los aviones que se dedicaban a la guerra antisubmarina.

Las experiencias obtenidas de los buques exploradores de petróleo se aprovecharon para construir el *Glomar Challenger*, un barco de investigaciones diseñado en específico para los estudios geológicos marinos, capaz de tomar muestras de roca a gran profundidad. Más adelante, mediante métodos paleontológicos y estudios de isótopos radiactivos, se determinó la edad de esas rocas y su orientación relativa. Se comprobó que la expulsión del magma durante decenas de miles de años había dado lugar a las diferentes cadenas montañosas que existen en el fondo de los océanos en la actualidad.

¿Y por qué precisamente en el fondo de los océanos? Porque allí la corteza terrestre es más delgada, y para salir al exterior el magma necesita recorrer un camino mucho más corto que por cualquier otra vía (Figura 1.7).

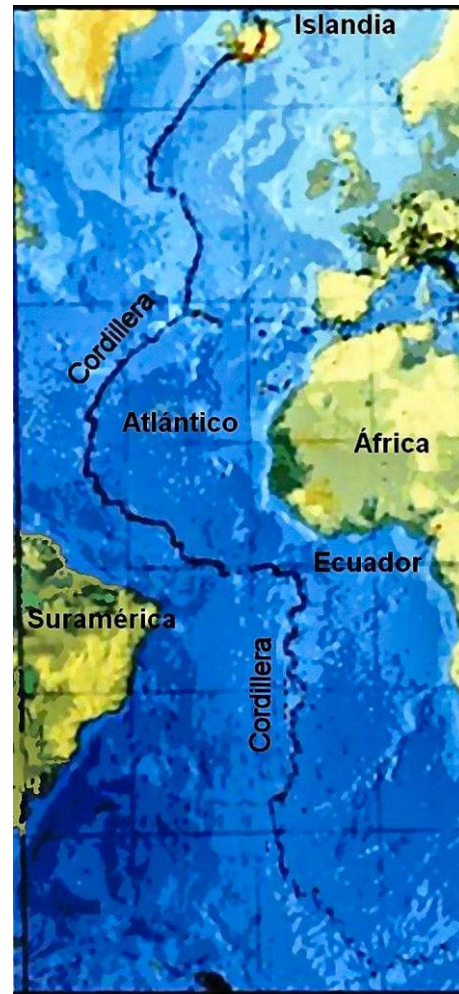


Figura 1.7 Cordillera del Atlántico. Tomada de *This Dynamic Earth*, US Dept. of the Interior/US. Geological Survey, ISBN 0-16-048220-8.

En la medida que se fue revelando la distribución magnética en el fondo de los océanos, las diferencias entre las rocas con polaridad directa e inversa expuestas por Brunhes y Matuyama a principios del siglo XX dejaron de ser arbitrarias, y fue tomando forma un cierto patrón de distribución. Cuando la región analizada llegó a ser lo suficiente 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 di-

recta e inversa se alternaban a ambos lados de la cresta central del océano Atlántico; las denominadas bandas magnéticas.

¿Cómo ocurrió esto? En el fondo del océano, la corteza nueva se forma de manera continua en la cresta o parte superior de la cordillera (Figura 1.8). Lejos de la cresta

las rocas son muy viejas, y a medida que nos acercamos a la cresta son cada vez más jóvenes, lo que se comprueba al analizar la cantidad de sedimentos depositados en el lecho oceánico. Sobre las rocas más viejas descansa una mayor cantidad de sedimentos.

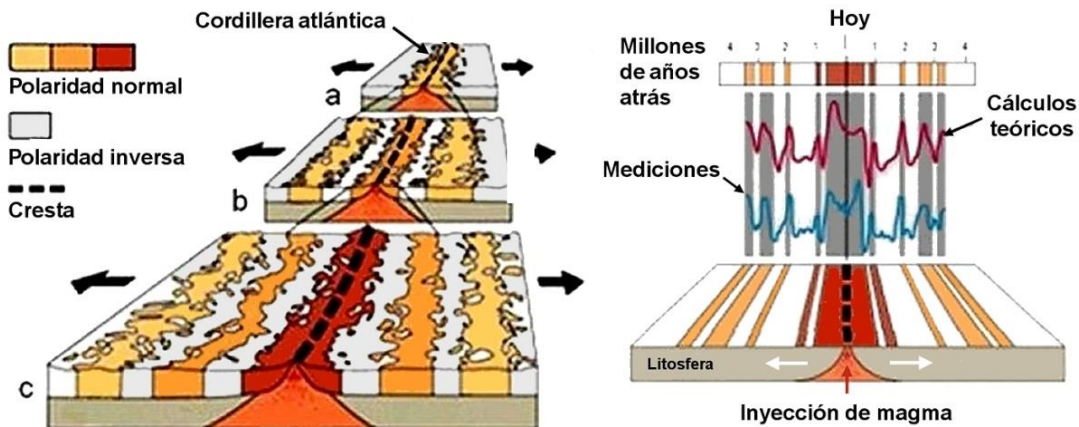


Figura 1.8 Evidencia experimental de la formación de las bandas. a) La cresta hace 5 millones de años. b) Hace 2 millones de años. c) Hoy día. Adaptado de *This Dynamic Earth*, US Dept. of the Interior/US. Geological Survey, ISBN 0-16-048220-8.

Las rocas más jóvenes, cercanas a la cresta, siempre tienen polaridad normal, coincidiendo con la dirección actual del campo magnético terrestre. Las bandas de rocas más alejadas 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. Los modelos teóricos de formación de rocas en el fondo del océano coinciden de forma excelente con los datos experimentales, y hoy día la corteza oceánica se considera una especie de “cinta magnética”, donde ha quedado registrada la historia del movimiento de los polos y de las inversiones del campo magnético terrestre durante millones de años.

En los últimos años, mediciones precisas

han dado por resultado una disminución significativa de la intensidad del campo magnético terrestre (alrededor de un 10 %). Se desconoce si este proceso conducirá a otra inversión de la polaridad o no en un futuro no muy lejano.

La magnetosfera y el viento solar

¿Quién no sabe que el campo magnético terrestre posibilita la orientación geográfica con la ayuda de la brújula? Junto a la estrella polar sirvió de guía a los viajeros durante siglos. Hoy día también tenemos el *Global Positional System* (GPS) que realiza la misma función con mucha mayor precisión, apoyándose en un sistema de 24 satélites que circunvalan la Tierra. Lo que no desmerece, ni mucho menos, la utilidad de la

brújula.

Pero es mucho menos conocido que el campo magnético terrestre realiza una segunda y mucha más importante función. 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.

El viento solar es un flujo de partículas cargadas (en su mayoría 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 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 interactuar 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* (figura 1.9).

Algunas partículas logran atravesar esa primera barrera magnética, pero son atrapadas más adentro, en los denominados *cinturones de radiación de Van Allen*. Otras logran ‘colarse’ hasta llegar a la atmósfera a través de las cúspides en los polos norte y sur, interactuando 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), algo muy común en las regiones polares, pero que rara vez se manifiesta cerca de los trópicos.

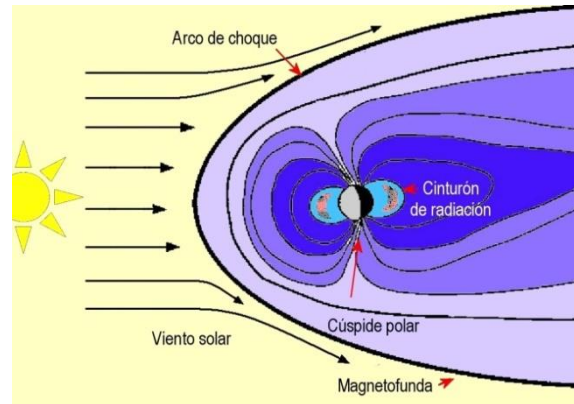


Figura 1.9 Magnetosfera terrestre.

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 las comunicaciones de forma notable y afectar incluso los instrumentos electrónicos más sensibles.

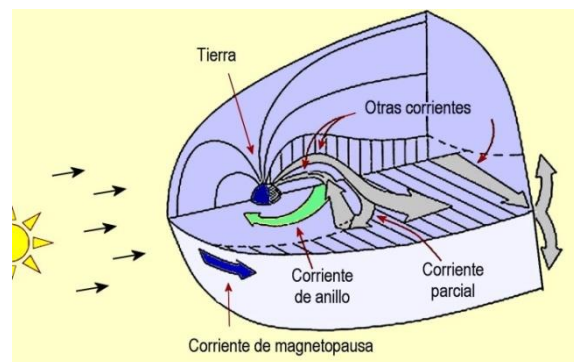


Figura 1.10 La corriente de anillo alrededor de la Tierra.

Tormentas magnéticas. La 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 de 0.5 %. Dura entre 12 y 24 horas, seguido 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 la denominada *corriente de anillo*, en el cinturón exterior de radiación que circunvala al planeta, cuando es reforzado por los protones procedentes de alguna erupción solar violenta (figura 1.10). La existencia de esta y otras corrientes alrededor de nuestro planeta ha sido determinada con gran precisión a partir de mediciones satelitales. En la actualidad es posible monitorear de forma continua la intensidad del campo magnético terrestre; el observatorio Kakioka, en Japón, publica el registro diario en su sitio WEB (<http://www.kakioka-jma.go.jp/en/index.html>).

La relación entre las tormentas magnéticas y las manchas solares es bien 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. Seis millones de personas

quedaron sin energía eléctrica durante nueve horas, con grandes pérdidas económicas. Esta excepcional tormenta magnética produjo auroras boreales a distancias tan lejanas del polo como es el sur de Texas. Fue el resultado de una gran emisión de masa en la corona solar que tuvo lugar 4 días antes.

¿Son dañinas las tormentas magnéticas? 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 igual 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 servir de plataforma para otros problemas de salud. Dosis muy grandes 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 son expuestos a la radiación proveniente de una erupción solar. Este es otro de los problemas ineludibles que hay que resolver durante los vuelos espaciales.

Existe mucha especulación sobre si la lluvia de partículas generada por las tormentas magnéticas puede o no afectar a las personas en la superficie terrestre, pero casi no hay definiciones hasta el momento. Algunos estudios indican una débil relación estadística entre las tormentas magnéticas y la presión arterial; sin embargo, como esos estudios no han sido reproducidos por otros investigadores, no pueden considerarse co-

mo definitivos.

Magnetismo planetario y solar

Los cuatro planetas gigantes de nuestro sistema (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) poseen campos magnéticos mucho más intensos que el terrestre. El eje magnético de Saturno parece estar alineado de forma exacta con su eje geográfico de rotación, mientras que los de Urano y Neptuno están inclinados unos 60° a partir del eje geográfico. Venus, por el contrario, no es magnético, mientras que el pequeño Mercurio, solo un poco más grande que nuestra luna, sorprendió a los científicos por estar magnetizado. Marte y la Luna no poseen campo magnético, pero presentan en su superficie grupos de rocas magnetizadas de forma permanente, sugiriendo que en algún momento sí lo tuvieron. Los grupos de rocas magnetizadas en Marte, observadas por primera vez en la misión espacial del *Mars Global Surveyor*, son en especial sorprendentes debido a que parecen formar bandas similares a las que aparecen en la cordillera del Atlántico.

En particular, es notable es el campo magnético de Júpiter. Si los campos de la Tierra y Júpiter fueran representados por barras magnéticas en el centro del planeta, la de Júpiter sería unas 20 000 veces más intensa. El eje magnético de Júpiter está algo desviado del eje de rotación, tal como sucede en la Tierra, pero mientras Júpiter y la Tierra giran en el mismo sentido, la polaridad magnética de Júpiter se encuentra invertida; tiene sentido contrario al de la Tierra.

El Sol posee un campo magnético semejante al de la Tierra, pero su magnetismo tiene una forma adicional de manifestarse. A

principios de los años 1600, *Galileo Galilei* y *Christopher Scheiner* observaron manchas que se movían en el ecuador solar. Tardaban 27 días en dar una vuelta completa, por lo que dedujeron que el Sol giraba. El período se incrementaba a 29.5 días en las regiones lejanas al ecuador, indicando que la superficie del Sol no era sólida.

Galileo y Scheiner supusieron que las manchas eran nubes que, flotando sobre la superficie, obstruían parcialmente el paso de luz. Hoy se sabe que las regiones de las manchas no son nubes, sino que están asociadas a intensos campos magnéticos. Son más oscuras porque están algo más frías, unos 2000°C por debajo de la temperatura de los alrededores. Se supone que de alguna manera los intensos campos magnéticos reducen el flujo local de calor y disminuyen la temperatura en esa región, pero el proceso mediante el cual ocurre la reducción aún se desconoce. Los astrónomos piensan que las corrientes eléctricas que fluyen en el plasma solar y crean esos campos magnéticos toman su energía de la desigual rotación del Sol, más rápida en el ecuador.

La intensidad de los campos en las manchas, calculada a partir de diversas mediciones realizadas en la Tierra y en misiones espaciales con instrumentos muy especializados, resulta ser unas 3000 veces mayor que la del campo magnético terrestre. A modo de comparación, el valor de la intensidad de campo de un imán corriente, como el de una bocina de audio, puede ser de 100 a 300 veces la del campo terrestre.

Las manchas solares presentan muchos rasgos enigmáticos. Su cantidad aumenta y disminuye siguiendo un ciclo algo irregular

que dura unos 11 años (Figura 1.11). La mayor parte de las veces las manchas aparecen por pares, con polaridades magnéticas opuestas. En la primera mitad de un ciclo, la primera mancha que aparece tiene siempre polaridad norte o (+) y la mancha "siguiente" polaridad sur (-), pero en el ciclo posterior las polaridades se invierten. El campo magnético global del Sol, asociado a sus polos norte y sur, también invierte su polaridad cada ciclo, unos 3 años después de cada mínimo de manchas. Todo lo anterior indica que este ciclo de 11 años de las manchas solares es una propiedad magnética en su esencia. Existen varias teorías para intentar explicar este comportamiento, pero ninguna es definitiva.

Teoría del dinamo autosustentable

Esta teoría trata de explicar el origen de los campos magnéticos presentes en muchos astros, mediante un modelo simplificado que imita la realidad. Para ello considera un líquido conductor de la electricidad que se encuentra en rotación. Además, su temperatura no es homogénea, por lo que existen corrientes de convección en su seno, similares a las que aparecen en un líquido calentado en una cazuela.

Las primeras suposiciones acerca del origen del magnetismo terrestre se sustentaban por el criterio de que la rotación de la Tierra era la responsable de la existencia del campo magnético. En primera instancia la idea parece atractiva, pues a las partículas elementales como los protones y electrones se les asocia cierta rotación elemental (el momento angular orbital y el momento angular de spin), y además poseen propiedades magnéticas.

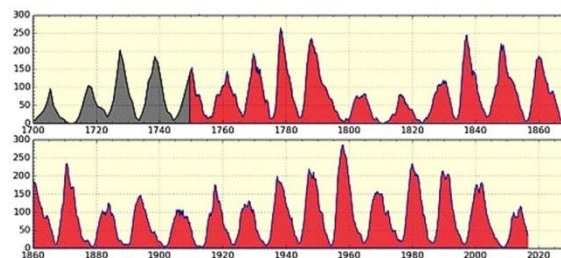


Figura 1.11 Ciclo de repetición del número de manchas solares observadas desde el siglo XVIII. Tomado de <https://www.astromia.com/solar/ciclosolar.htm>.

Así, por ejemplo, *P.M. Blackett*, ganador del premio Nobel de 1948 por su trabajo acerca de los rayos cósmicos, sugirió alguna vez que quizás cualquier objeto en rotación debería tener un campo magnético asociado. Sin embargo, todos los experimentos realizados con este fin proporcionaron resultados negativos. Más tarde, el descubrimiento de la inversión de la polaridad del campo magnético, ocurrida muchas veces en los últimos millones de años (desde luego, sin que el sentido de rotación de la Tierra varíe) contradujo por completo la suposición de Blackett.

Mediante el estudio de las ondas sísmicas que se originan durante los terremotos, se ha llegado a conocer que la Tierra posee un núcleo líquido denso de alrededor de la mitad de su diámetro, constituido en lo esencial por hierro fundido. A su vez, ese núcleo líquido posee un núcleo sólido aún más pequeño (Figura 1.12). Se supone que el metal fundido está circulando respecto al núcleo y atraviesa continuamente el campo magnético existente, lo que crearía corrientes eléctricas en el seno del líquido. Como las corrientes eléctricas generan campos magnéticos (ver capítulo 3), de alguna manera la rotación crearía un campo magnéti-

co autosostenido. Es decir, el campo generaría corrientes que a su vez darían origen al campo, que a su vez engendraría otras corrientes, y así en lo sucesivo.

La dificultad esencial radica en que hay que demostrar lo anterior basándose con rigurosidad en las leyes de la física, lo que nadie ha logrado hasta el momento. El problema es bastante peliagudo porque, entre otras cosas, la Tierra gira alrededor de un eje imaginario, lo que sugiere de inmediato que ese eje debería funcionar como un eje de simetría.

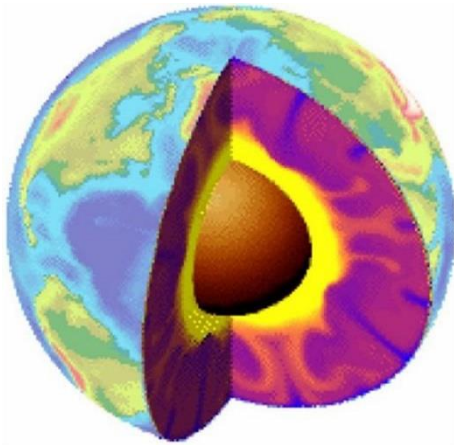


Figura 1.12 El centro de la Tierra. Tomado de <http://istp.gsfc.nasa.gov/earthmag/Mdynamo2.htm>.

Sin embargo, ya en 1931, el inglés *Thomas G. Cowling* demostró que ningún dinamo autosostenido en el centro de la Tierra podría tener un eje de simetría. Aún más, para resolver el problema de forma incontrovertible, sería también necesario obtener in-

formación sobre las fuentes de calor en el interior del planeta (información que no se posee), o al menos hacer suposiciones razonables que conduzcan a una solución aceptable.

Las fuentes de calor generan movimientos de convección en el núcleo, que también tendrían que formar parte de la solución del problema. Pero no solo se desconoce dónde están las fuentes más intensas de calor; aún más, cualquier movimiento de convección causado por el calor estará muy modificado por la rotación de la Tierra. El efecto sería similar a cómo se modifica el movimiento de las masas de aire en la atmósfera, haciendo que huracanes y tormentas se arremolinen en su forma característica.

Los intentos teóricos realizados hasta el momento solo proporcionan aproximaciones que no se ajustan a la realidad. Los modelos numéricos más recientes buscan soluciones computadorizadas basadas en las ecuaciones de la magnetohidrodinámica; pero para llegar a una solución válida se deben resolver sistemas de ecuaciones muy complejos, cuyos parámetros incluso no están bien determinados. Aparece información adicional sobre el tema en <http://setiathome.berkeley.edu/~pauld/etc/210BPaper.pdf> y <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma/lectures/node69.html>.

CAPÍTULO 2. EL CAMPO MAGNÉTICO MAGNETISMO MICROSCÓPICO

Cualquier cuerpo está formado por los pe-
queñísimos átomos y estos, a su vez, están
constituidos por partículas mucho más pe-
queñas, protones, neutrones y electrones en
lo esencial, aunque no son las únicas. Pro-
tones y neutrones se concentran en un nú-
cleo diminuto, 10 000 veces menor que la
envoltura, donde se encuentran los electro-
nes en movimiento, formando una especie
de nube poco definida (figura 2.1). El elec-
trón es aún mucho más pequeño; tanto, que
resulta difícil precisar con exactitud cuánto
más.

Átomo significa indivisible en griego. La
palabra se sigue usando aunque en realidad
los átomos dejaron de ser indivisibles hace
mucho. Son muy pequeños; el átomo más
ligero, el de hidrógeno, tiene un diámetro
de unos 10^{-10} m (0.0000000001 m o una
diezmillonésima de milímetro).

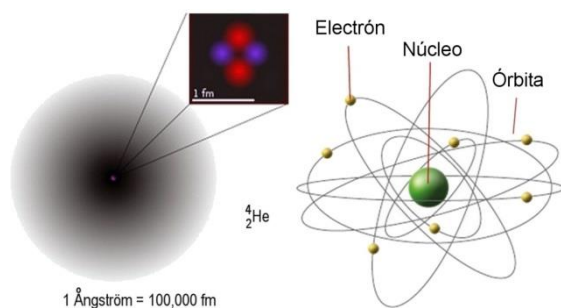


Figura 2.1 Representación de un átomo. Izq. Modelo matemático mediante ‘nubes’ de probabilidad. Der. Modelo físico planetario usado en aproximaciones clásicas. Ambas son imágenes idealizadas de la realidad.

Una sola gota de agua contiene más de mil trillones de átomos. Un millón de billones. Se expresa por la unidad seguida de 18 ce-
ros o 10^{18} . En las últimas décadas la tecno-

logía moderna ha permitido fotografiar los átomos, e incluso manipularlos uno a uno (figura 2.2).

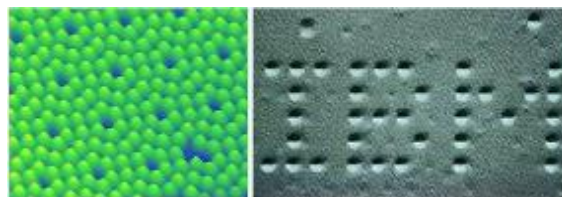


Figura 2.2 Algunas de las primeras imágenes de átomos individuales obtenidas mediante diversos microscopios de última generación. Izq. Átomos ordenados en la superficie de un sólido, obtenida con un microscopio electrónico de alta resolución. Der. Átomos de xenón sobre una superficie de níquel, ordenados para formar las letras IBM (*International Business Machines*) usando un microscopio túnel de barrido (1989). Tomadas de

http://www.medic.ula.ve/histologia/anexos/microscopweb/MONOWEB/capitulo6_8.htm y https://www.researchgate.net/figure/In-1990-a-scanning-tunneling-microscope-was-used-to-write-the-IBM-logo-in-xenon-atoms-at_fig2_284924836/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Il9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoX2RpcmVjdCJ9fQ.

Los átomos tienen masa. Todos los cuerpos son atraídos hacia la Tierra, y al ser colocados en una balanza tienen peso. Cuando los cuerpos están en reposo, el peso se expresa por la conocida relación $P = mg$, donde m es la suma de las masas de los átomos que lo conforman y g la aceleración de la gravedad. Los cuerpos también poseen propiedades eléctricas; los neutrones en el átomo no tienen carga, pero los protones tienen carga positiva y los electrones, negativa. En condiciones normales, desde el punto de vista eléctrico los cuerpos son neutros, pues sus átomos poseen igual cantidad de proto-

nes y electrones. Pero si por alguna razón un cuerpo adquiere electrones en exceso, adquiere carga negativa. Por el contrario, si tiene un defecto de electrones, entonces predominará la carga positiva de los protones, y el cuerpo tendrá una carga positiva. La experiencia nos dice que los cuerpos cargados que poseen igual carga se repelen, y los de carga diferente se atraen.

Finalmente, además de poseer extensión, masa y propiedades eléctricas, las sustancias también poseen propiedades magnéticas. Cada electrón atesora un magnetismo intrínseco o momento magnético, cuyo valor se representa por el *momento magnético de spin* (μ_s) y se comporta como un imán en miniatura. Protones y neutrones también poseen un magnetismo intrínseco, pero menos intenso que el de los electrones.

Cuando los electrones pasan a formar parte de un átomo específico, pueden o no comunicarle propiedades magnéticas en dependencia de su cantidad y su *pareamiento*. La razón es que tienden a ubicarse en la envoltura atómica por pares, con la polaridad opuesta, anulando el uno al otro su magnetismo, de la misma forma que dos imanes largos y estrechos tienden a cancelarlo al pegarse por sus polos opuestos. Si todos los electrones están pareados, el magnetismo total se cancelará.

Una contribución adicional de los electrones al magnetismo atómico resulta del *momento magnético orbital* (μ_L); originado por la interacción de los electrones con el núcleo atómico (figura 2.3). El *momento magnético atómico* (μ_a) recoge las contribuciones de los momentos magnéticos orbitales y de spin de todos los electrones del

átomo.

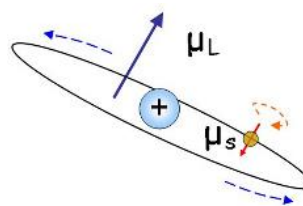


Figura 2.3 Representación clásica del momento magnético de spin μ_s y el momento magnético orbital μ_L asociados a un electrón. Las flechas continuas indican la dirección del campo magnético.

Cuando la suma de las contribuciones de todos los electrones en el átomo se anula se obtiene un átomo *diamagnético* ($\mu_a = 0$), que en lo esencial no posee propiedades magnéticas intrínsecas, aunque puede ser repelido débilmente por un campo magnético externo, como se verá en la sección siguiente. Las sustancias formadas por átomos de este tipo son sustancias o *materiales diamagnéticos*.

En los átomos *paramagnéticos* la suma de contribuciones produce un momento magnético no nulo ($\mu_a \neq 0$), y cada átomo se comporta como un imán microscópico. Cuando esos átomos se unen dan origen a los *materiales paramagnéticos*.

En adición, existen átomos paramagnéticos un tanto especiales, que se organizan de forma espontánea para formar sólidos con propiedades magnéticas mucho más intensas que los paramagnéticos convencionales; estos sólidos se denominan *ferromagnéticos* y se describen en las secciones siguientes.

Diamagnetismo

Son diamagnéticos algunos metales como el cobre y el bismuto, los gases inertes como el helio, el argón y el neón, el hidrógeno

molecular, la sal de mesa, el agua y muchos otros compuestos orgánicos e inorgánicos. Sin embargo, a pesar de que el momento magnético de los átomos de las sustancias diamagnéticas es nulo, estas sustancias son capaces de interactuar con los campos magnéticos externos por la razón siguiente.

Cuando un campo magnético externo actúa sobre un material diamagnético, en los átomos que lo componen aparecen dipolos magnéticos inducidos, similares a pequeños imanes, pero de sentido contrario al del campo externo aplicado. Surgen fuerzas de repulsión muy débiles y la sustancia diamagnética es repelida hacia la región donde el campo magnético es menos intenso. Esta propiedad es independiente de si el campo externo tiene polaridad norte o polaridad sur.

La interacción diamagnética es muy pequeña. Solo es detectable cuando se aplican campos magnéticos muy intensos, y no es necesario tomarla en cuenta en aplicaciones de interés práctico cuando hay presentes efectos magnéticos adicionales como los paramagnéticos o ferromagnéticos.

Paramagnetismo

Son paramagnéticos algunos gases moleculares como el nitrógeno N_2 y oxígeno O_2 , metales como el aluminio (Al), el wolframio^a (W) y el platino (Pt), y muchas sales y otros compuestos. Al acercarse una sustancia paramagnética a un campo magnético, cada átomo interactúa por separado con el campo y su momento magnético tiende a orientarse en la dirección del campo externo, o se orienta en realidad si la sustancia es un gas o un líquido poco viscoso.

^a También conocido como Tungsteno.

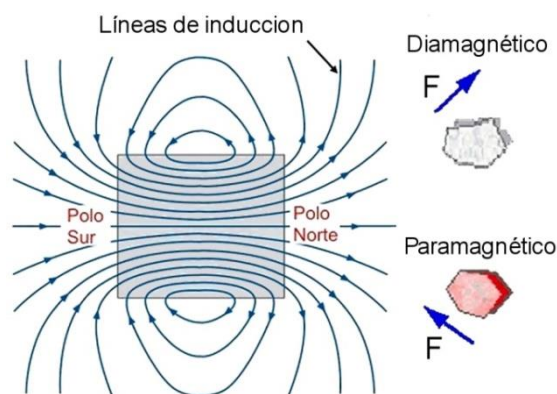


Figura 2.4 Las sustancias paramagnéticas son atraídas hacia donde el campo es más intenso (líneas de inducción magnética más unidas). Las diamagnéticas son repelidas. Este comportamiento no depende de si el polo es norte o sur.

Al mismo tiempo surgen fuerzas de atracción, tal y como ocurre con los polos opuestos de dos imanes convencionales, y la sustancia es atraída débilmente como un todo hacia la región donde el campo es más intenso (hacia donde están más unidas las líneas de inducción magnética).

En la figura 2.4 una barra imantada ilustra lo dicho antes. Las líneas de inducción salen de un extremo y se curvan para llegar al otro, formando rizos o bucles cerrados, con una parte dentro del imán y la otra fuera. El campo magnético es más intenso en los extremos de la barra donde las líneas de inducción magnética están más unidas; en los costados, donde están separadas, el campo magnético es más débil.

Magnetismo macroscópico

No es posible separar los polos magnéticos. Cualquier intento de dividir un imán permanente da origen a otros imanes con sus correspondientes polos positivo y negativo, aunque la división se repita hasta alcanzar un tamaño microscópico y llegar al nivel

atómico (figura 2.5). Significa que no existe una carga o monopolo magnético análogo a la carga eléctrica, que será analizada en el capítulo siguiente.



Figura 2.5 Dipolo magnético. Los polos magnéticos no se pueden separar. Al dividir la barra, cada segmento conserva sus dos polos.

Es usual designar el campo magnético por la *intensidad de campo* H o por la *inducción magnética* B . Cuando se designa por H , su magnitud en el *Sistema Internacional de Unidades* se mide en *ampere/metro* (A/m). Cuando se designa por B se mide en *tesla* (T). En otros sistemas de unidades, ya en desuso, se utilizaban con este fin el *Oersted* (Oe) y el *Gauss* (G). Más detalles sobre el Sistema Internacional de Unidades aparecen en el apéndice al final del capítulo.

En el vacío B y H se relacionan por la expresión $B = \mu_0 H$, donde μ_0 es una constante denominada *permeabilidad del vacío*. En cualquier otro medio B y H se relacionan según $B = \mu_0(H + M)$, donde H es el campo externo al medio y M la *magnetización* originada por la contribución de los momentos magnéticos internos de la sustancia en cuestión.

Otros parámetros magnéticos son la *permeabilidad relativa* μ_r y la *susceptibilidad magnética* χ_m , relacionada con μ_r por la expresión $\chi_m = \mu_r - 1$. Para los paramagnéticos

χ_m es positiva, mientras que para los diamagnéticos es negativa. En la tabla 2.1 aparecen los valores de algunas sustancias. Los valores negativos indican que tanto el cobre como el agua son diamagnéticos.

TABLA 2.1 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE ALGUNAS SUSTANCIAS	
SUSTANCIA	χ_m (ADIMENSIONAL)
Cobre	$-0,98 \times 10^{-5}$
Magnesio	$1,2 \times 10^{-5}$
Oxígeno (1 atm)	$193,5 \times 10^{-8}$
Agua	$-0,56 \times 10^{-6}$

Las células y los tejidos no obstruyen el paso del campo magnético de forma apreciable. De ahí que cuando se aplica uno de estos campos a una planta, animal o persona, aunque sea de muy baja intensidad, siempre podrá interactuar en mayor o menor grado con todas las moléculas, átomos e iones del sujeto en cuestión. La interacción será mucho menos importante con los átomos e iones diamagnéticos que con los paramagnéticos, y por regla general esta última es la interacción que se debe considerar, junto a la ferromagnética. Las cargas en movimiento dentro del organismo, que crean corrientes eléctricas de intensidad detectable, también pueden interaccionar con los campos magnéticos. Si los campos magnéticos son muy intensos, su interacción con las células y los tejidos puede causar perjuicios en el organismo, como se verá más adelante.

Paramagnetismo y bajas temperaturas. Mediante la magnetización y desmagnetización sucesiva de sustancias paramagnéticas se han obtenido las temperaturas más

bajas posibles. Desarrollado por primera vez en 1937 por el químico *William Giauque*, el método utiliza un campo externo para alinear los momentos magnéticos de los átomos de la sustancia utilizada para enfriar – usualmente una sal paramagnética en disolución. La disolución se sumerge en un baño de helio líquido (- 268,9 °C), que la enfría y, a la vez, sirve de conductor del calor.

La sal y sus alrededores logran enfriarse porque, para lograr alinearse cuando se aplica un campo externo, los momentos magnéticos de los átomos que la componen necesitan ceder calor. El helio líquido traslada ese calor al exterior. Cuando se eliminan a la vez la conducción del calor (aislando el sistema) y el campo magnético externo, los momentos magnéticos adoptan de nuevo una orientación desordenada, absorben calor y reducen la temperatura de la sal y sus alrededores. El proceso se repite en forma cíclica para lograr la mayor disminución posible de la temperatura.

Con este proceso se han alcanzado temperaturas muy cercanas al cero de la escala absoluta de Kelvin (hasta 0.002 K). La temperatura del hielo fundente (cero grados de la escala Celsius) equivale a 273.15 K. El cero de la escala Kelvin se conoce como *cero absoluto*.

De seguro el lector ya se habrá preguntado: ¿por qué algunas sustancias tienen un magnetismo mucho más fuerte que las demás? ¿Por qué algunas se magnetizan de forma permanente para crear imanes, y otras no? La respuesta está en que, como se dijo antes, dentro de las sustancias formadas por átomos paramagnéticos existe un grupo es-

pecial que tiene propiedades magnéticas muy acentuadas: las sustancias ferromagnéticas.

Ferromagnetismo

Algunos sólidos metálicos como el hierro, el níquel, el cobalto y muchas de sus aleaciones son ferromagnéticos. Estos materiales son atraídos con fuerza por el imán, con una intensidad miles de veces mayor que los materiales paramagnéticos. Algunos de ellos tienen la propiedad de que pueden ser magnetizados de manera permanente mediante un proceso conocido por *magnetización técnica*, que consiste en someter el material a la acción de un campo magnético externo de gran intensidad, generado por un electroimán (ver figura 2.11).

En adición a los metales y aleaciones, también existen óxidos y cerámicas que poseen propiedades magnéticas notables. La magnetita Fe_3O_4 es una de estas sustancias, así como otros óxidos sintéticos de parecida estructura cristalina, donde parte de los átomos de hierro se sustituyen con manganeso, níquel, cobalto, zinc, litio o sus mezclas. Los óxidos poseen un magnetismo un tanto diferente al anterior desde el punto de vista microscópico, y se les llama *ferrimagnéticos*, aunque no existen diferencias esenciales en su comportamiento macroscópico. La mayor diferencia es que los metales y aleaciones son buenos conductores de la electricidad, pero los ferrimagnéticos la conducen muy mal: son aislantes de la corriente eléctrica. Sus propiedades magnéticas, aunque intensas, no llegan a ser tan notables como en los ferromagnéticos pero, por otra parte, su alta resistividad las hace insustituibles en muchas aplicaciones. Por ejem-

plo, en dispositivos para radio y televisión, donde los metales ferromagnéticos dan origen a grandes pérdidas de energía por disipación de calor.

La intensa actividad magnética de los materiales ferro y ferrimagnéticos se debe a que los átomos de estas sustancias interactúan de forma espontánea unos con otros. Esa interacción hace que sus momentos magnéticos se ordenen en conglomerados de tamaño microscópico, llamados *dominios magnéticos* (ver figura 2.6).

Todos los momentos magnéticos atómicos dentro de un determinado dominio apuntan en la misma dirección, por lo que cada dominio se comporta como un dipolo magnético de intensidad miles de veces mayor que la de un solo momento magnético de valor μ_a .

Es posible caracterizar el efecto magnético mediante la magnetización M , número de momentos magnéticos atómicos por unidad de volumen en el material considerado. Si se utiliza el símbolo Σ para indicar la suma de todos los momentos magnéticos atómicos $\vec{\mu}_a$ en un volumen V determinado, entonces

$$\vec{M} = \frac{\Sigma \vec{\mu}_a}{V}$$

La pequeña flecha sobre μ_a indica que al sumar hay que tomar en cuenta las diferentes direcciones hacia donde están orientados los momentos magnéticos (son magnitudes vectoriales, a diferencia de las escalares como la masa o la temperatura, que solo se suman). En el Sistema Internacional de Unidades, M se mide en las mismas unidades de H : ampere/metro (A/m).

Dentro de cada dominio, donde todos los

momentos magnéticos atómicos están orientados en la misma dirección, M tiene el mayor valor posible que puede alcanzar $M = M_s$ (*magnetización de saturación*). Sin embargo, no todos los dominios magnéticos del material están orientados en la misma dirección.

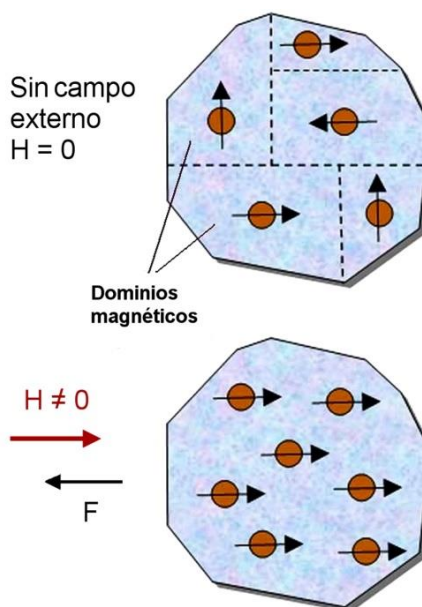


Figura 2.6 Aplicación de un campo externo H sobre un material ferromagnético. Aparece una fuerza F de atracción hacia el origen del campo. Si hay condiciones adecuadas, al retirar el campo externo el material queda magnetizado en forma permanente.

A causa de la agitación térmica siempre presente, cada dominio estará orientado en una dirección diferente a la de los restantes, como se refleja en la parte superior de la figura 2.6. Si se considera el volumen de todo el material y se suman los momentos magnéticos de todos los dominios microscópicos, aquellos orientados en sentido contrario se cancelarán. El efecto que se obtiene al nivel macroscópico es el de un material sin magnetización ($M = 0$).

En resumen, en un material ferromagnético

no magnetizado previamente, dentro de cada dominio microscópico la magnetización tiene un valor M_s , pero en el promedio macroscópico para todo el material, $M = 0$.

Para orientar todos los dominios en una misma dirección es necesario aplicar un campo externo H ; así, es posible lograr que las fronteras entre los dominios (las *paredes de dominio*) se desplacen de sus posiciones de equilibrio. Mediante ese mecanismo los dominios orientados en la dirección favorable, paralela a H , aumentan de tamaño a costa de los dominios vecinos. Aparece entonces una magnetización macroscópica resultante $M \neq 0$ en la dirección del campo aplicado, y una fuerza F de atracción notable sobre el material, dirigida hacia el origen del campo externo (figura 2.6). Si H es bastante intenso llega un momento en que todos los momentos magnéticos apuntan en la misma dirección y el material queda magnetizado por completo (o *saturado*) en lo macroscópico.

Materiales ‘duros’ y ‘blandos’

Según su comportamiento en presencia del campo externo H , los materiales ferro y ferrimagnéticos, tanto metálicos como cerámicos, se dividen en “duros” y “blandos”. En los materiales duros es necesario aplicar un campo intenso para magnetizar el material. Estos materiales se usan para construir imanes artificiales, pues son capaces de retener una parte importante de la magnetización después de que se retira el campo aplicado.

En los materiales blandos el campo necesario para magnetizar el material es muy pequeño. De aquí que estos materiales se utilicen para fabricar dispositivos eléctricos y

electrónicos que van a ser sometidos a un régimen de campo variable (transformadores, inductores y núcleos de electroimanes) donde la retención de la magnetización o remanencia es indeseable.

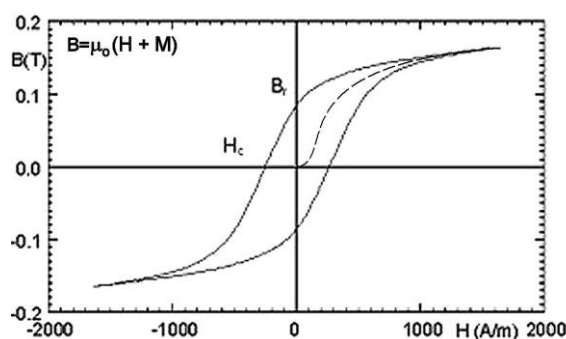


Figura 2.7 Lazo de histéresis; inducción magnética B en función de la intensidad de campo aplicado H ; B_r es la inducción remanente y H_c la fuerza coercitiva. La curva punteada es la curva virgen de magnetización o curva de inducción normal; sólo se obtiene cuando el material se magnetiza por primera vez.

Tanto los materiales duros como los blandos presentan la propiedad de *histéresis*, que consiste en el retraso de la magnetización M respecto al campo aplicado H . Si se grafican los diferentes valores que M va tomando cuando H primero aumenta, y después disminuye hasta invertir su sentido, se obtiene una curva cerrada característica llamada *lazo de histéresis* (figura 2.7). En vez de la magnetización M , también es usual emplear la inducción magnética $B = \mu_0(H+M)$ para caracterizar el lazo. En la figura, un valor negativo de H indica que se invirtió su sentido. Para $H = 0$ la magnetización no se anula, sino que toma el valor $M_r = B_r/\mu_0$ (*magnetización remanente*). Para lograr anular la magnetización del material es necesario aplicar un campo contrario de intensidad H_c , denominado *fuerza coercitiva*.

TABLA 2.2 PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE MATERIALES BLANDOS	
MATERIAL	$\mu_{\text{MÁXIMA}}$
Ferrita de Ni	2 500
Fe	5 500
Fe 96% – Si 4%	8 000
Ferrita de Mn	10 000
Fe 55% – Ni 45%	50 000

TABLA 2.3 PROPIEDADES DE HISTÉRESIS DE ALGUNOS MATERIALES PARA IMANES PERMANENTES			
MATERIAL	$H_c(\text{kA/m})$	$M_r(\text{T})$	$(BH)_{\text{MÁX}}$ (kJ/m^3)
Ferrita de estroncio	100-300	0,2-0,4	10-40
Alnico	275	0,6-1,4	10-88
SmCo_5	600-2000	0,8-1,1	120-200
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	750-2000	1,0-1,4	200-440

El área encerrada por el lazo de histéresis es proporcional a la energía que hay que gastar para magnetizar el material. En un núcleo sometido a una corriente alterna de alta frecuencia, como ocurre en los circuitos de radio y TV, el campo magnético se invierte continuamente miles o millones de veces por segundo; si el área del lazo no es muy pequeña, las pérdidas de energía serán

prohibitivas. Por el contrario, un material diseñado para aplicarse como imán permanente requiere de un lazo de histéresis con la mayor área posible, pues una cifra de mérito para esta aplicación es el máximo valor del producto BH en el cuadrante superior izquierdo del lazo de histéresis en la figura 2.7.

El producto $(BH)_{\text{máx}}$ mide la energía magnética almacenada en el imán; a mayor energía, mayor poder de atracción para un mismo volumen de material magnético. Un gran $(BH)_{\text{máx}}$ requiere a su vez grandes valores de M_r y H_c . Mientras mayores sean M_r y H_c también lo será el área encerrada por el lazo.

En la tabla 2.2 aparece la permeabilidad de algunas aleaciones y compuestos cerámicos ferro y ferrimagnéticos blandos. Los valores son miles de veces superiores a los de las sustancias paramagnéticas. En la tabla 2.3 se muestran algunos valores típicos de la fuerza coercitiva H_c en kiloampere/metro (kA/m) y la remanencia M_r en tesla (T), pertenecientes a aleaciones y compuestos utilizados en la fabricación de imanes permanentes. También aparece el producto $(BH)_{\text{máx}}$ en kilojoule/metro cúbico (kJ/m^3); $1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}$. Las propiedades de las diferentes aleaciones que se muestran en las tablas pueden variar bastante de uno a otro fabricante.

Temperatura de Curie. Cuando los materiales ferro y ferrimagnéticos se calientan y su temperatura aumenta, M_s disminuye a causa de la agitación térmica y las propiedades magnéticas se reducen. Por encima de cierta temperatura conocida como temperatura o *punto de Curie* la estructura de dominios

desaparece y M_s se hace igual a cero. Esta temperatura, característica de cada material, se llama así en honor del físico francés *Pierre Curie*, que descubrió esta particularidad en 1895. El punto de Curie del hierro metálico es de unos 770 C. En los ferrimagnéticos esta temperatura se denomina *temperatura de Néel*, por el trabajo destacado de *Louis Eugène Néel* sobre las propiedades magnéticas de los sólidos.

Si el material se enfría de nuevo tras alcanzar la temperatura de Curie, recupera la estructura microscópica de dominios de manera espontánea, pero queda totalmente desmagnetizado en lo macroscópico. Para que recupere las propiedades magnéticas anteriores es necesario volver a aplicar el proceso de magnetización técnica.

El magnetismo en los organismos vivos. La magnetorecepción.

Existen microorganismos y animales superiores que han evolucionado para utilizar el magnetismo terrestre a su conveniencia. En 1855, el zoólogo ruso Alexander Theodorowitsch von Middendorff, refiriéndose a las aves migratorias, escribió lo siguiente: ... similar a la aguja magnética de los barcos, estos navegantes del aire poseen un sensor magnético interno que podría estar ligado a los flujos galvano-magnéticos... Sin embargo, no fue hasta unos 100 años después que F. Merkel y W. Wiltschko mostraron la primera evidencia indiscutible, al lograr modificar la migración del Robin europeo (*Erithacus rubecula*) mediante campos magnéticos artificiales.

De allá para acá se han llevado a cabo múltiples investigaciones, no sólo en aves, sino también en abejas, hormigas y bacterias, así

como en especies migratorias como tortugas, anguilas, langostas, salmón, truchas y el tiburón cabeza de martillo (figura 2.8). También se ha investigado la influencia de los campos magnéticos en las plantas, aunque con mucha menor intensidad.

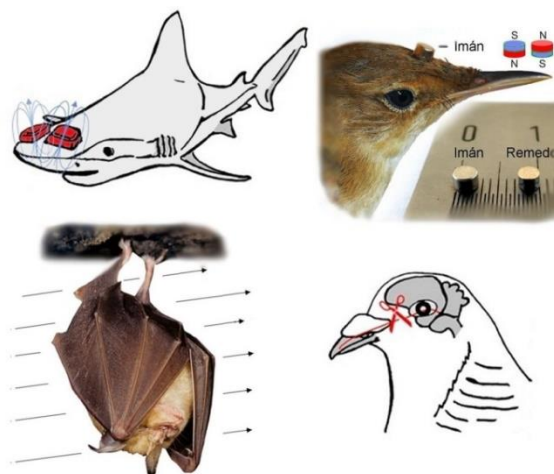


Figura 2.8 Diversas técnicas utilizadas para investigar la magnetorecepción. Aplicación de imanes permanentes a peces y aves, exposición a campos artificiales extensos y ablación del sensor magnético mediante cirugía o anestesia (adaptada de las refs. [2], [10] y [14]).

Los modelos más comunes para tratar de explicar cómo funciona la magnetorecepción se basan en la presencia de magnetita, detectada en algunos animales, y la actividad de los *criptocromos*, proteínas presentes en prácticamente toda la vida animal y vegetal como fotorreceptores de luz azul, que además realizan otras funciones en el organismo (figura 2.9).

Según este modelo, la luz forma un par de radicales en los que existe una asociación entre los espines de los dos electrones no apareados (conocido como mecanismo RPM por sus siglas en inglés: *Radical Pair Mechanism*) y el campo magnético afecta el ti-

po de relación (paralela o anti-paralela), lo que a su vez afecta el intervalo de tiempo que el criptocromo permanece activado. La activación afectaría la sensibilidad de las neuronas en la retina, dando la posibilidad de que el animal pueda "ver" el campo magnético. Sin embargo, reportes recientes cuestionan estas hipótesis, a causa de una larga cadena de contradicciones entre los ensayos 'in vitro', en el laboratorio, con los ensayos 'in vivo' realizados directamente en los animales.

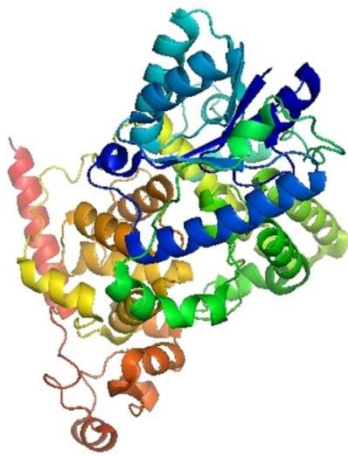


Figura 2.9 Flavoproteína criptocromo. Los criptocromos poseen dos cromóforos: la pterina y la flavina. Ambos son capaces de absorber un fotón.

Un organismo unicelular donde la magnetorecepción se ha comprobado sin lugar a dudas es la bacteria *Aquaspirillum magnetotacticum*, descubierta en 1975 al estudiar otras de sus propiedades en un laboratorio ubicado en el hemisferio norte. Al ser observadas al microscopio se encontró que, cuando se acercaba un imán al portamuestras, se movían siempre en dirección al polo norte del imán. Al investigar se comprobó que estas bacterias son capaces de producir pequeños imanes de magnetita o *magneto-*

somas. Las bacterias se las arreglan para ordenar los pequeños imanes en una línea y construir imanes mucho más largos y potentes; con él se alinean paralelas a las líneas de inducción del campo geomagnético (figura 2.10).



Figura 2.10 Bacterias magnetotácticas y magnetosomas en su interior. Las manchas de mayor tamaño son gránulos de azufre.

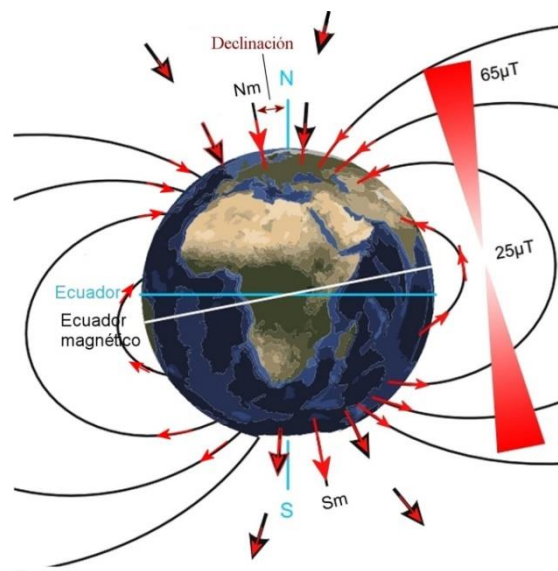


Figura 2.11. Características del campo magnético terrestre; polaridad, intensidad, declinación e inclinación. Nm: norte magnético; Sm: sur magnético.

¿Y por qué este comportamiento? Por lo siguiente: las líneas de inducción magnética son paralelas a la superficie terrestre sólo en el ecuador magnético y se inclinan al avanzar en la dirección norte hasta llegar a 90° en el polo (figura 2.11). Y resulta que estas

bacterias son *anaerobias*; viven en regiones donde hay poco o ningún oxígeno; en un medio acuoso el nivel de oxígeno decrece a medida que se avanza en profundidad. De aquí que las bacterias utilizan sus brújulas internas para dirigirse hacia lo más profundo, donde hay menos oxígeno, siguiendo la inclinación del campo geomagnético.

Y, como era de esperar, se comprobó que las bacterias del hemisferio sur, en vez de orientarse al norte, lo hacen hacia al sur. En el ecuador se encuentra una mezcla de bacterias tipo ‘norte’ y tipo ‘sur’. Cuando las bacterias se trasladan del hemisferio norte al sur, o viceversa, al reproducirse su ‘polaridad’ cambia al cabo de varias semanas.

Magnetita en otros organismos. Las abejas poseen material magnético en la parte anterior del abdomen; también existe material magnético en la anguila; en particular en los huesos del cráneo, de la columna vertebral y la faja pectoral. En la cabeza y el cuello de las palomas mensajeras la magnetita se encuentra en estructuras visibles a simple vista (0,5 - 2 mm), entre la membrana que cubre el sistema nervioso central (duramadre) y el cráneo. También se ha encontrado magnetita el delfín común del Pacífico *Delphinus delphis*.

Los tiburones poseen un complejo sistema de detección electromagnético disperso en su cabeza (*ámpulas electrorreceptoras de Lorenzini*, figura 2.12).

Otro caso que muestra un comportamiento complejo de magnetorecepción es el de la langosta del caribe *Panulirus argus*. Durante una investigación para profundizar en el conocimiento de sus características magnéticas, un lote capturado en Cayo Grassy,

Florida, se trasladó en dos grupos al cercano Cayo Largo. Allí las langostas fueron expuestas a campos magnéticos que replicaban el geomagnetismo existente a 400 km al norte y al sur del sitio de captura, distancias que se sabe estos crustáceos no son capaces de recorrer (figura 2.13).

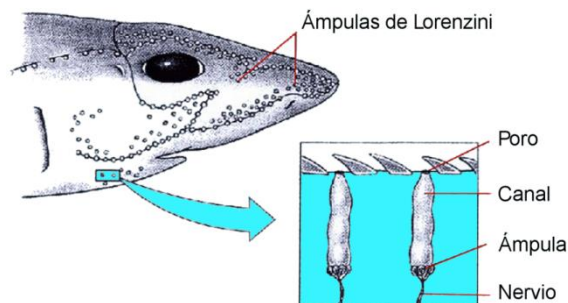


Figura 2.12 Ámpulas electrorreceptoras de Lorenzini en un tiburón. (A. Kalmijn, *IEEE Trans. Magn.* 17, 1113, 1981).

Al ser liberadas en un sitio cercano al de captura, las langostas comenzaron a trasladarse como si las hubieran liberado en los sitios simulados a 400 km, indicando no sólo capacidad de orientación, sino la existencia de cierta capacidad de memorizar la distribución geomagnética.

A pesar de la gran cantidad de estudios sobre el tema en los últimos años, aún no existe una teoría bien fundamentada acerca de la orientación magnética en los animales. Como explicación a esta ausencia de teoría se han señalado diferentes causas; algunas de ellas son las siguientes:

- Las personas no pueden percibir directamente el campo magnético terrestre, lo que dificulta diseñar experimentos en animales y compromete la efectividad del experimentador para eliminar sesgos e informaciones erróneas.

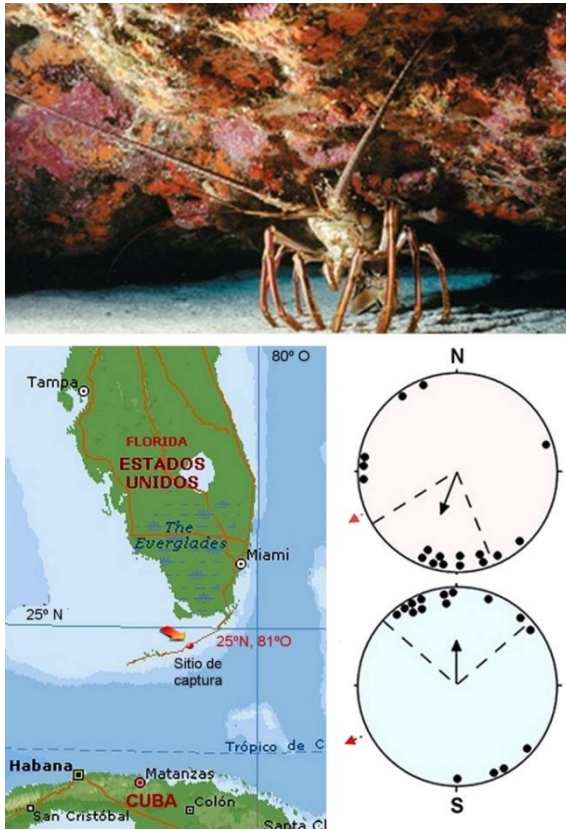


Figura 2.13. Experimento de campo con langostas. Tras ser expuestas a campos artificiales que simulaban las condiciones geomagnéticas a distancias de 400 km al norte y sur del sitio de captura (península de la Florida y sur de Cuba), al ser liberadas en un sitio cercano trataron de regresar al lugar de origen como si realmente estuvieran en los sitios simulados al norte y al sur (direcciones indicadas por las flechas promedio dentro de las circunferencias). Las flechas rojas indican la dirección real en que deberían haberse trasladado una vez liberadas.

- Pocas veces se hace distinción entre las diversas propiedades del campo geomagnético; (es decir, no se especifican polaridad, intensidad, declinación e inclinación).
- Los métodos electrofisiológicos usados regularmente en la neurobiología sensorial se ven muy limitados en relación a la orientación magnética, pues un estímulo magné-

tico puede inducir FEMs en un electrodo, sesgando la evidencia.

- Como los campos magnéticos penetran los tejidos vivos, los sistemas de magnetorecepción pueden estar ubicados en cualquier lugar del cuerpo del animal. Su tamaño puede ser nanométrico o aún menor, lo que dificulta enormemente su localización.

- No hay seguridad de si la magnetorecepción se basa en un solo tipo de receptor o en un solo tipo de mecanismo. En los tiburones, por ejemplo, pudieran coexistir sensores eléctricos y magnéticos. Además, la adaptación a diversos medios (peces, aves, insectos) puede haber generado múltiples receptores y mecanismos.

También se ha señalado que se requieren expertos en ciencias conductuales, para diseñar ensayos que eviten el posible sesgo causado por otros estímulos sensoriales. Por ejemplo, un imán colocado en la cabeza de algunas aves perturba notablemente su orientación, pero sólo si no se le permite acceder a otras posibilidades de orientarse.

Magnetización técnica

Hasta 1821 solo se conocía el campo magnético asociado a los imanes permanentes. En ese año el científico danés *Hans Christian Oersted*, mientras mostraba a sus amigos el flujo de una corriente eléctrica en un alambre, notó que el paso de la corriente hacía que la aguja de una brújula cercana se moviera. La nueva propiedad fue estudiada en detalle con posterioridad por *André-Marie Ampère*, quien fue el primero en demostrar que dos alambres conductores paralelos, por los que circula una corriente continua en el mismo sentido, se atraen a causa del campo magnético asociado a la corrien-

te. Si los sentidos de la corriente son opuestos, los alambres se repelen.

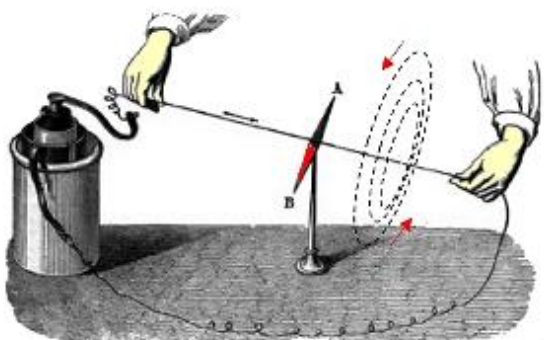


Figura 2.14 Experimento de Oersted. La brújula tiende a orientarse paralela a las líneas de inducción magnética asociadas a la corriente. Las líneas de inducción forman circunferencias concéntricas alrededor del alambre, en toda su longitud. El pulgar de la mano derecha sigue el sentido de la corriente; las líneas de fuerza siguen la dirección de los dedos de esa mano.

La dirección de las líneas de inducción magnética asociadas al alambre con corriente cumplen la *regla de la mano derecha*: si se orienta el pulgar en el sentido de la corriente, los restantes dedos de la mano indican el sentido de giro de las líneas de inducción alrededor del alambre (figura 2.14).

Un enrollado de alambre conductor con muchas vueltas en paralelo actúa como un electroimán cuando se le hace pasar una corriente eléctrica. Sus propiedades magnéticas son idénticas a las de un imán permanente (figura 2.15). El clavo de hierro en la figura actúa como un núcleo ferromagnético, que refuerza notablemente las propiedades del electroimán por la contribución de la magnetización M del material. Mediante los electroimanes es posible generar cam-

pos magnéticos de gran intensidad. Aplicando esos campos a una sustancia ferromagnética “dura” es posible fabricar imanes permanentes artificiales.

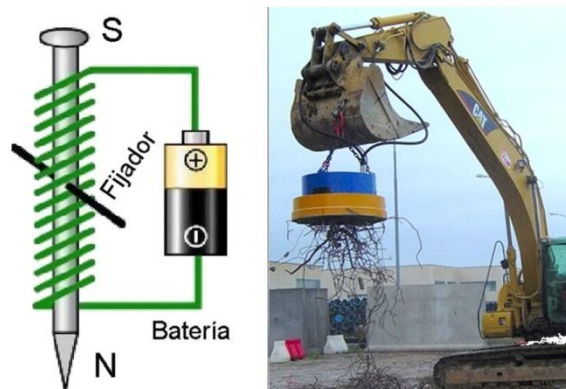


Figura 2.15 Izq. Electroimán de construcción casera con un núcleo de hierro (clavo). Der. Electroimán industrial de gran potencia.



Figura 2.16 Efectos sorprendentes obtenidos con superimanes sintéticos contemporáneos de neodimio-hierro-boro. El imán colocado en la parte superior de la mano es capaz de atraer (y también magnetizar) las presillas en la parte inferior, que se atraen unas a otras a lo largo de las líneas de fuerza.

La tecnología de construcción de los imanes artificiales ya tiene más de 100 años, y

ha posibilitado obtener imanes cada vez más pequeños con campos magnéticos cada vez más intensos. Los imanes sintéticos actuales poseen muchísima más energía y poder de atracción que la magnetita natural (figura 2.16).

Grabación magnética

La singular propiedad que poseen los materiales magnéticos “duros” de conservar la magnetización permite utilizarlos como elementos de memoria o almacenamiento de datos. El primer instrumento de registro y lectura magnética, el telegráfono, fue inventado en 1898 por el ingeniero danés *Valdemar Poulsen*. Como sistema grabador utilizaba una cinta de acero y un pequeño electroimán o cabezal en forma de herradura. Mediante un circuito eléctrico lograba convertir las señales sonoras en impulsos magnéticos. Los impulsos orientaban en forma codificada los dominios magnéticos de la cinta mientras se deslizaba sobre los polos del electroimán, movida por un sistema mecánico auxiliar. Después se podía reproducir el sonido haciendo pasar la cinta sobre los polos de otro electroimán, que hacía las veces de lector o reproductor. La cinta en movimiento, previamente magnetizada, inducía en la bobina del electroimán una pequeña diferencia de potencial eléctrico. Esa señal podía ser amplificada y convertida de nuevo en sonido mediante otro circuito electrónico que decodifica la grabación magnética.

Uno de los soportes que llegó a ser muy popular para grabar cintas de audio y video, ya obsoleto, fue el casete compacto con cinta de dos o cuatro pistas (figura 2.17). Estas cintas se construían utilizando algún mate-

rial magnético finamente pulverizado (por lo general óxidos de hierro o cromo) disperso en un material plástico lo suficiente flexible y resistente.

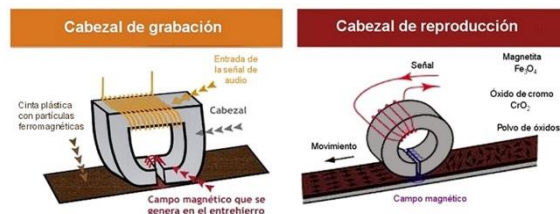


Figura 2.17. Sistema de grabación mediante cinta magnética, ya en desuso.

El cabezal de grabación era un electroimán muy pequeño, de varios milímetros de longitud y con los polos muy próximos, separados por fracciones de milímetro. Para ‘borrar’ la cinta se hacía pasar una corriente alterna por el electroimán. El campo variable que genera esta corriente desordena por completo los dominios magnéticos en la cinta, y el sistema queda listo para grabar de nuevo. Sistemas similares de grabación y lectura magnética se utilizan en la actualidad en tarjetas de crédito, de teléfonos, de identificación o en boletos y tickets de uso múltiple del metro y de los autobuses urbanos en algunos países.

En el denominado disco duro (HDD) de las computadoras, la grabación magnética se lleva a cabo sobre una película metálica muy delgada mediante la cabeza de lectura y escritura de la unidad de disco (un pequeño electroimán que cambia la orientación magnética de los dominios magnéticos o una magnetorresistencia lectora, figura 2.18).

En los primeros disquetes o discos flexibles de 3½ pulgadas, ya también desplazados por las memorias USB (*Universal Serial*

Bus), la grabación se hace sobre micropartículas de óxido magnético dispersas en un plástico semirrígido, al igual que en las tarjetas de crédito o de identificación.



Figura 2.18 Disco duro (HDD). Pueden poseer 4 o más brazos móviles.

Si un disquete, una cinta o una tarjeta magnética se acercan por descuido a un imán permanente o a un electroimán, la información grabada en forma codificada en los dominios magnéticos puede que se destruya de forma irreversible, aunque en lo macroscópico el disquete o la cinta no muestren el menor daño físico.

El campo asociado a las sustancias magnéticas 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 con facilidad; los actuales conservan casi invariables sus propiedades magnéticas a temperatura ambiente aunque transcurra mucho tiempo. Los imanes modernos tampoco son afectados sensiblemente por los demás factores mencionados, excepto en casos extremos.

APÉNDICE

El Sistema Internacional de Unidades

(SI)

Es posible considerar el inicio de lo que hoy se conoce como Sistema Internacional de Unidades (SI) a partir de la implantación en Francia del *Sistema Métrico Decimal* (SMD), a finales de los 1700. Poco después de la implantación del SMD se elaboraron dos patrones de platino iridio; el *metro* y el *kilogramo*, que fueron registrados de forma oficial en ese país a mediados de 1799 (figuras 2.19 y 2.20).



Figura 2.19. Patrones secundarios del metro patrón primario (distancia entre dos marcas en la superficie de la barra).

El kilogramo patrón original aún se mantiene. La definición del metro se ha modificado varias veces a lo largo de los años, con el fin de disminuir cada vez más la incertidumbre en las comparaciones con los patrones secundarios de otros países. La 17^a Conferencia General de la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM en el idioma original, *Bureau International des Poids et Mesures*) adoptó el acuerdo de que, a partir de 1983, el metro se definiera como la distancia que recorre la luz en el vacío durante un intervalo de $1/299\,792\,458$ de segundo.

Las obligaciones del BIPM incluyen la ac-

tualización de un sistema global de unidades, para que exista unicidad en la presentación de los descubrimientos científicos e innovaciones en la industria y el comercio internacional.



Figura 2.20. Prototipo internacional del kilogramo (uno de tantos patrones secundarios).

El Buró también se encarga de promover la importancia de la metrología para la ciencia, la industria y la sociedad, y de velar por la calidad de los patrones primarios contra los que se comparan los patrones secundarios del resto del mundo. Con ese fin colabora con otras agencias internacionales, coordina eventos científicos, publica informes periódicos, proporciona servicios para la correcta calibración de instrumentos y patrones, realiza actividades científicas y técnicas en sus propios laboratorios para beneficio de los estados miembros y coordina el mejoramiento del Sistema Internacional de Unidades organizando conferen-

cias generales.

TABLA A1
MAGNITUDES FUNDAMENTALES DEL
SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO DE LA UNIDAD
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	ampere	A
Temperatura termodinámica	kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

El primero de enero de 2015 el BIPM contaba con 55 estados miembros y 41 asociados a las conferencias. Entre los miembros permanentes 7 de ellos son latinoamericanos: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México, Uruguay y Venezuela. Entre los asociados se encuentran otros 7: Bolivia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Panamá, Paraguay y Perú.

Es usual que cada país cuente con su propia oficina de pesas y medidas, aunque hay países donde la denominación es diferente y se hace un énfasis mayor en la metrología que en los patrones.

El Sistema Internacional de Unidades reconoce 7 *magnitudes fundamentales*, definidas a partir del *criterio operacional*; en lo esencial, este consiste en describir la forma en que se mide cada magnitud (tabla A1).

TABLA A2
MAGNITUDES DERIVADAS DEL SISTEMA
INTERNACIONAL DE UNIDADES

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO	RELACIÓN CON OTRAS UNIDADES
Frecuencia	hertz	Hz	s ⁻¹
Fuerza	newton	N	kg·m/s ²
Presión	pascal	Pa	N/m ²
Energía, trabajo	joule	J	N·m
Potencia	watt	W	J/s
Carga eléctrica	coulomb	C	A·s
Potencial, FEM	volt	V	J/C, W/A
Capacidad	farad	F	C/V
Resistencia eléctrica	ohm	Ω	V/A
Conductancia	siemens	S	A/V
Flujo magnético	weber	Wb	V·s
Inducción magnética	tesla	T	Wb/m ²
Inductancia	henry	H	Wb/A
Flujo luminoso	lumen	lm	cd·sr
Luminancia	lux	lx	lm/m ²
Actividad radiactiva	becquerel	Bq	I/s
Dosis absorbida radiación	gray	Gy	J/kg
Dosis equivalente	sievert	Sv	J/kg

Cualquier otra magnitud es una *magnitud derivada*, obtenida a partir de fórmulas o expresiones matemáticas que reflejan algu-

na propiedad física. En la tabla 2 aparecen las unidades derivadas del Sistema Internacional traducidas al castellano, junto a su correcta denominación. Note que los nombres de las magnitudes se escriben con minúscula, aunque siguen la ortografía del correspondiente apellido que le dio origen en el idioma original, i.e., no se castellanizan. Con excepción del metro, el kilogramo, el segundo, el mol y la candela, los símbolos se escriben con mayúscula. En adición se reconocen dos magnitudes y unidades suplementarias, el ángulo plano (*radián* [rad]) y el ángulo sólido (*esterradián* [sr]).

Las normas que regulan las unidades de medida y su terminología alcanzan la categoría de ley en muchos países. En Cuba están definidas por el Decreto-ley 62 de fecha 30 de diciembre de 1982, que también regula la equivalencia con las unidades de otros sistemas de medida.

BIBLIOGRAFÍA DEL APÉNDICE

www.geocities.ws/fisica1y2/mediciones/mediciones.htm

<http://physics.nist.gov/cuu/Uncertainty/basic.html>

Decreto-ley 92, 30 de diciembre de 1982.

Accesible en

<http://www.nc.cubaindustria.cu/Documentos/DL%2062%20SI.PDF>

<http://www.bipm.org/en/measurement-units/history-si/>

<http://www.bipm.org/en/about-us/>

Ley de Metrología 19.511, Bs.As. 2/3/72.

Accesible en

<http://www.inti.gob.ar/metrologia/pdf/19511.pdf>

Ley No. 15.298. Sistema de unidades de medida. 22/jul/982.
<http://www.parlamento.gub.uy/leyes/AccessoTextoLey.asp?Ley=15298&Anchor=>
<http://www.normalizacion.gob.ec/>

http://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_summary_en.pdf
www.inecc.gob.mx/publicaciones/download/simexico1.pdf

CAPÍTULO 3. LA CORRIENTE ELÉCTRICA

La carga eléctrica

El rayo es la manifestación más espectacular de los eventos eléctricos en la naturaleza, pero no es ni mucho menos el único. En los países de clima seco es bastante común que los objetos se electricen a causa del rozamiento. Ponerse o quitarse un abrigo afelpado o sintético en invierno puede ser suficiente para lograr que el cuerpo adquiera una cantidad apreciable de carga eléctrica. Más adelante, al tocar cualquier objeto unido a tierra, se puede originar una descarga brusca en el punto de contacto, que se manifiesta como una intensa vibración de corta duración (el típico “corrientazo”).

En las regiones geográficas de clima muy seco es común que la descarga vaya acompañada de emisión de sonido e incluso de luz, en forma de chispas claramente visibles en la penumbra. El *fuego de San Telmo* es el nombre tradicional que se le da en España a una descarga eléctrica luminosa que puede aparecer durante tormentas fuertes en objetos prominentes; suele verse en campanarios, en los extremos de los mástiles y de las alas de los aviones, en la proa de los barcos, y a veces cerca de la cabeza de una persona o en las astas del ganado. El nombre tiene su origen en que los antiguos marineros del Mediterráneo lo consideraban una señal enviada por su patrón, San Telmo.

La electrización por frotamiento o *triboelectricidad* es conocida desde la antigüedad. De hecho, la primera cualidad eléctrica artificial que se observó fue la propiedad que presentan algunas sustancias como el ámbar, que al ser frotadas con piel o lana son capaces de atraer objetos pequeños. El ám-

bar es una resina fósil que en tiempos prehistóricos fue exudada por diferentes árboles coníferos, ahora extinguidos. Suele ser de color amarillo tostado. Se encuentra en trozos redondeados e irregulares, en granos o en gotas, es algo frágil y emana un olor agradable cuando se frota. En la antigüedad, se obtenía en la costa sur del mar Báltico, donde aún se sigue hallando. Su nombre griego es *electrón*, de donde surgió el concepto electricidad.

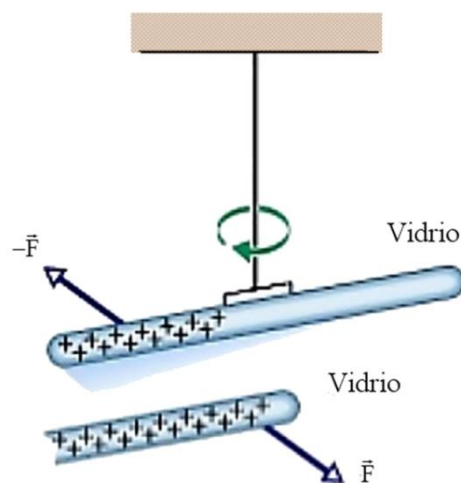


Figura 3.1 Interacción entre cuerpos cargados. Dos varillas con carga de igual signo se repelen. Si las cargas son de signo opuesto, se atraen.

Una varilla de vidrio frotada con seda también posee una capacidad similar a la del ámbar para atraer objetos no cargados. Pero dos varillas de vidrio frotadas con seda se repelen, mientras que la misma varilla atrae al ámbar frotado con lana, lo que indica la existencia de dos tipos de electrización o ‘carga eléctrica’ (Figura 3.1). Al vidrio frotado con seda se le atribuyó – en forma arbitraria – una carga positiva (+), mientras que la carga del ámbar frotado con lana es negativa (-).

Fue el francés *Charles Coulomb* quien estableció las relaciones numéricas entre los valores de las cargas y sus interacciones, tanto de atracción como de repulsión. En 1777 inventó la balanza de torsión para cuantificar las fuerzas de atracción/repulsión. En la Figura 3.2, al girar el cabezal de suspensión es posible compensar las fuerzas eléctricas gracias a la torsión aplicada al hilo. Los valores numéricos se obtienen determinando el ángulo que el cabezal debe rotar para llevar las cargas a su posición inicial.

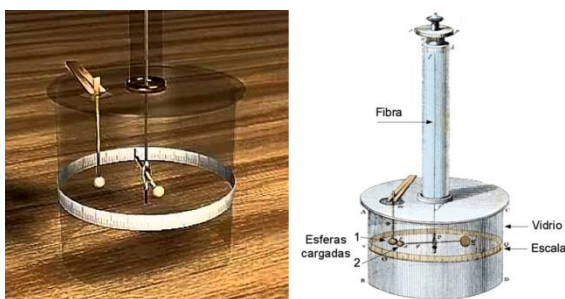


Figura 3.2 Balanza de torsión de Coulomb. La partícula de carga q_2 tiene un contrapeso no cargado al otro lado de la barra para equilibrar su masa. El cabezal giratorio sirve para ajustar la distancia r entre las cargas. Tomadas de <https://www.todamateria.com/ley-de-coulomb/> y <https://www.youtube.com/watch?v=GqF12ovhnRw>.

Con esta balanza Coulomb pudo establecer el principio que rige la interacción entre las cargas eléctricas, conocido hoy como la *ley de Coulomb*. Esta ley establece que la fuerza de interacción F entre dos *cargas puntuales* q_1 y q_2 (partículas de tamaño tan reducido que es posible no tomar en cuenta sus dimensiones) es proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r de separación.

En notación matemática: $F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$. En

el Sistema Internacional de Unidades la unidad de carga es el coulomb (C), la distancia r está en metros y la fuerza F se mide en newton (N). Este resultado es muy parecido al que se obtiene cuando se analiza la interacción entre polos magnéticos. Sin embargo, existe una diferencia fundamental: las cargas positivas y negativas existen por separado y se pueden aislar unas de otras. Como se expresó en el capítulo 2, los polos magnéticos no se pueden separar.

En su estado normal, el número de electrones en cualquier átomo es siempre igual al de protones, de aquí que el átomo en conjunto es neutro desde el punto de vista eléctrico; por tanto, cualquier cuerpo constituido por ellos también lo será. Sin embargo, los cuerpos pueden adquirir electrones en exceso o perderlos, y entonces adquieren carga negativa o positiva.

Un cuerpo con exceso de electrones posee una carga neta negativa, mientras que si posee un defecto de electrones tendrá carga positiva. Al frotar el vidrio con la seda en la figura 3.1 los electrones que se encuentran más cercanos a la superficie son arrancados del vidrio, pasando a la seda y dejando atrás un defecto de carga negativa. Ese defecto se traduce en el exceso de carga positiva que adquiere el vidrio; por ese motivo el vidrio y la seda adquieren la misma magnitud de carga, pero de sentido contrario: el vidrio se hace eléctricamente positivo y la seda se vuelve negativa.

Esta es una característica general del comportamiento de las cargas en la naturaleza; lo que aparece como carga positiva en un

lugar siempre surge como carga negativa en otro lugar. Dicho de otra forma, la suma de cargas positivas y negativas en cualquier sistema aislado siempre será constante; significa que las cargas solo se crean y destruyen por parejas. Esta ley universal se conoce como *principio de conservación de la carga*. La otra ley fundamental asociada a la carga eléctrica es su cuantificación: *la carga eléctrica está cuantificada* o cuantizada. Este principio reconoce el hecho de que cualquier carga es siempre un múltiplo entero de la carga del electrón, y de que es imposible obtener una carga de menor valor. Pero como la carga del electrón es tan pequeña ($\approx 1.60 \times 10^{-19}$ C), en los cálculos y aplicaciones macroscópicas siempre se puede considerar que la carga varía de manera continua.

El campo eléctrico

¿Y cómo explicar la interacción a distancia entre cargas eléctricas sin contacto directo, similar a la interacción que tiene lugar entre los polos magnéticos de los imanes? La explicación es también similar a la que ofrece el magnetismo. Se considera que las cargas eléctricas modifican el espacio que las rodea, creando un *campo eléctrico* capaz de interactuar con otras cargas. Mientras que el campo magnético se representa mediante líneas de inducción magnética, el campo eléctrico se representa mediante *líneas de fuerza*, que se dibujan en forma similar a las líneas de inducción. Es usual designar el *valor* o *intensidad de campo eléctrico* por la letra E, que en el Sistema Internacional de Unidades tiene dimensiones de newton/coulomb (N/C), aunque muchas veces se prefiere utilizar el equivalente volt/metro

(V/m).

El campo eléctrico y el magnético son diferentes en su esencia, pero no son independientes por completo, como quedará esclarecido más adelante. Los campos eléctricos estáticos interactúan con las cargas eléctricas y generan corrientes, pero no interactúan con los imanes. Los campos magnéticos asociados a las corrientes interactúan con los polos magnéticos de un imán, pero no lo hacen con las cargas eléctricas en reposo. Sin embargo, sí interactúan con las cargas en movimiento y con las corrientes eléctricas, que no son más que cargas en movimiento en el interior de los conductores. Para la mejor comprensión del lector, en la tabla 3.1 se muestran estas propiedades de forma resumida.

TABLA 3.1 INTERACCIÓN DE LOS CAMPOS ESTÁTICOS, CON INDEPENDENCIA DE SU ORIGEN	
CAMPO ELECTROSTÁTICO	CAMPO MAGNETOSTÁTICO
No interactúan entre sí, pero sí lo hacen con:	
 Cargas eléctricas en reposo y en movimiento (pero no con los polos magnéticos).	 Cargas en movimiento (pero no en reposo).
	✓ Corrientes eléctricas. ✓ Polos magnéticos.

Conductores y dieléctricos

Existen materiales donde los electrones se encuentran ligados de forma débil a los

átomos, de manera que pueden “saltar” sin dificultad de un átomo a otro y moverse con facilidad en el seno del material. Se denominan *conductores*. En caso contrario, cuando los electrones se encuentran fuertemente ligados al átomo y resulta difícil lograr que se desplacen de un lado a otro, tenemos un *aislante o dieléctrico*. Unos pocos materiales no son conductores, pero tampoco tan buenos aislantes como los dieléctricos (por ejemplo: el grafito y el silicio), y se denominan *semiconductores*.

Todos los metales como el oro, la plata, el aluminio y el cobre son buenos conductores. También lo son las sales fundidas y muchas disoluciones, así como los gases ionizados. La madera seca, el papel, la goma, los plásticos, los gases inertes, los aceites, el mármol y el vidrio son dieléctricos.

La facilidad con que un determinado material puede o no transportar las cargas eléctricas en su seno se mide por su *conductividad*, designada por la letra griega sigma (σ). En el SI de unidades la conductividad se mide en siemens/metro (S/m). El inverso de σ es la *resistividad* ρ (letra griega rho), que mide justo lo contrario; la oposición del material al paso de las cargas eléctricas. Se mide en ohm-metro (Ωm). Una resistividad pequeña indica una gran conductividad, y viceversa; en lenguaje matemático σ y ρ son recíprocos: $\rho = 1/\sigma$.

En un metal buen conductor ρ es del orden de $2 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, mientras que para un aislante como el vidrio ρ puede variar, en dependencia del tipo de vidrio, entre 10^{10} y $10^{14} \Omega\text{m}$. El silicio, un semiconductor, tiene una resistividad de $640 \Omega\text{m}$. Observe que

entre los valores extremos hay una diferencia de 22 órdenes (es decir, un uno seguido de 22 ceros).

En el caso de los líquidos y gases la conductividad no es electrónica, sino iónica. Los portadores de carga no son los electrones, sino átomos o moléculas ionizados (aniones y cationes) con un exceso o defecto de electrones (Figura 3.3).

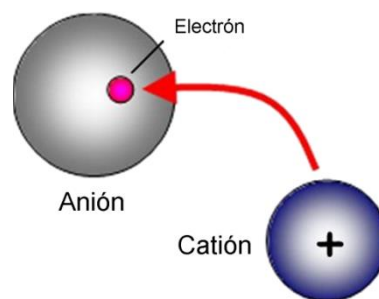


Figura 3.3 Formación de aniones y cationes.

Un ion se forma cuando un átomo neutro o un grupo de átomos ganan o pierden uno o más electrones. Un átomo que pierde un electrón forma un ion de carga positiva o *cación*. El que gana un electrón forma un ion de carga negativa o *anión*. Al disolverse en agua, la sal de mesa produce aniones de cloro y cationes de sodio en disolución. El agua pura es un dieléctrico, y conduce muy mal la corriente eléctrica, pero el agua salada es un buen conductor de la electricidad.

La presencia de iones en el cuerpo humano hace que su interior se comporte como un conductor aceptable de la electricidad. Y en la parte externa, la conductividad de la piel puede variar mucho en dependencia de su grosor y de si está seca o húmeda.

Interacción con un campo externo. ¿Qué sucede cuando un sólido conductor de la electricidad que se encuentra aislado de

otros cuerpos se coloca en una región donde existe un campo eléctrico? Como dentro del conductor las cargas tienen gran movilidad, los electrones son atraídos hacia el origen del campo hasta neutralizar las líneas de fuerza en su totalidad. El campo eléctrico es apantallado por las cargas móviles y su valor en el interior del conductor se hace cero (Figura 3.4). Cuando cesa el movimiento de las cargas y se alcanza el equilibrio, las líneas de fuerza quedan perpendiculares a la superficie del conductor. (No podría ser de otra manera. Si no fueran perpendiculares, existirían componentes del campo paralelos a la superficie y las cargas nunca alcanzarían el estado de equilibrio). El efecto de apantallamiento tiene lugar de la misma forma en un conductor con cavidades o sin ellas.

Para que las cargas puedan escapar fuera de la superficie (producción de chispas por ionización del aire que rodea al conductor) se necesitan campos eléctricos muy intensos.

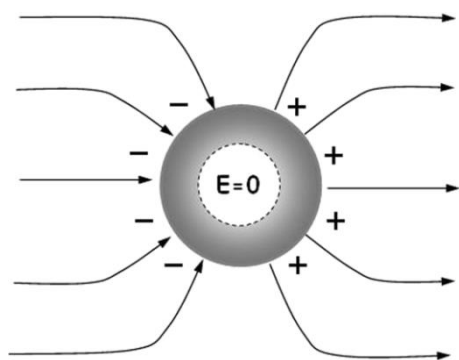


Figura 3.4 Distorsión de las líneas de fuerza del campo eléctrico en presencia de un conductor.

¿Y qué sucede si en vez de un conductor colocamos un dieléctrico no conductor en la región donde existe el campo eléctrico? En

los dieléctricos, los electrones portadores de carga eléctrica no pueden moverse con libertad y el campo eléctrico no será apantallado como en el conductor. Sin embargo, las nubes electrónicas sí pueden reordenarse dentro de cada molécula bajo la acción del campo externo, causando una cierta distorsión en las líneas de fuerza, aunque no tan intensa como en el caso de los conductores. El comportamiento no es el mismo en sólidos y líquidos, ni tampoco si el dieléctrico está constituido por moléculas *polares* o *no polares*.

Sustancias polares y no polares

Muchas moléculas, aunque neutras desde el punto de vista eléctrico, poseen *polaridad* a causa de la distribución asimétrica de sus nubes electrónicas, que dan origen a centros no coincidentes de carga positiva y negativa. Se denominan moléculas *polares*. Las moléculas simétricas no poseen esta propiedad; son *no polares*. La denominación también se aplica a las sustancias formadas por esas moléculas: sustancias polares y no polares.

La distribución asimétrica se caracteriza por tener un dipolo eléctrico asociado, que puede representarse en un gráfico por dos cargas de igual magnitud (q) y signos contrarios, separadas una distancia L (Figura 3.5). En el dipolo las líneas de fuerza salen de la carga positiva y terminan en la negativa. El *momento del dipolo* tiene un valor $p = qL$.

Líquidos y gases polares. Las moléculas de líquidos y gases pueden *fluir*. Significa que pueden rotar y trasladarse sin trabas de un lugar a otro dentro del recipiente que las contiene (y de ahí que a líquidos y gases se les llame *fluidos* indistintamente). Un

ejemplo típico de molécula polar de este tipo es la molécula de agua, constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno colocados en forma asimétrica (Figura 3.6).

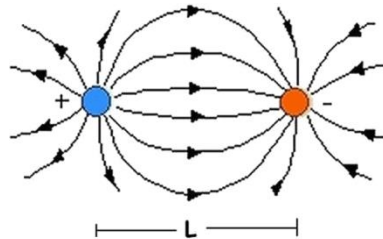


Figura 3.5 Dipolo eléctrico.

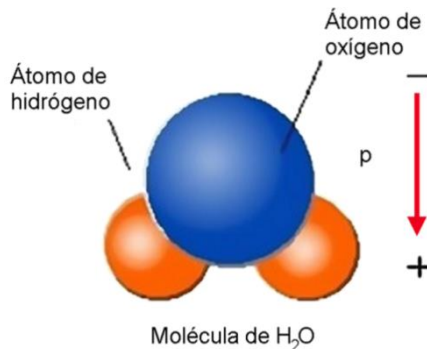


Figura 3.6 Dipolo eléctrico de la molécula de agua.

Al formarse los enlaces químicos, los electrones de los átomos de hidrógeno son atraídos hacia el oxígeno creándose una distribución asimétrica de cargas; aparece un exceso de carga negativa en un extremo de la molécula, y positiva en el otro. Por convenio, el momento dipolo de la molécula está dirigido de (-) a (+), desde el átomo de oxígeno hacia los átomos de hidrógeno, como indica la flecha en la Figura 3.6.

En los líquidos y gases polares, cuando se aplica un campo eléctrico externo, las moléculas rotan y tienden a orientarse paralelas a la dirección del campo. La parte negativa es atraída hacia el origen del campo,

mientras que la positiva es repelida. Si se aplica un campo eléctrico a un recipiente con agua u otro líquido dieléctrico, las moléculas se ordenan de forma tal que aparece un exceso de carga en las paredes del recipiente (Figura 3.7). El campo eléctrico se atenúa parcialmente en el interior del líquido, pero sin que llegue a anularse en su totalidad.

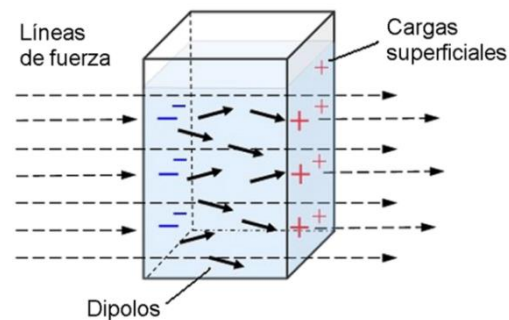


Figura 3.7 Un dieléctrico polar líquido en el campo eléctrico, mostrando la orientación de los dipolos y la atenuación de las líneas de fuerza.

Un dieléctrico muy importante es el agua. Constituye 50 a 90 % de la masa total de los organismos vivos. Cuando el campo eléctrico interacciona con los tejidos, la presencia del agua en los fluidos del cuerpo atenúa la penetración del campo hacia los tejidos más internos de forma considerable. Además, hay que tener en cuenta que también estarán presentes diferentes iones, que pueden moverse con mayor o menor libertad en el seno del correspondiente fluido, proporcionándole a éste propiedades conductoras que pueden favorecer aún más el apantallamiento. Este último efecto resulta difícil de evaluar, a causa de la solvatación de los iones.

Solvatación. El proceso de disolución de un

sólido trae aparejado la remoción de átomos de las posiciones fijas a las que estaban sujetos, formándose iones que quedan rodeados por las moléculas del disolvente (el *solvato*). Los iones solvatados se atraen entre sí con menor fuerza que en el sólido, y el efecto depende tanto de la naturaleza química de la sustancia disuelta como del disolvente. Al aplicar un campo externo a la disolución, el comportamiento se verá afectado por todos los factores que influyen en la solvatación, y no sólo de aquellos relacionados con las propiedades específicas de los dipolos.

Sólidos polares. Los átomos o moléculas de un sólido no pueden desplazarse de su lugar al interaccionar con un campo eléctrico externo; solo pueden oscilar alrededor de sus posiciones fijas de equilibrio. Sin embargo, cuando el campo eléctrico actúa sobre las nubes electrónicas del sólido, estas se redistribuyen con resultados similares a lo que ocurre en gases y líquidos. Aparece un exceso de cargas, de signo contrario, en las superficies más cercanas y alejadas del campo respectivamente, y el campo eléctrico en el interior se atenúa; lo usual es que la atenuación sea menor que en los líquidos.

Sustancias no polares. En los líquidos y sólidos no polares tiene lugar un proceso parecido al que ocurre en las sustancias polares. Aunque al inicio no existe un momento dipolo en las moléculas, el campo eléctrico externo deforma las nubes electrónicas que antes eran simétricas y crea dipolos inducidos, que se comportan en forma similar a los permanentes. Como es de esperar, el efecto de apantallamiento y la atenuación del campo en el interior del cuerpo conside-

rado será bastante menor que el caso de las moléculas polares.

En resumen, el apantallamiento eléctrico y la atenuación del campo en el interior de los dieléctricos tienen lugar en mayor o menor grado en todos ellos, cualquiera sea su composición y con independencia de si sus moléculas forman dipolos permanentes o no. La *permitividad relativa* ϵ_r , una magnitud adimensional, da una medida de la capacidad que tienen las diferentes sustancias para polarizarse y, por tanto, para apantallar el campo eléctrico. En la tabla 3.2 se muestran algunos valores típicos.

TABLA 3.2 PERMITIVIDAD RELATIVA DE ALGUNOS MATERIALES	
MATERIAL	ϵ_r (ADIMENSIONAL)
Vacío	1,00000
Aire	1,00054
Papel	3,5
Porcelana	6,5
Teflón	2,1
Óxido de titanio	100
Agua	78

La atenuación de los campos electrostáticos en el interior de los organismos vivos hace difícil su posible aplicación con fines terapéuticos. Para que atraviesen la piel y penetren en el organismo de manera efectiva se necesitan campos de gran intensidad, de difícil manipulación y con alto riesgo de accidentes. La intensidad de campo necesaria es tal que puede llegar a ionizar el aire que rodea al sujeto, generando chispas y causando quemaduras en la piel. El proceso es

similar a la descarga de un rayo, pero a mucha menor escala.

No ocurre así con el campo magnético, que posee un poder de penetración mucho mayor en los tejidos biológicos que el campo eléctrico. Aplicando campos magnéticos variables en el tiempo de baja intensidad en el exterior de un sujeto, se pueden generar campos eléctricos en su interior sin riesgo de daño eléctrico. Sin embargo, los campos generados también serán variables en el tiempo, no electrostáticos. En el capítulo IV se analiza con mayor detalle la interacción entre campos eléctricos y magnéticos.

Corriente continua y fuerza electromotriz

Con anterioridad se explicó que cuando un conductor interacciona con un campo eléctrico externo, las cargas se redistribuyen y van hacia la superficie, de forma que apantallan el campo en el interior del conductor.

Cuando el campo eléctrico se aplica en el interior de un alambre conductor el resultado es diferente. Mientras se suministre suficiente energía para mantener la presencia del campo eléctrico, los electrones se moverán hacia el origen del campo, creando una corriente continua. La *intensidad* (i) de la corriente se define como la cantidad de carga eléctrica que atraviesa cualquier sección transversal S del alambre en un segundo (figura 3.8). Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el ampere (A), en honor de *André-Marie Ampère*, matemático y físico francés. Por convenio, el sentido de la corriente se toma contrario al sentido del movimiento de los electrones, como si se movieran cargas positivas en vez de las negativas. Si q es la carga eléctrica que atra-

viesa la superficie S en un intervalo de tiempo t , entonces la corriente promedio se calcula como $i = q/t$.

Es posible mantener la presencia continua de un campo eléctrico no equilibrado en el interior de un conductor cuando se posee la fuente adecuada de energía. Una fuente con estas características se llama *fuerza electromotriz* o FEM. Su valor se expresa en volts (V), en honor del físico italiano *Alessandro Volta*. Existen FEM de diversos tipos:

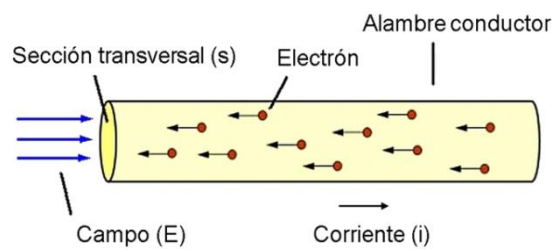


Figura 3.8 S es el área de la sección transversal del alambre. El campo E se encuentra dentro del conductor.

Pilas y baterías. Las pilas producen energía eléctrica a partir de una reacción química. La batería consiste en una serie de pilas conectadas en serie para obtener una FEM mayor. Las hay recargables y no recargables. En las pilas recargables la reacción química se invierte para alcanzar de nuevo el estado inicial de máxima carga. La primera pila reversible, también llamada *acumulador*, fue inventada en 1859 por el físico francés *Gaston Planté*. La pila de Planté de plomo y ácido es la que más se utiliza en la actualidad. Su ventaja principal es que a partir de un volumen relativamente pequeño puede producir suficiente energía para arrancar un motor; su principal desventaja

es que se agota con rapidez. Emplea una disolución diluida de ácido sulfúrico como conductor iónico o electrólito para transportar la corriente; el electrodo negativo es de plomo y el positivo de dióxido de plomo. Al recargar la pila, las reacciones químicas se invierten hasta que los productos químicos vuelven a su condición original (o casi). Al final el acumulador se agota porque con el tiempo el ácido sulfúrico se transforma en agua más sulfato de plomo. Estas pilas tienen una vida útil de unos cuatro años y su FEM es de unos 2V. Otros tipos de pilas recargables más recientes son la alcalina de níquel-cadmio que utiliza un electrólito de hidróxido de potasio y las de níquel-hidruro. La pila no recargable más común es la pila *Leclanché* o pila seca, inventada por el químico francés *Georges Leclanché* en los años sesenta del siglo XIX. La pila seca que se utiliza hoy día es muy similar al invento original. El electrólito es una mezcla pastosa de cloruro de amonio y cloruro de cinc. El electrodo negativo es de cinc, igual que la parte exterior de la pila, y el positivo es una varilla de carbón rodeada por una mezcla de carbón y dióxido de manganeso. Esta pila produce una FEM de 1,5 V. Otras pilas no recargables, muy utilizadas en la actualidad, son las alcalinas y las de litio.

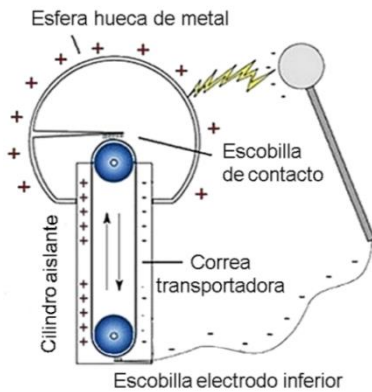
Dinamos. Los generadores o dinamos producen la FEM a partir de movimientos mecánicos como el de rotación de las aspas de una turbina o el girar de una rueda. Los hay de dos tipos: a) los electrostáticos, que utilizan el rozamiento para separar las cargas eléctricas y, b) los electromagnéticos, en los que se genera corriente desplazando un conductor a través de un campo magnético

por métodos mecánicos. Estos últimos se describen en otro capítulo.

El generador electrostático es una máquina que permite obtener diferencias de potencial muy elevadas mediante un mecanismo de fricción similar al del vidrio frotado con seda, aunque en este caso se emplean otros materiales. Fue desarrollado en 1931 por el físico estadounidense *Robert Jemison Van de Graaff*. Consiste en una columna aislante con una esfera metálica hueca montada en su parte superior (figura 3.9). Una correa de material dieléctrico, que gira mediante algún motor auxiliar, une un rodillo en la base de la columna con otro situado en la parte superior y en contacto con la esfera. Gracias a la fricción, la correa transporta las cargas eléctricas extraídas de un peine metálico de púas afiladas en la base de la columna hasta el interior de la esfera. Allí las cargas son retiradas por otros peines y al final terminan en la superficie de la esfera conductora, a causa de la repulsión. A medida que la correa va recogiendo cargas y las transporta a la esfera, va surgiendo una diferencia de potencial con la tierra, que puede alcanzar hasta 5 millones de volt.

La Figura 3.9 también muestra el efecto de aplicar un alto potencial al cuerpo humano aislado de la tierra. Como las cargas de igual signo se repelen y van a la superficie del cuerpo, los pelos de la modelo tienden a mantenerse separados del cráneo y entre sí, causando un efecto sorprendente. Los generadores de Van de Graaff se utilizan como fuentes de alto voltaje para comprobar la calidad de los aisladores que se usan en las redes eléctricas de alto voltaje. También se emplean en los centros de investigación de-

dicados al estudio de las partículas subatómicas, como fuente energizante en las primeras etapas de los aceleradores de partículas.



Adaptado de <http://www.earsnitz.com> y http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Van_de_graaf_generator.svg



Figura 3.9 Generador de Van de Graaff..

Celdas solares. Son dispositivos capaces de convertir la luz solar o la de otras fuentes luminosas en energía eléctrica por vía directa. El corazón de la celda es alguna sustancia semiconductor fotosensible, como un cristal de silicio muy delgado al que se le han añadido cantidades muy pequeñas de otras sustancias en forma de impurezas. Cuando la luz incide contra el cristal, los electrones son arrancados de sus posiciones de equilibrio y son expulsados a una de las superficies del cristal (efecto fotovoltaico). Allí se hacen pasar por un circuito externo, creando una corriente eléctrica para hacer funcionar lámparas o diferentes equipos

eléctricos o electrónicos. Las celdas solares tienen una vida muy larga y hoy día se utilizan dondequiera que haya suficiente luz solar. Cada día son más populares, pues constituyen una fuente de energía limpia, verde o ecológica, que no contamina la atmósfera ni contribuye al calentamiento global.

Termoelectricidad. Consiste en el surgimiento de una FEM a partir de diferencias de temperatura. Si se unen o sueldan por ambos extremos dos alambres de diferente naturaleza y una de las uniones se mantiene a una temperatura superior a la otra, aparece una corriente eléctrica entre las uniones caliente y fría. Esta particularidad fue descrita en 1821 por el físico alemán *Thomas Seebeck* y se conoce como efecto Seebeck. A los alambres soldados capaces de generar la FEM se les llama *termopares*.

Piezoelectricidad. Por último, es posible generar energía eléctrica mediante dispositivos que producen una fuerza electromotriz a partir de una presión o fuerza mecánica que causa una deformación en un material con propiedades especiales. Esta propiedad se denomina ‘efecto piezoeléctrico’, vocablo que viene del griego *piezein* (presionar). Los dispositivos piezoeléctricos se han vuelto muy populares para generar la chispa de los encendedores de bolsillo.

Circuitos de corriente continua

Una FEM con sus bornes o extremos conectados a un sistema de alambres conductores, u otros dispositivos que permitan el paso de la corriente eléctrica, forma un circuito de corriente continua. Por convenio, se considera que la corriente sale del polo o borne positivo de la FEM y entra por el negativo.

En el circuito de la figura 3.10, cuando la corriente atraviesa un alambre conductor muy fino ubicado dentro de la lámpara (el filamento) da lugar a que aparezca luz y calor. El aire dentro de la lámpara se extrae con anterioridad para evitar la oxidación del filamento a causa de las altas temperaturas que se alcanzan.

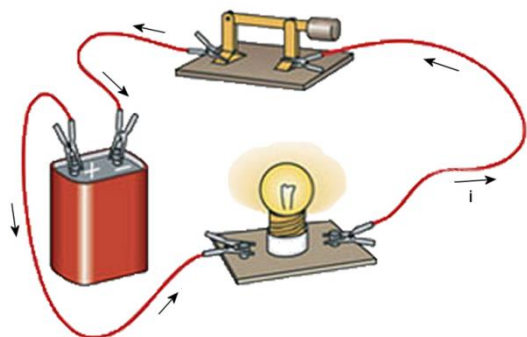


Figura 3.10 Circuito simple de corriente continua.

El volt no representa energía, sino energía por unidad de carga. Como la unidad de energía es el joule (J), significa que, dimensionalmente, volt = joule/coulomb. Cuando la capacidad de entregar energía por unidad de carga se refiere a dos puntos de un circuito y no a una FEM, se denomina diferencia de potencial y es usual designarla por la letra V.

En cualquier circuito, una parte de la energía entregada por la FEM siempre se disipa elevando la temperatura del alambre y generando calor al medio ambiente. El incremento de temperatura es causado por cierto ‘rozamiento o viscosidad’ interna que se opone al movimiento de los electrones dentro del alambre. La *ley de Joule* establece que la cantidad de calor producida en un conductor por el paso de la corriente eléctrica cada segundo es proporcional a su resistencia R y al cuadrado de la intensidad

de la corriente (i^2). En símbolos matemáticos: $P = i^2R$, donde P es la energía disipada en la unidad de tiempo o potencia. La resistencia R de un alambre se relaciona con la resistividad ρ del material por la expresión

$R = \frac{\rho l}{S}$, donde l es la longitud del alambre y S el área de su sección transversal.

La resistencia de los alambres y otros materiales no siempre juega un papel negativo como disipador de energía; también se utilizan resistencias para regular los voltajes en muchos dispositivos electrónicos. Un dispositivo construido para que funcione haciendo el papel de una resistencia pura se denomina *resistor*, aunque también es común llamar al dispositivo igual que la propiedad que lo caracteriza: resistencia.

TABLA 3.3 RESISTIVIDAD DE ALGUNAS SUSTANCIAS		
SUSTANCIA	$\rho(\Omega m)$	CARACTERÍSTICAS
Plata	$1,47 \times 10^{-8}$	Conductor
Cobre	$1,69 \times 10^{-8}$	
Aluminio	$2,83 \times 10^{-8}$	
Silicio	640	Semiconductor
Madera	$10^8 - 10^{11}$	Dieléctrico
Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$	

La ley de Ohm establece la relación entre la corriente, la resistencia y la diferencia de potencial V_R en los extremos de un resistor, $V_R = iR$. En la tabla 3.3 aparecen algunos valores típicos de la resistividad de diversos materiales.

Superconductividad

Descubierta en 1911 por el físico holandés *Heike Kamerlingh Onnes*, la superconduc-

tividad es la propiedad que tienen algunos conductores de no ofrecer resistencia al paso de la corriente cuando se enfrían por debajo de cierta temperatura crítica T_c . Las temperaturas críticas son muy pequeñas; por ejemplo, en determinadas aleaciones de niobio-germanio $T_c = -249,95\text{ }^\circ\text{C}$ y se necesita helio líquido, un refrigerante caro y poco eficaz, para que se produzca el suceso. Compuestos cerámicos descubiertos más recientemente permiten usar nitrógeno líquido como refrigerante para obtener la superconductividad. La temperatura del nitrógeno líquido es de $-196\text{ }^\circ\text{C}$, enfría con una eficacia 20 veces mayor que el helio líquido y cuesta 10 veces menos. Sin embargo, la fragilidad de los compuestos cerámicos hace muy difícil conformarlos en forma de hilos o cintas para utilizarlos como conductores de la corriente.

Como los superconductores no poseen resistencia y no se calientan al pasar la corriente, se utilizan para fabricar electroimanes que producen campos magnéticos muy intensos, empleando grandes corrientes. Estos superimanes se aplican en la investigación científica, en equipos médicos de diagnóstico, en el estudio de materiales y en la construcción de potentes aceleradores de partículas. Utilizando superconductores también se han desarrollado dispositivos que miden la corriente eléctrica, el voltaje y el campo magnético con una sensibilidad sin precedentes.

Encontrar superconductores capaces de trabajar a temperaturas más altas es un requisito previo para desarrollar otras muchas aplicaciones. Entre ellas se encuentran computadoras más rápidas y con mayor ca-

pacidad de memoria, reactores de fusión nuclear en los que el plasma se mantenga confinado por campos magnéticos, mejores trenes de levitación magnética de alta velocidad y, tal vez lo más importante, una generación y transmisión más eficiente de la energía eléctrica.

Corriente alterna

Cuando la corriente eléctrica se comporta de forma tal que el sentido de su recorrido en el circuito se invierte de forma periódica, estamos en presencia de una corriente alterna.

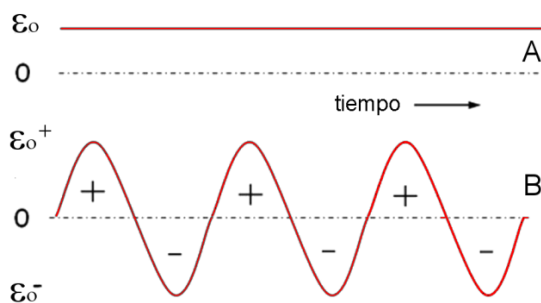


Figura 3.11 Representación de una FEM continua (A) y alterna (B). Los signos + y - indican el cambio de sentido de la corriente en el circuito.

En la Figura 3.11, en (A) se representa el valor de una FEM de corriente continua al transcurrir el tiempo; su valor E no varía. En (B) aparece la representación análoga para una FEM de corriente alterna. El valor de la FEM en cada borne cambia periódicamente de positivo a negativo al transcurrir el tiempo, al igual que el sentido de la corriente en el circuito.

La corriente alterna es la principal fuente de energía eléctrica en todo el mundo, tanto en aplicaciones industriales como en el hogar. La corriente de la red comercial en América

varía el sentido de su recorrido con una frecuencia de 60 veces por segundo. (El inverso de la frecuencia es el período, tiempo que tarda la corriente en realizar una oscilación completa). Como la polaridad de una FEM alterna también cambia continuamente de (+) a (-) y viceversa, en los circuitos de corriente alterna se prefiere usar el término *voltaje* para indicar las diferencias de potencial, que también varía de sentido de forma continua.

Las leyes que rigen los circuitos de corriente alterna difieren de manera radical de las leyes de los circuitos de corriente continua. En la corriente alterna hay que tomar en cuenta que la corriente y el voltaje no osci-

lan siempre al unísono, sino que se retrasan o adelantan la una respecto al otro, en dependencia del circuito específico analizado. Esas leyes no serán objeto de análisis en este libro.

La corriente alterna posee una serie de ventajas en comparación con la corriente continua; una de ellas es que proporciona menos pérdidas de energía durante su transmisión hasta el consumidor. Pero la más importante es que permite seleccionar los voltajes adecuados a cada circuito mediante un sencillo dispositivo electromagnético que no tiene piezas móviles: el transformador, que se describe en detalle en otro capítulo.

CAPÍTULO 4. INTERACCIONES ELECTROMAGNÉTICAS Y ONDAS DE RADIO

Magnetismo y corrientes eléctricas

Con anterioridad se vio que los campos estáticos, magnético y eléctrico, no son capaces de interactuar el uno con el otro. Además, cada uno actúa sobre cargas e imanes de forma independiente, como si el otro no estuviera presente. También se dijo que el campo magnético no interactúa con las cargas en reposo, pero sí lo hace con las cargas en movimiento.

Cuando una partícula cargada se mueve en una región del espacio donde hay un campo magnético estático, aparece una fuerza sobre la carga que en todo momento es perpendicular a la dirección de su movimiento y a las líneas de inducción del campo magnético. A causa de esa fuerza magnética, la partícula cargada cambiará la dirección de su movimiento (pero sin que su energía varíe). Y lo seguirá haciendo mientras siga interactuando con el campo. En realidad, el efecto depende del movimiento relativo de la carga respecto al campo, y viceversa. Si la carga está en reposo y es el campo quien está en movimiento, también aparecerán fuerzas sobre la carga.

¿Y qué sucede cuando tenemos un campo magnético que varía con el tiempo? ¿Y un campo eléctrico en similares condiciones? Pues resulta que los campos magnéticos variables en el tiempo siempre tienen asociado un campo eléctrico, también variable. Y el efecto inverso también tiene lugar: los campos eléctricos variables generan campos magnéticos.

Siempre que un campo variable se encuen-

tre presente, eléctrico o magnético, el otro también lo estará. De aquí que, cuando se desean examinar sus efectos, es obligatorio analizarlos de forma conjunta, so pena de cometer errores garrafales en la interpretación de los resultados.

Ley de Faraday-Lenz. En 1831 *Michael Faraday* descubrió la inducción magnética. Y ese mismo año demostró que era posible generar una corriente en un circuito a partir de otra en un circuito cercano e independiente del primero.

El acoplamiento entre los circuitos ocurre al interactuar los campos magnéticos variables generados por las corrientes, también variables en el tiempo. El campo magnético generado por una de las corrientes es capaz de inducir campos eléctricos que dan origen a otra corriente en el otro circuito. Veamos esto en detalle.

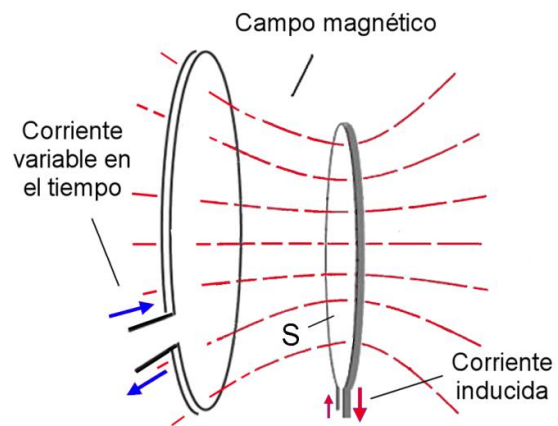


Figura 4.1 Corriente inducida en una espira de alambre conductor.

La figura 4.1 ilustra lo que sucede cuando se establece una corriente variable en el tiempo en una espira de alambre conductor. La corriente en la espira izquierda tiene asociado su correspondiente campo magné-

tico, que da origen a un campo eléctrico en la otra espira (no mostrado en la figura). Ese campo eléctrico actúa sobre los electrones de la otra espira como si fuera una FEM convencional, creando una corriente. Si el campo magnético no varía con el tiempo, la corriente no aparece. El resultado también depende del número de líneas de inducción magnética que atraviesen el área S encerrada por la espira. Si la espira es paralela a las líneas de inducción magnética no habrá corriente (como, por ejemplo, si la espira derecha en la figura 4.1 estuviera rotada 90 grados).

Sin embargo, también aparece una corriente en la espira derecha cuando el campo magnético no varía con el tiempo, pero el área S encerrada por la espira y perpendicular a las líneas de inducción magnética sí lo hace (por ejemplo, si la espira de la derecha oscila o gira alrededor de un eje vertical). De manera que el ángulo θ que forman el área S y las líneas de inducción magnética también tiene importancia en la generación de posibles corrientes en la espira.

El experimento demuestra que la FEM inducida en la espira (ϵ_{ind}) es igual a la variación del *flujo* $\phi = BS \cos \theta$ en la unidad de tiempo: $\epsilon_{\text{ind}} = \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$. Este resultado se conoce como *Ley de Faraday*. La letra griega Δ (delta) indica siempre la variación del correspondiente parámetro. Por ejemplo, si t indica la variable tiempo; $\Delta t = t - t_0$, donde t y t_0 representan un instante final e inicial, respectivamente.

Se puede predecir el sentido que tendrá la corriente en la espira a partir de la *Ley de Lenz*. Esta ley establece que el sentido de la

FEM (y de la corriente inducida) es tal que siempre se opone a la causa que la produce. Fue bautizada en honor a su descubridor *Heinrich Friedrich Emil Lenz*, y es usual designarla también como *ley de Faraday-Lenz*.

El principio de funcionamiento de los generadores eléctricos se fundamenta en la ley de Faraday-Lenz. La variación del flujo en una espira de alambre conductor que gira dentro de un campo magnético produce una FEM capaz de generar corriente en un circuito. La FEM y la corriente generadas pueden ser tanto continuas como alternas, en dependencia de cómo se dispongan conexiones de la espira rotatoria con el circuito externo.

Dinamos

Un generador electromagnético o dinamo es un mecanismo capaz de convertir energía mecánica en energía eléctrica sobre la base de la ley de Faraday-Lenz.

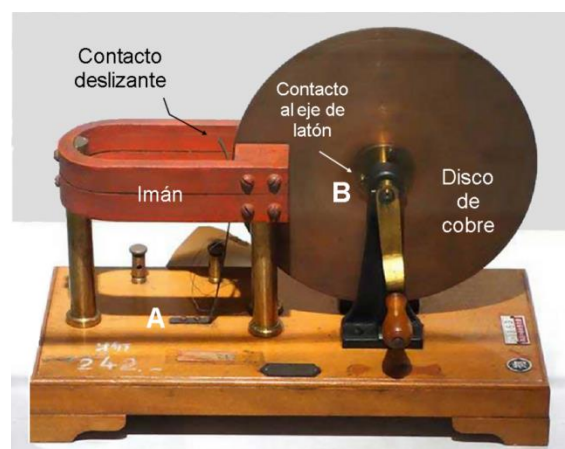


Figura 4.2 Primer generador electromecánico; el dinamo de disco de Faraday. La diferencia de potencial se establece entre los dos contactos en A y B. Tomado de http://www.astro.virginia.edu.https://twitter.com/GMexico_oficial/status/948568401978576897.

El más sencillo que se conoce es el dinamo de disco, desarrollado por el propio Faraday. Consiste en un disco conductor de cobre que va montado sobre un eje que pasa por su centro; la parte del disco entre el centro y el borde queda situada entre los polos de un imán de herradura (Figura 4.2). Cuando el disco se hace girar con una manivela aparece una FEM continua entre el centro y el borde.

El movimiento relativo entre el disco y el imán hace que las fuerzas magnéticas actúen sobre los electrones débilmente ligados del disco, creando una corriente eléctrica que siempre va en el mismo sentido. El dispositivo también se puede adaptar para funcionar a la inversa, como un motor, aplicando una FEM externa entre el borde y su centro, lo que hará girar el disco.

Cualquier generador moderno tiene dos partes fundamentales: un imán permanente (o un electroimán) que proporciona el campo magnético, y la *armadura*, una estructura que sostiene los conductores que cortan el campo magnético en su movimiento y transportan la corriente inducida. Por lo general la armadura es un núcleo de hierro laminado, alrededor del cual se enrollan en bobinas los cables conductores. El campo magnético de un imán permanente es bastante fuerte como para hacer funcionar un dinamo pequeño; los de mayor capacidad generadora utilizan electroimanes.

El principio de operación de un generador de corriente alterna se muestra en la figura 4.3. Es bastante similar al de la corriente continua, con algunos cambios que mejoran la eficiencia de la conversión energética y hacen que el sentido de la FEM se invierta

de forma periódica.

Enormes generadores de este tipo, movidos por turbinas impulsadas por la fuerza hidráulica (plantas hidroeléctricas), por el vapor de agua (plantas termoeléctricas y atomoeléctricas) o por el viento (eólicas), son los encargados de producir la mayor parte de la energía eléctrica que se consume en el planeta.

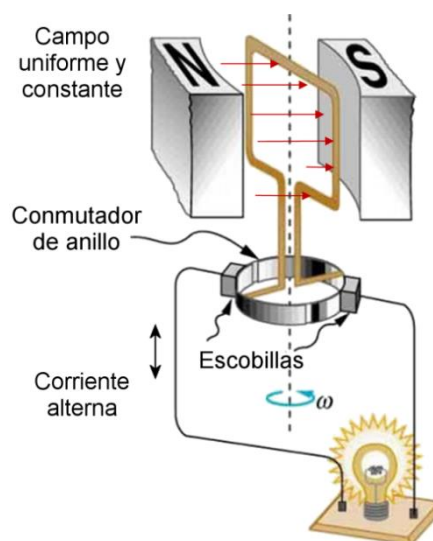


Figura 4.3 Generación de una corriente alterna.

Adaptada de

<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/23-5-electric-generators/>

Transformadores e inductores

El *transformador* es un dispositivo muy utilizado en circuitos eléctricos y electrónicos. No posee partes móviles y funciona basado en la ley de Faraday-Lenz. La red eléctrica comercial utiliza estos dispositivos para elevar el voltaje y transmitir la energía eléctrica a grandes distancias, pues así el proceso resulta mucho más eficiente y las pérdidas de energía en los alambres mucho menores.

Los transformadores también se utilizan para reducir el alto voltaje y poder llevar la energía hasta las viviendas de una forma menos peligrosa (110 y 220 V para aplicaciones no industriales). Cuando la diferencia de potencial entre el alambre conductor y la tierra es muy alta, el aire se ioniza parcialmente en los alrededores del alambre y se vuelve conductor. Si hay otro objeto cercano unido a tierra puede saltar una chispa, causando quemaduras e incluso volatilizando parte de los cuerpos que intervengan en la conducción. Las corrientes que se generan pueden ser de miles de amperes; como comparación, el motor de arranque de un automóvil consume solo unos pocos amperes.

Para ser eficientes, los transformadores de potencia deben disipar la menor cantidad posible de energía durante su funcionamiento; una disipación de tan solo 0.5 % en un gran transformador genera enormes cantidades de pérdidas por calor. Sin embargo, no es posible reducir las pérdidas a cero, y es por eso que los transformadores de la red comercial disponen de un circuito de refrigeración que utiliza aceite para el enfriamiento; el aceite circula por dentro del transformador y disipa el calor mediante radiadores externos.

La inmensa mayoría de los equipos electrónicos utilizan transformadores de distinto tipo; ellos permiten ajustar el voltaje suministrado por la red comercial a un valor adecuado para que funcionen sus circuitos.

En lo esencial, un transformador está formado por un núcleo de material ferro o ferrimagnético blando, cuya función es la de concentrar y reforzar las líneas de induc-

ción magnética, y dos enrollados de alambre con diferente número de vueltas N_1 y N_2 , el primario y el secundario. Cuando se hace circular una corriente alterna por el enrollado primario, se genera un campo magnético, también alterno, proporcional a N_1 . Ese campo magnético alterno es reforzado y guiado por el núcleo ferromagnético hasta el enrollado secundario, donde induce una FEM que es proporcional a N_2 . Controlando el número de vueltas N_1 y N_2 es posible regular la relación entre el voltaje a la salida y a la entrada del transformador, ya que a partir de la ley de Faraday se demuestra que los voltajes en el primario y secundario guardan la relación aproximada $V_1/V_2 = N_1/N_2$ (Figura 4.4).

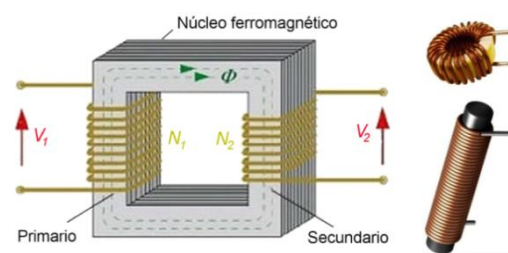


Figura 4.4 Transformador e inductores; Φ : flujo magnético. Adaptada de <https://piensa3d.com/que-es-un-transformador-tipos-funcionamiento/> y <https://www.electricaltechnology.org/2020/10/inductor-inductance-formula-equations.html>

Otro dispositivo muy usado en la electrónica, que funciona sobre la base de la ley de Faraday-Lenz, es el *inductor* o inductancia. Un inductor no es más que una bobina sencilla con un núcleo de material ferro o ferrimagnético blando. Al aplicar un voltaje alterno, la corriente variable que se establece crea un campo magnético y una FEM inducida que, según Lenz, se opone a la causa que lo origina; es decir, se opone al paso de

la corriente.

Mientras mayor es la frecuencia de la señal y mayor la variación del campo en el tiempo, mayor es la oposición que presenta el inductor; por el contrario, cuando la frecuencia disminuye, la oposición es cada vez menor. Si la corriente no varía (frecuencia cero), el flujo magnético no varía ($\Delta\phi/\Delta t = 0$) y por tanto no hay FEM inducida que se oponga a la corriente. Como resultado, el inductor es un dispositivo que no afecta notablemente la corriente continua, pero se opone al paso de la corriente alterna. La oposición se mide por la *reactancia inductiva* $X_L = 2\pi\nu L$, donde L es un factor característico del inductor (su *inductancia*). A mayor frecuencia ν , mayor oposición. A diferencia del resistor, un inductor disipa poco calor al paso de la corriente por efecto Joule, pues el enrollado de aleación de cobre o aluminio posee una resistividad muy baja.

Los *capacitores* – dispositivos que trabajan almacenando cargas y campos eléctricos – también se oponen al paso de la corriente alterna, pero al contrario de los inductores no dejan pasar la corriente continua, y su oposición al paso de la corriente *disminuye* cuando aumenta la frecuencia. En este caso, el parámetro característico es la *reactancia capacitiva* $X_C = \frac{1}{2\pi\nu C}$, donde C es la *capacidad* del condensador.

Es necesario gastar o consumir energía para crear un campo magnético, pero esa energía no se pierde. Se almacena en el campo magnético y se revierte de nuevo al circuito al variar el sentido de la corriente en cada ciclo. Sin embargo, a causa de la histéresis

y de las corrientes inducidas que aparecen en el núcleo ferromagnético, en cada ciclo siempre se pierde una pequeña cantidad de energía en forma de calor. Este calor es adicional al que se pierde en los alambres por efecto Joule.

En combinación con los capacitores, los inductores se utilizan en circuitos resonantes y filtros que permiten sintonizar o separar una frecuencia determinada (o un pequeño intervalo de frecuencias) de una mezcla de señales de muchas frecuencias. Es el método utilizado en los receptores de radio y TV para seleccionar o *sintonizar* una frecuencia específica entre todas las que se reciben a la vez en la antena.

Radiación electromagnética

No es necesario que un circuito esté presente para que el campo magnético genere un campo eléctrico. Incluso en el vacío, un campo magnético variable en el tiempo siempre tendrá asociado su correspondiente campo eléctrico. El campo eléctrico generado de esta manera posee la característica de que sus líneas de fuerza son cerradas y de dirección perpendicular a las del campo magnético. En la Física, esos campos se denominan *no conservativos*, porque son capaces de entregar energía al realizar un ciclo cerrado. Cuando ocurre lo contrario, el campo es *conservativo*. Si un campo magnético variable actúa sobre un cuerpo conductor macizo, el campo eléctrico inducido es capaz de engendrar o generar corrientes en el seno del cuerpo, las denominadas *corrientes de Foucault*. Por tanto, si ese campo variable incide sobre el cuerpo humano, el campo eléctrico asociado será capaz de generar corrientes alternas en su interior.

Como se expresó al inicio, la naturaleza de los campos eléctricos y magnéticos es tal que el efecto inverso también tiene lugar: un campo eléctrico variable en el tiempo da origen a un campo magnético. Por tanto, los campos eléctricos y magnéticos variables no son independientes; siempre se presentan de conjunto, y de ahí la denominación de campo electromagnético.

Generación de campos electromagnéticos.

La aceleración es la relación que existe entre la variación de la velocidad de un cuerpo y el tiempo que tarda en ocurrir esa variación. Considerando una partícula que se mueve a lo largo de una recta, si t_0 representa la lectura del reloj cuando la velocidad era v_0 y t una lectura posterior cuando la velocidad tiene otro valor v , la aceleración media a_m en ese intervalo se calcula por la expresión $a_m = (v - v_0) / (t - t_0)$ lo que también se indica como $a = \Delta v / \Delta t$. En esas condiciones la aceleración puede ser tanto positiva (la velocidad aumenta al transcurrir el tiempo) como negativa (la velocidad se reduce).

Las cargas eléctricas aceleradas son capaces de generar campos electromagnéticos, en forma de ondas que se propagan en el espacio. Es posible crear estas ondas mediante una antena con dos extremos abiertos o terminales que, en forma alterna, se cargan positiva y negativamente (*dipolo*). La típica antena de televisión es un dipolo, pero que solo se usa para recibir y no para emitir ondas electromagnéticas.

Un tipo de antena emisora muy común es la *antena Marconi*. Se trata de una barra o varilla vertical que forma la mitad del dipolo, mientras que la tierra actúa como la otra

mitad. Este tipo de antena también se utilizó mucho en automóviles y teléfonos inalámbricos (Figura 4.5). En este caso la parte metálica del automóvil o teléfono actúa como la otra mitad del dipolo. En los teléfonos celulares las antenas tipo Marconi evolucionaron hacia las más eficientes *antenas fractales*, que permiten ocultar la antena en el interior del equipo (figura 4.6).

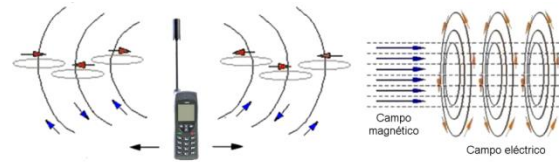


Figura 4.5 Propagación de la radiación en todas direcciones en un teléfono satelital contemporáneo. Los campos magnéticos generan campos eléctricos y viceversa. La señal radiada se propaga con la velocidad de la luz.

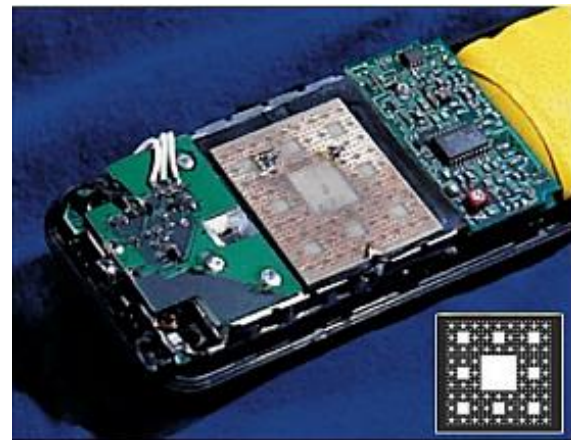


Figura 4.6 Interior de uno de los primeros teléfonos celulares mostrando la antena fractal, dibujada en el recuadro a la derecha (alfombra de Sierpinski).

Cuando la antena tiene las dimensiones adecuadas, al aplicarle una FEM alterna se logra que emita radiaciones al espacio que la rodea. Operando sobre la FEM y modificándola de manera adecuada, es posible

usar la radiación para transmitir información de todo tipo (sonido, imágenes, información digitalizada). La energía radiada se propaga a la velocidad de la luz, unos 300 000 kilómetros por segundo en el vacío y algo menor en otros medios.

Espectro electromagnético. El físico inglés *James Clerk Maxwell* amplió las investigaciones de Michael Faraday sobre los campos electromagnéticos y logró encontrar las relaciones matemáticas que describen su comportamiento. Sus resultados lo convirtieron en uno de los científicos más importantes del siglo XIX. Su obra más importante es el *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873), donde publicó su conjunto de ecuaciones diferenciales o *Leyes de Maxwell* en las que se describe la naturaleza de los campos electromagnéticos en términos de espacio y tiempo.

Maxwell demostró que la propagación de la radiación electromagnética en el vacío, o en cualquier otro medio, se describe de forma similar a las ondas que se propagan en la superficie del agua cuando ocurre una perturbación (por ejemplo, como cuando se deja caer una piedra en aguas tranquilas). La *velocidad de propagación* v_p de la onda es la velocidad con que se propaga o avanza la perturbación en el medio. La *amplitud* de la onda es el tamaño máximo que alcanzan sus valles o crestas al oscilar (figura 4.7). La *intensidad* de la onda se define como la energía por unidad de tiempo que es capaz de transportar a través de la unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación. Se mide en watt/m^2 . Mientras mayor sea la amplitud de la onda, mayor será su intensidad.

La distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos es la *longitud de onda* λ (lambda), y el número de veces que una cresta (o un valle) se repite por segundo en una posición determinada es la *frecuencia* ν (nú) de la onda. Como se dijo antes, la frecuencia se expresa en oscilaciones por segundo (Hz). La longitud de onda y la frecuencia no son independientes. Estos parámetros se relacionan con la velocidad de propagación por la expresión $v_p = \lambda \nu$.

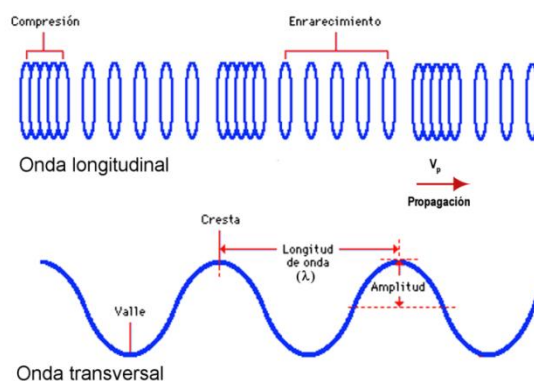


Figura 4.7 Representación de los dos tipos de ondas mecánicas que se pueden presentar en un medio material como el aire (sonido), un sólido o un líquido (olas).

En la onda que viaja por la superficie de una charca oscilan las moléculas de agua. En la radiación electromagnética lo que oscila son los campos eléctrico y magnético, cada uno creando al otro continuamente a medida que la onda avanza o se propaga con la velocidad de la luz (Figura 4.8). Para tener una idea de lo que significa esta velocidad, se puede considerar que el perímetro de la tierra (su longitud) es de unos 40 000 kilómetros por el ecuador. Como en el vacío la luz recorre 300 000 km en un segundo, en ese tiempo una onda de radio es capaz de dar 7 vueltas y media a la Tierra. (En

un medio diferente al vacío la velocidad es algo menor, pero muy poco).

Se le llama *espectro electromagnético* al conjunto de todas las posibles frecuencias con que puede presentarse una onda electromagnética (tabla 4.1).

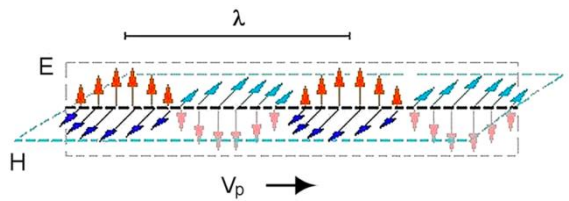


Figura 4.8 Representación instantánea de una onda electromagnética. Los campos E y H son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación.

Tabla 4.1 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

Abarca una región muy amplia, desde unas pocas decenas de Hz hasta miles de millones de Hz. Las propiedades de la onda electromagnética varían de forma notable en dependencia de su frecuencia; las radiaciones de más baja frecuencia constituyen las conocidas ondas de radio (onda larga), la de más alta frecuencia es la radiación *gamma* penetrante (de la letra griega γ), que se produce en los elementos radiactivos o en pro-

cesos subatómicos tales como la aniquilación de un par electrón positrón. Las explosiones de supernovas y otros sucesos astrofísicos muy intensos también generan cantidades apreciables de radiación γ . Dentro del intervalo comprendido entre las ondas de radio y la radiación γ se encuentran todas las demás radiaciones: onda corta, radiación infrarroja (IR), espectro visible, ultravioleta (UV) y rayos X.

Los rayos gamma y los rayos X “duros” tienen una longitud de onda de entre 0,005 y 0,5 nm (un nm o nanómetro equivale a 10^{-9} m o una millonésima de milímetro). Los rayos X “blandos” se superponen con la radiación ultravioleta en longitudes de onda próximas a los 50 nm. El ultravioleta, a su vez, da paso a la luz visible, que va aproximadamente desde 380 hasta 760 nm. Los rayos infrarrojos o radiación de calor se solapan con las frecuencias de radio de microondas, entre los 100,000 y 400,000 nm. Por encima de esta longitud de onda, hasta unos 15,000 metros de longitud, el espectro está ocupado por las diferentes ondas de radio. Más allá de la zona de radio el espectro entra en la región de bajas frecuencias, cuyas longitudes de onda llegan a medirse en decenas de miles de kilómetros.

Transmisión de señales

Se reconoce al ingeniero italiano *Guillermo Marconi* (1874-1937) como el inventor del primer sistema práctico de transmisión de información mediante señales de radio, a finales del siglo XIX. Ya en 1890 se interesaba por la telegrafía sin hilos y hacia 1895 había inventado un aparato con el que consiguió enviar seña-

les a varios kilómetros de distancia mediante una antena direccional. En 1899 estableció la comunicación inalámbrica entre Inglaterra y Francia a través del canal de la Mancha. Las marinas italiana y británica pronto adoptaron su sistema y hacia 1907 había alcanzado tal perfeccionamiento que se estableció un servicio trasatlántico de telegrafía sin hilos para uso público.

El descubrimiento de las ondas de radio dio lugar a un impetuoso desarrollo de los medios de comunicación, incluyendo la televisión, el radar, los sistemas de navegación, la comunicación espacial y la telefonía celular, con infinitud de aplicaciones en otras ciencias como la meteorología y la astronomía.

Las ondas de radio son aquellas cuya frecuencia va desde unos pocos kilohertz (kHz) hasta 300 gigahertz (GHz). Un kilohertz equivale a mil ciclos por segundo, y un megahertz (MHz) a un millón; un gigahertz equivale a 10^9 Hz o 1 000 MHz. La denominada onda media de los receptores de radio en amplitud modulada (AM) cubre el intervalo 535–1 605 kHz. Las frecuencias mayores corresponden a las ondas cortas de diferentes bandas.

Las propiedades de las ondas de radio dependen de su frecuencia ν (o de su equivalente, la longitud de onda λ) por lo que es común utilizar ondas de radio de diferente λ para distintos fines. Las ondas más cortas poseen una frecuencia más alta (más oscilaciones por segundo); las más largas tienen una frecuencia más baja. La relación entre λ y la frecuencia es $\lambda = c/\nu$, donde c es la velocidad de la luz.

En una atmósfera uniforme, la radiación electromagnética se propaga en línea recta. Como la superficie terrestre es casi esférica, la comunicación radiofónica a larga distancia solo es posible gracias a que las ondas largas se reflejan en la ionosfera, una región de la atmósfera compuesta de varias capas de aire ionizado que se extiende desde una altura de casi 80 km sobre la superficie terrestre – comienzo de la ionosfera – hasta 640 km o más (Figura 4.9). En comparación, la altura de vuelo de las líneas aéreas comerciales es de unos 10 km.

A tales alturas el aire está enrarecido en extremo, como si se hubiera hecho vacío con una bomba mecánica. Cuando las partículas gaseosas de la atmósfera se ionizan a causa de la radiación ultravioleta del sol, tienden a permanecer ionizadas debido a las mínimas colisiones que se producen con otras partículas. Estas partículas ionizadas son capaces de reflejar las ondas de radio de manera parcial. De ahí que sólo una parte de la energía radiada por un transmisor hacia la ionosfera es transmitida hacia el exterior, otra es absorbida y la restante es reflejada hacia la superficie de la Tierra. Este último efecto permite la recepción de señales de radio a distancias mucho mayores de lo que sería posible con ondas que viajaran solo en línea recta.

Las ondas de frecuencia superior a los 300 MHz ($\lambda < 10$ m) se subdividen en cuatro categorías: muy alta frecuencia (VHF, del inglés *very high frequency*), ultra alta frecuencia (*ultra high frequency*, UHF), superalta frecuencia (*super high frequency*, SHF) y extremadamente alta frecuencia (*extremely high frequency*, EHF). Estas ondas

no se reflejan en la ionosfera, por lo que solo se pueden captar cuando el receptor se encuentra en línea recta con el emisor. Sin embargo, son muy útiles en las comunicaciones espaciales.

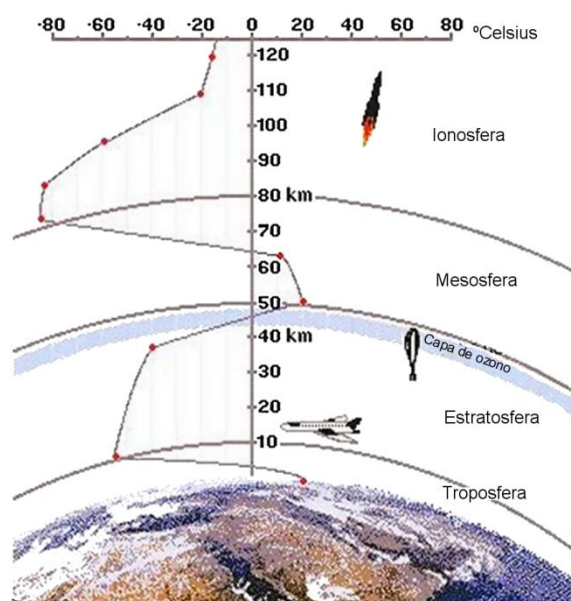


Figura 4.9 Capas de la atmósfera: troposfera, estratosfera, mesosfera e ionosfera. La curva quebrada indica la temperatura según la escala

superior.

Por lo común, el término *microondas* se usa para designar las ondas electromagnéticas en la región de frecuencias UHF – EHF, con longitud de onda que va desde 1 mm hasta 30 cm ($\nu = 1$ a 300 GHz). Las microondas tienen aplicaciones en las comunicaciones de todo tipo vía satélite, en la meteorología, en la medición de distancias e incluso se utilizan para cocinar alimentos en los hornos de microondas. En la tabla 4.2 aparece resumida la clasificación de las ondas de radio de acuerdo con su frecuencia y su longitud de onda. Al interactuar con la atmósfera la atenuación no es la misma para todas las frecuencias; la radiación con λ inferior a unos pocos centímetros es absorbida por las gotas de agua o por las nubes; la inferior a 1.5 cm pueden incluso quedar absorbida por el vapor de agua que hay normalmente en una atmósfera limpia.

Tabla 4.2
Clasificación de las ondas de radio

Frecuencia	Denominación	Abreviatura	λ
3 – 30 kHz	Muy baja frecuencia	VLF	$10^5 - 10^4$ m
30-300 kHz	Baja frecuencia	LF	$10^4 - 10^3$ m
300-3 000 kHz	Frecuencia media	MF	$10^3 - 10^2$ m
3-30 MHz	Alta f. (onda corta)	HF	$10^2 - 10$ m
30-300 MHz	Muy alta frecuencia	VHF	$10 - 1$ m
300-3 000 MHz	Frecuencia ultra alta	UHF	$1 \text{ m} - 10 \text{ cm}$
3-30 GHz	Frecuencia superalta	SHF	$10 - 1 \text{ cm}$
30-300 GHz	Extremadamente alta	EHF	$1 \text{ cm} - 1 \text{ mm}$

Transmisión de potencia. Hornos de microondas

Una de las propiedades de la radiación de alta frecuencia al interactuar con muchos materiales es la de generar calor. Los hornos de microondas funcionan en la región UHF, a frecuencias cercanas a los 2450 MHz (figura 4.10).

La componente eléctrica de la onda presenta una interacción fuerte con el momento dipolo eléctrico de las moléculas del agua, y también con otras moléculas polares que formen parte de los alimentos. Esas moléculas son forzadas a seguir las oscilaciones de la onda electromagnética, incrementándose su movimiento de rotación y vibración al nivel microscópico. Un incremento microscópico del movimiento se refleja en lo macroscópico como un aumento de temperatura, que es transmitido a los restantes átomos y moléculas por los mecanismos usuales de transmisión del calor: *convección, conducción y radiación*. La convección se refiere al flujo circulatorio de gas o líquido desde las zonas más calientes a las más frías, la conducción al contacto directo entre sólidos, mientras que la radiación implica la transmisión de calor por radiación electromagnética, en lo esencial en la región infrarrojo-visible del espectro (cap. 5).

Las microondas no pueden penetrar en los recipientes metálicos para calentar la comida, pues los metales reflejan las ondas de radio de la misma forma que un espejo refleja la luz visible. Sin embargo, pueden atravesar recipientes no metálicos como vidrios, cerámicas o plásticos sin calentarlos, para ser absorbidas sólo por los alimentos

en su interior. Como la radiación penetra muy profundo en los tejidos biológicos, los alimentos se cocinan en profundidad, a diferencia de lo que ocurre en un horno convencional, donde el calor se recibe solo en la superficie y avanza con lentitud de fuera hacia dentro. Además, la energía solo se emplea en calentar los alimentos, sin necesidad de elevar la temperatura de los recipientes o de las paredes del horno. Por ese motivo los alimentos tardan menos en hornearse y se gasta menos energía en el proceso.

Cuando la intensidad de la radiación es muy alta, la exposición a las microondas puede ser muy peligrosa. También es importante el tiempo de exposición. Tanto la alta intensidad como una larga exposición pueden ocasionar quemaduras, cataratas oculares, daños en el sistema nervioso o esterilidad. Aún no se conocen bien los efectos de la exposición a las microondas de baja intensidad durante largos períodos.

Cocinas de inducción

Las cocinas de inducción trabajan a frecuencias mucho menores que las de los hornos de microondas, en el intervalo de frecuencias entre 20 y 100 kHz. No calientan los alimentos por vía directa como en los hornos, sino que generan corrientes de Foucault en un material ferromagnético-resistivo adosado al fondo de la cazuela, que a la larga produce el calor que se emplea en cocinar los alimentos (figura 4.10).

Durante su funcionamiento, el campo magnético variable generado por una bobina da origen a un campo eléctrico también varia-

ble, y ambos se propagan en todas direcciones – no sólo como se muestra en la figura – atravesando la vitrocerámica no absorbente. Es la componente eléctrica quien genera las corrientes y producen calentamiento por efecto Joule en el material magnético del fondo de la olla, tal como ocurre en una cocina de resistencia convencional.

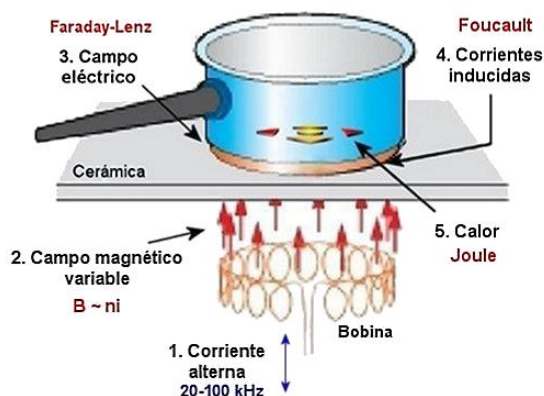


Figura 4.10 Mecanismo del calentamiento por inducción.

A diferencia de los hornos de microondas, estas cocinas no se pueden utilizar con recipientes de loza, barro, teflón o cualquier otro material aislante. Tampoco con cualquier recipiente de aluminio o cobre u otro metal no magnético, pues a la frecuencia de trabajo de la cocina estos metales reflejan la radiación electromagnética con gran efectividad. La otra diferencia esencial con los hornos de microondas, donde la radiación se mantiene confinada en su interior por paredes reflectantes, es que en una cocina de inducción la radiación se dispersa en todas direcciones, generando contaminación electromagnética en mayor o menor grado.

Investigaciones recientes muestran la posibilidad de efectos perjudiciales sobre los genes de diversos tipos de células, mientras

que por otra parte no existen estudios que demuestren que ese intervalo de frecuencias esas radiaciones sean inocuas, en especial con la intensidad en que son emitidas – con potencia suficiente para cocinar alimentos. Las posibles afectaciones incluyen efectos genéticos en el feto en las gestantes, dada la cercanía de la región abdominal a la fuente de radiaciones, así como roturas u otras alteraciones en los genes de espermatozoides y óvulos de personas adultas (ver artículo de revisión de Lai. H. en las referencias).

Estimación de distancias: radar

Los sistemas para medir distancias mediante la radiación están basados en el *radar*, palabra que se deriva del inglés *radio detection and ranging*. El radar detecta objetos fuera del alcance de la vista, y determina a qué distancia se encuentran al proyectar sobre ellos ondas de radio. Se comenzó a utilizar de manera generalizada durante la II Guerra Mundial (1939-1945).

Su funcionamiento está basado en la propiedad que tienen las ondas electromagnéticas de reflejarse en determinadas superficies. En un equipo de radar, un transmisor de radio de alta frecuencia emite un haz de radiación durante un corto período, con una λ que puede ir desde algunos centímetros hasta cerca de 1 metro. Los objetos que se hallan en la trayectoria del haz reflejan las ondas de regreso hacia el transmisor, donde se coloca un receptor específico, diseñado para detectarlas. Midiendo por medios electrónicos el tiempo que tarda la señal en ir y regresar hasta el blanco, y conocida su velocidad de propagación ($\approx 300\,000$ km/s), es posible calcular la distancia hasta el objeto donde se reflejó el haz. En un equipo

de radar el proceso de transmisión-recepción de impulsos ocurre en forma continua, en fracciones de segundo.

El radar no solo detecta la presencia de un objeto remoto como un avión en el aire, sino que es capaz de fijar su posición en el espacio, su tamaño y su forma aproximada, así como la dirección de su movimiento y su velocidad. Aunque en sus orígenes fue un instrumento bélico, hoy se utiliza en muchos fines pacíficos, tales como la navegación marítima y el control de tráfico aéreo. El radar ha encontrado una aplicación casi universal en la meteorología y la predicción del tiempo; además de localizar perturbaciones importantes como los huracanes o los tornados, también se usa para efectuar el seguimiento de las condiciones climatológicas locales. Los radares meteorológicos proporcionan información acerca del volumen de las precipitaciones y permiten alertar con antelación sobre posibles inundaciones. Los más recientes dan la posibilidad de medir la velocidad del viento cuando hay tormenta, a partir de una propiedad conocida como *efecto Doppler*.

Radares de otro tipo son utilizados por la policía de tránsito para determinar la velocidad de los vehículos y cuantificar la densidad del tráfico en las calles principales. También para controlar los semáforos de forma automática. Por ejemplo, hay sistemas que pueden proyectar la luz roja de manera automática si el vehículo se acerca a un cruce de cuidado con una velocidad por encima del límite permitido.

Resonancia magnética

Otro tipo de interacción de la radiación con la sustancia en la región de altas frecuencias

es la resonancia magnética. Existen diversos tipos: nuclear, paramagnética electrónica, ferromagnética, antiferromagnética, de ondas de spin, cuadrupolar nuclear y resonancia de spin de electrones de conducción; todas se aplican mayormente en la investigación científica. Sólo se describirá la resonancia magnética nuclear (RMN), por haber sido una de las primeras en ser usada como herramienta de diagnóstico en la medicina. (En inglés *Magnetic Resonance Imaging*; i.e., Imágenes por Resonancia Magnética).

La RMN no implica radiactividad ni ningún otro tipo de radiación ionizante, pues sólo se trabaja en la región de radiofrecuencias. El núcleo atómico posee un momento magnético μ_N , similar al momento magnético de spin del electrón μ_s . Como su valor es miles de veces menor que el de μ_s , no es necesario tomarlo en cuenta al analizar las propiedades diamagnéticas, paramagnéticas o ferromagnéticas de una determinada sustancia. Sin embargo, cuando se hace incidir radiación de frecuencia adecuada sobre una sustancia que a la vez está sometida a un campo magnético estático de gran intensidad, el momento magnético nuclear es capaz de interaccionar con esa radiación y absorber gran cantidad de energía. Esto es precisamente lo que caracteriza una resonancia; la absorción sólo tiene lugar a una frecuencia específica (o en un intervalo de frecuencias muy estrecho a su alrededor), y no a cualquier frecuencia.

Como fuente de radiación se utiliza una bobina por la que circula una corriente alterna de frecuencia adecuada (figura 4.11). La descripción de lo que ocurre, según la física clásica, es la siguiente: cuando el campo estático externo (de intensidad B_0 en la figu-

ra) interacciona con los momentos magnéticos nucleares, tiende a alinearlos en una dirección paralela a las líneas de inducción, perpendicular al polo del electroimán en la figura. Sin embargo, esta alineación no llega a ser perfecta, pues los momentos magnéticos tienen tendencia a rotar alrededor de las líneas de inducción. Este movimiento particular de rotación se conoce como *precesión*, similar al cabeceo de los trompos cuando van perdiendo velocidad; se ha representado por el cono en el recuadro a la izquierda en la figura 4.11.

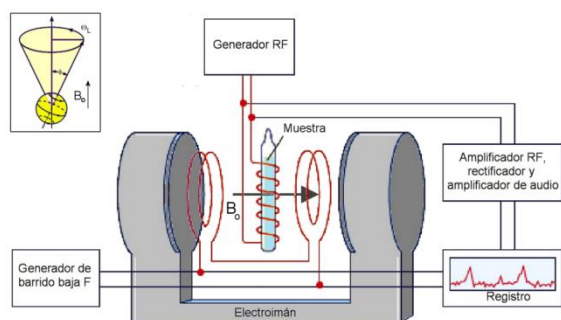


Figura 4.11 Esquema de un experimento de resonancia magnética; ω_L representa la *frecuencia angular* de precesión, relacionada con la frecuencia ν por la expresión $\omega = 2\pi\nu$.

El número de rotaciones por segundo que realiza el vector es la *frecuencia de precesión* ν_0 , que depende de B_0 según la expresión $\nu_0 = 42,58B_0$ (ν_0 en MHz y B_0 en T). Cuando la frecuencia ν de la señal externa aplicada coincide con ν_0 , se produce la resonancia. Así, para lograr la resonancia de los protones del agua, si $B_0 = 0.5$ T se necesita aplicar una señal en la bobina de 21.3 MHz. Esta particularidad de interactuar con los protones del agua se utiliza en los equipos modernos de obtención de imágenes por resonancia magnética para diagnóstico médico (capítulo 6).

Detección de metales

El desarrollo de instrumentos capaces de detectar metales bajo tierra mediante ondas de radio está asociado a los primeros intentos de emplear esas ondas en sistemas de orientación aérea, alrededor de 1920. Estos intentos proporcionaron versiones primitivas de los modernos radiogoniómetros, que se utilizan hoy día en la navegación marítima y aérea. Se buscaba que los aviones fueran capaces de orientarse en días muy nublados o con niebla; para esto se utilizaba como emisor de ondas la torre transmisora de alguna estación local de radio, de ubicación conocida. Como sistema receptor en el aeroplano, capaz de determinar la dirección de la emisora, se utilizaba una antena direccional en forma de aro o anillo metálico abierto, con los extremos unidos por conductores al equipo receptor de radio.

La antena direccional funciona de la manera siguiente: cuando el plano de la circunferencia que forma la antena receptora se encuentra paralelo a la línea recta que va desde el avión a la antena emisora, la recepción es máxima; cuando este plano está perpendicular a esa línea, lo que equivale a rotar la antena $\frac{1}{4}$ de vuelta de su posición de máxima recepción, la recepción es prácticamente nula. La mayoría de los receptores de *amplitud modulada* (AM) poseen en su interior antenas de este tipo, en forma de bobina con muchas vueltas de alambre (enrolladas sobre un núcleo de ferrita en la mayoría de los casos, figura 4.12), por lo que la intensidad de la recepción depende en gran medida de la orientación del receptor respecto a la emisora. Cuando el extremo de la bobina apunta directo hacia la fuente emisora, la señal es mínima y puede llegar a anularse

en su totalidad.

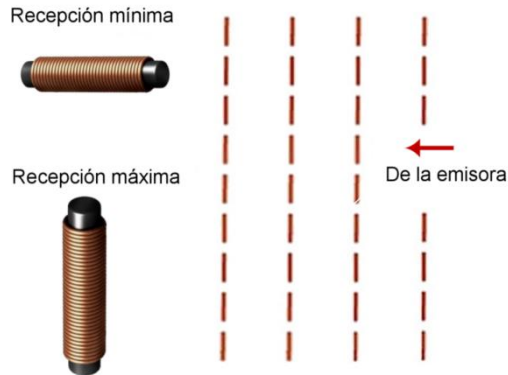


Figura 4.12 Dependencia de la recepción de la señal en función del ángulo de la antena con la radiación incidente.

Este efecto de recepción nula cuando la espira está orientada hacia la dirección de la fuente emisora es el principio básico de operación de los antiguos sistemas de orientación aérea, pues la posición de "no recepción" es muy precisa, y se utilizaba para situar al avión en la dirección determinada. La dirección que se iba a seguir se determinaba girando la antena receptora hasta obtener señal cero. El piloto podía entonces ir corrigiendo a conveniencia la dirección del vuelo hasta lograr la dirección deseada.

Sin embargo, ya desde los primeros intentos de llevar a cabo esta técnica de orientación surgían errores significativos cuando se sobrevolaban determinados territorios. Diferentes pilotos en diversos aviones, guiándose por la misma estación emisora, encontraban siempre los mismos errores en los mismos lugares. Investigaciones posteriores revelaron que, donde ocurrían las interferencias, había yacimientos minerales con alto contenido de metal o existían grandes construcciones de ese material como, por ejemplo, el techo de tejas metálicas de una

gran fábrica.

Finalmente se logró encontrar la siguiente explicación: una antena emisora emite radiación en todas direcciones. Si la señal posee suficiente intensidad, será capaz de inducir corrientes significativas en un buen conductor, como un techo metálico o un gran tanque de agua o combustible. Esas corrientes inducidas son capaces de emitir, a su vez, una señal secundaria con la frecuencia de la fuente original, también en todas direcciones, aunque de mucha menor intensidad. No obstante, si el receptor utilizado en un avión es sensible, las señales secundarias se detectarán superpuestas a la señal original cuando el avión se encuentra cerca de la fuente secundaria.

Para obtener la señal cero que servía de referencia al piloto, el plano de la antena del avión debía estar perpendicular a la dirección de la antena emisora. Como la radiación de la antena emisora y la reflejada por el emisor secundario provenían de diferentes direcciones, no era posible lograr que la señal en la antena receptora del avión se anulara en su totalidad, y de ahí los errores de orientación detectados (que se pueden corregir con facilidad una vez conocido su origen).

Se atribuye al técnico de sistemas de navegación aérea *Gerhard Fisher* la sugerencia de que la radiación secundaria emitida por el metal podía ser utilizada para la detección de metales soterrados. Esa práctica ha tenido un gran desarrollo hasta nuestros días.

Los detectores de metal contemporáneos utilizan una sola antena que trabaja, de forma alterna, como emisor y receptor du-

rante fracciones de segundo, en forma similar a como lo hace la antena de radar. La antena va ubicada en una especie de plato llano colocado en el extremo de una barra o mango de sujeción que contiene los circuitos electrónicos y la batería que energiza el instrumento (figura 4.13). Otras versiones son los detectores utilizados para detectar tuberías metálicas soterradas y los usados en los controles de aduana de los aeropuertos y otros lugares sensibles, donde las bobinas van insertadas en el marco de una puerta que el viajero debe atravesar.

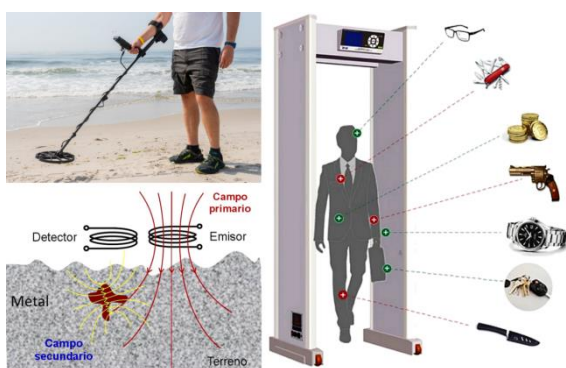


Figura 4.13 Detectores de metal.

En su estado básico, un detector manual no detecta señal alguna. Cuando el plato se desplaza cerca del suelo o de una pared donde se halla enterrado algún objeto metálico como, por ejemplo, una tubería, aparece una señal de rechazo, causada por la radiación secundaria emitida por el metal. Esa señal origina una FEM inducida en la antena, que se puede amplificar por medios electrónicos para generar sonido en un audífono, desviar una aguja indicadora o emitir una señal luminosa, revelando así la presencia del metal oculto. Un detector típico en el mercado pesa 3.75 libras, opera a la frecuencia de 12 kHz, tiene sintonía manual o automática a elección, es capaz de indicar

la profundidad a que se encuentra el metal y se energiza con 8 baterías tipo AA, capaces de mantener trabajando el instrumento de 25 a 35 horas en régimen de bajo consumo (utilizando audífonos para ahorrar energía). Los detectores más sofisticados son capaces de diferenciar entre diversos metales.

También existen detectores portátiles, del tamaño aproximado de un teléfono celular; en este caso un operador desplaza el instrumento cerca de la persona examinada, a pocos centímetros de los lugares del cuerpo de donde pudiera existir algún arma disimulada.

En algunos países son bastante comunes los buscadores de tesoros, aficionados que dedican su tiempo libre a hacer campismo en locaciones donde hubo asentamientos humanos en otras épocas, o se efectuaron batallas importantes. Los buscadores utilizan el detector de metal para rastrear monedas antiguas, armas, hebillas, adornos o cualquier otro objeto metálico; algunos de estos objetos pueden alcanzar un gran valor en la actualidad. Otros se dedican a buscar anillos, monedas, o prendas de valor perdidas en las arenas de las playas.

También se construyen detectores especializados para buscar debajo del agua. Hay revistas dedicadas solo a estos temas, que aconsejan dónde y cómo buscar, reportan hallazgos de importancia y ofrecen consejos técnicos sobre los instrumentos a utilizar. En los conflictos bélicos se utilizaron por mucho tiempo detectores de minas similares a los empleados por los buscadores de tesoros. Hoy día no son muy efectivos, dada la proliferación de minas de plástico o de madera, desarrolladas precisamente con el

fin de evitar su detección mediante estos instrumentos.

El radar de penetración terrestre RPT

También conocido como *radar de sondeo terrestre* o *georradar*, el RPT es un instrumento que trabaja en forma muy parecida a un radar convencional. Se considera que se aplicó por primera vez en Austria, en 1929, para determinar el espesor de un glaciar. Su antena transmisora envía pulsos cortos de alta frecuencia hacia la tierra. Cuando la radiación encuentra un objeto o una frontera con diferente permitividad dieléctrica, aparecen variaciones en la señal reflejada e información de la distancia a que se encuentra. Hay muchos tipos y modelos especializados para diferentes aplicaciones.

La profundidad de penetración de la señal está limitada por la conductividad del terreno, la frecuencia utilizada y la potencia radiada. Cuando la conductividad del suelo aumenta, la penetración disminuye, porque la radiación se disipa con más facilidad en forma de calor. Las altas frecuencias proporcionan mejor resolución, pero penetran menos que las bajas frecuencias. En los suelos arenosos o en materiales compactos y secos como el granito, la piedra caliza y el hormigón, es usual lograr una buena penetración (hasta 15 metros). En los suelos húmedos o arcillosos u otros con alta conductividad eléctrica la penetración es algu-

nas veces de solo unos pocos centímetros. En el hielo la radiación penetra cientos de metros.

El radar de penetración terrestre se puede utilizar en gran cantidad de medios diferentes que incluyen rocas, suelos, hielo, agua, pavimentos y estructuras. Puede detectar objetos enterrados, cambios en el material del suelo y subsuelo, hendiduras y cavidades. En las ciencias de la tierra se usa para estudiar los lechos de roca, el agua subterránea y el hielo. Las aplicaciones de ingeniería incluyen ensayos no destructivos de estructuras y pavimentos, la localización de tuberías soterradas y el estudio de las características del terreno. En la arqueología se usa para hacer levantamientos y mapas de yacimientos y sitios arqueológicos; en lo militar para la detección de minas, explosivos sin detonar y túneles.

Una determinación típica con un equipo de RPT proporciona un perfil o sección laminar bajo la superficie. Un conjunto de perfiles sirve para construir una imagen tridimensional tomográfica. Los datos se pueden representar como bloques tridimensionales, o en forma de cortes horizontales o verticales. Los cortes horizontales son mapas planos a una profundidad determinada, y por ello suelen ser los favoritos de los arqueólogos.

CAPÍTULO 5. RADIACIONES DE MÁS ALTA FRECUENCIA

Interacción de la radiación con la sustancia; fotones

Las propiedades de la radiación electromagnética difieren de manera notable de las propiedades de la sustancia. Por ejemplo, la radiación no posee masa en reposo (no es posible pesarla en una balanza, aunque en determinadas condiciones sí resulta posible asociarle una cierta *masa efectiva*). No obstante, en la medida que la longitud de onda disminuye y la frecuencia aumenta, la radiación comienza a manifestar propiedades no del todo acordes con una onda. A frecuencias muy altas, la energía que la radiación es capaz de entregar no se transfiere de forma continua, sino en cantidades específicas o *cuantos* de valor $\varepsilon = h\nu$, como si en vez de una onda estuviéramos en presencia de un “chorro” o flujo de partículas (figura 5.1). En la expresión anterior h es una constante de valor conocido: la *constante de Planck*.

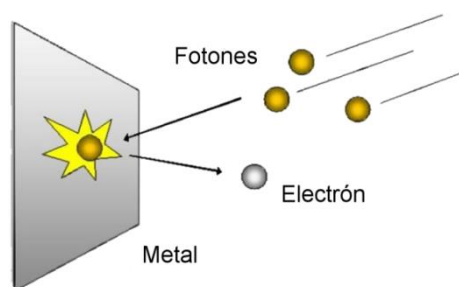


Figura 5.1 Efecto fotoeléctrico.

Se acostumbra designar esta característica muy particular de la radiación electromagnética como *dualidad partícula-onda*, indicando así que la radiación tiene un comportamiento que mezcla particularidades de una onda y de un flujo de partículas. Esta

dualidad es indetectable en las ondas de radio, pero en la región del espectro visible, y por encima de este, se manifiesta en toda su plenitud.

Las "partículas luminosas" fueron nombradas *fotones* por Albert Einstein en 1905 (ver *A. Einstein en las referencias*), quien logró dar explicación al hasta entonces inexplicable *efecto fotoeléctrico*, que consiste en la expulsión de electrones de un metal cuando sobre él incide luz de determinada frecuencia. Einstein consideró que cuando un electrón interacciona con un fotón, absorbe toda su energía $h\nu$. Si esa energía es suficiente para vencer las fuerzas de atracción de los núcleos atómicos, el electrón es expulsado del metal.

La dualidad de la luz se manifiesta incluso en la expresión matemática de su energía $\varepsilon = h\nu$, pues ε se refiere a una partícula específica, y ν es la frecuencia que se obtiene suponiendo que la radiación es una onda, no una partícula. Sin embargo, a pesar de esta contradicción onda-partícula, el concepto dual funciona a la perfección y permitió predecir (incluso en lo cuantitativo) lo que sucedería en diversas situaciones desconocidas.

La teoría de Einstein logró explicar muchas características del efecto fotoeléctrico que no se podían explicar considerando la luz como una onda electromagnética. Por ejemplo, la energía máxima de los electrones expulsados es independiente de la intensidad de la luz, efecto imposible de explicar a partir del modelo ondulatorio. El carácter dual de la radiación se verificó por completo en otros experimentos posteriores, y es hoy aplicado universalmente en la

ciencia y la tecnología.

El término efecto fotoeléctrico también se usa a veces, de manera general, para referirse a otros dos procesos diferentes: la *fotoionización* y el *efecto fotovoltaico*; en este último caso también es posible encontrar en la literatura el término *fotoconducción*. La *fotoionización* es la ionización de un gas por la luz u otra radiación electromagnética; si los fotones tienen suficiente energía, logran separar uno o más electrones externos de los átomos que componen el gas, convirtiendo este en un conductor eléctrico. El *efecto fotovoltaico* – asociado a la *fotoconducción* de los materiales – tiene lugar en el seno de los semiconductores; el flujo de fotones crea *pares electrón-hueco* en el seno del material que activan la conducción de la electricidad.

Un “hueco” es la falta de un electrón en un enlace químico, y se comporta como una partícula en determinadas condiciones. Las *celdas solares* o *celdas fotovoltaicas*, hechas de silicio, arseniuro de galio u otro material similar, convierten la radiación en electricidad por vía directa mediante el efecto fotovoltaico.

Radiaciones ionizantes y no ionizantes. Las radiaciones electromagnéticas se pueden clasificar en dos grandes grupos, en dependencia de si pueden arrancar electrones de la envoltura atómica o no: radiaciones *ionizantes* y *no ionizantes*.

Las ionizantes son aquellas que corresponden a frecuencias muy altas (ultravioleta (UV) lejano, rayos X y rayos γ) donde la energía es suficiente para romper los enlaces químicos e ionizar los átomos. A las frecuencias más bajas (luz visible, micro-

ondas y radio), la energía del fotón no es suficiente para romper los enlaces químicos; la radiación es no ionizante. En la tabla 5.1 aparecen algunas características de la interacción de la radiación con la sustancia, incluyendo las ondas de radio, ya analizadas en el capítulo 4.

La radiación y los organismos vivos

Tanto la radiación ionizante como la no ionizante pueden causar efectos notables en los tejidos animales y vegetales. Las radiaciones UV, visible e IR dan lugar a la excitación electrónica de las moléculas, aunque no a su ionización. Sin embargo, esa excitación puede favorecer algún tipo de reacción fotoquímica. Ejemplos típicos son la fotosíntesis en las plantas y la producción de vitamina D en la piel bajo la acción de la luz solar.

TABLA 5.1 INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA SUSTANCIA	
TIPO DE RADIACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Ionizante	Ioniza o rompe las moléculas (UV lejano, rayos X y γ).
No ionizante (óptica)	Excita los electrones e induce reacciones químicas (UV cercano, visible e IR).
No ionizante (radio, tipo A)	Induce corrientes e interacciona con los dipolos produciendo el calentamiento de los tejidos (microondas y radio AF).
No ionizante (radio, tipo B)	No produce calentamiento detectable (campos de frecuencia industrial y radio por debajo de 1 MHz).

Las emisiones de radio y microondas por encima de 1 MHz pueden inducir calor por vía directa en los tejidos mediante diversos efectos.

TABLA 5.2 PROPIEDADES DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA									
NO IONIZANTES, $h\nu < 12.4 \text{ eV}$						IONIZANTES, $h\nu > 12.4 \text{ eV}$			
Sub-radio frecuencia	Radio frecuencia	Microondas	Infrarrojo	Visible	UV no ionizante	UV ionizante	Rayos X	Rayos γ	Rayos cósmicos
ν 0-30 kHz	30 kHz- 1 GHz	1-300 GHz	300 GHz- 385 THz	385-750 THz	750-3000 THz	3-30 PHz	30-300 PHz	3-3000 EHZ	>3000 EHZ
λ ∞ -100 km	100 km-300 mm	300 mm-1 mm	1 mm- 780 nm	780 nm- 400 nm	400 nm- 100 nm	100 nm- 10 nm	10 nm- 1 pm	100 pm-0,1 pm	< 0.1 pm
G: giga = 10^9 ; T:tera = 10^{12} ; P:peta = 10^{15} ; E:exa = 10^{18} ; nm = nanómetro; pm = picómetro.									

TABLA 5.3. APLICACIONES DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA EN LAS REGIONES DE RADIO Y MICROONDAS.			
BANDA	ν	λ	APLICACIONES
EHF Extremely high frequencies	300 GHz a 30 GHz	1 mm a 10 mm	Comunicaciones diversas. Radar de navegación.
SHF Super high frequencies	30 GHz a 3 GHz	10 mm a 100 mm	Radar, radio, satélites. Usos industriales. Fisioterapia.
UHF Ultra high frequencies	3 GHz a 300 MHz	100 mm a 1 m	Horno microondas. Usos industriales y médicos. Fisioterapia. TV.
VHF Very high frequencies	300 MHz a 30 MHz	1 m a 10 m	Radio. FM. TV.
HF High frequencies	30 MHz a 3 MHz	10 m a 100 m	Soldadura de plásticos. Diatermia. OC.
MF Medium frequencies	3 MHz a 300 kHz	100 m a 1 km	Radio AM.
LF Low frequencies	300 kHz a 30 kHz	1 km a 10 km	Calentamiento por inducción.
ELF Extremely low frequencies	30 kHz a 0 Hz	10 km a ∞	Ultrasonidos. Técnicas de audio. Transporte de energía eléctrica.

Por debajo de 1 MHz la radiación es muy poco eficiente para producir calor; la correspondiente longitud de onda λ es mayor que la longitud del cuerpo humano y la radiación lo atraviesa sin mayores efectos conocidos.

En esta última región se incluyen las ondas de radio de baja frecuencia y las de frecuencia industrial, asociadas a las líneas de transmisión de la energía eléctrica (50 o 60 Hz, según el país considerado).

La capacidad de penetración en los organismos vivos tampoco es la misma para los diferentes tipos de radiación electromagnética. Las ondas de radio y los rayos X son capaces de atravesar con facilidad las sustancias biológicas, mientras que la radiación visible y ultravioleta se absorbe por completo en su superficie. En las tablas 5.2 y 5.3 se resume la clasificación de las radiaciones ionizantes y no ionizantes atendiendo a su frecuencia, así como algunas de sus aplicaciones en las regiones de radio y microondas.

Radiación infrarroja y visible

Cuando la longitud de onda λ de la radiación es del orden de varios cientos de nanómetros nos encontramos en la región del espectro correspondiente al *infrarrojo* (IR), *visible* y *ultravioleta* (UV). La λ de la radiación IR es menor que la de las ondas de radio y mayor que la de la luz visible; varía entre 0,001 y 1 milímetro aproximadamente. Su efecto principal al incidir sobre cualquier objeto es generar calor y elevar la temperatura de su superficie. La radiación infrarroja es la principal responsable de la sensación de calor que se siente bajo la luz

solar, o al acercar la mano a un objeto caliente, aunque este no se encuentre en estado incandescente ni emita luz.

Todos los cuerpos, incluyendo el cuerpo humano, emiten radiación infrarroja a diversas frecuencias en mayor o menor grado, razón por la cual esa radiación se puede utilizar para obtener imágenes de objetos lejanos ocultos por la bruma atmosférica, que dispersa la luz visible, pero no la radiación IR.

La fotografía IR, desarrollada hacia 1880, se ha convertido en la actualidad en una importante herramienta de diagnóstico en la agricultura, la industria y la medicina. En este último caso, el empleo de técnicas infrarrojas permite observar situaciones patológicas que no pueden verse a simple vista o en una radiografía. El uso de *miras infrarrojas* es común en el armamento contemporáneo, ya que permiten detectar al enemigo en las horas nocturnas.



Figura 5.2 Fusil de francotirador Kalashnikov SV-98 de última generación con diversos aditamentos ópticos y mira infrarroja. Tomada de <http://www.youtube.com/embed/VgiOUMgsgd> y <https://tiradoresprecision.com/kalashnikov-svch-308-designado-marksman-rifle/>

La figura 5.2 muestra un fusil de francotirador de última generación con este tipo de aditamento, junto a una instantánea tomada de un video donde aparece el presidente de la Federación Rusa, *Vladimir V. Putin*, comprobando su efectividad.

En medicina se llama *termografía* a la medida del calor corporal emitido por la piel. Mediante placas fotográficas o receptores de imagen sensibles a los rayos infrarrojos se pueden obtener termogramas de la totalidad o parte del cuerpo. Las variaciones de la temperatura en la epidermis dependen, entre otros factores, del número de vasos sanguíneos y de su cercanía a la superficie corporal; imágenes anormales permiten diagnosticar una enfermedad. Por ejemplo, un punto caliente en un lugar no acostumbrado puede indicar el desarrollo de un cáncer, mientras que un punto frío puede indicar un bloqueo del torrente sanguíneo, como el producido por una trombosis.

La teledetección mediante fotografía IR aérea y orbital se ha empleado para observar las condiciones de las cosechas y el daño producido por insectos y enfermedades en grandes zonas agrícolas, así como para localizar depósitos minerales. En los últimos años la detección IR se ha aplicado en la astronomía con gran intensidad.

La naturaleza nos ha dotado de un instrumento que permite detectar la radiación electromagnética en el intervalo aproximado de 380 a 760 nanómetros; ese instrumento es el ojo. El ojo humano es un órgano complejo que posee un lente capaz de adaptarse a la distancia del objeto que se enfoca para obtener una imagen nítida (el *cristalino*). Los *conos* y los *bastoncillos*, células

especializadas en el fondo del ojo, son capaces de separar diferentes longitudes de onda, proporcionando en el cerebro diferentes sensaciones de color. Así, la radiación de longitud de onda cercana a los 380 nm produce la sensación de violeta, mientras que la de 760 nm produce la sensación de rojo. Las longitudes de onda intermedias proporcionan todos los restantes colores de forma continua, pasando del rojo a los tonos naranjas, amarillos, verdes, azules y violetas a medida que la longitud de onda disminuye (figura 5.3).

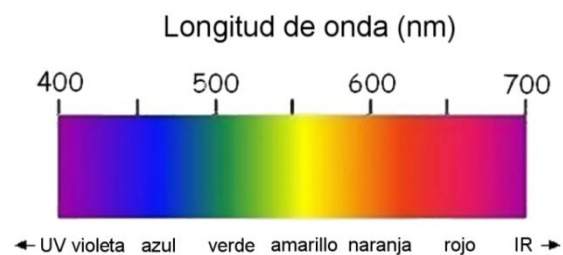


Figura 5.3 Espectro visible.

Es notable que estímulos físicos diferentes puedan producir una misma sensación de color en el ojo. Así, una mezcla de luces roja y verde de intensidades apropiadas parece exactamente igual a una luz amarilla espectral, aunque la mezcla no contiene radiación de longitud de onda correspondiente al amarillo. Se puede lograr cualquier sensación de color mezclando diversas intensidades de luz roja, azul y verde. Por eso, estos colores se denominan “aditivos primarios”. Si se mezclan los colores primarios con igual intensidad se produce la sensación de luz blanca. Esta propiedad se usa para obtener los colores adecuados en las pantallas televisores y monitores de computadoras. Además existen parejas de colores espectrales puros que, al mezclarlos en la proporción adecuada, también produ-

cen luz blanca; se denominan “colores complementarios”; entre esos pares figuran determinados amarillos y azules, o rojos y verdes azulados.

Muchas fuentes de luz artificiales, o naturales como el Sol, emiten luz blanca que es en realidad una mezcla de muchas longitudes de onda. Cuando esta luz pasa por un prisma, se separa en sus componentes espectrales (cada longitud de onda λ se desvía o refracta un ángulo diferente) y se obtiene un haz coloreado. La luz roja es la que menos se refracta, y la violeta la más refractada. Esta propiedad de la luz se detecta con facilidad en los bordes biselados de un espejo o de cualquier otro objeto transparente. La dispersión de la luz también tiene lugar en la atmósfera tras la lluvia, cuando quedan pequeñas gotas de agua pulverizada como remanentes. Esas pequeñas gotas actúan como prismas dando lugar al arco iris.

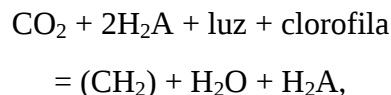
No es posible en tan breve espacio hacer una descripción detallada de todos los posibles eventos, propiedades y aplicaciones en los que interviene la luz visible; ni siquiera mencionar los más importantes. Es usual que cualquier carrera de ciencias o ingeniería dedique todo un semestre, o buena parte de él, al estudio de la óptica y las propiedades y aplicaciones de la luz visible (refracción, interferencia, difracción, absorción, cuantificación, presión de la luz...). Es por eso que solo hemos seleccionado dos ejemplos que ilustran la gran importancia de la radiación visible en el mundo que nos rodea:

Fotosíntesis. Como primer ejemplo, consideremos la fotosíntesis. Este es el proceso mediante el cual los organismos con cloro-

fila, como las plantas verdes, las algas y algunas bacterias, reciben energía de la luz y la utilizan para elaborar diferentes productos químicos. A la vez, en el proceso se consume CO_2 y se produce oxígeno.

Con la excepción de la pequeña contribución de las fuentes eólicas, geotérmicas, hidroeléctricas, fotovoltaicas y las plantas de energía nuclear, la energía que consume la biosfera terrestre procede de la fotosíntesis. Las plantas absorben la energía solar por vía directa en forma de radiación para desarrollarse; los herbívoros absorben esa energía de manera indirecta al nutrirse de las plantas, y los carnívoros también la recolectan 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.

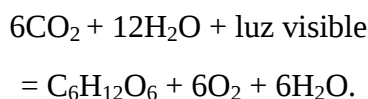
Una ecuación generalizada (y no ajustada) de la fotosíntesis en presencia de luz sería:



donde el término H_2A de la fórmula representa un compuesto oxidable, del cual se pueden extraer electrones; CO_2 es el dióxido de carbono y CH_2 una generalización de los hidratos de carbono que incorpora el organismo vivo. La clorofila actúa como catalizador, y no se transforma. En la gran mayoría de las algas y las plantas verdes H_2A es agua (H_2O); pero en algunas bacterias fotosintéticas, H_2A es anhídrido sulfúrico (H_2S).

La fotosíntesis con agua es la más importante y conocida; tiene lugar en dos etapas: la primera consiste en una serie de reaccio-

nes que dependen de la luz y son independientes de la temperatura; la segunda etapa consiste en otra serie de reacciones que, por el contrario, dependen de la temperatura y son independientes de la luz. La ecuación completa y ajustada de la fotosíntesis para la glucosa, en la que el agua actúa como donante de electrones y en presencia de luz es:



El láser. Como ejemplo de instrumento óptico que ha tenido un sinnúmero de aplicaciones en ramas muy diversas de la ciencia y la tecnología moderna, consideremos el láser (del inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Lo inventó *Theodore H. Maiman* en mayo de 1960, mientras trabajaba en el Laboratorio de Investigaciones de la *Hughes Aircraft Company* en California (figura 5.4).

Una fuente de luz ordinaria se caracteriza porque la radiación emitida desde cada punto de la fuente oscila en forma independiente de la emitida por los restantes puntos; la radiación es *no coherente*. Los láseres emi-

ten luz de forma *coherente*, logrando que las radiaciones emitidas por todos los puntos de la fuente oscilen al unísono, en fase o de forma acompasada – a veces se compara a los fotones con un grupo de soldados marchando en formación.

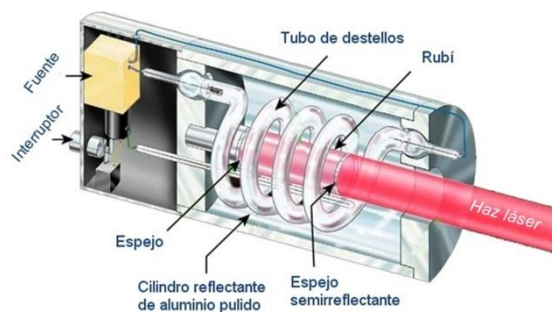


Figura 5.4 Láser de rubí de T.H. Maiman. Tomada de <https://www.socialfuturo.com/tal-dia-como-hoy/el-primer-laser/>.

Esta particularidad hace que la luz láser pueda ser extremadamente intensa, muy direccional, y con una gran pureza de color.

En la figura 5.5 aparece una representación de cómo se origina la coherencia a partir del modelo físico corpuscular que representa la luz como un flujo de fotones de energía $\varepsilon = h\nu$.

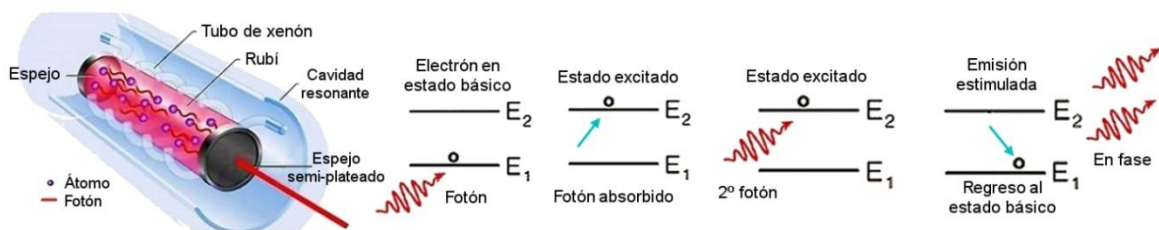


Figura 5.5 Esquema de un láser de rubí y formación del haz de luz coherente.

En un láser, los átomos de determinadas sustancias ‘almacenan’ la luz durante fracciones de segundo y la emiten en forma coherente al ser excitados de nuevo por

otros fotones (emisión estimulada). La excitación se realiza mediante la luz proveniente de tubos de destello de xenón, lámparas de arco o lámparas de vapor metálico, que

barren un amplio intervalo de frecuencias (luz blanca).

El láser de rubí de la figura 5.4 está compuesto de óxido de aluminio con impurezas de cromo; los iones de Cr^{3+} son los responsables de emitir la luz. Los extremos del cilindro de rubí se tallan de forma que las superficies de los extremos sean paralelas, y se recubren con una capa reflectante no metálica para formar espejos. Los fotones que no tienen la dirección adecuada se reflejan en la cavidad resonante (cilindro reflectante) y dan origen a nuevos átomos excitados en el seno del material.

La frecuencia ν de los fotones emitidos depende de los átomos de la sustancia en cuestión y son coherentes; junto a los reflejados en la cavidad resonantes, estos fotones "chocan" a su vez con otros átomos excitados y liberan nuevos fotones. De esta forma la luz se va amplificando a medida que los fotones en la dirección correcta se desplazan en uno u otro sentido entre dos espejos paralelos. Al mismo tiempo, parte de la luz más intensa se "filtra" por uno de los espejos, que es solo reflecta la luz de manera parcial, y puede entonces ser utilizada con fines prácticos. Normalmente el láser funciona por pulsos, generando destellos de luz intensa de muy corta duración.

Existen láseres que trabajan en frecuencias que van desde el infrarrojo hasta los rayos X; según la sustancia que emplean para generar la luz, suelen denominarse de estado sólido, de gas, a semiconductores y líquidos. El láser de las figuras 5.4 y 5.5 es de rubí, y aunque el rubí es una piedra preciosa de origen mineral, es posible obtener rubíes sintéticos a altas temperaturas y regular la

forma y el contenido de impurezas del producto final.

El principal peligro al trabajar con láseres es el daño ocular, ya que el ojo concentra la luz láser igual que cualquier otro tipo de luz. Por eso, el haz del láser no debe nunca incidir sobre los ojos, ni siquiera por reflexión.

Los usos actuales del láser son múltiples. En la industria se emplean como fuente de calor muy localizada, ya que es posible enfocar sobre un punto pequeño un haz láser potente, con lo que se logra una enorme densidad de energía capaz de calentar, fundir o vaporizar materiales de forma precisa. Así, se usan para taladrar diamantes, modelar máquinas herramientas, recortar componentes microelectrónicos, grabar datos en discos compactos CD y DVD, cortar patrones de modas y sintetizar nuevos materiales, entre otras aplicaciones.

El potente y breve pulso producido por un láser también hace posibles fotografías de alta velocidad con un tiempo de exposición de algunas billonésimas de segundo. También se utilizan láseres para medir distancias con gran precisión y alinear las estructuras en la construcción de carreteras y edificios. En la investigación científica se emplean para detectar los movimientos de la corteza terrestre y para efectuar medidas geodésicas; son los detectores más eficaces de ciertos tipos de contaminación atmosférica y también se han empleado para determinar con precisión la distancia variable entre la Tierra y la Luna.

Como la luz del láser es muy direccional y monocromática, resulta fácil detectar cantidades muy pequeñas de luz dispersa, o mo-

dificaciones en su frecuencia al interactuar con las sustancias; midiendo estos cambios, los científicos han conseguido estudiar las estructuras internas de las moléculas. Los láseres han hecho que se pueda determinar la velocidad de la luz con una precisión sin precedentes; también permiten inducir reacciones químicas de forma selectiva y detectar la existencia de trazas de impurezas en una muestra. La luz de un láser puede viajar largas distancias por el espacio exterior con una pequeña reducción de la intensidad de la señal. A causa de su alta frecuencia, la luz láser puede transportar, por ejemplo, 1000 veces más canales de televisión de lo que transportan las microondas, por lo que el láser resulta ideal para las comunicaciones espaciales.

Se han desarrollado fibras ópticas de baja pérdida que transmiten luz láser para la comunicación terrestre en sistemas telefónicos y redes de computadoras. Se han empleado técnicas láser para registrar información con una densidad muy alta; por ejemplo, la luz láser simplifica el registro de un holograma, sistema que permite grabar y reconstruir imágenes tridimensionales. Los sistemas de guiado por láser para misiles, aviones y satélites son hoy imprescindibles en la tecnología militar.

En adición, el láser también tiene amplia aplicación en la medicina. Utilizando haces intensos y estrechos es posible cortar y cauterizar ciertos tejidos en una fracción de segundo sin dañar al tejido sano circundante. Se ha empleado el láser para “soldar” la retina, perforar el cráneo, reparar lesiones y cauterizar vasos sanguíneos.

A partir de la última década del siglo pasa-

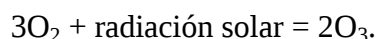
do se comenzó a utilizar el láser para inducir altas temperaturas en el hidrógeno, con el fin de iniciar una *reacción nuclear* de fusión autosostenida, similar a la que existe en el sol y otras estrellas. Ese tipo de reacción podría generar energía limpia y barata a partir del hidrógeno, cuya fuente es ilimitada en nuestro planeta a partir del agua de mar. Sin embargo, la reacción nuclear autosostenida presenta grandes inconvenientes, ya que ha resultado muy difícil lograr mantener confinada la reacción una vez que se inicia. Por otra parte, han surgido variantes mucho más simples: los reactores de aniquilación, donde el láser actúa de manera continua como activador de la reacción nuclear, sin pretender alcanzar la reacción autosostenida, en principio pueden generar energía más que suficiente como para hacer el proceso rentable (ver Holmid L. en las referencias).

Radiación ultravioleta

La radiación UV es la radiación electromagnética cuyas longitudes de onda λ se encuentran entre el límite de la luz violeta (380 nm) y el extremo de la región de los rayos X (15 nm). Este tipo de radiación se puede producir de forma artificial mediante lámparas de arco; la principal de origen natural proviene del Sol. Puede ser dañina para los seres vivos, sobre todo cuando su longitud de onda es pequeña. La de λ inferior a 300 nm se emplea para esterilizar, porque mata bacterias y virus. Si es intensa, esa misma radiación puede producir quemaduras en los seres humanos. Una exposición prolongada durante años a este tipo de radiación, aunque sea de baja intensidad, puede provocar fotodegradación (la piel se reseca y arruga) o cáncer en la piel.

La atmósfera terrestre protege a los organismos vivos de la radiación UV del Sol. Si toda la radiación UV proveniente del Sol llegara a la superficie terrestre, acabaría con la mayor parte de la vida en el planeta. Por fortuna la *capa de ozono*, que se encuentra en una región de unos 20-30 km de altura a concentraciones de 2-8 partes por millón, absorbe casi toda la radiación UV de λ pequeña y gran parte de la correspondiente a las longitudes de onda mayores.

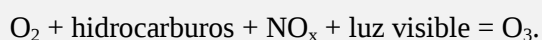
El ozono (O_3) es un gas compuesto por tres átomos de oxígeno y se forma por la acción de la luz solar UV de alta energía (200-240 nm) sobre el oxígeno molecular (O_2), en un proceso que se puede representar como:



Por otra parte, la radiación UV menos energética, de mayor λ (hasta los 280 nm) es capaz de disgregar las moléculas de ozono convirtiéndolo en el oxígeno original. Esta radiación, también perjudicial a las personas, es asimismo absorbida durante este proceso. Se crea así un equilibrio beneficioso para las personas, donde se crea y destruye ozono de manera continua, a la vez que se absorbe la radiación UV perjudicial antes que llegue a tierra. La radiación UV no siempre tiene efectos dañinos; también puede ser benéfica, pues gran parte de la vitamina D que las personas y los animales necesitan para mantenerse sanos se produce cuando la piel es irradiada por la componente solar de esa radiación.

Aunque éste no es estrictamente un tema de electromagnetismo, vale la pena hacer notar lo erróneo que resulta extrapolar el efecto benéfico del ozono *estratosférico* con el

efecto del ozono ambiental en las capas bajas de la atmósfera, donde se comporta como un contaminante peligroso y muy activo para las personas y la vegetación. Este ozono *troposférico* se forma, en lo esencial, por la acción de la luz solar sobre la mezcla del oxígeno del aire con hidrocarburos y óxidos de nitrógeno provenientes de la quema de combustibles. El proceso químico que tiene lugar se puede representar como



Incluso en cantidades muy pequeñas puede irritar las vías respiratorias y causar tos, ardencia, resuello y falta de aire, además de agravar el asma y otras dolencias pulmonares. La exposición continuada a concentraciones tan pequeñas como 100 ppb (partes por billón) es capaz de dañar los tejidos del sistema respiratorio y los tejidos vegetales.

El problema de la contaminación ambiental con el ozono y otros contaminantes es objeto de gran atención en muchos países. La Ciudad de México, por ejemplo, posee una red automática de estaciones de monitoreo que recoge el nivel de contaminación de gases y micropartículas y emite información actualizada sobre la situación atmosférica (ver <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>). En 2008, España contaba con 380 estaciones para vigilar la calidad del aire (https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/Ozono_tcm30-188049.pdf). En relación a las posibles aplicaciones terapéuticas del ozono – aplicadas de forma indiscriminada en algunos lugares – el título 21 del Código de Regulaciones Federales de EE.UU., actualizado en 2023, establece lo siguiente:

“El ozono es un gas tóxico sin aplicaciones médicas conocidas en terapias específicas,

complementarias o preventivas. Para que el ozono sea efectivo como germicida, debe estar presente en una concentración mucho mayor que la tolerada con seguridad por personas o animales”.

Más adelante, prosigue:

“Aunque se han reportado efectos fisiológicos indeseables en el sistema nervioso central, el corazón y la visión, el efecto fisiológico predominante es la irritación primaria de las membranas mucosas. La inhalación del ozono puede causar suficiente irritación en los pulmones como para ocasionar edema pulmonar. El inicio del edema pulmonar usualmente se retrasa varias horas tras la exposición; así, una respuesta sintomática no es una alerta confiable de la exposición a una concentración tóxica de ozono. Como la fatiga olfatoria aparece de inmediato, el olor del ozono no es un índice confiable de la concentración de ozono en la atmósfera”.

El documento establece los valores límites permisibles en diversos lugares, y considera fraudulento (*misbranded*) cualquier generador de ozono producido con otros fines que se utilice para liberar ozono en hospitales u otros lugares habitados por enfermos (<https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/cfrsearch.cfm?fr=801.415>).

Rayos X

Los rayos X son radiaciones electromagnéticas de frecuencia superior al ultravioleta; fueron descubiertos por Wilhelm Conrad Roentgen a finales del siglo XIX.

En noviembre de 1895, en su laboratorio de la universidad de Würzburg, Alemania, Roentgen estudiaba los efectos de pasar una

corriente eléctrica por un gas a baja presión contenido en un bulbo de vidrio. Le llamó la atención que durante el experimento se volvieran luminosas algunas sales fluorescentes que se hallaban cubiertas en su mesa de trabajo. Intrigado, y después de realizar varios ensayos, llegó a la conclusión de que había encontrado un nuevo tipo de radiación invisible, capaz de atravesar los cuerpos. La llamó rayos X, pues es común usar la X como incógnita en las matemáticas. Al colocar la mano de su esposa junto a una placa fotográfica y exponerla a la radiación desconocida, obtuvo la primera radiografía de la historia.

La longitud de onda λ de esta radiación comprende el intervalo de 10 nm hasta 0,001 nm; mientras menor es la longitud de onda, mayor es la frecuencia y mayores son su energía y poder de penetración (recordar $v = v/\lambda$ y $\epsilon = hv$).

Los rayos de mayor λ , cercanos al ultravioleta, se conocen como rayos X *blandos*. Los de λ menor, próximos a la zona de rayos gamma o que incluso se solapan con esta, se denominan rayos X *duros*. Los rayos X formados por una mezcla de muchas λ diferentes se conocen como rayos X *blancos*, para diferenciarlos de los rayos X *monocromáticos*, que tienen una sola λ (o un intervalo muy pequeño alrededor de ella). Muchos objetos son más o menos transparentes a los rayos X. Su absorción por una sustancia determinada depende de su densidad y de su *masa atómica* – masa de un átomo de la sustancia en cuestión. Mientras menor sea la masa atómica de un determinado material, más transparente será a la radiación.

Los rayos X afectan a una emulsión fotográfica del mismo modo que lo hace la luz visible. Cuando se irradia el cuerpo humano, los huesos, compuestos de elementos con mayor masa atómica que los tejidos circundantes, absorben la radiación en ma-

yor proporción que los tejidos, por lo que producen sombras más oscuras en una fotografía. La placa usada en medicina es un negativo fotográfico, por eso los huesos se ven blancos y los tejidos oscuros.

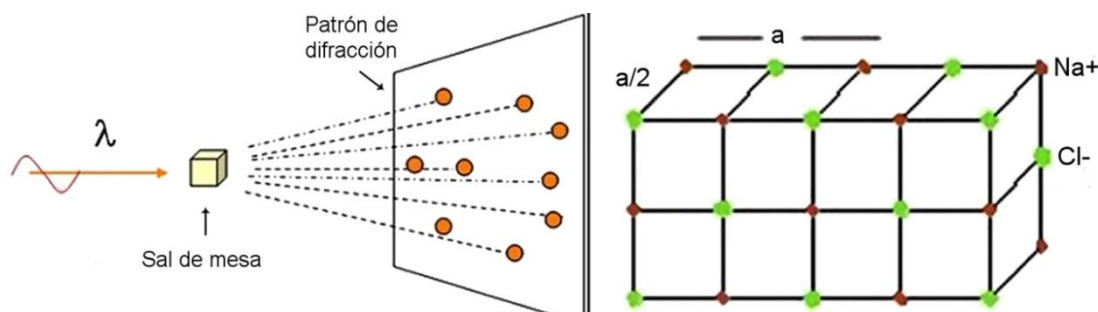


Figura 5.6 Difracción de los rayos X en un cristal de sal común (NaCl) y estructura cristalina microscópica de la sal.

Los rayos X se emplean como rutina en la investigación científica en disciplinas como la física, química, mineralogía, metalurgia y biología. En 1912, el alemán *Max von Laue* encontró que al hacer incidir un haz de radiación de radiación no monocromática sobre un cristal de sal común (NaCl) aparecía un patrón de difracción característico, que podía ser recogido en una placa fotográfica (figura 5.6). Este experimento permitió verificar dos cosas muy importantes, desconocidas hasta el momento:

- La naturaleza ondulatoria de los rayos X, que habían sido descubiertos por Roentgen en 1895 sin que se lograra determinar de qué estaban compuestos.
- La estructura periódica de los cristales a nivel microscópico, lo que hoy día se conoce como *estructura cristalina* de las sustancias sólidas.

La técnica más común, aunque no la única,

es utilizar la propiedad de difracción para analizar la estructura interna de las sustancias. A partir del análisis del haz difractado se pueden determinar las posiciones de los átomos o las moléculas en la red cristalina de la sustancia en cuestión (determinación de estructuras). Los rayos X también se usan mucho en la industria, como herramienta de investigación y para realizar numerosos procesos de prueba y ensayos no destructivos, como es el examinar las posibles imperfecciones mecánicas de una pieza metálica sin dañarla.

Los rayos X en la medicina. El uso de esta radiación en la medicina contemporánea es insustituible. Las radiografías o fotografías de rayos X se usan a diario en todo el mundo como herramientas de diagnóstico. Una técnica que surgió después, gracias a la aparición de las computadoras, es la *tomografía axial computarizada* (TAC), que proporciona una visión clara de cualquier parte

de la anatomía, incluyendo los tejidos blandos. A costa de una exposición mayor a la radiación, la tomografía permite ver una sección o corte completo del cuerpo del paciente, con claridad unas 100 veces mayor que la de una placa tradicional.

El tomógrafo es un instrumento mucho más complejo y costoso que un equipo convencional de rayos X. Los primeros TAC comerciales aparecieron alrededor de 1970 y solo servían para estudiar el cráneo; hoy día se usan para estudiar todo el cuerpo. En lugar de obtener una sola imagen, el tomógrafo registra un conjunto de ellas de la siguiente forma. La fuente de rayos X y el detector se colocan en un gran anillo, de manera que ambos rotan alrededor del sujeto, que descansa en una camilla en el centro del anillo. Deslizándose la camilla a diferentes posiciones a través del anillo es posible construir imágenes digitales tridimensionales empleando un software adecuado. Los tomógrafos de última generación poseen entre 4 y 128 anillos y permiten obtener en una pantalla imágenes tridimensionales en tiempo real con gran precisión (figura 5.7).

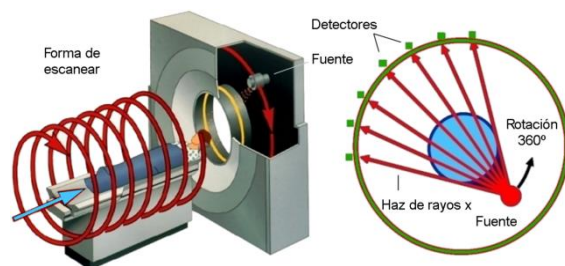


Figura 5.7 Principio de operación de un tomógrafo. La camilla se desliza mientras la fuente de rayos x y los detectores giran a su alrededor, creando una espiral.

Por otra parte, la antigua técnica fotográfica para obtener negativos dio paso a técnicas

más recientes; el registro de imágenes estáticas utilizando la computación. Ejemplos son la radiografía computarizada y la radiografía digital.

La radiografía computarizada (RC). Este fue uno de los primeros intentos de sustituir la placa fotográfica mediante el uso de la computación; se comenzó a utilizar en 1980. La RC es muy similar a la radiografía convencional, pero en vez de placa fotográfica utiliza una *placa soporte de imagen* reutilizable que contiene compuestos fosforados. Estos compuestos se excitan al ser iluminados por los rayos X, formando una imagen latente que puede durar varias horas. Durante el revelado se aplica un escáner láser a la placa, los átomos excitados regresan a su estado básico y en el proceso emiten luz, que es detectada por un sensor que convierte el impulso luminoso en una señal eléctrica. La señal se digitaliza y se envía a un procesador de señales asociado a una computadora, donde después se almacena en un disco duro o se proyecta en un monitor.

Si se manipulan con cuidado, las placas SI se pueden reutilizar miles de veces (al menos en teoría), pero en las condiciones reales es común que se dañen tras ser usadas varios cientos de veces. No obstante, presentaban algunas ventajas sobre la radiografía convencional; eliminaban el gasto de película fotográfica, usaban menos radiación para producir imágenes de buen contraste y no utilizaban productos químicos para el revelado (i.e. eran mucho más ecológicas). Su principal desventaja era su alto costo.

La radiografía digital (RD) es el resultado

de la rápida evolución de la microelectrónica aplicada al campo de los rayos x. Es la técnica más utilizada en la actualidad, y difiere de la anterior RC en que proporciona imágenes de forma casi instantánea, sin necesidad de láser o algún otro procesamiento adicional; además, permite obtener imágenes en movimiento en tiempo real. Una ventaja adicional es que la placa utilizada para obtener la imagen – de unos pocos mm de espesor – no se deteriora con el uso. Su funcionamiento es similar al de las cámaras fotográficas de los teléfonos digitales, aunque las características del detector de rayos x que utiliza son muy diferentes.

Aunque existen varios tipos de placas digitales, las de última generación emplean fotoconductores de selenio amorfo; estos liberan electrones de carga negativa y ‘huecos’ positivos al ser impactados por los rayos X. Se crean así impulsos eléctricos que excitan un arreglo de capacitores de tecnología TFT (*Thin Film Transistor*), lográndose imágenes con mayor nitidez que en los métodos anteriores (figuras.5.8 y 5.9).

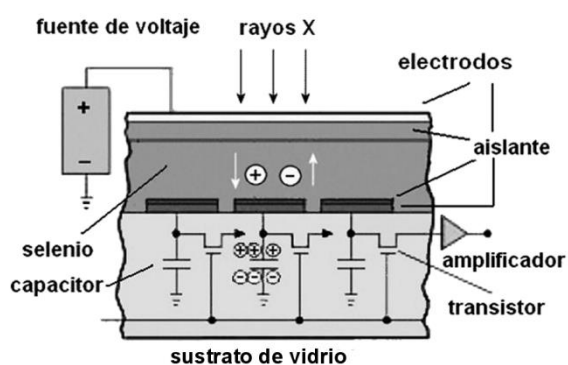


Figura 5.8 Esquema del corte transversal de una “placa” de radiografía digital moderna. El espesor es solo de unos pocos milímetros. Tomado de Orbe Año X, No. 46, Abril 18 2009.



Figura 5.9 Radiografía digital. A. Imagen obtenida en la pantalla de un monitor; B. Placas digitales de rayos X para radiografía dental.

Las imágenes se pueden ampliar y almacenar en diferentes soportes digitales como los discos duros o las memorias USB. Mediante técnicas informáticas las “fotos” se pueden filtrar y mejorar su contraste. Además, se pueden distribuir en una red local de computadoras e incluso integrarse a redes nacionales digitalizadas vía internet, junto a la historia clínica del paciente, lo que puede ser vital en casos de urgencia.

Rayos gamma

La radiación gamma (rayos γ) es radiación electromagnética de similar naturaleza que los rayos X, pero con mayor energía. Se origina en las desintegraciones radiactivas, en las reacciones nucleares y en otros procesos subatómicos, junto con otros tipos de radiación no electromagnética: la alfa (α), formada por núcleos de helio de carga positiva, y la beta (β), integrada por electrones de carga negativa. Al igual que los rayos X, la radiación γ tiene la capacidad de ionizar la sustancia, formando iones al “arrancarle” electrones a los átomos cuando hay interacción.

Las radiaciones α , β y γ se emiten a veloci-

dades enormes. Al atravesar la sustancia las partículas α son frenadas con gran rapidez; poseen gran poder de ionización y una hoja de papel basta para detener la mayor parte de la radiación. Las partículas β se emiten a velocidades mucho mayores; su poder de ionización es algo menor, por lo que penetran más en las sustancias. La distancia recorrida por los rayos γ es aún mayor que la recorrida por las partículas β . Esta radiación es capaz de atravesar varios centímetros de plomo.

Cuando las partículas α y β atraviesan la sustancia crean numerosos iones; sin embargo, como los rayos γ no tienen carga, aunque tienen mayor penetración no causan tanta ionización. Las partículas β producen entre 1/100 y 1/200 de la ionización generada por las partículas α en cada centímetro de su trayectoria en aire. Los rayos γ producen alrededor de 1/100 de la ionización de las partículas β . Cuando la radiación nuclear es absorbida por el cuerpo humano en grandes cantidades como, por ejemplo, a consecuencia de un accidente nuclear, puede ocasionar graves daños e incluso la muerte del sujeto.

La *radioterapia* consiste en la exposición de una región localizada del organismo a una fuente de radiación ionizante; se suele utilizar para el tratamiento del cáncer. Puede provenir de una fuente de radiación γ tal como un isótopo radiactivo, o de una fuente de radiación electromagnética como los rayos X. Es usual utilizar los rayos X para lesiones superficiales, mientras que los rayos γ se aplican en lesiones más profundas.

Otros tratamientos incluyen radiaciones con protones y electrones. El tratamiento de radioterapia incluye la localización precisa del tumor y el empleo de dosis periódicas de radiación. El objetivo es dañar el núcleo de las células enfermas para así evitar su posterior división.

En las células sanas, las radiaciones ionizantes pueden producir efectos agudos o crónicos sobre la salud, en dependencia de la dosis recibida. Las dosis altas de radiación ionizante producen enfermedades agudas por un lado, y efectos retardados como el cáncer, por otro. Los trabajadores que por su ocupación se exponen a radiación de rayos X o material radiactivo constituyen la población de riesgo. La unidad de dosis absorbida en el Sistema Internacional de Unidades es el gray (Gy) y es igual a un joule por kilogramo (J/kg); un rad equivale a 0.01 Gy.

La exposición de todo el cuerpo a dosis superiores a 1 Gy en un corto período (minutos u horas) ocasiona una reducción significativa del número de células sanguíneas al afectar la médula ósea, lo que conduce a un aumento de la susceptibilidad a las infecciones, a la aparición de hemorragias y a la anemia.

El empleo y manipulación de materiales radiactivos está sujeto a controles rigurosos, por lo que la exposición accidental de las personas a radiaciones intensas está muy restringida. En todos los países existen legislaciones y normativas para la protección de los trabajadores y el público que regulan la exposición a radiaciones de todo tipo.

CAPÍTULO 6. OTRAS APLICACIONES DEL MAGNETISMO

Diagnóstico médico

Magnetoencefalograma. En su estado normal, el cuerpo humano genera pequeñas corrientes eléctricas que 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. Esos campos se estudian sólo con fines de diagnóstico, no con fines terapéuticos.

Se alerta al lector de que el término biocampo también se suele emplear en medios no científicos como sinónimo de cierta “aura” invisible, de origen indefinido o esotérico, que supuestamente rodea a las personas y que algunos alegan ver o “sentir” para así diagnosticar enfermedades. También se usa el término para tratar de justificar tratamientos magnéticos ilusorios, con imanes o con radiaciones de baja frecuencia. Esta es una manera de actuar típica de la pseudociencia: utilizar palabras científicas conocidas alterando su significado para lograr promover lo que en realidad carece de fundamento científico. A causa de su carácter controvertido, estos “tratamientos magnéticos” se analizan por separado en el capítulo siguiente.

Cuando las corrientes son variables o pulsantes, los biocampos generados aparecen en forma de radiación electromagnética que se propaga en todas direcciones (capítulo 4). Las funciones cerebrales y cardíacas generan impulsos de suficiente intensidad como para ser detectados; la componente eléctrica se puede medir con electrodos co-

locados 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.

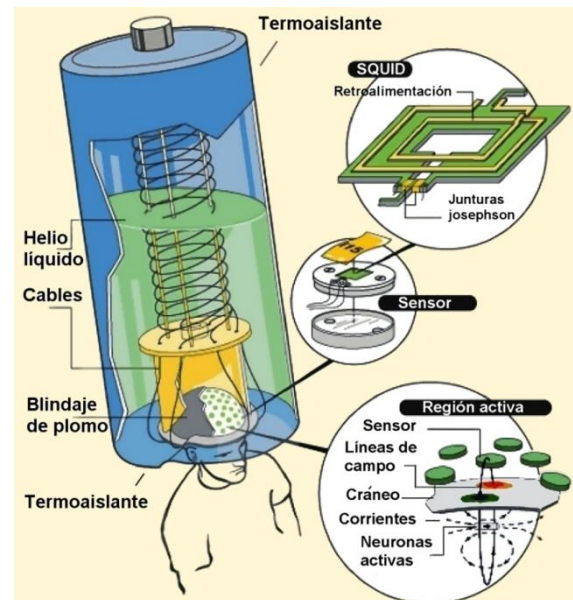


Figura 6.1 Biomagnetismo médico. Medición de la componente magnética de las ondas electromagnéticas generadas por el cerebro.

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). El SQUID es capaz de detectar y medir cuantitativamente las componentes magnéticas de intensidad 100 millones de veces menor que el campo magnético terrestre, pero sólo se puede encontrar en lugares muy específicos, con capacidad de proveer la alta tecnología que necesita para su desempeño. No es un equipo que se pue-

da 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. 6.1).

En la actualidad el SQUID se utiliza 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). De manera similar a los electroencefalógrafos de última generación, basta con ubicar los sensores a corta distancia de la piel, en una posición fija. Su principal desventaja, además de la necesidad de trabajar a muy bajas temperaturas, es que la señal que se va a medir es varios órdenes menor que los “ruidos magnéticos” ambientales (ver tabla 6.1). Esos ruidos son generados por las lámparas de luz fría, los equipos electrónicos y las líneas de transmisión, por lo que para que esta técnica pueda funcionar es obligatorio aplicarla en un recinto aislado de influencias magnéticas.

Como las radiaciones electromagnéticas atraviesan con facilidad 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 aislada, construida con aceros especiales capaces de desviar y reflejar las ondas electromagnéticas.

Modelos más recientes como el de la figura 6.1, desarrollado en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en Nuevo México, emplean un casco detector que se asemeja a los secadores de pelo 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 6.2).

TABLA 6.1		
VALORES DE LA INDUCCIÓN MAGNÉTICA GENERADA POR DIVERSAS FUENTES		
B (TESLA)	ORIGEN DEL CAMPO	FRECUENCIA (Hz)
7×10^{-5}	Campo magnético de la tierra.	0
10^{-7}	Fluctuaciones del campo magnético de la tierra y "ruido magnético" urbano.	Todo el intervalo
10^{-9}	Partículas magnéticas pulmonares.	0,1 - 10
7×10^{-11}	Magnetocardiograma	0,1 - 100
10^{-12}	Magnetocardiograma fetal.	0,1 - 100
10^{-12}	Magnetoencefalograma (ondas α).	8-12
10^{-13}	Magnetoretinograma.	0.1 -800
10^{-15}	Límite de sensibilidad del SQUID.	Todo el intervalo

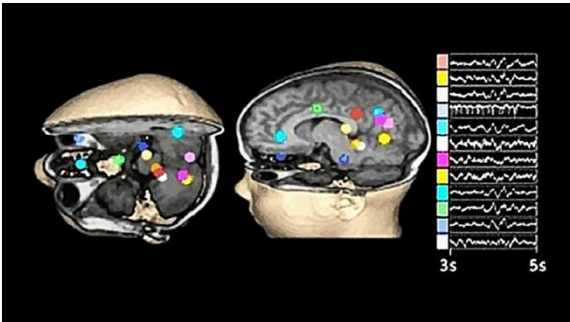


Figura 6.2 Figura 06-02. Mediante técnicas de computación se puede mapear la actividad eléctrica del cerebro en función del tiempo. Los mapas se utilizan para diagnosticar epilepsia, apoplejía, desórdenes mentales o para estudiar las funciones cerebrales.

Los equipos más recientes alcanzan una resolución de ¼ 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 proveniente del exterior.

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.

Imágenes por resonancia magnética (IRM).

La IRM es una técnica de diagnóstico descrita a principios de 1980 basada en la resonancia magnética nuclear descrita en el capítulo 4. Como los tejidos tienen diferente grosor y contenido de agua, con protones capaces de resonar con las radiofrecuencias adecuadas, al realizar un barrido con los instrumentos apropiados, se puede obtener una imagen del interior del cuerpo. Este es un proceso diferente por completo a la Tomografía Axial Computarizada de rayos x, descrita con anterioridad, aunque similar en el tratamiento tomográfico por computadora de los datos obtenidos.

Los equipos de IRM son mucho más complejos que el esquema de la RMN mostrado

en el capítulo 4. Poseen un imán de grandes dimensiones que genera campos magnéticos muy intensos, miles de veces superiores a los de un imán permanente convencional (figura 6.3).

La parte del cuerpo que se va a analizar (a veces todo el cuerpo) se introduce en el campo magnético, y un sistema de emisión y detección de radiofrecuencias registra la absorción de la radiación de microondas en diferentes puntos. Los datos se pasan a una computadora, que es capaz de dar una imagen de la región analizada en la pantalla de un monitor.

La resonancia magnética es considerada por muchos como la modalidad de diagnóstico por imágenes más versátil, sensible y eficaz de que se dispone en la actualidad. Su importancia médica se puede resumir señalando su capacidad de analizar finas secciones de modo no invasivo, proporcionando imágenes funcionales de cualquier parte del organismo, en un tiempo corto – instantáneo, en los equipos de última generación – y desde cualquier ángulo y dirección. Las técnicas más recientes permiten componer imágenes tridimensionales en tiempo real.

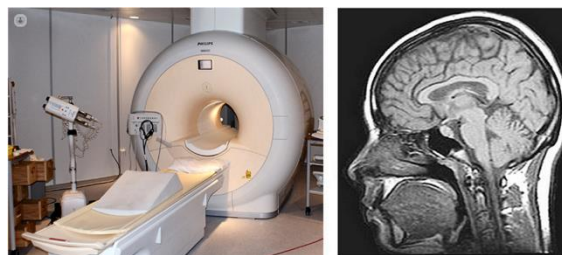


Figura 6.3 Equipo comercial de formación de imágenes por resonancia magnética. La persona se coloca en el centro de un campo magnético de gran valor al fondo de la foto, generado por corrientes muy intensas que circulan por superconductores.

Las imágenes de resonancia magnética dan la posibilidad de detectar y rastrear componentes bioquímicos en cualquier corte anatómico del cuerpo humano, lo que produce una información biomédica y anatómica de gran potencial para el conocimiento fundamental y el diagnóstico precoz de múltiples enfermedades.

La principal desventaja que presenta la IRM al compararla con la Tomografía Axial Computarizada (TAC), que también es capaz de obtener imágenes de cualquier parte del organismo, es que resulta mucho más cara. Para generar los intensos campos magnéticos que se necesitan es necesario utilizar grandes imanes superconductores. Estos imanes deben ser enfriados a muy bajas temperaturas con técnicas complejas, lo que encarece mucho el proceso de obtención de imágenes. Sin embargo, la IRM tiene una ventaja que la TAC no posee; no es agresiva para el paciente. Puede ser empleada durante el tiempo o las veces que se requiera sin dificultades, mientras que al utilizar la TAC se somete al paciente a niveles de radiación importantes en cada tomografía.

Levitación magnética

La necesidad de transportar con más rapidez y eficiencia, tanto a las personas como a cualquier tipo de carga, aumenta día a día. Desde hace algunos años en diversos países han aparecido prototipos de un nuevo método de transportación que utiliza trenes con rieles o vías electromagnéticas (figura 6.4). El método se denomina de levitación magnética o maglev (del inglés *magnetic levitation*).

El término maglev se utiliza hoy día como

un término genérico para indicar cualquier tipo de transporte que base su movimiento en el uso del electromagnetismo para “flotar” o levitar sobre un carril guía, o monorraíl, e impulsar el vehículo. El funcionamiento del maglev está fundamentado en la generación de campos magnéticos alternos que, a la vez que sostienen el tren, lo impulsan hacia adelante. Se emplean electroimanes de bobinas superconductoras, que casi no consumen energía. Un Maglev típico cuenta con 16 imanes superconductores de alta energía magnética, que operan de forma independiente. Así se garantiza un desempeño seguro aun cuando ocurran fallas simultáneas en varios de ellos.

Hay dos tipos básicos de maglev: el de suspensión electromagnética (SEM) y el de suspensión electrodinámica (SED). El sistema SEM ha resultado ser bastante inestable; la distancia entre los electroimanes y los raíles, de unos 10 mm, debe ser controlada y ajustada de forma continua por computadora para evitar que el tren golpee el monorraíl.



Figura 6.4 Tren de levitación magnética en Shanghai.

El maglev de suspensión electrodinámica SED utiliza la ley de Faraday-Lenz para

ubicar el tren en el centro del monorraíl y evitar los choques. Las bobinas de levitación de alta potencia están instaladas fuera del tren, en las prolongaciones que interactúan con las bobinas del monorraíl (figura 6.5). Cuando los electroimanes del tren pasan a gran velocidad a varios centímetros de las bobinas del monorraíl, se induce una corriente eléctrica que las convierte en imanes de forma instantánea, y surgen fuerzas magnéticas que tiran del vehículo hacia arriba, causando la levitación.

Si el vehículo se desplaza hacia un lado y trata de chocar contra el raíl, se inducen corrientes adicionales que originan fuerzas de repulsión sobre el lado más cercano del tren, y fuerzas de atracción sobre el más alejado. De esa forma el tren siempre está ubicado en el centro del raíl, sin posibilidad de choques.

Las bobinas de levitación no son independientes, están interconectadas a todo lo largo de la vía. El empuje hacia delante se logra mediante su energización adicional por corrientes alternas, generadas en subestaciones distribuidas en todo el trayecto. Las corrientes crean un campo magnético variable de tal forma que los electroimanes del vehículo son atraídos y repelidos alternadamente cuando se encuentran en la posición adecuada para el avance. Así, el vehículo se mueve siempre en el mismo sentido, de forma similar a como un ventilador alimentado por corriente alterna gira siempre hacia un solo lado.

En todos los sistemas mecánicos de transportación, la fricción causada por el roce de una superficie contra otra siempre está presente. El rozamiento causa pérdidas de

energía, genera calor y ocasiona el desgaste mecánico de las diferentes partes del sistema.

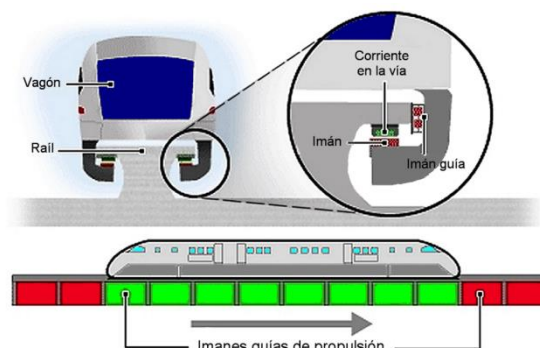


Figura 6.5 Sistema magnético de suspensión (monorraíl). Los electroimanes de la vía actúan como suspensión y como propulsión a la vez.

Mientras menor sea la fricción entre las superficies, menos fuerza se requiere para mover el vehículo y más eficiente será el sistema de transportación utilizado. La reducción del rozamiento en el maglev permite eliminar el ruido, establecer una marcha más estable, reducir los costos de mantenimiento y sobre todo, alcanzar velocidades del orden de los 350 km/h. El hecho de que los trenes maglev no toquen los carriles tiene además otras ventajas: la aceleración y el frenado son más rápidos, hay mayor capacidad de subida en las cuestas y un mejor funcionamiento en situaciones de lluvia intensa, nieve y hielo. La eficiencia de estos vehículos es tal que, en proporción, solo emplean de la mitad a la cuarta parte del combustible que gasta un avión o un automóvil en recorrer el mismo tramo.

En principio, el maglev parece ser más seguro que los trenes convencionales. A causa del diseño de las vías no puede haber descarrilamientos ni choques frontales. No necesita cargar combustible a bordo, y al fun-

cionar levitando sobre la vía disminuye la posibilidad de accidentes por desgastes. Sin embargo, es necesario proteger a los viajeros de los intensos campos electromagnéticos que se producen en el exterior mediante un blindaje magnético. El blindaje se logra utilizando en las paredes, suelo y techo del tren, algún material ferromagnético que concentre y desvíe las líneas de inducción magnética en su interior.

En 2008 la BBC News aseguraba que la ciudad de Shanghai era en ese momento la única con un servicio comercial maglev en el mundo. Desde el primero de enero de 2004 el tren ha transportado viajeros entre el aeropuerto y el distrito financiero a 30 km de distancia, alcanzando velocidades de 350 km/h. Con anterioridad, desde 1984 hasta 1995, un maglev se utilizó en el aeropuerto internacional de Birmingham, Reino Unido, para trasladar pasajeros hasta la estación de trenes, distante unos 600 m, pero al final fue sustituido por un sistema convencional a causa de su baja confiabilidad.

A pesar de lo promisorio que aparenta ser esta tecnología, en la actualidad (2023) solo hay seis maglev operacionales en el mundo, todos asiáticos: tres en China, dos en Corea del Sur y uno en Japón.

El tratamiento magnético del agua

Es conocido, desde hace muchos, que tratar el agua mediante campos magnéticos afecta la deposición de incrustaciones en calderas y tuberías. Sin embargo, a veces el procedimiento se critica como pseudociencia, quizás porque junto a los reportes sobre efectos reales, demostrados en experimentos rigurosos, también suelen aparecer falsos reportes sobre supuestos efectos no de-

mostrados, y se echa en el mismo saco lo real junto a lo ficticio.

Algunos de estos supuestos efectos no demostrados son el reforzamiento de la resistencia del hormigón hasta en 50 %, el incremento de la eficiencia de separación por flotación de minerales en procesos industriales, una mejor eficiencia de los detergentes en el lavado de la ropa y gran cantidad de diversas aplicaciones médicas. También aparecen de forma esporádica artículos científicos promisorios sobre una u otra aplicación, pero que nunca llegan a concretarse. Por ejemplo, en 2007, se publicó un artículo (*Environmental and Experimental Botany*, Vol. 59, Issue 1, p. 68-75) reportando el efecto de los campos magnéticos en la germinación y desarrollo de las etapas tempranas del maíz, donde se obtuvieron efectos detectables en la germinación.

Los autores encontraron que un porcentaje con significación estadística de las semillas tratadas germinó antes que las de los grupos de control, y las plantas alcanzaron un mayor desarrollo en las primeras etapas de crecimiento. A los 10 días de la germinación se obtuvo un mayor incremento de tamaño y peso, resultados que coinciden con los de otros investigadores (se citan 10 referencias). Sin embargo, esos resultados no garantizan de manera alguna un posterior incremento de las cosechas. El crecimiento acelerado incluso pudiera ser dañino en vez de benéfico, ocasionando lo que se suele llamar *crecer de vicio* y aportando, a la larga, menos frutos. El artículo tampoco propone un mecanismo que explique los efectos observados.

Los anuncios comerciales poco escrupulosos contribuyen en gran medida a divulgar fantasías de todo tipo. Para ilustrar un magnetizador comercial se muestra un esquema donde partículas negativas (cualesquiera que estas sean) se vuelven positivas tras el tratamiento magnético. Además, las moléculas de agua se “ordenan” como si fueran los momentos magnéticos de un sólido ferromagnético saturado, lo que resulta en un absurdo por partida doble (<http://www.magnetizer.net/spa/spa.htm>, visto en agosto 7, 2008). Recordar que el agua es diamagnética y, por tanto, es repelida débilmente por el campo magnético. No es posible magnetizarla como si fuera un pedazo de hierro.

El mencionado sitio web afirma que el tratamiento proporciona los siguientes beneficios (ninguno de ellos demostrado): reducción de la irritación de los ojos y la piel en piscinas, acción desodorizante, reducción de los costos de los tratamientos con cloro u otros agentes químicos, reducción de la tensión superficial, estabilización del pH, eliminación más efectiva de las lociones y aceites untados en la piel y una sensación más “sedosa” del agua. Se cita, como último punto, el único comprobado en la práctica, la reducción de las costras e incrustaciones.

Otros alegan que el tratamiento magnético proporciona al agua propiedades curativas o antisépticas, lo que también carece de fundamento.

La supuesta mejora en la eficiencia de los combustibles sometidos a tratamiento magnético merece un comentario aparte, pues este argumento resurge una y otra vez cada

cierto tiempo y, aunque existen muchas patentes sobre el tema, la demostración de la efectividad del procedimiento nunca aparece. Una búsqueda efectuada en agosto de 2008 en el sitio web especializado www.sciencedirect.com, dio por resultado 40 artículos publicados de 1974 a la fecha que se relacionan de alguna manera con el tratamiento magnético del agua. No surgió ninguno respecto al tratamiento magnético de combustibles. En el sitio <http://www.csicop.org/si/9801/powell.html> se reporta una búsqueda anterior con similares resultados.

En todo caso, sólo aparecen resultados anecdóticos. En un artículo publicado en 2008 en la revista *Applied Thermal Engineering* (Vol. 28, Issue 13, pp. 1694-1697) se lee que durante la Segunda Guerra Mundial la fuerza aérea de Estados Unidos ensayó la colocación de imanes junto a los conductos de combustible en los motores de los cazas *P51 Mustang* para mejorar su desempeño. Sin embargo, al buscar la fuente original citada por el autor, lo que aparece es la página WEB particular de la familia Shelley, donde se pueden encontrar opiniones y reportes sin referencias sobre casi cualquier cosa

(<http://www.shelleys.demon.co.uk/magnets.htm>). Tras una búsqueda bastante exhaustiva, este autor no pudo encontrar el reporte de un solo experimento en banco de pruebas, método convencional para estudiar la eficiencia de un motor de combustión interna. En estos bancos, muy familiares a los ingenieros, se controlan los diversos reglajes del motor, su régimen de trabajo a distintas potencias y otras variables de interés, amén del consumo de combustible. Los en-

tusiastas de aplicar el tratamiento magnético a combustibles nunca reportan esos estudios, proponiendo en su lugar resultados donde intervienen de manera esencial factores subjetivos, como son la pericia (y la honradez) de un operador o chofer específico.

Dispositivos para el tratamiento magnético.

La primera patente reivindicando el efecto del tratamiento magnético del agua sobre las costras data de 1946. Después aparecieron muchas otras, así como una gran cantidad de reportes de todo tipo, junto a artículos en revistas y dispositivos comerciales. El esquema de un montaje convencional de laboratorio para aplicar tratamientos magnéticos y su posterior estudio aparece en la figura 6.6.

El agua se hace pasar por una tubería a determinada velocidad a la vez que se aplica un campo magnético externo. Es usual estudiar la dependencia del efecto en función de la velocidad del líquido y la intensidad del campo aplicado, además de la influencia de otros posibles parámetros como la temperatura.

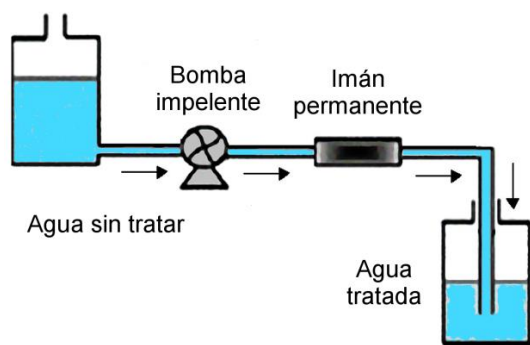


Figura 6.6 Esquema de un dispositivo de laboratorio para el tratamiento magnético del agua.

Se ha observado una mejoría de la eficiencia del dispositivo al incrementar la longi-

tud de la sección de tubería sometida al campo magnético. La mejoría es más marcada cuando se colocan varios imanes consecutivos con la polaridad alternada.

Un artículo resumen de 1996 lista más de 80 referencias que reportan la reducción en la formación de costras, la aparición de costras menos tenaces, la remoción de las ya existentes y la preservación de las propiedades hasta 130 horas tras aplicar el tratamiento. Se citan investigaciones que tanto confirman como rechazan algunas conclusiones parciales, sin llegar a un resultado concreto. Los mecanismos propuestos para explicar estos efectos comprenden interacciones intraiónicas o intramoleculares, efectos causados por la fuerza de Lorentz, disolución de contaminantes, efectos de interfase sólido-líquido y cambios en la morfología de los cristales minerales que se depositan. Se ha considerado incluso la posibilidad de un efecto puramente mecánico, a causa de la influencia del campo magnético al crear posibles turbulencias en el flujo líquido.

Una gran parte de las dudas que existían sobre el tratamiento se disiparon cuando Coey y Cass, tras examinar más de 100 muestras, reportaron en una revista especializada en magnetismo que los sedimentos de *calcita* obtenidos al evaporar el agua conteniendo iones Ca^{2+} se convertían en *aragonita* al aplicar el tratamiento. Calcita y aragonita son diferentes fases cristalinas del carbonato de calcio CaCO_3 .

Tras el tratamiento magnético, Coey y Cass almacenaban el agua durante un intervalo de tiempo t_0 , previo a su calentamiento, en un beaker a 80°C para formar los sedimen-

tos. Después las fases sólidas se recolectaban del fondo del beaker y se analizaban mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica. Encontraron un incremento notable del cociente aragonita/calcita con el tratamiento magnético, alcanzando un máximo para $t_0 \sim 40$ horas.

También se ha medido la concentración de iones Ca^{2+} a la salida de un dispositivo magnetizador por métodos electroquímicos, encontrándose una reducción apreciable de la concentración de iones de calcio. Este resultado indica que el tratamiento magnético activa de alguna manera la precipitación del carbonato, que queda en suspensión en el líquido y no puede contribuir a la conductividad eléctrica ni cristalizar después en las paredes de la tubería.

La eficacia del tratamiento se observa no solo en las nuevas deposiciones de carbonato, sino también en las costras formadas con anterioridad. Existen reportes de que cuando se aplica el tratamiento, las costras ya formadas desaparecen. El autor tuvo la oportunidad de asistir, hace ya algunos años, a una reunión resumen nacional sobre las experiencias de la aplicación del tratamiento magnético en diversos centrales o fábricas de azúcar. En algunos casos, el efecto fue tal que el desprendimiento de las costras obstruyó las tuberías y fue necesario interrumpir la producción.

El tratamiento magnético se aplica con regularidad en muchas otras instalaciones nacionales; sin embargo, más allá de algunas consideraciones generales, no existen modelos detallados que logren abundar en la explicación física de lo que sucede en realidad en este caso.

También se han encontrado resultados disímiles utilizando tuberías de acero inoxidable, cobre y dos diferentes tipos de cloruro de polivinilo, uno transparente y flexible y el otro rígido y opaco, del tipo usado en trabajos de plomería. La reducción del contenido de Ca^{2+} en las tuberías de acero y cobre fue de 28 %, de 18 % para el PVC duro y cero para el PVC blando, razón por la cual las tuberías utilizadas también son un parámetro importante a tomar en cuenta al estudiar los tratamientos magnéticos.

Los reclamos publicitarios que afirman que el tratamiento magnético aporta al agua propiedades curativas o antisépticas carecen de fundamento, pues no existe la más mínima evidencia – ni teórica ni experimental – que justifique tales fantasías. Y a pesar de las muchas patentes que surgen cuando se realiza una búsqueda bibliográfica, tampoco se ha demostrado que el tratamiento magnético aplicado a combustibles mejore su eficiencia; los resultados experimentales que avalen tal afirmación nunca aparecen.

Aceleradores de partículas

Los campos magnéticos también se utilizan como un medio auxiliar para acelerar partículas elementales. Las partículas de alta velocidad se usan para investigar el micro-mundo y también para “bombardear” tumores de todo tipo en el interior del cuerpo. Uno de los primeros aceleradores de partículas fue el *ciclotrón*.

Su principio de operación es el siguiente. Dos cavidades huecas en forma de letra D guían las partículas cargadas emitidas por una fuente ubicada en el centro del instrumento (figura 6.7). Un campo magnético perpendicular a la trayectoria (y al plano del

papel en la figura), producido por un potente electroimán, hace que las partículas con carga eléctrica se muevan en una trayectoria curva. Las partículas son aceleradas en cada vuelta por una fuente pulsante de voltaje alterno cada vez que atraviesan la brecha o ‘gap’ entre las ‘Des’. A medida que las partículas acumulan energía, se mueven en espiral hacia el borde externo del acelerador; allí se pueden extraer utilizando sistemas auxiliares.

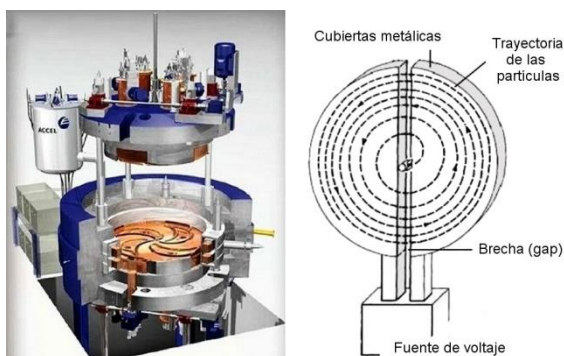


Figura 6.7 Izq. Ciclotrón comercial para aplicaciones médicas. Der. Esquema simplificado de su funcionamiento. Adaptado de Rev. Cub. Fis, vol. 24, No. 2, p. 175-177, 2007.

El ciclotrón de la figura 6.7 posee un imán superconductor de alta energía, tiene una masa de 90 toneladas y un diámetro de 3.4 m. Requiere de instalaciones auxiliares de control y programación que no aparecen en la figura.

Tal como predice la teoría especial de la relatividad, cuando la velocidad de las partículas se acerca a la de la luz, se requiere cada vez más energía para lograr incrementos adicionales de la velocidad. Esto hace que, en cada vuelta, las partículas se retrasen y no lleguen al gap en el momento preciso para recibir el pulso de aceleración, lo

que impide el aumento de la energía más allá de ciertos límites.

El problema quedó resuelto cuando se inventó el ciclotrón de frecuencia modulada o *sincrociclotrón*, instrumento donde la fuente pulsante de voltaje alterno va incrementando automáticamente el intervalo de tiempo entre los pulsos, con el fin de compensar el retraso de las partículas en cada vuelta. Otros instrumentos de la misma familia son el *betatrón* y el *sincrotrón*, diseñados para obtener energías muy altas en otras aplicaciones, donde el diámetro del recorrido circular puede ser de varios kilómetros. Todos estos aceleradores utilizan campos magnéticos para mantener confinadas las partículas, mientras van adquiriendo energía.

En la figura 6.8, el círculo grande marca la ubicación subterránea del gran colisionador de hadrones LHC (*Large Hadron Collider*) del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear, en Suiza. Los hadrones son un tipo de partículas elementales que incluyen, entre otros, a protones y neutrones. El túnel en el que se aceleran las partículas está situado a 100 m de profundidad y tiene una circunferencia de 27 km. A mayor diámetro, mayor tiempo en el proceso de aceleración, más energía y mayor posibilidad de lograr la ruptura de las partículas para poder estudiar su constitución interna.

Cuando el magnetismo es indeseable

Minas magnéticas. Los aceros empleados en la construcción de grandes buques son ferromagnéticos, en mayor o menor grado. Al desplazarse el buque durante largos períodos por la superficie del mar, atraviesando de manera continua las líneas de induc-

ción magnética del campo terrestre, su estructura llega a magnetizarse ligeramente. El proceso es similar al que tiene lugar cuando cualquier material ferromagnético – un clavo, unas tijeras o un cuchillo de acero – se frota con un imán. Aunque las fuerzas involucradas son muy pequeñas, la exposición prolongada al campo hace que los dominios magnéticos en el seno del material

tiendan a ordenarse en la dirección del campo externo, dando lugar a la magnetización del buque (ver capítulo 2). Como las líneas de fuerza varían su inclinación con la latitud geográfica, la magnetización no solo tiene componentes horizontales a lo largo del barco, también tiene componentes verticales y transversales.



Figura 6.8 Ubicación del gran colisionador del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) en Suiza, mayor laboratorio de investigación sobre la física de partículas en el mundo.

En 1939, a principios de la 2da. Guerra Mundial, los alemanes aprovecharon estas propiedades al idear minas magnéticas submarinas para hundir los barcos ingleses. Las minas eran capaces de detectar a distancia a los grandes barcos y dañarlos sin necesidad de hacer contacto directo, a causa de la onda de choque generada en el agua durante la explosión. Se colocaban en el lecho marino en lugares de poco calado, cerca de las costas, empleando aviones o submarinos, y se ajustaban para que estallaran al pasar un barco enemigo por encima. No era posible neutralizarlas por los métodos que se empleaban para detectar las minas

convencionales, que solo estallaban por contacto directo y debían ir ubicadas muy cerca de la superficie.

Las minas magnéticas funcionaban de la forma siguiente. Una aguja magnética muy sensible se activaba mediante un mecanismo de relojería. La presencia cercana de cualquier navío magnetizado era suficiente para mover la aguja y disparar un mecanismo auxiliar que hacía estallar la mina (figura 6.9).

En 1939, los ingleses perdieron 14 buques barreminas diseñados en específico para neutralizar minas, pues no eran capaces de detectar las minas magnéticas. Ya para no-

viembre de ese mismo año los alemanes habían depositado unas 800 minas en los mares cercanos a la costa inglesa y a la salida de sus ríos navegables.

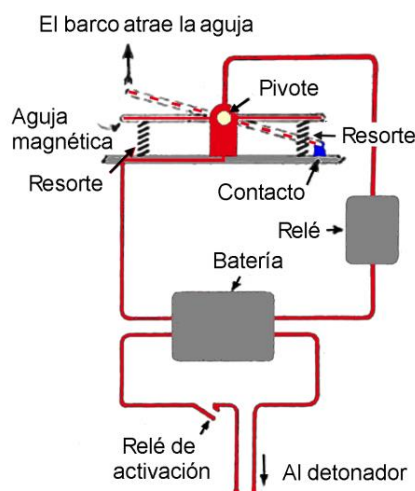


Figura 6.9 Sistema de disparo de una mina magnética alemana de la 2ª Guerra Mundial. La aguja magnética cerraba el circuito de disparo. Un contrapeso la mantenía siempre en la posición correcta.

Tras develar su principio de funcionamiento – al recobrar una mina mal colocada que no explotó – los ingleses idearon diversos medios para neutralizarlas. Uno de ellos era desmagnetizar los buques mediante un enrollado de alambre alrededor del casco, energizado con la planta eléctrica del propio buque, que superponía un campo de sentido contrario para neutralizar la magnetización del barco. Enormes trasatlánticos como el Queen Mary y el Queen Elizabeth, empleados para el transporte de tropas, fueron protegidos de esta manera.

Para desactivar las minas se empleaban lanchas de madera que arrastraban una balsa conteniendo una bobina. La bobina generaba un campo magnético de intensidad sufi-

ciente como para hacer estallar las minas. Aviones equipados en forma similar, capaces de volar a muy baja altura, se utilizaron con el mismo fin (figura 6.10).

Más adelante se encontró que al deslizar un cable con una corriente de 2000 ampere a lo largo del casco de un buque (técnica denominada *wiping*) se inducía un campo apropiado que neutralizaba la magnetización. El procedimiento funcionaba por un tiempo, pero después era necesario repetirlo.



Figura 6.10 El avión AF Vickers Wellington DWI Mark II de la Royal Air Force fue otra respuesta para neutralizar las minas magnéticas alemanas. El anillo de madera de balsa, de 4 m de diámetro, creaba un campo magnético mediante una bobina de aluminio alimentada por un generador dentro del avión. Al volar rasante sobre el agua hacía estallar las minas.

A partir de ese momento, medidas y contramedidas relacionadas con las minas magnéticas siguieron desarrollándose por las fuerzas navales de todo el mundo; es un tema que se ha tomado en cuenta en diferentes conflictos bélicos. Los sistemas actuales de desmagnetización son mucho más complejos, e incluyen no menos de tres conjuntos de bobinas separadas para reducir la intensidad del campo magnético del buque en tres direcciones perpendiculares en-

tre sí.

Hace unos pocos años la marina norteamericana ensayó el uso de bobinas superconductoras desmagnetizantes, capaces de trabajar con mejor eficiencia y reducir el peso de los enrollados hasta en 80 %. Un resumen actualizado sobre el tema de la desmagnetización de los buques aparece en el sitio WEB de la Revista Marina de Chile (ref. 77).

Soldadura de tuberías de acero. Otro ejemplo donde la magnetización resulta perjudicial, y debe ser eliminada a toda costa, es cuando hay que soldar grandes tuberías de acero. Tal necesidad se presenta, por ejemplo, al instalar sistemas industriales de enfriamiento que deban trabajar a alta temperatura o que necesiten soportar mucha carga. Tanto durante el proceso de fabricación como de transportación a grandes distancias, los tubos pueden llegar a magnetizarse de forma notable, según sea la aleación específica empleada en su construcción.

La forma usual de unir los tubos es aplicar a los bordes en contacto una chispa o arco eléctrico con una varilla de soldar, confeccionada a partir de una aleación adecuada y algún otro componente que evite la oxidación y facilite la soldadura (el fundente). El arco no es más que una corriente eléctrica muy intensa, formada por electrones y partículas de aire ionizado que se mueven a gran velocidad (ver capítulo 3). La corriente pasa a través del aire ionizado formando un arco estable, generando efectos luminosos y una temperatura muy alta, suficiente para fundir el extremo de la varilla y poner al rojo los bordes de los tubos. El operador deposita en los bordes el material fundido,

que se difunde y mezcla con el material de los tubos hasta lograr la soldadura.

En el capítulo 4 se analizó que los campos magnéticos estáticos son capaces de interaccionar con las partículas cargadas en movimiento. Una de las principales propiedades de esa interacción es que las fuerzas que aparecen están siempre dirigidas en sentido lateral (perpendicular) al movimiento de la partícula. De aquí que si el tubo está magnetizado, el arco eléctrico se desviará hacia un lado del punto específico que se desea calentar, cualquiera sea el punto que se seleccione y de cualquier forma que se coloque la varilla. Lo que ocurre en la práctica es que el arco salta continuamente de un lugar a otro, y no es posible alcanzar en punto alguno la temperatura necesaria para formar la soldadura.

Es por eso que no queda más remedio que llevar a cabo una desmagnetización previa de los tubos. La forma usual de lograrlo es enrollando un alambre conductor a su alrededor y haciendo pasar por él una corriente alterna de gran intensidad, que crea un campo magnético alternante en el seno del tubo. Al ir disminuyendo en forma paulatina la intensidad de la corriente hasta llegar a cero, los dominios magnéticos en el seno del material van quedando desordenados, hasta que la magnetización desaparece cuando la corriente se anula por completo (capítulo 2). Si la tubería está muy magnetizada, puede ser necesario repetir varias veces el proceso. Existen equipos comerciales diseñados para aplicar este procedimiento específico a tuberías de diversos diámetros, incluyendo las mayores que se fabrican.

Magnetización de la maquinaria industrial.

A partir de los años 70 del siglo pasado comenzó a tomarse en cuenta que el magnetismo inducido en diversas maquinarias podía ser la causa de muchas fallas, hasta el momento inexplicables. Hoy día se le atribuye a la magnetización el deterioro de rodamientos, cadenas, engranajes y acoplamientos en maquinarias que al parecer no tienen alguna conexión magnética y no forman parte de motores, generadores ni poseen conexiones eléctricas. El problema se origina porque las partes de acero interconectadas entre sí crean circuitos magnéticos, y estos circuitos proporcionan una vía fácil para la transmisión de los campos magnéticos generados por motores u otros dispositivos generadores, aunque estén ubicados en lugares distantes.

El deterioro proviene a partir de la propiedad de los campos magnéticos en movimiento de crear voltajes y corrientes inducidas, que incrementan la temperatura en el seno del material y aceleran el desgaste de los rodamientos y otras partes móviles. El efecto es mayor mientras más rápido es el movimiento relativo de las superficies en contacto (capítulo 4).

Otras posibles fuentes de magnetización de la maquinaria son a) la exposición de algunas de sus partes a campos magnéticos intensos que den origen a una magnetización remanente y b) el paso de una corriente continua intensa durante una soldadura de arco. En casos extremos la combinación de diferentes elementos puede llegar a causar con el tiempo chispas y daños severos en la superficie de las partes deslizantes, incrementando la fricción y el desgaste. Algunos fabricantes prevén estos comportamientos

indeseables incluyendo materiales aislantes en los rodamientos.

Anomalías magnéticas

La distribución normal 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 con inclusión de diversas 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 las pequeñas alteraciones en la distribución del campo magnético terrestre (figura 6.11).

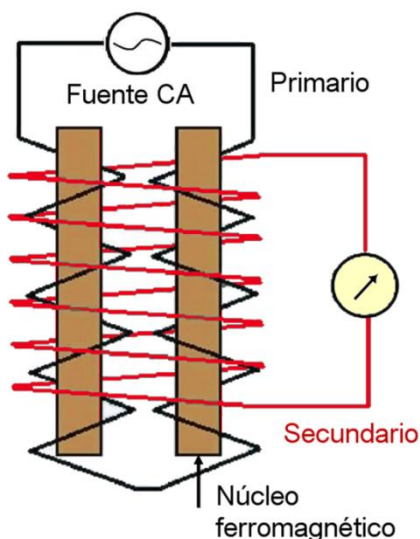


Figura 6.11 Sensor de anomalías magnéticas (magnetómetro de compuerta de flujo). Hay otros tipos.

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 sólo son sensibles a las perturbaciones magnéticas causadas por la presencia de Fe, Ni, Co y sus aleaciones, o por óxidos u otros minerales que los contengan; de hecho, la primera aplicación práctica de un magnetómetro de este tipo fue la de localizar depósitos minerales que tuvieran componentes ferromagnéticos. El primer texto publicado sobre el tema, “Examen de yacimientos de hierro mediante medidas magnéticas”, data de 1879.

Hoy día se siguen utilizando magnetómetros 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 reaccionan ante cualquier acumulación de mineral ferroso con tal que no se encuentre muy alejada 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 todos los objetos que contengan materiales ferromagnéticos tales como cuchillos, hebillas, gafas de armadura metálica o llaveros. Un magnetómetro geológico es un instrumento pequeño, que consta de un detector y un registrador que se llevan auestas. Es típico que el detector se coloque en una pértiga de 2 a 3 metros de longitud con el fin de atenuar cualquier influencia proveniente del operador (figura 6.12). Otras posibles interferencias pueden ser causadas por construcciones cercanas, líneas de ferrocarril, autos y carretas, o vigas de acero que se encuentren soterradas co-

mo, por ejemplo, en los cimientos de un edificio. También pueden alterar las lecturas del magnetómetro las líneas de transmisión eléctrica, los transformadores de la red comercial, e incluso las variaciones propias del campo magnético terrestre, que siempre está sujeto a pequeñas fluctuaciones.



Figura 6.12 Prospección de minerales ferrosos. El magnetómetro se encuentra en el extremo de la pértiga.

Las compañías de explotación de minerales también suelen emplear aviones para hacer la prospección de rocas ferrosas, aunque la detección se basa en otros principios, ya revisados en el capítulo 4 al describir la detección de metales (figura 6.13).

La última novedad en la prospección de minerales por medios electromagnéticos consiste en el uso de ‘drones’. En la actualidad se entiende por *drone* cualquier dispositivo aéreo controlado y no tripulado (figura 6.14). Si en sus inicios los drones se utilizaron de manera exclusiva para fines béli-

cos y recreativos, sus aplicaciones se han ido diversificando cada vez más.



Figura 6.13 Prospección de minerales desde el aire.



Figura 6.14 Drone similar a los usados en la actualidad en la prospección de minerales.

Algunas compañías de prospección mineral tienen en sus planes inmediatos usar drones para levantar mapas del espectro electromagnético a diferentes frecuencias. Según Peter LeCouffe, director de operaciones de la compañía canadiense *Harrier Aerial Surveys*, los drones se usarán para ‘...registrar las diversas bandas del espectro electromagnético. Diferentes minerales dejarán huellas electromagnéticas disímiles, de manera que con un procesador podemos en principio resolver la composición de esos minerales’

(http://www.miningandexploration.ca/technology/article/drones_are_ready_for_takeoff_in_the_mining_industry/).

Conflictos bélicos. Durante la Segunda Guerra Mundial los diversos contendientes emplearon magnetómetros para descubrir los submarinos enemigos (figura 6.15); el instrumento era remolcado por un barco, o se colocaba en una aeronave; el método aéreo es el habitual en la actualidad dada la sensibilidad de los magnetómetros contemporáneos. Cualquier variación brusca del campo magnético en las cercanías del detector como, por ejemplo, la que tiene lugar en el motor de arranque durante el encendido de un vehículo, proporcionará una clara señal. Esta última particularidad fue empleada por los EE.UU. en Viet Nam detectar garajes o depósitos de vehículos militares camuflados.

Para reducir la interferencia de los equipos eléctricos proveniente del propio avión, el DAM se coloca en una proyección externa o botalón, como el que se muestra en un avión P-3C de la *Lockheed* (figura 6.16); en los helicópteros el magnetómetro se cuelga de un cable. Lo usual es añadir circuitos electrónicos para neutralizar el ruido magnético de interferencia proveniente de la aeronave. Aun así, el submarino se detectará solo si se encuentra cerca de la superficie y no demasiado lejos del medio aéreo empleado.

El alcance máximo de detección, de unos 1200 m, lo determina el tamaño del submarino y la composición de su casco, aunque también influye en el alcance la dirección relativa del movimiento respecto al campo

magnético terrestre, tanto del avión como del submarino.

Detector de Anomalías Magnéticas (DAM)

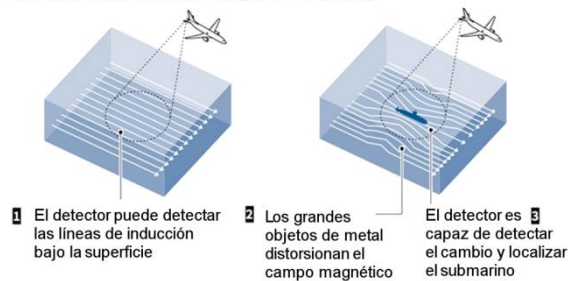


Figura 6.15 Detección magnética de submarinos. El DAM detecta las variaciones causadas en el campo magnético terrestre por la presencia de una gran masa metálica.



Figura 6.16 Botolón con el magnetómetro detector de anomalías magnéticas en su interior, en un avión P-3C Lockheed.

Existen submarinos nucleares cuyo casco está construido de titanio, metal no magnético; no obstante, diversos instrumentos y equipos en su interior que incluyen las turbinas, el reactor y los motores diésel auxiliares se construyen de aleaciones que contienen hierro y níquel, haciendo factible su detección magnética.

El magnetómetro que aparece en el esquema de la figura 6.11, denominado ‘de com-

puerta de flujo’ (*fluxgate magnetometer*) fue desarrollado en 1930; funciona energizando con corriente alterna dos bobinas idénticas en oposición, de manera que la lectura del amperímetro acoplado a la bobina secundaria se puede ajustar a cero en presencia del campo terrestre. Sin embargo, cualquier perturbación magnética posterior causa un desequilibrio en la magnetización de los núcleos ferromagnéticos y en la corriente que atraviesa las bobinas, apareciendo una señal detectable en el secundario.

Un tipo de magnetómetro más reciente es el de *precesión de protones*. A pesar de que su nombre quizás le sugiera al lector un término de ciencia-ficción, su funcionamiento es muy sencillo (aunque la física involucrada en el asunto no lo es). En este caso el enrollado se coloca alrededor de un recipiente largo y estrecho con agua, etanol o kerosén. Al usar una batería de corriente continua y desenergizar bruscamente el enrollado en presencia del campo magnético terrestre, aparece una extracorrente de ruptura que activa los momentos magnéticos de los protones en los núcleos atómicos de la sustancia en cuestión. Se genera así una pequeña señal proporcional al campo terrestre que se puede amplificar y detectar. Un ejemplo de extracorrente de ruptura es la pequeña chispa que en ocasiones se origina en un interruptor al desconectar un motor o una lámpara de luz fría.

En la actualidad existen magnetómetros computarizados muy sensibles, que pueden detectar anomalías magnéticas terrestres desde los satélites en órbita. Magnetómetros complejos se incluyen en naves espaciales para estudiar el magnetismo del sol y otros planetas.

En julio de 2007 se publicó el Mapa Mundial Digital de Anomalías Magnéticas, con datos recopilados durante un largo período de tiempo. Fue confeccionado usando sensores SAM de diversos tipos, combinando determinaciones terrestres, marítimas y aéreas por vía satélite (figura 6.17).

El mapa completo se puede descargar en http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/WDMAM/project/perugia/WDMAM_1.02_2007_Edition_low_resolution_reduced1.pdf.

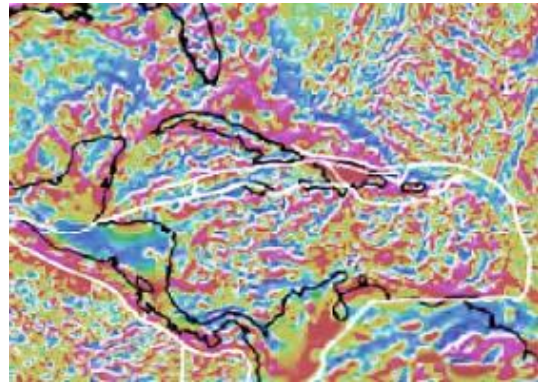


Figura 6.17 Sección Centroamericana y Caribeña del Mapa Mundial Digital de Anomalías Magnéticas.

CAPÍTULO 7. TERAPIAS MAGNÉTICAS REALES E ILUSORIAS

Magnetostática y electromagnetismo

En la actualidad existen muchas terapias que aplican campos magnéticos, tanto estáticos como electromagnéticos. Algunas tienen base científica y son válidas como la *diatermia*, que consiste en el calentamiento local de los tejidos aplicando radiación de microondas. Otras no poseen valor alguno a la luz de los conocimientos científicos contemporáneos; sin embargo, muchas personas alegan sentirse mejor cuando se someten a ellas.

Las terapias ilusorias – tanto magnéticas como de otros tipos – aparentan causar beneficios por diversas razones. Una de ellas es el efecto placebo, descrito en el capítulo siguiente. Otra razón es que no toman en cuenta la evolución natural de los padecimientos que pretenden curar. Por ejemplo, hay estadísticas que muestran que en casi el 90% de los casos de las dolencias relacionadas al sistema osteo-mio-articular hay remisión espontánea de síntomas; es decir, desaparecen o reducen su intensidad por sí mismos, lo cual hace aparecer como eficaz cualquier tratamiento aplicado, tanto si es convencional como si pertenece al grupo de las llamadas medicinas “alternativas”, “naturales” o “tradicionales”.

Se dice que es necesario conocer el pasado para poder comprender el presente y vislumbrar hacia dónde iremos en el futuro. Y la realidad es que muchos supuestos tratamientos magnéticos “novedosos”, además de carecer de fundamento científico, fueron ya ensayados y desechados hace mucho. Aún alcanzan categoría de “terapia” en

ciertos círculos gracias a la ignorancia de practicantes y pacientes, a la ilusoria promesa de alivio efectivo con poco esfuerzo y sin riesgos, y a la propaganda reiterada acerca de su supuesta efectividad, la mayoría de las veces con fines estrictamente económicos. Esto último ha sido catalogado en la literatura médica como “malicia sanitaria”; es decir, se designa así “cualquier actividad preventiva, diagnóstica, terapéutica o rehabilitadora de dudosa utilidad para el individuo o la sociedad, pero que beneficia a quienes las promueven o promocionan” (Gérvás J. *Malicia sanitaria y prevención cuaternaria*. *Gac Med Bilbao*. 2007; 104:93-6).

A veces se alega que tales terapias son benéficas porque los imanes son ‘naturales’, como si esto fuera un argumento de peso. En realidad, los imanes que se encuentran en la vida diaria son todos sintéticos, diseñados para cada aplicación específica. Poseen propiedades magnéticas muy superiores a las de la magnetita natural, que en la práctica sólo ha quedado para curiosidad de museo o uso de laboratorio (ver tabla 2.3). Además, el *naturismo* no es ciencia, sino una *doctrina* que predica el uso de productos naturales para prevenir o curar las enfermedades. Nadie ha demostrado que la medicina natural sea superior, o siquiera equivalente, a la medicina convencional moderna excepto – quizás – en alguna concreta excepción.

No es raro que las supuestas terapias aparezcan de forma recurrente. Alcanzan un máximo de popularidad, se ponen de moda y muchos las adoptan. Al cabo de un corto tiempo surge el desencanto, se comprueba

que no sirven para nada y desaparecen... aunque no en su totalidad, para reaparecer con fuerza al cabo de unos pocos años renaciendo de sus cenizas, como el ave Fénix.

El caso de las pulseras magnéticas del capítulo 1 no es, ni mucho menos, el único. En la actualidad no resulta difícil encontrar anuncios, promociones y artículos en revistas no especializadas, o en la Internet, donde se ensalzan las virtudes de uno u otro tratamiento magnético o de radiaciones desconocidas, para ser aplicadas tanto a personas como a animales. Los anuncios recomiendan bobinas para generar campos alternos, o imanes permanentes para magnetoterapia, prometiendo al comprador beneficios de todo tipo a un precio módico. Es común que los imanes se coloquen en algún soporte o aditamento adecuado como pulseras, vendas, collares, mantas, e incluso camisas.

Estas promociones nunca aportan pruebas de sus afirmaciones, citan personajes inexistentes o fuera de contexto y ni siquiera emplean una terminología veraz. Lo usual es que utilicen términos científicos, pero en forma incorrecta. No obstante, para el lector no entrenado, estas declaraciones suelen resultar bastante convincentes, pues la terminología científica proporciona un manto de ciencia y veracidad a lo que nada tiene de lo uno o de lo otro. También pesa mucho en la balanza el afán del paciente de buscar solución a una dolencia que puede no ser fatal, pero sí muy molesta, recurrente y difícil de aliviar.

Por tanto, ¿qué hay de cierto y qué de falso en las terapias magnéticas? ¿Qué se sabe en realidad y qué resulta una pura especula-

ción? ¿Es correcto incluir a todas bajo una misma denominación? Es decir, por ser magnéticas o electromagnéticas ¿todas sirven? ¿Ninguna sirve? ¿Son benéficas o son dañinas? ¿Cómo separar la ficción de la realidad?

Campos magnetostáticos y electromagnéticos. Antes de proseguir resulta conveniente insistir en lo siguiente. Existe una diferencia esencial entre los campos magnetostáticos, asociados a los imanes permanentes (o a una bobina con corriente continua) y los campos electromagnéticos que se generan en una antena emisora o se producen al hacer pasar una corriente alterna por el enrollado de una bobina. La diferencia consiste en que *los campos magnéticos variables en el tiempo siempre tienen asociado un campo eléctrico*, mientras que los campos magnéticos estáticos no están asociados a campo eléctrico alguno. Por regla general los magnetoterapeutas desconocen lo anterior y no hacen distinción entre los diversos tipos de campo, cuando en realidad resulta imprescindible analizarlos por separado, pues las propiedades son radicalmente distintas. En un caso solo actúa un campo: el magnético. En el otro, dos campos con propiedades muy diferentes actuarán a la vez sobre el sujeto.

Campos magnéticos estáticos: magnetoterapia

El término proviene del inglés *magnetotherapy*, “terapia con imanes”, aunque también se aplica a los campos generados en bobinas con corriente continua, siempre y cuando la corriente no varíe con el tiempo.

Desde la antigüedad se le han atribuido virtudes curativas a los imanes. Cuando se re-

visa la literatura surgen referencias anecdóticas antiguas, aunque difíciles de verificar. Así, se mencionan papiros de antes de nuestra era donde aparece la receta de un ungüento aplicable a heridas en la cabeza nombrando el *hierro meteórico*, que algunos interpretan como el imán natural magnetita. También parece ser que griegos y romanos atribuían efectividad a los tratamientos magnéticos. Según algunas fuentes, el griego Hipócrates, considerado el médico más importante de la antigüedad, recomendaba:

“...si la cavidad uterina no retiene el semen viril, toma plomo y saca de la *piedra que atrae el hierro* un polvo fino, envuelve todo en tela de lino humedecida con leche de mujer, y luego aplícalo como fomento contra la matriz”.

Otras afirman que en los escritos del biógrafo y ensayista griego Plutarco se puede encontrar la desconcertante referencia de que un imán permanente pierde su fuerza si se restriega con ajo. También aparecen menciones sobre las supuestas virtudes curativas de la magnetita en escritos persas, árabes y bizantinos antiguos.

En el siglo XVI, el médico, filósofo y alquimista suizo *Theophrastus Bombastus von Hohenheim* (1493-1541), más conocido como *Paracelso*, utilizó imanes permanentes para tratar la epilepsia, la diarrea y las hemorragias, procedimientos que más tarde fueron encontrados sin fundamento. Consideraba que las enfermedades eran atraídas hacia el imán de la misma forma que son atraídos el acero y el hierro, y que uno de los polos era capaz de atraer y el otro de repeler los padecimientos. Aunque los escri-

tos de Paracelso contenían elementos de magia, la oposición a los preceptos médicos de su tiempo, apoyados en purgas y sanguijuelas para “extraer los malos fluidos del cuerpo”, contribuyeron al adelanto del pensamiento científico de la época. Algunos de sus criterios subsisten hasta hoy en forma de pseudociencia como, por ejemplo, la supuesta diferencia de aplicar un polo norte o un polo sur en diferentes terapias magnéticas. Paracelso también es considerado precursor de otra pseudociencia, la homeopatía de *Samuel Hahnemann* (1755-1843), pues muchos de sus remedios se cimentaban en la creencia de que “lo similar cura lo similar”. Esta frase resume la ‘ley de lo similares’, uno de los nunca demostrados postulados de Hahnemann (ver *Rev. Cub. Física* vol. 25, No. 1, (2008) p. 38-44, accesible en la WEB).

En los siglos siguientes se multiplicaron en toda Europa partidarios y detractores de las terapias magnéticas. En 1641, el irlandés *Valentine Greatrakes*, inspirado en un sueño, se dedicó a prestar sus servicios como sanador frotando las partes afectadas con una barra de hierro magnetizada. El éxito de sus tratamientos fue confirmado por personas distinguidas y educadas de la época, pero las curas eran transitorias y la cantidad de personas que venían a consultarlo fue decreciendo gradualmente, hasta que se retiró. *Johan Baptiste van Helmont* (~1644), intentó asociar el magnetismo a la mística, encontrando la oposición del jesuita *Adana-sius Kircher*, quien consideraba las conjeturas supersticiosas como “payasadas”. Es posible encontrar referencias del siglo XVIII sobre la aplicación de los imanes permanentes a los dolores dentales y a las histe-

rias, temblores y tortícolis. También se mencionan la mejora en la regularidad de las menstruaciones y la atenuación de los dolores en general.

Franz Anton Mesmer. La terapia magnética con imanes permanentes alcanzó su mayor grado de popularización a finales del siglo XVIII en Francia, con Franz Anton Mesmer, un médico austríaco precursor en los campos del psicoanálisis y del hipnotismo. Mesmer había sido alumno de otro sacerdote jesuita, el padre *Maximilian Hell*, quien realizaba “curaciones” a principios de la década de 1770, aplicando a sus pacientes placas de acero magnetizado.

En vísperas de la Revolución Francesa, Mesmer inauguró en París un salón de curaciones que atendía a la nobleza e incluía tratamientos magnéticos. Las curaciones se lograban tratando las “...desviaciones indeseables del magnetismo animal innato a los seres humanos”. Con el tiempo, Mesmer descubrió que obtenía los mismos resultados sin utilizar los imanes y postuló que el ‘magnetismo animal’, inherente a todo lo vivo, era quien le permitía corregir las anomalías del ‘flujo magnético’ en los enfermos.

Uno de sus tratamientos consistía en reunir a los pacientes en una habitación oscura; vistiendo una túnica dorada y una especie de varita mágica en su mano, los sentaba alrededor de una gran vasija que contenía una disolución de productos químicos. El magnetizador y sus ayudantes, todos varones, miraban con fijeza a los ojos de los pacientes, les hablaban y les frotaban diversas partes del cuerpo, incluyendo los senos de las mujeres, mientras los pacientes se agarra-

ban a unas barras de hierro que sobresalían de la disolución hasta que se alcanzaba un cierto grado de exaltación. De esta manera se curaban a diestra y siniestra muchos aristócratas, – mujeres jóvenes en su gran mayoría...

En 1785, cuatro años antes del inicio de la Revolución Francesa, los principales médicos de París presionaron a Luis XVI para que tomara cartas en el asunto, quien hizo que la Academia Francesa de las Ciencias nombrara una comisión para revisar los tratamientos de Mesmer. La comisión incluía personalidades de renombre como el astrónomo *Jean Sylvain Bailly*, miembro de la Academia, primer presidente de la Asamblea Nacional durante la Revolución Francesa y más tarde Alcalde de París; el químico *Antoine Lavoisier*, descubridor de la Ley de Conservación de la Masa, miembro de la Academia, también conocido como el Padre de la Química Moderna; el médico *Joseph Ignace Guillotin*, de sombría celebridad hoy día, pero un médico reconocido en su época y diputado a la Asamblea Nacional, y *Benjamín Franklin*, revolucionario norteamericano, diplomático y experto en electricidad, inventor del pararrayos y los bifocales.

La comisión realizó lo que hoy se conoce como un elemental experimento de control; aplicó el tratamiento magnetizador sin que los pacientes lo supieran, y no se produjeron las curaciones. Se concluyó que las curaciones, si las había, estaban solo en la mente de las personas que las esperaban. El informe elaborado, desfavorable para las teorías de Mesmer, hizo que este perdiera su prestigio con rapidez y pasara el resto de su vida en el olvido.

La figura 7.1 muestra un dibujo de un periódico parisino de la época; Benjamín Franklin aparece a la izquierda con los documentos que declaran el magnetismo animal una farsa. Arriba a la derecha Mesmer, con grandes orejas de burro, es expulsado volando de la sala junto a su séquito de asistentes. Los más maliciosos en París acusaban a Mesmer de ejecutar prácticas mágico-sexuales en su salón de curaciones.



Figura 7.1 Dibujo satírico de un periódico parisien de 1790 ridiculizando al magnetismo animal: ‘Franklin pone en fuga a los mesmeristas’ en ‘El magnetismo develado’, Biblioteca Nacional de Francia.

Los reportes originales de las autoridades parisinas detallando las terapias de Mesmer, junto a muchas otras informaciones sobre falsos expertos y tratamientos magnéticos, aparecen en el libro de *Charles Mackay* “Memorias de Ilusiones Populares y la Locura de las Multitudes”, editado en 1841.

Se encuentra accesible en

<http://www.fullbooks.com/Memoirs-of-Extraordinary-Popular-Delusionsx3081.html>.

Los tractores de Perkins. También hacia finales del siglo XVIII el médico *Elisha Per-*

kins de Connecticut, que alternaba el ejercicio de la medicina con el de comercio de mulas, recomendaba el uso de “tractores metálicos” para el tratamiento de varias enfermedades en personas y caballos. Los tractores (dos punzones confeccionados de metales diferentes, que en realidad no tenían propiedades magnéticas) se utilizaban frotando con suavidad el área lesionada, para “...extraer el fluido eléctrico nocivo que subyace en la base del sufrimiento”. En 1776, justo al comienzo de la guerra de independencia de Estados Unidos, se le concedió una patente bajo el título *Aparato metálico de Perkins para la terapia del dolor*.



Figura 7.2 Tractores de Perkins. Tomado de <http://www.hsl.virginia.edu/>. Publicado por *H. Humphrey*, 27 St. James's Street, Londres, Noviembre 11, 1801.

Algunos médicos prominentes, escépticos de los resultados de Perkins, repitieron sus experimentos utilizando piezas de madera talladas y pintadas de forma que semejaran tractores. Los resultados fueron exactos a los obtenidos con los tractores reales, y se publicaron en el artículo *De la Imaginación, como Causa y Cura de Desórdenes, Ejemplificada por Tractores Ficticios*. En

1796, la *Connecticut Medical Society* calificó a Perkins de farsante, y lo expulsó de sus filas por haber “revivido las remanencias miserables del magnetismo animal,...predicando que el frotamiento curará de raíz los dolores más rebeldes...”. Por regla general, los periodistas de la época no tardaban en satirizar este tipo de fantasías terapéuticas (figura 7.2).

Un artículo mucho más reciente de *E.J. Engstrom*, publicado en el *Medizinhistorisches Journal* 41(3-4) 2006, revela que entre 1780 y 1830 los médicos de *La Charité*, uno de los principales hospitales de Berlín, realizaron ensayos clínicos para comprobar la efectividad terapéutica del magnetismo animal y mineral (la manera de designar en la época lo que hoy se conoce como magnetoterapia). Haciendo una revisión de los reportes médicos e historias clínicas existentes en el hospital, Engstrom concluyó lo siguiente:

“Mientras que en 1790 la plausibilidad de las reivindicaciones terapéuticas del magnetismo animal demandaban la atención del cuerpo médico, en 1830 las evidencias acumuladas sobre las que se basaban esas reivindicaciones habían perdido su poder de persuasión y fueron relegadas al oscuro mundo de los farsantes y los charlatanes”.

Magnetoterapeutas contemporáneos. No obstante, a pesar de la continuada descalificación de estos procedimientos por parte de la comunidad científica, la terapia magnética se hizo bastante popular. En los siglos siguientes devino en una forma de curanderismo o charlatanería distorsionada y mu-

chas veces fraudulenta. A finales del siglo XIX era posible encontrar catálogos de grandes tiendas norteamericanas ofertando ropa y sombreros magnéticos (algunos con más de 700 imanes) para entrega por correo. Los anuncios prometían que “...el magnetismo, aplicado correctamente, curará cualquier enfermedad curable, con independencia de cuál sea su causa” (*Macklis, R. Annals of Medicine* 118(5): 376-383, 1993).

Aún hoy día es posible encontrar escritos donde se afirma que el magnetismo es bueno... para todo. Así, por ejemplo, una solicitud de patente de 1982 (*S. Maeshima, Tokio*) describe los beneficios que proporciona el aparato diseñado por él como que es capaz de

“... conducir el magnetismo al cuerpo y con esto provocar una leve estimulación de los nervios periféricos y de las células tisulares. Esto debe aumentar la circulación de la sangre, la excreción cutánea y el recambio, efectos necesarios para la conservación de una buena salud, para la defensa contra las enfermedades y para la recuperación general después de una severa enfermedad.”

Aquí el engaño está en la palabra “debe”; es decir, el solicitante *supone* que su invento es capaz de todo lo que dice... que, desde luego, no puede demostrar.

En el párrafo anterior también se pudiera escribir: ‘debe’ estimular los procesos que favorecen la formación de tumores,...’debe’ estimular la reproducción de las células cancerosas... en fin, lo que a usted se le ocurra, ya que no hay razón alguna para que se sólo se estimulen los procesos

benéficos para el organismo, si es que de veras se logra estimular alguno. Lo único que ha cambiado en relación con los escritos del siglo XVIII es la terminología utilizada, más acorde con el estado actual de los conocimientos.

El misticismo, las exageraciones y las falsedades que acompañaron el uso del magnetismo en la medicina desde sus inicios, de cierta forma desestimularon por mucho tiempo el desarrollo de investigaciones científicas serias acerca de sus posibles efectos terapéuticos. Al avanzar el siglo XX el interés popular por la terapia magnética había decaído, y hacia los años 40 no se publicaban artículos en las revistas especializadas acerca de los efectos fisiológicos de los campos magnetostáticos y electromagnéticos.

Aunque aún es posible encontrar ofertas de imanes permanentes en forma de diversos aditamentos terapéuticos, los estudios que avalan la eficacia de esos tratamientos siguen sin aparecer. Aún más, ni siquiera hay indicios de cual pudiera ser el posible mecanismo de acción de esos dispositivos. Como el campo magnético de los imanes no varía con el tiempo, no hay efectos eléctricos asociados; además, la intensidad de los campos aplicados es muy pequeña para tener algún efecto directo sobre el organismo. De aquí que vale la pena analizar, aunque sea de manera muy breve, las propiedades reales de los campos magnetostáticos.

El campo magnetostático es conservativo

Es conocido que un campo magnetostático no interacciona con las partículas sin carga eléctrica. Tampoco lo hace con las que tienen carga eléctrica y están en reposo. Solo

puede hacerlo con las cargas o iones en movimiento, haciendo que su dirección varíe, pero no su energía cinética, pues la fuerza de interacción es perpendicular al movimiento en todo momento (en física se resume esta propiedad diciendo que la fuerza no hace trabajo).

Si se acerca un imán al cuerpo humano, puede que interaccione de una manera diferente con los iones presentes en los tejidos, haciendo que su energía potencial varíe. Pero al alejarlo, la situación se revertirá por completo. Al regresar a la posición inicial el sistema tornará exactamente al estado energético que tenía en sus inicios, sin que haya ningún cambio neto en la energía (es por eso que el campo magnetostático es un campo *conservativo*; la energía del sistema se mantiene constante en un ciclo cerrado de movimiento). Luego, no se puede considerar que haya un traspaso de energía del imán al sujeto, pues contradice las leyes conocidas de la física. Si así fuera, los imanes se descargarían como las baterías, lo que no sucede. (Los imanes de las bocinas de sus equipos de audio y los de la puerta de su refrigerador no se ‘descargan’ nunca, por mucho que trabajen, aunque sí se pueden desmagnetizar por otras razones).

Otro argumento contrario a la efectividad terapéutica de los campos magnetostáticos es el siguiente: los promotores de la aplicación de vendas magnetizadas para estimular los músculos de los deportistas atribuían los supuestos efectos a un incremento de la circulación local de la sangre; sin embargo, la evidencia científica que apoya esta afirmación es inexistente. Vale la pena recordar que el flujo sanguíneo depende de factores

tales como la diferencia de presión en el sistema de vasos y de sus diámetros, sometidos éstos a un fino control a través de mecanismos muy complejos (hormonales, nerviosos y sistemas locales de control) cuya influencia individual es muy difícil de valorar. Además, todo intento de explicar un incremento en la circulación mediante las fuerzas magnéticas que actúan sobre los iones cargados en movimiento, choca con la realidad de que esas fuerzas son demasiado pequeñas. Se ha calculado que un imán permanente típico, capaz de generar en la piel un campo magnético de 25 mT, origina un efecto en los iones de la sangre millones de veces menor que el de la agitación térmica que siempre se encuentra presente en cualquier objeto.

Un argumento definitorio en contra de la supuesta estimulación local de la circulación de la sangre es el siguiente: los pacientes sometidos a diagnóstico en equipos de resonancia magnética se someten a campos magnéticos de intensidad miles de veces mayores que el proporcionado por cualquier imán permanente. Los estudios realizados sobre estos pacientes nunca han mostrado efecto alguno en la circulación sanguínea.

Existen numerosas investigaciones que han fracasado en el empeño de encontrar alguna relación entre la aplicación del campo magnético y la circulación de la sangre. También se ha señalado que la sola presencia de una venda alrededor de un músculo, sin ningún aditamento magnetizante, es suficiente para hacer variar su temperatura y ejercer un efecto estimulante. De manera que es posible afirmar, sin lugar a dudas, que esa estimulación magnética de la circu-

lación no es más que una fantasía ilusoria.

Campos electromagnéticos

Como se ha expresado más de una vez, los campos magnéticos variables en el tiempo engendran campos eléctricos (y viceversa), de manera que no es posible analizar los efectos magnéticos sin tomar en cuenta los efectos eléctricos. Ambos efectos estarán siempre presentes en conjunto, en forma de radiación electromagnética que se propaga en todas direcciones a la velocidad de la luz.

Descartando los rayos X, analizados en el capítulo 5, resulta útil establecer una división adicional entre los dos tipos de radiaciones más utilizadas en diversas terapias: las microondas u ondas de radio de alta frecuencia y los campos alternos de baja frecuencia.

Microondas (300 MHz-3 GHz). El principal efecto de las microondas en los tejidos biológicos es la generación de calor. La diatermia se ha utilizado con bastante amplitud para tratar el dolor y la inflamación, con irradiaciones de radiofrecuencias sobre la zona afectada para elevar la temperatura. (La tendencia actual para tratar algunos tipos de procesos inflamatorios es contraria; se reduce la temperatura con el objetivo de ralentizar o retardar las reacciones dañinas que tienen lugar en el proceso).

Como la componente eléctrica de la radiación actúa por vía directa sobre las cargas eléctricas, puede inducir pequeñas corrientes eléctricas en los tejidos, que generarán calor por efecto Joule. También habrá otro tipo de interacción, la dieléctrica, al inducir dipolos en las moléculas no polares o ejer-

ciendo torques sobre las moléculas polares. Este mecanismo también puede elevar la temperatura de los tejidos al incrementar la agitación al nivel microscópico, pues la temperatura es justamente la medida macroscópica de esa agitación. El proceso es muy similar al que tiene lugar en un horno de microondas, solo que la potencia empleada es menor.

La inducción generada por los campos eléctricos – y el correspondiente calor disipado – aumenta con la intensidad del campo aplicado y con la rapidez de su variación en el tiempo. Existe un rango bastante amplio de frecuencias que producen estos efectos. La frecuencia utilizada en la mayoría de los equipos comerciales de microondas es de unos 2 450 MHz, regulada por convenios internacionales.

Radiación de baja frecuencia. En la literatura médica se denominan campos de baja frecuencia a los de valor entre 20 y 100 Hz; la frecuencia de la red comercial es 50 Hz en Europa y 60 Hz en América. También es usual encontrar campos pulsantes, que poseen una frecuencia algo mayor, pero que no se aplican de forma continua, sino por impulsos de corta duración. Con ese procedimiento se persigue el objetivo de dar tiempo a dispersar lo más posible el calor potencial generado por la radiación – si lo hubiere – ya que en este caso no es el calor lo que interesa.

Existe amplia evidencia de que la actividad eléctrica está presente en el cuerpo humano en todo momento. En capítulos anteriores se vio que es posible medir los potenciales causados por las corrientes en el corazón (electrocardiograma) o en el cerebro (elec-

troencefalograma). Un hueso sometido a un esfuerzo mecánico también puede generar diferencias de potencial (*efecto piezoeléctrico*). De manera que resulta muy racional suponer que la aplicación de una corriente eléctrica adecuada de baja intensidad podrá afectar los tejidos de alguna manera. Esa corriente se puede aplicar por vía directa, a través de contactos en la piel, o por vía indirecta mediante un campo electromagnético de baja frecuencia, que genera campos eléctricos y corrientes en el interior del cuerpo. La palabra *adecuada* es muy importante: los tejidos responden de muy diversa forma a diferentes señales eléctricas, en dependencia tanto del tejido particular considerado como de la señal aplicada. Por tanto, es imposible conocer de antemano, sin llevar a cabo ensayos clínicos detallados, si tal estímulo será en realidad benéfico para el paciente o, por el contrario, dañino. Muchos promotores de estos procedimientos simplemente no toman en cuenta esta realidad.

Breve historia de las terapias electromagnéticas

Las terapias electromagnéticas surgieron casi a la vez de las primeras redes eléctricas comerciales.



Figura 7.3 El Theronoid. Tomado de <http://www.americanartifacts.com/smma/index.htm>.

La figura 7.3 muestra una paciente durante una aplicación del *Theronoid* (marca co-

mercial) producido en Estados Unidos a partir de 1928. Consistía en un enrollado toroidal de alambre conductor de unos 50 cm de diámetro con una caja adosada y dos controles: uno de apagado/encendido y otro de alta/baja para regular la intensidad.

Diseñado para aplicaciones caseras, el paciente lo conectaba a la corriente de su vivienda para autoaplicarse tratamientos diarios de 3 a 5 minutos de duración. Este no fue el primer dispositivo con estas características, pues con anterioridad se habían patentado otros similares para ser usados tanto en personas como animales, hasta en caballos. La figura 7.4 muestra una patente donde la bobina se colocaba alrededor de todo el caballo, parado en sus 4 patas.

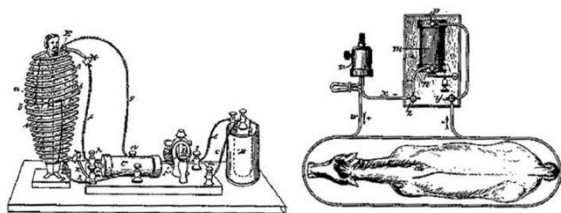


Figura 7.4 Equipos para tratamientos electromagnéticos. Principios del siglo XX. (<http://www.americanartifacts.com/smma/index.htm>). Notar la similitud con algunos tratamientos contemporáneos (figura 7.5).

Como casi siempre ocurre con estas terapias maravillosas, los autores afirmaban que el Theronoid podía curar casi cualquier dolencia, desde el estreñimiento hasta la parálisis. En 1933 la Comisión Federal de Comercio de Estados Unidos prohibió la publicidad del Theronoid como dispositivo terapéutico, por no encontrar que proporcionara beneficio alguno a las personas (accesible en <http://www.americanartifacts.com/smma/in>

[dex.htm](http://www.americanartifacts.com/smma/index.htm)).

En el presente existe una gran cantidad de literatura sobre el tema. Por ejemplo, una revisión del año 2008 publicado por *R.H.W. Funk* y colaboradores, del Instituto de Anatomía de Dresden, incluye alrededor de 400 artículos dedicados al estudio de los efectos biológicos de la radiación sobre células y tejidos. El resumen no incluye otros muchos y muy variados artículos que reportan los efectos de la radiación al aplicarse directamente a las personas (a pesar de que quienes los aplican no saben con certeza si los tratamientos serán dañinos en algún sentido o no).

En las personas, la radiación de baja frecuencia se ha aplicado al estudio de los efectos en el aparato músculo-esquelético, en traumatología, reumatología y en enfermedades del aparato vascular. Una terapia muy estudiada fue la aplicada a las fracturas óseas, tanto en personas como animales. Si bien el mecanismo no quedó esclarecido en su totalidad, diversos autores reportaron que la radiación estimula los procesos asociados a la formación del hueso y a la asimilación de implantes. Se emplearon frecuencias entre 20 y 100 Hz con intensidades del campo aplicado muy pequeñas, entre 0,5 y 8 mT, y duración de hasta 30 minutos. El tratamiento se podía prolongar por días o meses, aunque algunos investigadores alegaron que la regeneración del hueso podría ocurrir de forma indeseable. Otros consideraron que los beneficios no justificaban su relativo alto uso clínico en algunos lugares.

En 1985 *Watkins* y otros reportaron que la aplicación de campos electromagnéticos a

equino, en defectos creados antes por ellos mediante cirugía en la superficie del tendón digital flexor, causó un incremento en la concentración de vasos sanguíneos. Pero la maduración del tejido de reparación y la transformación del tipo de colágeno – componentes esenciales del proceso de recuperación del tendón – fueron en realidad *retrasados* por el tratamiento.

Un artículo muy documentado de *E.Y.S. Chao y N. Inoue*, basado en ensayos con animales y publicado en 2003, titulado *Estimulación biofísica de la reparación de huesos fracturados, regeneración y remodelación* concluía que

“...sin conocer con precisión el mecanismo celular asociado a la respuesta de los tejidos a estas intervenciones, resultaría difícil e inefectivo implementar una terapia apropiada acorde a la prescripción clínica precisa”.

Más adelante señalaba:

“se requiere un esfuerzo en este sentido para lograr la suficiencia en la aplicación clínica”.

Y al final de la publicación, en un intercambio con los árbitros, los propios autores advertían:

“...utilizar esta tecnología de forma indiscriminada (sin prescripción y supervisión apropiada) puede causar efectos secundarios indeseados, e incluso daños”.

Un meta-análisis estadístico posterior, publicado en 2008 por *Mollon et al.*, reportaba que en ese momento aún existía mucha incertidumbre acerca de la efectividad de la

estimulación electromagnética cuando se aplica a las fracturas.

Pero la radiación electromagnética de baja frecuencia no solo se aplica en los huesos; ha sido evaluada por diferentes investigadores para el tratamiento de tejidos blandos, también en la cabeza, para tratar de calmar los dolores o la ansiedad, y en otras partes del cuerpo con diversos fines. Aún se fabrican equipos comerciales en los que se puede introducir el torso completo de una persona, aunque su fundamento sigue siendo incierto (figura 7.5).



Figura 7.5 Terapia con campos electromagnéticos de muy baja frecuencia.

En ciertos casos algunas investigaciones proporcionan evidencia de que esta terapia pudiera ser de valor, como en el caso de lesiones crónicas y la regeneración neuronal. Sin embargo, otros no han podido encontrar ningún efecto en la curación de los tejidos, y es bastante usual encontrar reportes contradictorios. Quienes critican estas técnicas alegan que muchos de los experimentos que aparecen en la literatura han sido mal diseñados o no ha habido comparación con grupos de control para confirmar los resultados. Otros apuntan que los campos eléctricos inducidos a tan bajas frecuencias son mucho menores a los que por naturaleza existen en las membranas biológicas, por lo que resulta muy cuestionable la efectividad del tratamiento. Especificar la intensidad de

la radiación también es importante: por ejemplo, a partir de estudios celulares se ha estimado que la intensidad de un campo magnético de frecuencia industrial (50-60 Hz) debe ser superior a 0.5 mT para inducir corrientes eléctricas que, al menos, sean de magnitud similar a las que se presentan de forma natural en el cuerpo humano.

En general, aunque hay una tendencia por parte de la comunidad científica a reconocer la eficacia de algunos tratamientos específicos, también existe un sentimiento bastante generalizado de que aún queda mucho por estudiar para lograr optimizar parámetros tales como la intensidad, frecuencia, forma de la onda, tiempo de aplicación y duración del tratamiento. A la par, se necesitan estudios detallados que permitan descartar la aparición de daños colaterales.

Reportes negativos

La radiación a baja frecuencia y baja intensidad no parece tener efectos perjudiciales inmediatos, pero sí a largo plazo. Un reporte bastante completo de la Universidad de Washington en 2004, firmado por *H. Lai* y *N.P. Singh* indica que "... ratas expuestas a campos sinusoidales de 60 Hz por dos horas, a intensidades de 0,1-0,5 mT, mostraron incremento de la rotura de cadenas simples y dobles de ADN en las células del cerebro", y un artículo de revisión de 2014 realizado por el *Bioinitiative Working Group* de la Universidad de Washington, reporta afectaciones genéticas en células expuestas a radiaciones de muy baja frecuencia en el 83% de los casos.

Un artículo de revisión de Elfide et. al. (2017) que abarca un amplio intervalo de

frecuencias, con 162 referencias, concluye que la exposición a los campos electromagnéticos estimula el estrés oxidativo en diversos tejidos y causa cambios significativos en los marcadores antioxidantes de la sangre. Asimismo la radiación da origen a fatigas, dolor de cabeza y deterioro de la habilidad cognitiva y de aprendizaje; desafortunadamente, el artículo sólo repite lo que aparece en las referencias; falta el análisis crítico y, por si fuera poco, las conclusiones del artículo no especifican tiempos de exposición, frecuencias ni intensidades a las que ocurren estos efectos.

No obstante, estos resultados debieran indicarle a los terapeutas magnéticos contemporáneos no aplicar a los sujetos campos de baja frecuencia de forma recurrente, al menos hasta tener mayor información sobre el tema. Por una parte no hay beneficios demostrados mediante ensayos clínicos rigurosos y, por la otra, existe la posibilidad concreta de efectos perjudiciales a largo plazo. Aplicar estas radiaciones en la región abdominal podría acarrear afectaciones en el ADN de óvulos y espermatozoides. Como son entidades unicelulares, se incrementaría así la probabilidad de que el paciente llegue a procrear fetos viables, pero con alguna anomalía genética, que no será detectada hasta mucho después.

Otros 'tratamientos' promovidos como exitosos no han sido más que estafas bien organizadas. En febrero de 2007, en una acción combinada con México y Canadá, la Comisión Federal de Comercio de EE.UU. (*Federal Trade Commission, FTC*) presentó una demanda contra la empresa canadiense *Zoetron therapy*, alegando la ineffectividad

de su terapia electromagnética contra el cáncer. La misma se basaba en la aplicación de campos magnéticos pulsantes para eliminar las células cancerosas. La Zoetron cobraba de 15,000 a 20,000 USD a pacientes norteamericanos, que después debían trasladarse por su cuenta a México. Durante la acción combinada, las autoridades mexicanas clausuraron la clínica en Tijuana donde se efectuaban los tratamientos. A fin de cuentas la Zoetron llegó a un acuerdo con la FTC, en el que la empresa se comprometía a no intentar de nuevo un “negocio” análogo, a cuenta de la suspensión de una multa de 7 650 000 USD, en lo esencial basada en su imposibilidad de cubrirla.

En septiembre de 2013 la *Food and Drug Administration* (FDA) de ese mismo país envió una carta de advertencia de delito a la empresa israelita Curatron Ltd. por comercializar en los EE.UU. equipos generadores de radiación electromagnética capaces, según sus promotores, de ‘re-educar’ los músculos para prevenir infartos, incrementar la circulación y retardar o prevenir la atrofia. (Documento accesible en <http://www.fda.gov/iceci/enforcementactions/warningletters/2013/ucm335343.htm>).

Estos ejemplos indican que, como regla, cualquier supuesto tratamiento electromagnético se debe verificar a partir de la literatura científica, y no sólo por lo que promueven los sitios comerciales.

No obstante, no todos los tratamientos propuestos en la literatura son espurios. Los hay efectivos, o al menos reconocidos como tales, pero muy contados. Un ejemplo es el siguiente: la FDA aprobó en enero de 2013 un tratamiento dirigido a adultos con desor-

denes depresivos que no alcanzan una mejoría significativa con tratamientos convencionales anti-depresivos. La terapia emplea radiaciones electromagnéticas de baja frecuencia (1-10 kHz). (Documento accesible en

http://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf12/k122288.pdf).

Nanomagnetismo y medicina

A partir de principios de siglo, en las revistas científicas especializadas se multiplicaron los artículos que relacionan la nanotecnología con el magnetismo y la medicina; desde ese momento la cantidad de artículos publicados ha ido aumentando de manera sostenida. Una revisión publicada en 2009 por Pankhust lista más de 110 artículos, que se pueden agrupar en diversas vertientes según el tema específico a que están dedicados. Además de las nanopartículas magnéticas que se emplean para realzar el contraste de las imágenes de resonancia magnética, se destacan las siguientes aplicaciones del nanomagnetismo:

- Separación magnética de células u otras entidades biológicas.
- Suministro de fármacos, genes o radionúclidos.
- Métodos de radiofrecuencia para desintegrar tumores por hipertermia.

Separación magnética. Esta técnica emplea nanopartículas compatibles con la entidad biológica deseada para ‘marcarlas’ con alguna sustancia magnética. Tras ser marcadas se separan de las restantes mediante algún dispositivo de separación magnética. Tal dispositivo puede ser algo tan sencillo como un tubo de ensayo, al cual se aplica

un imán permanente para causar la segregación de las partículas magnéticas fuera del fluido portador. Una vez segregadas es fácil eliminar el resto del líquido. Desde luego, existen métodos mucho más rápidos y sofisticados.

Suministro de fármacos, genes o radionúclidos. La desventaja principal de la mayoría de las quimioterapias es que no son específicas. El fármaco se aplica por vía intravenosa y se dispersa en todo el organismo, atacando tanto al tumor como a las células sanas, causando efectos secundarios indeseables. Si los fármacos pudieran colocarse en el lugar específico donde se necesitan, se podrían utilizar con mayor efectividad y con menos peligro de dañar las células sanas. Así sería posible reducir tanto los efectos secundarios como la cantidad empleada de medicamento.

El procedimiento magnético consiste en unir algún producto tóxico para las células (citotóxico) con una nanopartícula magnética biocompatible. La partícula resultante se mezcla con un líquido portador adecuado, que puede ser agua o algún solvente orgánico, para formar un *ferro fluido* con las partículas complejas en suspensión en el líquido. Es común añadir algún estabilizador como el ácido oleico o el ácido cítrico para prevenir la aglomeración de las partículas. El tratamiento en sí consiste en inyectar el ferro fluido en el sistema circulatorio, a la vez que se aplica un campo magnético externo en la región del cuerpo donde se desea concentrar el citotóxico. La intensidad del campo debe variar con mucha rapidez al variar la distancia, pues la fuerza magnética actuando sobre las partículas es

proporcional al *gradiente* del campo magnético (no a su intensidad); es decir, a cuán rápido varía esa intensidad cuando se aleja de la fuente. Una vez que el complejo citotóxico-nanopartícula se concentra en el tumor, el primero se libera mediante cambios en la actividad enzimática, en la acidez (pH) o en la temperatura.

Existen muchos factores que influyen en el resultado final del procedimiento, entre ellos el flujo sanguíneo, la concentración del ferro fluido, el grosor de los tejidos, la distancia hasta el origen del campo magnético, la reversibilidad del enlace citotóxico-nanopartícula y el volumen del tumor.

Desintegración de tumores por calentamiento local (hipertermia). Los primeros intentos datan de 1957, cuando *Gilchrist* y colaboradores impregnaron tejidos con partículas de maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) de tamaño entre 20 y 100 nm, para luego exponerlos a radiaciones electromagnéticas de frecuencia 1.2 MHz. El procedimiento actual no ha variado mucho. Las partículas se conducen hasta el tumor de manera similar al método descrito antes, y luego se aplica radiación electromagnética externa de frecuencia adecuada para lograr el calentamiento de las partículas y el aumento de la temperatura del tumor. Si la temperatura se logra mantener $\frac{1}{2}$ hora o más por encima del umbral terapéutico de los 42 °C, el tumor será destruido.

En la práctica este método ha estado muy restringido, porque resulta difícil no dañar los tejidos sanos adyacentes durante el calentamiento. No obstante, en 2007 se reportaron los primeros estudios clínicos en humanos en el hospital La Charité de Berlín,

realizados en un grupo de 14 pacientes con cáncer en el cerebro. Las nanopartículas se inyectaron por vía directa en el tumor y la radiación aplicada fue de 100 kHz (*J. Neuro-Oncol.* 2007, 81, 53-60). El proceso se controló de manera continua mediante imágenes por resonancia magnética. En junio de 2010 la compañía alemana *Mag Force Nanotechnologies AG* recibió la aprobación para comercializar su terapia *Nano Cáncer*, que combina el uso de nanopartículas de óxido de hierro con la aplicación de radiación de alta frecuencia en pacientes con *glioblastoma multiforme* (GBM), el tumor cerebral más común y maligno que se conoce. Los fabricantes afirman que su técnica sólo afecta al tumor y no los tejidos sanos adyacentes (<http://www.magforce.de/english/products/nano-cancer-therapy.html>).

¿Tratamientos magnéticos contra el dolor?

Tanto los campos electromagnéticos como los magnetostáticos son propuestos en la actualidad por muchos comerciantes como útiles para aliviar el dolor. En particular, la idea de que sea posible reducir el dolor con solo aplicar sobre la parte afectada un imán permanente, sin utilizar aparatos complejos ni ingerir medicamentos, resulta muy seductora. De ser cierta resultaría ideal: tendríamos un método que no causa grandes molestias, no produce efectos colaterales y no cuesta dinero, si se exceptúa la inversión inicial (un imán se puede adquirir incluso de la bocina de un equipo de radio desechado, de un disco duro dañado o de la puerta de un refrigerador inservible). Por si esto fuera poco, el tratamiento mediante un

agente intangible e invisible como el campo magnético posee un aura de misterio que para muchas personas presenta un atractivo adicional.

Sin embargo, no se tiene idea del posible mecanismo mediante el cual el campo magnético, ya bien sea estático o variable en el tiempo, pudiera producir estos efectos. Si fura cierto que el campo magnético estático es efectivo para aliviar el dolor, no se podría considerar que el efecto esté asociado a una disminución de la conductividad eléctrica de los nervios. Hay cálculos que demuestran que para disminuir la conductividad nerviosa en 10 % se necesitan campos miles de veces más intensos que los que proporciona el imán permanente más potente.

A veces se afirma que la aplicación de imanes es efectiva para aliviar síntomas como dolores musculares en el cuello y los hombros, aunque otros les atribuyen más bien un efecto psicológico que de otro tipo sobre el paciente. En el caso que la aplicación va acompañada de masajes, no se han encontrado diferencias decisivas entre el empleo del masaje y el campo magnético aplicado o sin él. Otros estudios han dado por resultado que la aplicación de collares o almohadillas magnéticas no tiene efecto alguno sobre estos dolores. Algo similar ocurre con las supuestas aplicaciones en veterinaria. No se encuentran estudios debidamente comprobados que demuestren que la terapia magnetostática sea útil en el tratamiento de dolencias animales. Una revisión de revistas médicas y veterinarias de 1998, con 65 referencias, no logró encontrar ninguna evidencia definitiva a favor de los campos

magnéticos estáticos (Ramey DW., 1998).

En cuanto a los campos electromagnéticos, algunos estudios realizados sobre el efecto de los campos de baja frecuencia y baja intensidad para aliviar el dolor han proporcionado resultados al parecer satisfactorios; (por ejemplo, ver *Annals of Surgery*. March 2012 - Volume 255 - Issue 3 - p 457–467). Otras referencias indican que esta terapia pudiera resultar útil para aliviar el dolor en el tratamiento de la osteoartritis de la rodilla y la cervical, en dolores persistentes en el cuello y en el tratamiento de mujeres con dolores crónicos en la pelvis. Sin embargo, en otros casos como el de la artritis en el hombro, no se han observado mejorías. Los tratamientos en animales parecen ser menos efectivos que en las personas, aunque no nulos.

No obstante, a pesar de las muchas investigaciones, son pocos los resultados concretos publicados en revistas especializadas. Por ejemplo, en el caso de los tratamientos contra el dolor, un artículo de revisión de Paolucci et al. sugiere – no afirma – que las terapias con campos electromagnéticos alivian el dolor y mejoran la función en pacientes con diversas enfermedades musculoesqueléticas (Paolucci et al. *Journal of Pain Research*, 1385-1400, DOI: 10.2147/JPR.S231778).

Pero otro artículo de revisión de Hongzhi Hu et. al. (2020) sobre desórdenes musculoesqueléticos con 173 referencias (*Bio-medicine & Pharmacotherapy* 131, 110767) llega a la conclusión de que,

“a pesar de la amplia difusión de estas terapias, es necesario profundizar en la selección óptima de los parámetros y en

el conocimiento de los mecanismos involucrados”

pero no da evaluación alguna sobre la calidad de los correspondientes ensayos clínicos. De hecho, el artículo no avala la efectividad de los resultados consultados en la revisión, pues también concluye que

“... con una adecuada selección de los pacientes, indicaciones apropiadas y estrategias terapéuticas homogéneas estas técnicas pudieran ejercer un potente papel para tratar ciertos desórdenes musculoesqueléticos en el futuro”.

Otro artículo publicado por Xiaotian Yang et al. en 2020, de la Universidad de Sichuan (*Physical Therapy Volume 100 Number 7*), expresa en sus conclusiones:

“Al comparar con el placebo, hubo un efecto benéfico de la terapia con pulsos electromagnéticos en el dolor, rigidez y la función física en pacientes con osteoartritis. La duración del tratamiento puede no ser un factor crítico en el manejo del dolor. Se requieren más estudios para confirmar los efectos de los campos electromagnéticos pulsantes en la calidad de vida (del paciente)”.

Pero otro artículo de revisión sobre la osteoartritis en la rodilla, también de la Universidad de Sichuan, (Li CHEN, *J Rehabil Med* 2019; 51: 821–827) con 36 referencias, que además incluye los resultados de un meta-análisis de 8 ensayos clínicos, llega a otra conclusión:

“la terapia de campos electromagnéticos pulsantes es benéfica para mejorar la función física a pesar de que no muestra ventajas en tratar el dolor y la rigidez”,

y también considera que “se necesitan más ensayos clínicos aleatorizados para confirmar estos hallazgos”.

Referente a otras aplicaciones terapéuticas, el artículo de revisión de *Geraets et al.*, publicado en 2019 (*Neuroscience Letters* 699, 212–216) describe un estudio realizado en 20 pacientes sanos, excepto por el dolor neuropático que padecían. El estudio concluyó que, comparados con el placebo, los campos electromagnéticos pulsantes no indujeron efecto alguno al ser aplicados en sesiones de 30 minutos.

Una posible explicación (no demostrada) para estos comportamientos, con terapias que algunos consideran que funcionan y otros no, sería suponer que el tratamiento electromagnético es capaz de afectar la producción de sustancias químicas endógenas; i.e, generadas por el organismo, capaces de regular la transmisión del dolor – unas veces sí y otras no, en dependencia del paciente, con un comportamiento muy similar al del *efecto placebo*, que se analiza en el capítulo siguiente.

A mediados de la década de 1970 se demostró que muchas fibras que inhiben la transmisión del dolor en la médula espinal liberan un neurotransmisor denominado *encefalina*, y que algunas áreas del cerebro que procesan los mensajes de dolor producen otras sustancias químicas inhibitorias, llamadas *endorfinas*. Las investigaciones que se llevan a cabo en la actualidad en otros campos sobre los mecanismos del dolor involucran gran cantidad de ensayos clínicos y miles de pacientes.

Por ejemplo, se ha sugerido cierta relación entre la acupuntura y la liberación de endor-

finas en el organismo, y algunos neurofisiólogos opinan que las agujas podrían desencadenar la liberación de estas sustancias – lo que tampoco ha sido demostrado –. Un meta-análisis estadístico que resume los resultados de muchos ensayos clínicos previos, titulado “*Acupuncture Treatment for Pain: Systematic Review of Randomised Clinical Trials with Acupuncture, Placebo Acupuncture, and No Acupuncture Groups*” publicado en el *British Medical Journal* (*BMJ* 2009; 338: a3115), arrojó las siguientes conclusiones en una población total de 3 025 sujetos al comparar los resultados de la acupuntura contra un placebo: “...se encontró un pequeño efecto analgésico que aparentemente posee poca relevancia clínica, y no puede ser separado con claridad de la predisposición de los practicantes” -el método doble ciego no se aplicó en ningún caso-. “No está claro si las agujas en los puntos de acupuntura, o en cualquier sitio, reducen el dolor de manera independiente del impacto psicológico del ritual del tratamiento”.

No fue posible encontrar estudios similares al anterior empleando campos electromagnéticos en vez de agujas. Por otra parte, como se dijo antes, muchos ensayos clínicos no toman en cuenta la remisión espontánea de los síntomas que tiene lugar en muchas dolencias; tampoco consideran el efecto placebo. Este último consiste en que no pocas personas alegan sentir mejoría cuando se someten a algún procedimiento ineficaz o se les suministra alguna sustancia inerte – el placebo – bajo la falsa pretensión de ser un medicamento que aliviará su dolencia (ver capítulo 8).

¿Son dañinos los campos magnéticos?

Fuentes naturales y artificiales. Vivimos sumergidos en un mar de ondas electromagnéticas de baja intensidad, que barren un amplio espectro de frecuencias. Radiaciones provenientes de la red comercial, de radio, televisión y telefonía atraviesan nuestros cuerpos en todo momento; todos los días y cada segundo de cada día, mientras comemos, dormimos, nos bañamos o nos sentamos frente al televisor. Estas ondas son generadas por las redes o tendidos eléctricos, los radares, las redes de comunicación de todo tipo y algunos equipos industriales o del hogar como los televisores, los hornos de microondas, las cocinas de inducción y los teléfonos celulares. Pero hay una gran diferencia entre los efectos causados por la radiación de alta intensidad y la de baja intensidad. A partir de cierta intensidad la radiación puede llegar a ser muy dañina; por debajo de cierto valor resulta inocua. De aquí que cuando se habla de los efectos de la radiación electromagnética resulta indispensable establecer con suma precisión los límites de intensidad y el intervalo de frecuencias de que se habla.

La radiación proveniente de fuentes naturales es de muy baja intensidad, mucho menor que la generada por las fuentes creadas por el hombre. En la superficie terrestre, en el intervalo de 1 MHz a 10 GHz, su intensidad es menor de 0.00001 watt/m^2 . La proveniente de fuentes artificiales se puede originar tanto en la comunidad como en las viviendas o los puestos de trabajo.

En la comunidad. La mayor parte de esta radiación se origina en las antenas emisoras de radio, TV, telefonía y otros equipos de

telecomunicaciones. Su valor es, en promedio, inferior a la que proviene de los aparatos de radio o televisión en el hogar. Según estudios realizados, los niveles promedio de radiación en las grandes ciudades se sitúan en torno a los 0.00005 w/m^2 , y solo 1 % de la población se halla expuesto a intensidades superiores a $0,1 \text{ w/m}^2$. Resulta obvio que en las locaciones ubicadas en las inmediaciones de transmisores de gran potencia, o de sistemas de radar, se pueden registrar niveles más elevados.

En las viviendas. Aquí las fuentes de radiación incluyen los hornos de microondas, las cocinas de inducción, los teléfonos móviles y celulares, los dispositivos de alarma anti-robo y los televisores. Los hornos de microondas, que en principio podrían originar niveles de radiofrecuencias muy elevados, están sujetos a normas estrictas que limitan las fugas de radiación. No ocurre así con las cocinas de inducción, para las que no existen normas internacionales, a pesar de son capaces de dispersar niveles importantes de radiación en todas direcciones. Con la excepción de las cocinas de inducción, el nivel básico de radiación de los aparatos electrodomésticos es bajo en general, de unas cuantas decenas de microwatt por metro cuadrado ($\mu\text{W/m}^2$).

Puestos de trabajo. Existen procedimientos industriales y médicos que utilizan equipos capaces de generar radiación electromagnética de gran intensidad como, por ejemplo, los calentadores dieléctricos empleados para laminación de maderas y sellado de plásticos, los calentadores por corrientes de inducción, los hornos de microondas para uso industrial, los equipos de diatermia para tra-

tar el dolor, y los aparatos de electrocirugía para cortar y soldar tejidos. Siempre existe la posibilidad de que el personal que trabaja con esos sistemas sufra una exposición excesiva, en especial en las actividades relacionadas con el calentamiento o sellado industrial mediante radiofrecuencias o con el manejo de unidades de diatermia. La intensidad de la radiación en las proximidades del equipo utilizado puede ser superior a varias decenas de watt/m^2 .

Efectos biológicos

A diferencia de la radiación UV que causa la fotodegradación de la piel, o los rayos X y gamma, capaces de ionizar átomos y moléculas, las microondas no causan ionización. Es por eso que durante mucho tiempo ha existido la creencia de que solo son perjudiciales en intensidades muy elevadas, produciendo quemaduras, cataratas, o esterilidad temporal. Sin embargo, con la proliferación de dispositivos que al funcionar generan este tipo de radiación, cada día hay más personas preocupadas por estudiar de manera rigurosa las posibles consecuencias de una exposición prolongada a baja intensidad.

Se produce un efecto biológico cuando la exposición a la radiación origina algún cambio fisiológico perceptible o detectable en animales o vegetales. El efecto puede ser perjudicial para la salud o no. Será perjudicial cuando sobrepase la capacidad normal de compensación del organismo y dé origen a algún proceso patológico. Aunque ocurra algún efecto biológico, este puede ser inocuo, e incluso benéfico. Así, como se comentó antes, la producción de vitamina D por el organismo en respuesta a la radiación

solar en la piel es provechosa. También lo es el incremento del riego sanguíneo cutáneo en respuesta a un ligero calentamiento producido por la luz solar directa, que proporciona una sensación cálida en un día frío. Sin embargo, otros efectos, como las quemaduras solares o la fotodegradación y el cáncer de piel resultan perjudiciales.

Investigaciones clínicas

Se han llevado a cabo gran número de estudios acerca de la exposición de las personas a la radiación electromagnética. En su mayoría tratan sobre la incidencia en el cáncer de niños y adultos, ya que en ocasiones algunos investigadores han encontrado correlaciones que sugieren un incremento del riesgo de contraer leucemia en trabajadores expuestos a niveles altos. Sin embargo, no se ha encontrado esta correlación en estudios posteriores, aunque los trabajadores hayan sido expuestos a muy altos niveles de radiación, y existen dudas de si los resultados anteriores se debían en realidad a los campos electromagnéticos o a algún otro agente como, por ejemplo, a la presencia de agentes químicos también relacionados con el trabajo de los obreros.

Tampoco se han encontrado evidencias decisivas en investigaciones epidemiológicas, realizadas en sectores residenciales, para detectar la posible influencia de los campos electromagnéticos en la incidencia de cáncer en los niños. Estas investigaciones son muy complejas. Deben tomar en cuenta parámetros como la distancia de la vivienda hasta las líneas de alta tensión y la presencia de otros emisores en las cercanías, incluyendo los equipos electrodomésticos.

La consecuencia más importante de la ex-

posición a la radiación con frecuencias superiores a 1 MHz y menores de 10 GHz es el calentamiento que causa en los tejidos, al desplazar iones y moléculas a través del medio que los rodea. Incluso a niveles muy bajos de intensidad, la energía de las radiofrecuencias produce pequeñas cantidades de calor, que son absorbidas por los procesos termorreguladores normales del organismo sin que el individuo lo perciba. Si la fuente de radiación es intensa y amplia, puede hacer que aumente la temperatura del cuerpo, el flujo sanguíneo y la sudoración.

Resultados experimentales muestran que la exposición a la radiación de intensidad que no llega a producir calentamiento puede alterar la actividad eléctrica del cerebro en gatos y conejos, al modificar la movilidad de los iones. Este efecto se ha verificado en tejidos y células aisladas. Otros estudios sugieren que la acción de la radiación cambia el ritmo de proliferación de las células, altera la actividad de ciertas enzimas o afecta al ADN celular. Sin embargo, esos efectos no están demostrados en su totalidad, ni sus consecuencias para la salud humana se conocen lo suficiente como para restringir por ese motivo los límites permisibles de exposición por debajo de los ya existentes.

Un artículo resumen de la literatura publicado por D.A. McNamee y colaboradores sobre los efectos cardiovasculares de los campos electromagnéticos de baja frecuencia en el *International Archives of Occupational and Environmental Health* en 2009 concluyó lo siguiente: “Los efectos de la exposición a los campos electromagnéticos de frecuencia extremadamente baja sobre los parámetros cardiovasculares... están in-

determinados”.

Estudios epidemiológicos han analizado los valores de la radiación en los lugares de trabajo y su efecto sobre las variaciones en la frecuencia cardíaca para tratar de predecir ciertas patologías cardiovasculares. Otros estudios de laboratorio se han enfocado en indicadores macrocirculatorios como la frecuencia del pulso, variabilidad y presión sanguínea. Sin embargo, los intentos de reproducir los resultados de estos estudios no han sido exitosos; el diseño de los experimentos, la pequeña cantidad de sujetos y las variables confusas han obstaculizado el progreso hasta el momento. Un artículo de revisión de Hirata et al. de 2021 sobre la exposición a los campos electromagnéticos de radiofrecuencias, con 142 referencias, tampoco ofrece conclusiones.

Teléfonos celulares y cáncer. En 2009, el Instituto del Cáncer de la Universidad de Pittsburg emitió un comunicado alertando sobre los teléfonos celulares y su posible relación con el cáncer del cerebro. Entre las 10 medidas propuestas, la principal aconseja evitar al máximo su uso por los niños, quienes se consideran en especial vulnerables por poseer un cerebro en desarrollo, aún no formado en su totalidad.

Firmado por un Comité Internacional de Expertos, el comunicado no afirma que existan evidencias categóricas de que los celulares son peligrosos para niños o adultos, sino que hay indicios que sugieren la conveniencia de limitar su uso hasta que se alcancen conclusiones definitivas al respecto. Otras recomendaciones del Comité son: alejar el celular mientras se duerme (dirigido en lo esencial a las gestantes), no usarlo

en autobuses u otros lugares donde numerosas personas puedan ser expuestas a las radiaciones, y no entablar conversaciones prolongadas. Las recomendaciones son igual de válidas para cualquier teléfono móvil o inalámbrico. Autoridades de la India, Francia e Inglaterra también hicieron suyas la advertencia relativa a los niños, emitiendo alertas al respecto.

El tema de los celulares y el cáncer ha sido muy debatido desde sus mismos inicios, pues aunque el celular transmite a muy baja intensidad, la cercanía de la antena emisora a la cabeza hace que el usuario reciba cantidades significativas de radiación en una región muy sensible de su cuerpo. Ya en mayo de 1993, David Reynard, de La Florida, estableció una demanda contra la *NEC Corporation*, argumentando que el tumor cerebral de su esposa fue causado por las radiaciones de su celular. El caso fue desestimado en los tribunales por falta de evidencias. En otro litigio en el 2000, el doctor Chris Newman, neurólogo de Baltimore, demandó a varias compañías de teléfonos convencido de que su hábito de usar el celular durante 9 años causó el cáncer en su cerebro. Según los médicos de Newman, el tumor se localizó “en la posición anatómica exacta donde la radiación del teléfono incidía sobre su cráneo”. Más tarde la demanda fue rechazada por una corte de apelaciones en 2003, también por falta de evidencias.

De las investigaciones publicadas sobre el tema, la más completa apareció en 2006, en el *Journal of the National Cancer Institute de Estados Unidos*. Se analizaron 420,000 usuarios daneses, sin encontrar un incremento del riesgo de cáncer. Miles de ellos

habían utilizado el celular por más de 10 años. Un estudio similar publicado ese año en la Universidad de Utah, referido en este caso a varios miles de pacientes con tumores en el cerebro, aportó iguales resultados. Otro estudio francés de 2007 llegó a la misma conclusión, aunque en este caso se señaló la “posibilidad de un incremento de riesgo entre los usuarios más adictos”, pendiente de verificar en investigaciones posteriores. Y en cuanto a si es cierto o no que los niños absorben más radiación en el cerebro que los adultos, en un amplio resumen publicado en 2005 solo aparecen 3 investigaciones reportando una mayor absorción en cabezas pequeñas, mientras que en otras 10 no se encontraron diferencias entre adultos y niños.

Evidencias más recientes han echado por tierra estas preocupaciones. Un artículo de revisión de Okechukwu publicado en 2020, con 55 referencias, concluye que la radiación en el intervalo de radiofrecuencias – incluida la emitida por los teléfonos celulares – no muestra evidencias sustanciales que la relacionen con la patogénesis de los tumores cerebrales, y desestima la necesidad de seguir investigando los posibles efectos térmicos y no térmicos de estas radiaciones sobre la estructura celular, la barrera hemo-cerebral, las funciones endoteliales, el sistema inmune o la excitabilidad del sistema nervioso.

De hecho, hasta el momento el único problema de salud que puede asociarse al uso de estos teléfonos es el incremento de accidentes de tránsito causados por la distracción de los choferes que los usan y conducen a la vez.

Normas de seguridad

Existen normas internacionales para garantizar que los equipos emisores de radiofrecuencias no dañen a las personas y que su uso no interfiera con el de otros equipos. La Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (*International Commission on Non Ionizing Radiation Protection* ICNIRP), organización no gubernamental reconocida por la Organización Mundial de la Salud, ha establecido límites admisibles para la exposición a campos de radiofrecuencias. Las directrices de la ICNIRP se prepararon sobre la base del examen colegiado de todas las publicaciones científicas, incluidas las relativas a los efectos térmicos y no térmicos. Las normas se basan en la evaluación de los efectos biológicos que tienen consecuencias demostradas para la salud, y están sujetas a cambios a medida que avanza la investigación y el conocimiento sobre estos temas. Los niveles de radiación observados en el entorno habitual normal se encuentran en la actualidad muy por debajo de los límites admisibles de radiación de la ICNIRP.

Los niveles seguros de exposición a la radiación electromagnética también se encuentran reglamentados por normas nacionales en la mayoría de los países. La profundidad de penetración de la radiación en el tejido depende de la frecuencia y es mayor para las frecuencias más bajas, por lo que los niveles de exposición permisibles varían mucho con la frecuencia. Para 50 y 60 Hz las recomendaciones a exposiciones de corta duración varían entre 10-30 kV/m para los campos eléctricos y 1-5 mT para los magnéticos. Para exposiciones de larga

duración (24 horas) los valores límites permisibles son mucho menores, de 5-10 kV/m y 0,1- 0,5 mT (*Documento NTP 234 del Instituto de Seguridad e Higiene del Trabajo, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España, en <http://www.mtas.es/insht/index.htm>*).

Si la persona es sometida a valores muy intensos de radiación se pueden producir dolores de cabeza, náuseas, atontamiento y, eventualmente, un colapso circulatorio y la pérdida de la termorregulación del cuerpo, llegando a ser fatal en casos extremos. La absorción de energía se determina como un coeficiente de absorción específica en una masa tisular específica; se mide en watt por kilogramo (W/kg). Para que se produzcan efectos perjudiciales se requiere un coeficiente de absorción igual o mayor a 4 W/kg. Esos niveles de energía se pueden encontrar a la distancia de algunas decenas de metros de antenas potentes de frecuencia modulada pero que, por lo general, están situadas en zonas inaccesibles, en el extremo de altas torres. No obstante, las personas que trabajan en los sectores de la radiodifusión, transporte y comunicaciones, pueden estar expuestas a campos de intensidad elevada cuando realizan su actividad muy cerca de antenas transmisoras y sistemas de radar.

Un importante subgrupo de esos trabajadores es el personal militar. En la mayoría de los países, el uso para fines civiles y militares de los campos de radiofrecuencias está sujeto a normativas muy estrictas.

Si la radiación no está distribuida de manera uniforme por todo el cuerpo, puede ocasionar elevaciones locales de la temperatura. Algunas zonas, como por ejemplo el ce-

rebros, son más sensibles que otras. El aumento local de la temperatura en los tejidos cerebrales puede dar origen a respuestas biológicas inapropiadas; el calentamiento excesivo del globo ocular puede llegar a causar la opacidad del cristalino. Cuando la frecuencia se encuentra por encima de 10 GHz la absorción de la radiación solo tiene lugar en la superficie de la piel y en la córnea. Para que la exposición a frecuencias de más de 10 GHz produzca efectos perjudiciales para la salud, como cataratas oculares y quemaduras cutáneas, se requieren densidades de potencia superiores a $1\,000\text{ W/m}^2$. Estas potencias no se presentan en la vida diaria y solo tienen lugar en las inmediaciones de radares potentes. Las normas internacionales de seguridad prohíben la presencia humana en esas zonas.

La radiación electromagnética pulsante interacciona con los tejidos de forma algo diferente a la radiación continua. Puede origi-

nar sensaciones auditivas, quizás a causa de la rápida expansión termoelástica del cerebro y a la creación de una onda de sonido dentro de la cabeza. La radiación de frecuencia inferior a 1 MHz induce cargas y corrientes eléctricas que pueden estimular las células en diversos tejidos nerviosos o musculares.

En resumen: las corrientes eléctricas se encuentran presentes en el organismo como parte normal de las reacciones químicas propias de la vida. Si los campos de radiofrecuencias inducen corrientes que excedan ese nivel de base en el organismo de manera significativa, es posible que se produzcan efectos perjudiciales para la salud. Se han propuesto diversos mecanismos para explicar los posibles efectos de la radiación en los tejidos, pero hasta el momento esas propuestas no resisten el escrutinio científico.

CAPÍTULO 8. PLACEBOS Y PSEUDOCIENCIA

El efecto placebo

El *placebo* es cualquier sustancia inerte que se utiliza con regularidad en los ensayos clínicos en vez del medicamento o terapia activa. Un grupo de pacientes recibe la terapia y otro (grupo de control) recibe el placebo. Es un hecho muy conocido que una cantidad significativa de pacientes del grupo de control alegará sentirse mejor (*efecto placebo*). Fue descubierto por el anesthesiólogo norteamericano *Henry Knowles Beecher* en 1955, quien al realizar un estudio en 1000 pacientes encontró mejoría en 35 % de los que recibieron el placebo. El efecto contrario, el *nocebo*, mucho menos estudiado que el placebo, consiste en que aunque el fármaco o procedimiento aplicado sea inerte o carezca de efectividad, hay casos donde se presentan consecuencias dañinas o desagradables muy reales, a nivel bioquímico, fisiológico, emocional y cognitivo. Según el Dr. *Morton Tavel*, de la Escuela de Medicina de la Universidad de Indiana,

“El efecto placebo se define como cualquier mejora de los síntomas o indicios tras una intervención físicamente inerte. Sus efectos son en especial intensos en el alivio de síntomas subjetivos tales como el dolor, la fatiga y la depresión. Presente en un intervalo variable en todos los encuentros terapéuticos, se intensifica por el contacto manual y una comunicación verbal cercana entre quien aplica los cuidados y quien los recibe. Así, puede usarse en beneficio de los pacientes, pero también proporciona una vía ancha para “sanadores” inescrupulosos

de todo tipo (...). Mucho menos estudiado, el “efecto nocebo” define respuestas negativas a las intervenciones con placebos. Este último efecto puede llegar a ser muy intenso, y es posible que sea la causa de muchos trastornos a los que se atribuye un origen psíquico” (*The American Journal of Medicine* (2014) 127, 484-488).

Aunque por regla general el efecto placebo se presenta solo en un porcentaje reducido de pacientes, hay mucho personal de salud que comparte la noción de que sólo puede ser provechoso o nulo para el paciente, pero nunca dañino. Sin embargo, un reciente artículo de revisión con 134 referencias señala la presencia conjunta y significativa de ambos efectos, el *placebo* y el *nocebo*; es decir, la aparición de *eventos adversos* en los pacientes cuando se administra un placebo (figura 8.1).



Figura 8.1 Efecto placebo y efecto nocebo.

Esto se vio reflejado con mucha claridad en los ensayos clínicos realizados durante la vacunación contra la pandemia de la COVID-19 (*Haas JW, JAMA Netw Open* 5(1):e2143955). Los síntomas más comunes son náuseas, sequedad en la boca, somnolencia, ansiedad, nerviosismo, dolor de cabeza, falta de aire, mareo, sonrojos, flatulencia, disminución de la presión arterial y sensación de pesantez (*Pardo Cabello et.*

al., *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology* (2022) 395:1343–1356).

Para evitar los posibles efectos de la sugestión, tanto del paciente como de la persona que evalúa los resultados, en la actualidad los ensayos clínicos rigurosos se realizan de forma aleatoria, a la ciega o doble ciegos. La idea básica es que los tratamientos son asignados al azar a los sujetos de investigación, con el fin de que los diferentes grupos sean equivalentes desde el punto de vista estadístico. En un ensayo a la ciega los pacientes no saben si han recibido el fármaco activo o el placebo; en un estudio doble ciego quienes aplican el tratamiento tampoco lo saben. En algunos casos se considera incluso el estudio triple ciego, donde además el investigador o el estadístico que analiza los datos no sabe a cuál grupo pertenece cada paciente.

Resultados experimentales recientes sugieren que muchas terapias que alegan “sanar” o curar alguna dolencia, aunque carecen de evidencia científica, lo que hacen en realidad es activar en el cerebro procesos químicos capaces de tranquilizar al paciente y sedar el dolor. De esa manera la supuesta ‘terapia’ proporciona un alivio pasajero al sujeto, o quizás una breve sensación de bienestar, similar a la que producen algunos fármacos. El mecanismo no funciona de la misma forma en todas las personas y, desde luego, esas terapias podrán aliviar el dolor, pero en realidad serán incapaces de curar la enfermedad. Esto último representa un grave riesgo para la salud del paciente cuando la dolencia es progresiva y no es identificada a tiempo a causa de la ilusoria terapia.

En 2005, la revista científica *The Journal of*

Neuroscience (vol. 25, No. 34) reportó un estudio realizado aplicando técnicas de la reciente *tomografía de emisión de positrones* (TEP) y de formación de imágenes por resonancia magnética (IRM) de forma conjunta (figura 8.2). Se analizó el cerebro de 14 hombres jóvenes sanos a los que se les inyectó en la mandíbula una disolución salina concentrada, muy dolorosa. Las edades oscilaban 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*. Las endorfinas son generadas por el propio organismo en respuesta a determinados estímulos externos; son capaces de unirse a los denominados *receptores μ -opiáceos* en el cerebro, células nerviosas especializadas en transformar señales fisicoquímicas a impulsos eléctricos, para anular la transmisión de las señales de dolor. La heroína, morfina, metadona y otros narcóticos calman el dolor actuando de manera similar.

Durante el proceso los cerebros de los voluntarios fueron escaneados usando la TEP, que permite detectar la actividad de los μ -opioides endógenos en el cerebro. Esta técnica 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 rayos gamma. Estos últimos se detectan con un escáner y se registran por vía digital. El carfentanil compite con los μ -opioides para ocupar un lugar en los receptores de las células nerviosas. Mientras más débil sea la actividad del carfentanil y la correspondiente señal positrónica en una región del cere-

bro, mayor será la actividad de los μ -opiáceos y viceversa, lo que permite obtener la imagen de lo que sucede en el cerebro.

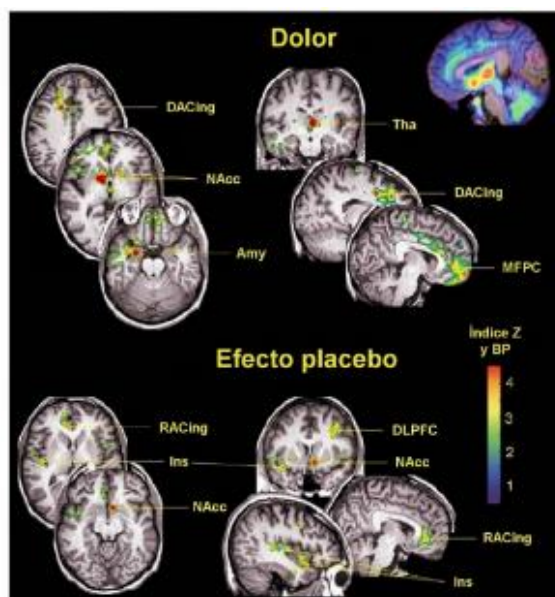


Figura 8.2 Imágenes combinadas de Resonancia Magnética IRM + Tomografía de emisión de positrones TEP. En el idioma original, DA-Cing: dorsal anterior cingulate; RACing: rostral anterior cingulate; MPFC: medial prefrontal cortex; DLPFC: dorso lateral prefrontal cortex; Nacc: nucleus accumbens; Tha: medial thalamus; Amy: right amígdala; Ins: insular cortex. En el recuadro superior a la derecha se muestra un mapa de la distribución de receptores μ -opioides en el cerebro. (*The Journal of Neuroscience*, August 24, 2005, 25(34):7754–7762).

Una vez inyectada la disolución salina, a los voluntarios se les suministró cada 4 minutos una inyección intravenosa de un supuesto 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 se incrementó lentamente la con-

centración inyectada en la mandíbula, con el fin de mantener a los participantes con un mismo índice de dolor mientras el escaneo proseguía.

Todos los sujetos mostraron un aumento de la activación de su sistema de endorfinas después de que se les administró el placebo. La cantidad de disolución salina adicional que se necesitó para mantener la misma sensación de dolor fue en aumento, una clara indicación de una reducción de la sensibilidad al dolor de la que el sujeto no tenía conocimiento.

Las imágenes obtenidas por IMR del cerebro de los voluntarios se compararon con sus sensaciones de dolor y con las imágenes TEP, lográndose determinar con precisión cuáles fueron las regiones del cerebro que se activaron durante el experimento, y en qué momento lo hicieron. La figura 8.2 se compuso utilizando ambas técnicas de escaneo (IRM y TEP); la parte superior muestra la acción de los μ -opioides cuando los voluntarios experimentaban dolor, mientras que en la inferior aparece lo que ocurrió cuando pensaban que estaban recibiendo el calmante (en realidad el placebo inerte). La actividad cerebral reflejó a la perfección los cambios en la intensidad del dolor que los participantes dijeron sentir.

Estudios previos ya habían demostrado que el cerebro reacciona liberando endorfinas cuando las personas reciben algún tratamiento simulado contra el dolor. Como se dijo antes, este hecho (efecto placebo) es bien conocido desde los años 50, y es forzoso 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, con argumentos muy sólidos, a la pregunta de por qué tantas personas alegan recibir alivio de terapias y remedios que no aportan algún beneficio físico real.

“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 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”. (*Zubieta et al., 2005*).

No todos mostraron similar sensibilidad al placebo. Nueve de los participantes fueron clasificados como de alta respuesta al placebo, ya que había más de 20 % de diferencia entre los resultados con y sin placebo; en otras palabras, el efecto placebo era fuerte. Los otros cinco fueron clasificados como de baja respuesta.

Es obvio que se necesitarán muchos más experimentos con diversas condiciones y sujetos para tener una visión completa del tema. Pero estos resultados indican de forma incontrovertible que la sugestión juega un papel primordial en las pseudoterapias que carecen de una sólida base experimental. El solo hecho de que el sujeto crea que se está aplicando una cura efectiva es suficiente para activar el mecanismo de los μ -opioides y hacer que este se sienta mejor. El experimento también explica por qué estos procedimientos no funcionan de la misma manera en todas las personas.

Más reciente, en octubre de 2009, la revista *Science* publicó un reporte del departamento de Neurociencias, Universidad Médica de Hamburgo, que describe los resultados de un estudio mediante resonancia magnética funcional de alta resolución (Figura 8.3). Su objetivo era comprobar la hipótesis de que las respuestas asociadas a las estimulaciones dolorosas que afectan los niveles de oxígeno en sangre, en la médula cervical humana, se reducen con la aplicación de un placebo. Como resultado, se encontró que el nivel de oxígeno en la sangre en el grupo de ensayo se redujo en forma significativa en comparación con el grupo de control. Los autores consideran que este resultado abre nuevas vías para confirmar la efectividad de diferentes tratamientos en diversos tipos de dolor, incluyendo el crónico.

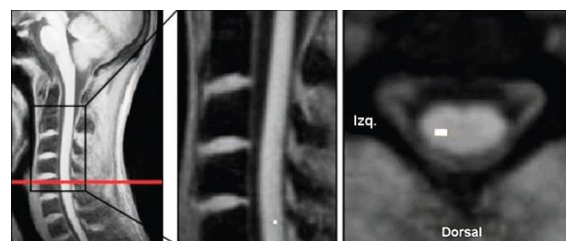


Figura 8.3 Estudio del efecto placebo en imágenes de RMN de la espina dorsal (*Science*, vol. 326, p.404, 2009).

La ciencia... y lo que no lo es

Los resultados científicos no siempre son ciento por ciento correctos. La ciencia avanza por aproximaciones a la realidad, y la gran mayoría de las veces los resultados de cualquier investigación son perfectibles. En ocasiones ocurre que algún experimento, realizado al parecer con todas las exigencias del caso, proporciona resultados que no pueden ser reproducidos por otros.

La mayoría de las veces es porque se obvió algo que no se podía obviar. Y en unos pocos casos se comete fraude a sabiendas. No son muchos, pero los hay; *de todo hay en la viña del señor*, como dice el dicho. En cualquier caso, el falso resultado se desecha y el avance hacia nuevos conocimientos continúa sin mayores contratiempos.

En esta sección se analizan otros ‘estudios’ que en realidad no corresponden a resultados científicos. No son aproximaciones a la realidad, pues se reducen a exponer afirmaciones ilusorias, sin evidencias experimentales que las corroboren. No es tarea de la ciencia demostrar que tales aseveraciones son erróneas. La responsabilidad de mostrar evidencias corresponde a quien propone lo novedoso, no al resto del mundo, como a veces algunos ponentes piensan acerca de sus proposiciones.

En la ciencia cada afirmación debe estar sustentada por la evidencia experimental rigurosa; las afirmaciones no basadas en evidencias no pueden catalogarse como ciencia. Cuando contra viento y marea algunos tratan de dar explicación a proposiciones no demostradas, no es raro que a falta de explicación científica deriven hacia la prédica de algún tipo de magia mística – a veces disimulada, a veces patente – tratando de presentarla como ciencia. Para ello mezclan palabras de la jerga científica al azar, sin venir al caso, inventadas a veces, y sin un sentido concreto que refleje la realidad de lo que se desea describir.

Aseveraciones de este tipo son, por ejemplo, que las pirámides concentran los campos magnéticos (apareció en un periódico nacional en la página de información médi-

ca); que la cercanía a las redes eléctricas comerciales produce dolores de cabeza y que si usted le coloca una antena a una pirámide y se mete dentro, recibirá una energía beneficiosa del cosmos (ambas aseveraciones publicadas nada menos que en revistas médicas que preferimos no citar).

Hay pseudociencias que se ‘modernizan’. Hoy día, en pleno siglo XXI, es posible encontrar personas que, sin ser médicos, alegan haber descubierto ‘sistemas curativos’ y creado instrumentos y softwares que permiten diagnosticar en forma automática muchas enfermedades; ya antes comentamos que es usual que las afirmaciones ilusorias se vayan adaptando al avance de la ciencia, aunque sin perder su carácter fantástico.

También se imparten cursos internacionales de unos pocos días de duración en los que algún “inspirado” garantiza que, sin tener conocimientos de medicina, usted puede aprender a diagnosticar muchas enfermedades utilizando esos instrumentos (¿Para qué entonces hace falta un médico o estudiar medicina varios años?). Estas aseveraciones constituyen una abierta incitación al intruismo y a perjudicar a los incautos mediante falsos diagnósticos.

A veces, tanto los sistemas curativos como los instrumentos promovidos no son más que plagios de métodos ya descalificados con anterioridad. Un ejemplo muy ilustrativo es el sistema de electrodiagnóstico de *Reinhold Voll*, un médico alemán que se dedicaba a la acupuntura allá por la década de los 50 del siglo pasado. En 1958 Voll combinó, de manera arbitraria, la acupuntura con mediciones de la conductividad eléc-

trica en la piel y supuestos “canales energéticos” inexistentes para crear su primer instrumento de diagnóstico, el *Dermatrón*, que se muestra en la figura 8.4A. El instrumento incluía una punta de prueba que se aplicaba en la piel e indicadores de aguja – la tecnología accesible en la época – para medir corrientes y voltajes, asociando de manera ilusoria los resultados de las mediciones en los puntos de acupuntura a diversas enfermedades.

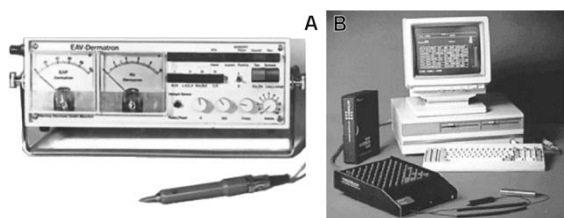


Figura 8.4 Equipo de electrodiagnóstico de Voll. (A) Modelo original. (B) Modelo actualizado por alguno de sus imitadores. La ausencia de fundamento científico es la misma en ambos casos.

En la actualidad está muy claro que, con independencia de que no hay justificación para esos procedimientos, el resultado de las mediciones de Voll depende de factores ajenos a sus postulados como, por ejemplo, la fuerza con que se aplica la punta de prueba o el grado de humedad de la piel en el momento de la medición.

Más tarde aparecieron muchos imitadores y equipos de todo tipo. En la figura 8.4B se muestra uno de estos equipos, adaptado a las técnicas modernas de medición. Los antiguos indicadores de aguja han sido sustituidos por una computadora y un software que “diagnostica” la enfermedad de forma automática. A pesar de la nueva indumentaria, la falta de fundamento científico es

exactamente la misma que en el siglo pasado.

Hace mucho que el método de Voll fue declarado fraudulento en Estados Unidos. En un artículo que se puede consultar en la WEB, el médico Stephen Barret expresa:

“Los dispositivos descritos (...) se usan para diagnosticar problemas de salud inexistentes, seleccionar tratamientos inapropiados y defraudar a las compañías de seguros. Los practicantes que los usan son, o ilusorios, o deshonestos, o ambas cosas. Estos dispositivos debieran ser confiscados y los practicantes que los usan llevados a juicio. Si usted se encuentra con uno de estos dispositivos, por favor repórtelo al fiscal general del estado, a cualquier buró de licencias, a la FDA, la FTC, el FBI, el *Better Bussines Bureau* o cualquier compañía de seguros a la cual el practicante envíe los reclamos que involucren el uso de este dispositivo (2012, www.quackwatch.com/01QuackeryRelatedTopics/electro.html)”

Las afirmaciones que pretenden ser científicas, pero que en realidad no lo son, ya que no se derivan de experimentos o ensayos clínicos rigurosos y no han sido sometidas a la crítica internacional, se califican en lo general como *pseudociencia*. En toda pseudociencia es usual encontrar una sutil apropiación de términos científicos conocidos que designan, de forma tergiversada, supuestos objetos o propiedades cuya existencia ni siquiera está comprobada. De esa manera se trata de dar apariencia científica a lo que no lo es, presentando las creencias como si fueran evidencias. Algunos piensan

que este comportamiento engañoso no siempre se hace a propósito o de forma consciente, sino por desconocimiento acerca de la ciencia y su metodología. Sin embargo, resulta muy dudoso tal derroche de ingenuidad cuando la mayoría de las veces la práctica de tal “terapia” está asociada a un obvio ánimo de lucro. Otras veces, aunque no hay beneficios económicos inmediatos, el objetivo principal es intentar ganar prestigio y reconocimiento social, a como dé lugar y con muy poco esfuerzo.

En la práctica resulta imposible encontrar a un pseudocientífico basando sus afirmaciones en una revisión bibliográfica de artículos científicos publicados en revistas arbitradas. Y si hay referencias, son de clínicas privadas de dudosa reputación, o de sitios mágicos y esotéricos en la WEB, no respaldados por institución alguna.

Cuando esas nociones erróneas se popularizan en determinados círculos, se crea una especie de subcultura marginal pseudocientífica, que pretende ser ciencia sin aplicar sus métodos. Dentro de estos círculos se llevan a cabo ‘congresos científicos’ que de ciencia nada tienen; se organizan cursos de postgrado e incluso se otorgan títulos. Se crea así una especie de comedia de absurdos, que lo sería en realidad si todo el asunto no concluyera en perjuicio de los pacientes.

En la Internet suelen aparecer reportes de personas que alegan haber recibido daños por sustituir la medicina convencional por alguna terapia alternativa no demostrada. Y dado el carácter marginal de estos procedimientos, es posible inferir de manera razonable que la mayoría de estos daños quedan

sin registrar, pues las estadísticas pseudocientíficas simplemente no existen.

¿Qué es la pseudociencia?

En el *Oxford American Dictionary* aparece una definición breve y precisa. Pseudociencia es cualquier conjunto de conocimientos, métodos, creencias o prácticas que, alegando ser científicas, en realidad no se rigen por el método científico. La figura 8.5 muestra el esquema básico del método científico en las ciencias naturales y otras afines. Cuando se tiene noción de un determinado comportamiento (observación), lo usual es establecer una suposición razonada acerca de por qué ocurre y cuáles son sus causas (hipótesis). Es necesario entonces repetir la característica estudiada (o parte de ella) de manera controlada (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.

La frase *de manera controlada* tiene importancia primordial. Es necesario controlar todos los factores que pueden afectar el resultado para llegar a conocer si lo que se supuso al inicio es cierto o no, ya que algún otro factor no tomado en cuenta podría ser el responsable del resultado observado. (Y no se obtendría un resultado confiable del experimento en cuestión). Por otra parte, si los resultados de un experimento no son reproducibles en otros laboratorios, por otros operadores y utilizando otro instrumental, no se podrá afirmar cosa alguna de los resultados obtenidos. Significa que el resultado particular obtenido fue, si no erróneo, cuando más casual. Es un indicio de que el experimento no fue controlado lo suficiente

y hubo factores ajenos, no identificados, que afectaron el resultado.

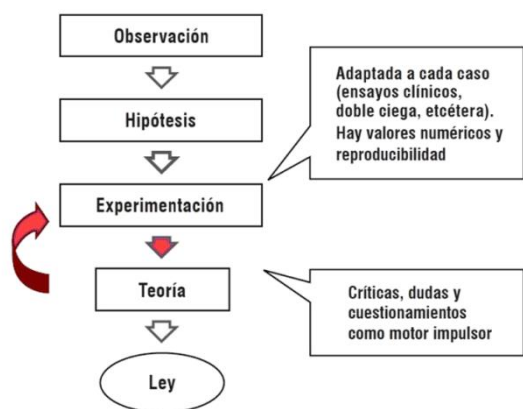


Figura 8.5 Esquema del método científico.

Una vez que se tiene el resultado de un experimento, – que puede confirmar o negar la hipótesis –, es necesario 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 flecha curva en el esquema de la figura 8.5). 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 proceso de divulgación internacional de resultados, a través de publicaciones en revistas científicas arbitradas, críticas, errores y rectificaciones. Y puede ocurrir que teorías muy bien establecidas deban ser reformadas, al detectarse alguna nueva propiedad o comportamiento que la teoría existente no

es capaz de explicar de forma satisfactoria. Cuando la teoría se hace lo suficiente amplia y sólida, cuando es capaz de dar explicación a gran cantidad de características y relaciones de causa-efecto, y también de rebatir con racionalidad cualquier crítica, se llega a la ley. Las leyes tampoco son eternas. Muchas veces se hace necesario generalizarlas para lograr explicar propiedades no detectadas hasta el momento. Hay muchísimas leyes físicas, químicas, biológicas y también económicas y de otras ciencias: todas provienen del proceso que se acaba de describir.

En realidad, la afirmación anterior no se ajusta a la verdad de forma estricta, pues en algunas ciencias es imposible en lo material llevar a cabo experimentos controlados en relación con una propiedad o peculiaridad determinada. Así ocurre, por ejemplo, en la arqueología, la geología, la astronomía y en las ciencias sociales, cuyos métodos de análisis e investigación no se ajustan con exactitud al esquema de la figura 8.5. No obstante, en esos casos, la observación precisa y reproducible sustituye al experimento, y las teorías solo se consideran válidas cuando:

- Son capaces de asociar de forma racional muchos hechos en apariencia independientes, y
- Logran predecir la existencia de cualidades y relaciones no detectadas hasta el momento.

En el campo de la medicina, el método científico y los experimentos van de la mano de los ensayos clínicos. La *Organización Panamericana de la Salud*, oficina regional de la *Organización Mundial de la*

Salud, publicó en 2010 la versión en español del libro divulgativo de libre acceso en la WEB ‘Cómo se prueban los tratamientos’, dirigido tanto a pacientes como al personal de salud,. Escrito en lenguaje popular, describe en forma amena una serie de conceptos básicos referentes a los ensayos clínicos junto a los requerimientos mínimos que se deben cumplir para realizar cualquier investigación en el campo de la medicina, mostrando numerosos ejemplos reales para ilustrar sus aseveraciones.

En algunos países de Latinoamérica se ha comenzado a considerar con mayor detenimiento la promoción de la cultura científica entre la población. En el año 2012 las sociedades cubanas de Matemática y Computación, Física y Química, a las que después se sumaron la de Bioingeniería y la de Oncología, Radioterapia y Medicina Nuclear, emitieron una declaración enfatizando la necesidad de promover el método científico. En una de sus partes aparece:

“Las sociedades científicas firmantes sostenemos que, aunque toda persona puede utilizar los medios que estime convenientes para mejorar su salud y bienestar, las instituciones oficiales sólo deberían patrocinar, financiar, invertir recursos del estado o respaldar de cualquier forma la reproducción a escala social de conocimientos, conductas y hábitos, si y sólo si, se hace evidente que están basados en el método científico”.

La declaración se encuentra accesible en www.scq.uh.cu/~scq/declaracion_metodo_cientifico.pdf. También en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-34662013000100010.

¿Cómo funciona la pseudociencia?

La pseudociencia se las arregla para evadir la parte esencial del método científico, pasando directo de la hipótesis a algún punto medio entre la teoría y la ley, obviando el experimento. Las suposiciones de algún “inspirado” o “iluminado” y sus seguidores se convierten así en ‘leyes’, sin pasar por el fino tamiz de la crítica internacional y la interacción teoría-experimento. Pero estas suposiciones, al hacer abundante uso de la terminología científica en sus descripciones, pueden engañar con facilidad a cualquiera no familiarizado con el quehacer científico (figura 8.6).

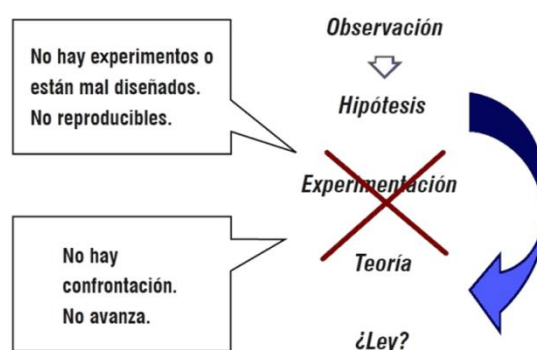


Figura 8.6 Esquema de la deformación pseudocientífica.

En el terreno de la pseudociencia la experimentación casi siempre se omite, a lo más tiene carácter anecdótico, y se toma alguna hipótesis como una verdad absoluta, que no admite dudas ni impugnaciones. Muchas veces el iluminado de turno es alguien que no posee entrenamiento en la ciencia y ni siquiera conoce la existencia del método científico. Y es frecuente que tome las críticas a “su” método – cualquiera que este sea – como un ataque personal. Quienes los critican se convierten así en “agentes de las

transnacionales” que quieren impedir la difusión de “un procedimiento efectivo y de bajo costo que sirva para ayudar a las multitudes de necesitados en el tercer mundo”.

Cuando la pseudociencia pertenece al campo de la medicina, muchas veces el predictor de la terapia ni siquiera es médico, – lo que no parece amilantar a sus entusiastas seguidores. Este autor ha tenido la oportunidad de conocer o leer escritos de geógrafos, físicos, químicos, ingenieros, profesores de secundaria, periodistas, veterinarios, enfermeros, psicólogos y filósofos que pretenden ser especialistas con capacidad de diagnosticar o ser catedráticos de temas médicos, sin poseer el correspondiente título universitario que los faculte para ello. Otras veces se llevan a cabo unos pocos experimentos mal diseñados y se propone una teoría desligada del experimento. Y cuando hay resultados experimentales al parecer favorables, no son reproducibles. Una característica adicional es que quienes favorecen las terapias no demostradas en muy raras ocasiones mencionan el efecto placebo; para ellos simplemente no existe.

Como el motor de avance de la ciencia es la prueba y el error, la crítica y la interacción teoría-experimento, la pseudociencia no tiene forma de avanzar. Sus leyes y teorías están siempre dadas de una vez y para siempre. La tabla 8.1 resume algunas características que pueden ayudar al lector a distinguir la pseudociencia de una verdadera proposición científica.

Hay tres razones fundamentales para denunciar y condenar la pseudociencia:

TABLA 8.1
COMPARACIÓN ENTRE CIENCIA Y
PSEUDOCIENCIA *

	Ciencia	PSEUDOCIENCIA
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, es usual que sus promotores lo asuman 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, por lo general del mismo círculo pseudocientífico.
4	Utiliza conceptos y magnitudes bien definidas para describir y analizar las propiedades y eventos.	Usa sus propios vagos conceptos, mezclándolos con conceptos de 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 inviables, muchas veces “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.
* Tomada de <i>Revista Elementos, Univ. Autónoma de Puebla, Mx., 69, 2008, pp. 31-35</i>		

- Es falsa. Toda pseudociencia predica nociones contrarias a las establecidas con solidez por la ciencia y que se imparten día a día en las aulas de cualquier universidad, aunque se debe mencionar que en la actualidad hay pseudociencias, como la homeopatía, que han logrado infiltrarse en cursos de verano y de postgrado en algunas universidades públicas españolas y de otros países. Esto incluso a pesar de las reiteradas denuncias de muchos profesores que alegan el predominio de criterios económicos sobre los académicos, y de que en países como los EE.UU. ya está prohibida su comercialización por carecer de evidencias científicas

ficas

(https://www.ftc.gov/system/files/documents/public_statements/996984/p114505_otc_homeopathic_drug_enforcement_policy_statement.pdf).

Constituye una pérdida de tiempo, esfuerzo, recursos, y algo similar a lo que los economistas llaman “costo de oportunidad”. Es decir, no solo se pierde lo dicho antes, también se pierde lo que se pudiera haber ganado de emplear esos recursos y esfuerzos en algo de veras productivo.

Cuando la pseudociencia está ligada a una falsa terapia, el posible perjuicio para el paciente siempre está presente, ya bien sea por causa directa, o bien porque este no logre atender a tiempo su dolencia, al entretenerse con la ilusoria terapia sin someterse a un tratamiento en realidad eficaz. Es posible encontrar múltiples ejemplos de daños graves a pacientes en la prensa internacional.

Pseudociencia magnética contemporánea

Los criterios acerca de que los campos magnéticos estáticos producidos por imanes permanentes incrementan la circulación, reducen la inflamación o el dolor y aceleran la cura de las lesiones son, por lo general, simplistas e ingenuos, y no están apoyados por el peso de la evidencia experimental. Por otra parte, aunque real, el efecto de los campos electromagnéticos de baja frecuencia sobre los tejidos es bastante complejo. Al parecer su efectividad varía mucho de un tejido a otro, depende bastante de la intensidad y frecuencia de la señal aplicada, y también del tiempo de tratamiento. Ver, por ejemplo, el artículo de revisión de *Funk et al.*, 2009, con 400 referencias, que no ofrece conclusiones definitivas.

A pesar de que la mayoría de las investigaciones recientes negando la efectividad de muchas de estas terapias son muy rigurosas, hace pocos años aún era posible encontrar clínicas estatales donde se aplicaban imanes con relativa frecuencia. Y cuando usted trataba de explicar a los promotores que ese procedimiento es falso, carece de fundamento científico y es inocuo, la respuesta usual era que “está autorizado”, sin otro argumento científico. (Desde luego; ¿qué van a argumentar?).

También es posible encontrar afirmaciones engañosas en diversos medios de comunicación. Algunas, más que pseudociencia, son timos. Por ejemplo: referencias vagas acerca de la efectividad del tratamiento propuesto: “...científicos destacados concuerdan en que los imanes unipolares son superiores a los bipolares”. En primer lugar, los imanes unipolares no existen. Todo imán tiene dos polos, imposibles de separar. En segundo lugar, nunca se especifica quiénes son los “científicos destacados”.

Otra compañía previene al consumidor acerca del abuso de la medicina convencional y de que los imanes no producen efectos colaterales, pues son “tan naturales como la naturaleza”, lo cual puede ser cierto. Quizás no produzcan efectos colaterales... ni tampoco el deseado efecto curativo. Otras promociones afirman que en diversas universidades se ha demostrado que los imanes permanentes incrementan el flujo sanguíneo; una falsedad, como se analizó antes. También aparecen supuestas investigaciones favorables, donde el efecto placebo ni siquiera se menciona.

En los EE.UU. tanto los jueces como dife-

rentes agencias del gobierno no dan respiro a los magnetoterapeutas. El 7 de septiembre de 1999 la Comisión Federal de Comercio (*Federal Trade Commission*, FTC) presentó una demanda contra la corporación *Pain Stops Here! Inc.*, por promover productos para magnetoterapia que incluían agua magnetizada de polo sur, bipolar y colchonetas magnéticas. Los promotores alegaban que el campo magnético penetra profundo en la piel para energizar y oxigenar la sangre, y que el tratamiento mejoraba una serie de dolencias en diversos órganos. La FTC calificó de falsas las supuestas virtudes curativas y envió el asunto a los tribunales (<http://www.ftc.gov/os/1999/9906/painagr.htm>).

El 8 de agosto de 2000 el Consumer Justice Center, una entidad privada de defensa del consumidor, en California, entabló una demanda contra la cadena de tiendas *Florsheim* y la tienda *Shoe Emporium*. Estas tiendas promovían zapatos magnéticos que “corrregían las deficiencias magnéticas, mejoraban la circulación, reducían la fatiga en las piernas y proveían de un alivio natural para los dolores mejorando la energía”. Unos pocos días después de presentada la demanda, la *Florsheim* retiró los controvertidos anuncios.

En septiembre de 2002 el Fiscal General de California entabló pleito contra unos fabricantes de colchones magnéticos, que supuestamente beneficiaban unos 50 padecimientos diferentes. Los precios de los colchones oscilaban entre 1 100 y 1 800 USD. La demanda pedía multas millonarias contra los 5 integrantes de la empresa *European Health Concepts, Inc.* junto al reem-

bolso del dinero a los consumidores (<http://caag.state.ca.us/newsalerts/2002/02-105.pdf>). Algo similar ocurrió con la *Magnetic Therapeutic Technologies* (<http://www.ftc.gov/os/1999/9906/magneticagr.htm>).

También en 2002, en el mes de abril, la FTC entabló una demanda contra *TechnoBrands, Inc.* por razones similares, en este caso la venta de una colección de imanes para combatir el dolor en cualquier lugar del cuerpo.

La prensa “formal” tampoco escapa a los tentáculos de la pseudociencia. Así, por ejemplo, en abril de 2010 un periódico local publicó el artículo *Ondas Magnéticas y su Aplicación en la Medicina*, consistente en una mezcla de gran cantidad de afirmaciones pseudocientíficas junto a algunas gotas de realidad. Allí se podía leer, entre otros muchos absurdos, que el magnetismo incrementa la circulación de la sangre (a pesar de la evidencia contraria proporcionada por los miles de pacientes sometidos a diario a estudios de resonancia magnética sin efectos colaterales) y también que las pirámides se construyeron... ¡para aplicar campos magnéticos!

Otra modalidad pseudocientífica es afirmar todo lo contrario: que la radiación electromagnética no es siempre benéfica, sino dañina. Se exageran al máximo los posibles efectos perniciosos de las radiaciones generadas por las líneas de transmisión de alto voltaje u otros equipos.

Una variante adicional es que existe mucha especulación acerca de si los cambios que tienen lugar en el campo geomagnético de nuestro planeta, asociados a las erupciones

solares, también pueden afectar los sistemas biológicos en la superficie terrestre. Por el momento no hay resultados definitivos. Un reporte publicado en el *Astronomical & Astrophysical Transactions*, Volume 19, Issue 1 del 2000, bajo el título *Confirmación experimental del efecto bioefectivo de las tormentas magnéticas* fundamenta sus resultados en la aplicación del fraudulento electrodiagnóstico de Voll ya mencionado, lo que reduce a cero su valor. Se ha sugerido la posibilidad de que los protones de muy alta energía provenientes del Sol puedan causar dosis elevadas de radiación en los aviones a grandes alturas, sobre todo cuando pasan cerca del círculo polar pero, aparte de las especulaciones, no fue posible encontrar reportes experimentales concretos sobre el tema.

En resumen, la evidencia acumulada hasta el momento demuestra que los campos magnéticos alternos de muy baja frecuencia *pudieran* ser una herramienta útil en el tratamiento terapéutico de diversas afecciones, siempre que se demuestre que proporcionan más beneficio que daños. Será necesario tomar en cuenta, en cada caso particular, la frecuencia e intensidad de la señal aplicada y la duración del tratamiento, ya que pueden ser factores muy importantes que hay que controlar para garantizar la efectividad en uno u otro sentido.

No puede decirse lo mismo de la aplicación de campos *estáticos* mediante imanes permanentes o bobinas de corriente continua. En la medida en que avanza la investigación científica en cualquier rama de la ciencia, van apareciendo evidencias cada vez más contundentes acerca de las propiedades

del evento estudiado, que a su vez dan origen a nuevas interrogantes. Sin embargo, en lo que se refiere a la aplicación terapéutica de los imanes permanentes la evidencia no ha aparecido aún; todo está exactamente

igual, a pesar de los miles y miles de ensayos y los cientos de años transcurridos desde los tiempos de Elisha Perkins y Franz Anton Mesmer.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aaron R. Ciombor D. Acceleration of experimental ossification by biophysical stimulation of the progenitor cell pool. *J Orthop Res* 1996;14(4): 582-89.
2. American artifacts museum [homepage on the Internet]. [citado nov. 2009]. Disponible en: <http://www.americanartifacts.com/smma/index.htm>.
3. Anderson J.M. et al., Insight into shark magnetic field perception from empirical observations. *SCIENTIFIC REPORTS* | 7: 11042 | DOI:10.1038/s41598-017-11459-8.
4. Baker, RR. A Sense of magnetism. *New Scientist* 1980; 87:844.
5. Banco de pruebas para motores de combustión interna. [homepage on the Internet]. Disponible en <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/bancomot.htm>.
6. Baker JS Simon JJ, Magnetic amelioration of scale formation (review). *Water Research*. 1996 feb;30(2):247-60.
7. Barker AT. Electricity, magnetism and the body: some uses and abuses. *Eng Sci and Edu J*. 1993; december:249-256.
8. Barret S. Magnet therapy: a skeptical view, [monografía en internet]. [citado julio 7 2008] disponible en <http://www.quackwatch.org/index.html>.
9. Barret S. Quack "Electrodiagnostic" Devices (2012) <http://www.quackwatch.com/01QuackeryRelatedTopics/electro.html>.
10. Bassett CAL. Beneficial effects of electromagnetic fields. *J of Cell Biochem* 1993. (51):387-93.
11. Belossi A. No effect of a low-frequency pulsed magnetic field on the brain blood flow among mice. *Panminerva Med* 1993;35(1):57-9.
12. 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.
13. Boles L.C. & Lohmann K.J.. True navigation and magnetic maps in spiny lobsters. *NATURE* | VOL 421 | 2 JANUARY 2003 |.
14. Busch KW, Busch MA. Laboratory studies on magnetic water treatment and their relationship to a possible mechanism for scale reduction. *Desalination* 1997 May;109(2):131-48.
15. Collacott EA, Zimmerman JT, White DW, Rindone JP. Bipolar permanent magnets for the treatment of chronic low back pain; a pilot study. *JAMA* 2000 March 8;283(10):1322-25.
16. «CFR-Code of Federal Regulations Title 21, Jan 17, 2023». *USA Federal Government*, <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcr/cfrsearch.cfm?fr=801.415> (visto abr., 2023).
17. Chao EYS, Nozomu I. Biophysical stimulation of bone fracture repair, regeneration and remodeling, *European Cells and Materials* 2003;6:72-85.
18. Chris N.W. Geraetsa, Marije van Beilena, Mirjan van Dijkb, Hidde Kleijerb, Charlotte Köhneb, Johannes H. van der Hoeven, Gerbrand J. Groend, Branislava Ćurčić-Blakeb, Robert A. Schoeversa, Natasha M. Mauritsc, Rudie Kortekaasb; *Neuroscience Letters* 699 (2019) 212-216.
19. Cryptochrome and magnetic sensing, <http://www.ks.uiuc.edu/Research/cryptochrome/>
20. Dmitreva IV, Khabarova OV, Obridko VN. Ragulskaja MV, Reznikov AE. Experimental confirmations of bioeffective effect of magnetic storms. *Astronomical & Astrophysical Transactions* 2000;19(1):67-77.
21. Differences in RF energy absorption in the heads of adults and children. *Bioelectromagne-*

- tics Supplement. 2005(7):S31-S44.
22. Dirección de monitoreo atmosférico, Gobierno de la Ciudad de México.
<http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>.
 23. Eastham TR. High-speed rail: ¿another golden age? *Scientific American* 1995 Sep;100.
 24. El ozono troposférico en Cataluña. Medio ambiente y sostenibilidad». *Generalitat de Catalunya*,
https://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dac tua- cio/atmosfera/qualitat_de_laire/avaluacio/camp anya_ozo/ozo-troposferic-catalunya/
 25. Einstein A. *Ann. Physik* 17, 132, 1905. Traducción al inglés en el *American J. of Physics*, 33,5, 1965, p. 367.
 26. Eippert F, Finsterbusch J, Bingel U, Büchell C. Direct evidence for spinal cord involvement in placebo analgesia. *Science* 2009 Oct;326:404-16.
 27. Feneci R. Magnetic measurements and modeling for the investigation of the human heart conduction system. *IL Nuovo Cimento* 1983; (2D).
 28. Feychting M, Ahlbom A. Magnetic fields and cancer in people residing near Swedish high voltage power lines. *Stockholm* 1992; IMM-rapport 6/92.
 29. Fleischmann P.N., Grob R .and Rössler W., Magnetoreception in Hymenoptera: importance for navigation. *Animal Cognition* 23:1051–1061 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10071-020-01431-x>
 30. 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.
 31. Flóreza M, Carbonella MV, Martínez E. Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: effects on germination and early growth. *Environmental and Experimental Botany* 2007 Jan;59(1):68-75.
 32. Foley-Nolan D. Pulsed high frequency (27mhz) electromagnetic therapy for persistent neck pain: a double blind, placebo-controlled study of 20 patients. *Orthopedics* 1990;13(4):445-51.
 33. Frankel RB, Liburdy RP, Biological Effects of Static Magnetic Fields. En: Polk C. Postow E, editors. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, 2nd Ed. CRC Press Boca Raton FL;1996.p.149-183.
 34. Funk RHW, Monsees T, Ozkucur N. Electromagnetic effects – From cell biology to medicine. *Progress in Histochemistry and Cytochemistry* 2009;(43):177–264.
 35. González Arias A. Origen y actualidad de la radiografía, *Orbe* 2009 Abril 18; AñoXI (No.46).
 36. González Arias A. LEDs GO! *Juventud Técnica* 2010 Ene-Feb;(352):12-4.
 37. González Arias A. Eficientes, flexibles... y baratas! *Orbe* 2009 Junio 27, Año XI(No.4).
 38. González Arias A. The magnetotherapy delusion. *Rev. Cub. Física* 2007;24(2):122-6.
 39. González Arias A., Biomagnetismo vs. Magnetobiología. *Rev. Cub. Fis.* vol. 22, 2, p. 188, 2005.
 40. Goodeve Peter J., The German Magnetic Mine. Disponible en <http://www.goodeveca.net/CFGGoodeve/magmine.html>.
 41. Gould JL. Bees have magnetic remanence. *Nature* 1978; (201):1026-28.
 42. 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.
 43. Haas JW, Bender FL, Ballou S, Kelley JM, Wilhelm M, Miller FG, Rief W, Kaptchuk TJ.

- Frequency of adverse events in the placebo arms of COVID-19 vaccine trials: a systematic review and meta-analysis. *JAMA Netw Open* 5(1):e2143955.
44. Halliday D, Resnick R, Wilkes J. *Fundamentals of Physics*. John Wiley and Sons 1993, 4th Ed.
45. Hirata A. et al., Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields: Review and Future Directions, *IEEE Journals & Magazine IEEE Xplore*, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9557785/>
46. Hanson M. Magnetic material in european eel (*anguilla anguilla*), *Comp. Biochem. Physiol. a. Comp. Physiol* 1984;77(2):221-4.
47. Hazen HH. Injuries resulting from irradiation in beauty shops. *American Journal of Roentgenology and Radium Therapy* 1930; 23(4):409-12.
48. Holmid L. Energy production by laser-induced annihilation in ultradense hydrogen H(0), *Internationsl Journal of Hydrogen Energy*, 46 (2021) 14592.14595
49. Hong C. Magnetic necklace: its therapeutic effectiveness on neck and shoulder pain. *Arch Phys Med Reab.* 1982; (63):464-66.
50. Hongzhi Hu, Wenbo Yang, Qianwen Zeng, Wei Chen, YanBin Zhu, Weijian Liu, Shangyu Wang, Baichuan Wang, Zengwu Shao, Yingze Zhang. Promising application of Pulsed Electromagnetic Fields (PEMFs) in musculoskeletal disorders. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 131 (2020) 110767.
51. Hulme JM, Robinson VA, de Bie RA. Electromagnetic fields for the treatment of osteoarthritis. *Cochrane Database Syst Rev.* 2002;(1):CD003523.
52. Ieran M. Effect of low frequency pulsing electromagnetic fields on skin ulcers of venous origin in humans: a double-blind study. *J Orthop Res* 1990;8(2):276-82.
53. Imperial War Museum. Germany's Magnetic Mine Offensive. [Home page en Internet] [Citado el 7/12/2010] Disponible en <http://www.iwm.org.uk/searchlight/server.php?show=nav.24369>.
54. International Commission on Radiation Protection. *Recommendations* New York, Pergamon Press 1991; Report 60.
55. Jackson B. The resurgence of magnetic therapy. *The Pharmaceutical Journal* 2006 April 22;276(7397):480-81.
56. Jamtvedt G, Dahm KT, Christie A, Moe RH, Haavardsholm E, Holm I, Hagen KB. Physical therapy interventions for patients with osteoarthritis of the knee: an overview of systematic reviews. *American Physical Therapy Association Care IV series* 2008 Jan;88(1):1-14.
57. Johnsen S, Lohmann KJ. Magnetoreception in animals. *Physics Today*, 2008 March: 29-35
58. Kalliomaki K. Magnetic technique for measuring lung contamination. *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Biomagnetism*, Grottaferrata, Italy, 1982 Sept; Cap.15:1-12.
59. Karki N, Vergish S, Zoltowski BD. Cryptochromes: Photochemical and structural insight into magnetoreception. *Protein Science.* 2021;30:1521-1534. <https://doi.org/10.1002/pro.4124> .
60. Kittel C. *Introducción a la Física del Estado Sólido*. Editorial Reverté 1993, 3ra Ed.
61. Leaper DJ. Do magnetic fields influence soft tissue wound healing? *Eq. Vet. J.* 1985;17(3):178-80.
62. 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. See also. *Genetic Effects of Non-Ionizing Electromagnetic Fields*. 2014 Supple-

ment Department of Bioengineering, University of Washington, Seattle, WA USA. Prepared for the BioInitiative Working Group, March 2014. Accesible en

http://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCEQFjAAahUKEwii9sumocjIAhVCWx4KHZPIBrc&url=http%3A%2F%2Fwww.bioinitiative.org%2Freport%2Fwp-content%2Fuploads%2Fpdfs%2Fsec06_2012_genetic_effects_non-ionizing.pdf&usq=AFQjCNGPrshHo9bpUbpJyGP1Uy8rpgyHuw

63. Li CHEN, MD, PhD*, Xin DUAN, MD, PhD*, Fei XING, MD, Guoming LIU, MD, Min GONG, MD, Lang LI, MD, Ran CHEN, MD and Zhou XIANG, MD, PhD. Effects of Pulsed Electromagnetic Field Therapy on Pain, Stiffness and Physical Function in Patients with Knee Osteoarthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *J Rehabil Med* 2019; 51: 821–827.

64. Lin JC. Magnetic necklace: its therapeutic effectiveness on neck and shoulder pain. *Geophysical Variables and Behavior XXVII*. [2. Psychological Assessment]. *Psychological Reports* 1985;(56):639-49.

65. López Bravo S. *Reviews de Física Médica* 2001;2(2):99-110.

66. Mackay C. *Memoirs of extraordinary popular delusions and the madness of crowds*. Published by the Office of the National Illustrated Library, 1852. Chapter 7. Second edition text. First published: 1841.

67. Macklis RM. Magnetic healing, quackery, and the debate about the health effects of electromagnetic fields. *Annals of Internal Medicine* 1993 March;118(5):376-83.

68. Madsen MV, Gotzsche PC, Hróbjartsson A.

Acupuncture treatment for pain: systematic review of randomised clinical trials with acupuncture, placebo acupuncture, and no acupuncture groups. *BMJ* 2009;(338):a3115.

69. Maier-Hauff K et al. Intracranial thermotherapy using magnetic nanoparticles combined with external beam radiotherapy: results of a feasibility study on patients with glioblastoma multiform, *J. Neuro-Oncol.* 2007 8:53–60

70. Magnetic Levitation Trains. *The Economist* 1990 Oct. 13; 317(7676):91.

71. Magnetite in Freshwater Magnetic Bacteria, *Science* 203, 1355-1357 (1979).

72. Magnetizer.net (5525swamp rd., fountainville, pa 18923-9612). [Homepage on the Internet]. Disponible en <http://www.magnetizer.net/spa/spa.htm>,

73. McCarthy JC, Callaghan MJ, Oldham JA. Pulsed electromagnetic energy treatment offers no clinical benefit in reducing the pain of knee osteoarthritis: a systematic review. *Musculoskeletal Disorders* 2006;(7):51.

74. 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.

75. McNamee DA, Legros AG, Krewski DR, Wisenberg G, Prato FS, Thomas AW. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 2009 agosto;82(8).

76. Mollon B, da Silva V, Busse JW, Einhorn TA, Bhandari M. Electrical stimulation for long-bone fracture-healing: a meta-analysis of ran-

- domized controlled trials. *J Bone Joint Surg Am*. 2008;90:2322-30.
77. Nano-Cancer® therapy - Mag Force Nanotechnologies AG. Disponible en <http://www.magforce.de/english/products/nano-cancer-therapy.html> [citado 1/2/2011]
78. NASA. org. [homepage on the Internet]. [citado enero 10, 2010]. Disponible en <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/Education/Mtrap1.html#ringcurrent>.
79. Nippes Paul I., Understanding magnetism and degaussing methods, MPS Magnetic Products and Services; accesible en <http://www.gaussbusters.com/ppm93.html>.
80. Nordmann Gregory C., Hochstoeger Tobias, Keays David A. Magnetoreception—A sense without a receptor. *PLOS Biology*, <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003234>. October 23, 2017.
81. Okechukwu CE. Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on neurophysiology. *Adv Hum Biol* 2020;10:6-10.
82. Packmor F. et al., A magnet attached to the forehead disrupts magnetic compass orientation in a migratory songbird. *Journal of Experimental Biology* (2021) 224, jeb243337. doi:10.1242/jeb.243337. <https://www.researchgate.net/publication/355754409>
83. Paolucci Teresa, Pezzi Letizia, Centra Antonello Marco, Giannandrea Niki, Bellomo Rosa Grazia & Saggini Raoul. Electromagnetic Field Therapy: A Rehabilitative Perspective in the Management of Musculoskeletal Pain – A Systematic Review. *Journal of Pain Research* (2022) 1385-1400, DOI: 10.2147/JPR.S231778.
84. Pankhurst Q A, Connolly J, Jones S K and Dobson J., Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003 36:167–181
85. Pankhurst Q A, Thanh N K T, Jones S K and Dobson J., Progress in applications of magnetic nanoparticles in biomedicine, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009 42:224001 (15pp)
86. Pennisi E. New suspension may smooth maglev ride, *Science News* 1992 January 25, p.55.
87. Pardo-Cabello A.J., · Manzano-Gamero Victoria. Puche-Cañas Emilio. Placebo: a brief updated review. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology* (2022) 395:1343–1356
88. Petersen RC. Radiofrequency/microwave protection guides. *Health Physics* 1991; 61:59-67.
89. Polk, C. Electric and magnetic fields for bone and soft tissue repair. En Polk C, Postow E, editors. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996. p. 231-246.
90. Pope, GT. Rockets could ride the maglev express. *Popular Mechanics* 1995 October, p.17.
91. Prisyazhniuk VA. Magnetic treatment, phase transitions, entropy, structure, and others. *Applied Thermal Engineering* 2008 Sept;28(13):1694-97.
92. Ramey DW. Magnetic and electromagnetic therapy. The scientific review of alternative medicine. Prometheus Books 1998.
93. Ramsay Jessica L. and Kattnig Daniel R. Magnetoreception in cryptochrome enabled by one-dimensional radical motion; arXiv:2303.12117v1 [physics.bio-ph] 20 Mar 2023.
94. Reitz JR, Milford FJ, Christy RW. Fundamentos de la teoría electromagnética. Addison-Wiley Iberoamericana; 1996.
95. Rubin C, McLeod K, Lanyon L. Prevention of osteoporosis by pulsed electromagnetic fields. *J Bone Joint Surg [Am]* 1989; (71):411-16.

96. Rojas Ochoa Francisco, Silva Ayçaguer Luis Carlos, Sansó Soberats Félix José, Alonso Galbán Patricia. El debate sobre la Medicina Natural y Tradicional y sus implicaciones para la salud pública. *Rev Cubana Salud Pública* vol.39 no.1 Ciudad de La Habana ene.-mar. 2013
97. Sharrard W. A double blind trial of pulsed electromagnetic fields for delayed union of tibial fractures. *J Bone and Joint Surg [Br]* 1990;(72):347-55.
98. Schneider Will T., Holland Richard A. and Oliver Lindecke. Unsolved Mystery. Over 50 years of behavioural evidence on the magnetic sense in animals: what has been learnt and how? *Eur. Phys. J. Spec. Top.* (2023) 232:269–278. <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00755-8>.
99. Schulten K. Magnetic field effects in chemistry and biology. *Adv. Solid State Phys.* 1982;22(61).
100. Shelley's family site. Disponible en <http://www.shelleys.demon.co.uk/magnets.htm>.
101. Silberberg Schovelín Luis A., Calibración de los sistemas de degaussing, *Revista de Marina, Armada de Chile*, 1997, 2. Accesible en <http://www.revistamarina.cl/revismar/revistas/1997/2/silberbe.pdf>.
102. Solomon S. A Review of mechanisms of response to pain therapy: why voodoo works. *Headache*2002;(42):656-62.
103. Tavel M., The Placebo Effect: the Good, the Bad, and the Ugly. *The American Journal of Medicine* (2014) 127, 484-488.
104. Tenforde TS. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Annu. Rev. Publ. Health*1992;(13):173-96.
105. Thoradit et al. Cryptochrome and quantum biology: unraveling the mysteries of plant magnetoreception *Front. Plant Sci.* 14:1266357. doi: 10.3389/fpls.2023.1266357 (2023). <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1266357/full>.
106. Trock, DH, Bollet AJ, Markill R. The effect of pulsed electromagnetic fields in the treatment of osteoarthritis of the knee and cervical spine. Report of randomized, double blind, placebo controlled trials. *J Rheumatol* 1994;21(10):1903-11.
107. Tropiezos del magnetismo, *Granma* 2008, Agosto 1, Año 12, No. 213.
108. Tynes T, Andersen A, Langmark F. Incidence of cancer in norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 1992;136(81).
109. Tyll JS, Liu D, Schetz JA, Marchman JF. Environmental studies of magnetic levitation train aerodynamics. *AIAA Journal* 1996 Dec;34(12):2465–68.
110. U.S. Army Corps of Engineers. Maglev for the United States, CoE Final Summary Maglev Report, Nov. 1993.
111. Vallbona C, Hazlewood CF, Jurida G. Response of pain to static magnetic fields in postpolio patients: a double-blind pilot study. *Arch Phys Med Rehabil* 1997;(78):1200-04.
112. Vermeiren TIC, inventor; EPURO joint-stock company (Antwerpen, Belgium), assignee. Process and apparatus CEDI. US Patent 2,596,743. 1946 Oct. 01.
113. Vincent W., F. Andrasik and R. Sherman, Headache treatment with pulsing electromagnetic fields: a literature review, *Appl. Psychophysiol. Biofeedback* 2007;(32):191–207.
114. Walcott CH. Pigeons Have Magnets. *Science*1979;(105)1027.
115. Wang Yinan et. al., *Bats respond to polarity of a magnetic field*. *Proc. R. Soc. B* 274, 2901–2905 (2007), doi:10.1098/rspb.2007.090

116. Watkins J., et al; Healing of surgically created defects in the Equine Superficial Digital Flexor Tendon: Effects of PEMF on collagen-type transformation and tissue morphologic reorganization. *AJVR*1985;(46):2097-2103,.
117. Wikswo JP, Barach JP. An estimate of the steady magnetic field strength required to influence nerve conduction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering BME* 1980;27(12):722-23.
118. Wilson V, Andrasik F. Sherman R. Headache treatment with pulsing electromagnetic fields: a literature review. *Appl Psychophysiol Biofeedback* 2007;(32):191–207.
119. Winemiller MH, Billow RG, Laskowski ER, Scott Harmsen W. Effect of magnetic vs. sham-magnetic insoles on plantar heel pain. A randomized controlled trial. *JAMA* 2003 September 17;290(11):1474-78.
120. Xiaotian Yang, Hongchen He, Wenwen Ye, Thomas A. Perry, Chengqi He. Effects of Pulsed Electromagnetic Field Therapy on Pain, Stiffness, Physical Function, and Quality of Life in Patients With Osteoarthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Placebo-Controlled Trials. *Physical Therapy* (2020), Volume 100 Number 7.
121. Yahoo news. Warning on cell phones and children. [citado diciembre 2008]. Disponible en http://news.yahoo.com/s/ap/20080724/ap_on_he_me/cell_phone_warning
122. Zhadin MH. Review of russian literature on biological action of DC and low-frequency AC magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 2001;(22):27-45.
123. Zoeger J. Magnetic material in the head of the common pacific dolphin. *Science* 1981;(213):892-94.
124. Zubieta, Bueller, Jackson, Scott1, Xu1, Koeppe, Nichols, Stohler. Placebo Effects Mediated by Endogenous Opioid Activity on μ -Opioid Receptors. *The Journal of Neuroscience*, 24 August 2005, 25(34). <http://www.jneurosci.org/content/25/34/7754.short-target-4>