



Noboru Takeuchi

Energía y medio ambiente

Manual básico
de innovaciones
tecnológicas
para su mejor
aprovechamiento





CONSEJO EDITORIAL

GRUPO PARLAMENTARIO DEL PARTIDO DE LA REVOLUCIÓN DEMOCRÁTICA

Dip. TOMÁS BRITO LARA, *Titular*

Presidencia

GRUPO PARLAMENTARIO DEL PARTIDO REVOLUCIONARIO INSTITUCIONAL

Dip. JOSÉ ENRIQUE DOGER GUERRERO, *Titular*

Dip. ELIGIO CUTTLÁHUAC GONZÁLEZ FARÍAS, *Suplente*

GRUPO PARLAMENTARIO DEL PARTIDO ACCIÓN NACIONAL

Dip. JUAN PABLO ADAME ALEMÁN, *Titular*

GRUPO PARLAMENTARIO DEL PARTIDO VERDE ECOLOGISTA DE MÉXICO

Dip. RICARDO ASTUDILLO SUÁREZ, *Titular*

Dip. LAURA XIMENA MARTEL CANTÚ, *Suplente*

GRUPO PARLAMENTARIO DE MOVIMIENTO CIUDADANO

Dip. JOSÉ FRANCISCO CORONATO RODRÍGUEZ, *Titular*

Dip. FRANCISCO ALFONSO DURAZO MONTAÑO, *Suplente*

GRUPO PARLAMENTARIO DEL PARTIDO DEL TRABAJO

Dip. ALBERTO ANAYA GUTIÉRREZ, *Titular*

Dip. RICARDO CANTÚ GARZA, *Suplente*

GRUPO PARLAMENTARIO DEL PARTIDO NUEVA ALIANZA

Dip. LUIS ANTONIO GONZÁLEZ ROLDÁN, *Titular*

Dip. JOSÉ ANGELINO CAAMAL MENA, *Suplente*

SECRETARIO GENERAL

Mtro. MAURICIO FARAH GEBARA

SECRETARIO DE SERVICIOS PARLAMENTARIOS

Lic. JUAN CARLOS DELGADILLO SALAS

CENTRO DE ESTUDIOS SOCIALES Y DE OPINIÓN PÚBLICA

CENTRO DE ESTUDIOS PARA EL ADELANTO DE LAS MUJERES Y LA EQUIDAD DE GÉNERO

CENTRO DE ESTUDIOS DE LAS FINANZAS PÚBLICAS

CENTRO DE ESTUDIOS PARA EL DESARROLLO RURAL SUSTENTABLE Y LA SOBERANÍA ALIMENTARIA

CENTRO DE ESTUDIOS DE DERECHO E INVESTIGACIONES PARLAMENTARIAS

CENTRO DE DOCUMENTACIÓN, INFORMACIÓN Y ANÁLISIS

ÉDGAR PIEDRAGIL GALVÁN

Secretario Técnico del Consejo Editorial

Energía y medio ambiente

Manual básico
de innovaciones
tecnológicas
para su mejor
aprovechamiento

Noboru Takeuchi

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



PROFEPA
PROCURADURÍA FEDERAL DE
PROTECCIÓN AL AMBIENTE

ce LXII LEGISLATURA
CONSEJO EDITORIAL CÁMARA DE DIPUTADOS



Universidad
Nacional
Autónoma de
México



Centro de Nanociencias
y Nanotecnología

MAPorrúa
librero-editor • México

Coeditores de la presente edición:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
PROCURADURÍA FEDERAL DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE

CÁMARA DE DIPUTADOS, LXII LEGISLATURA
CONSEJO EDITORIAL

MIGUEL ÁNGEL PORRÚA, librero-editor

Ilustraciones: Noboru Takeuchi | Kiyoshi Takeuchi

Primera edición, mayo del año 2014

© 2014

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA
Km 107 carretera Tijuana-Ensenada
Ensenada, Baja California, 22860

© 2014

Por características tipográficas y de diseño editorial
MIGUEL ÁNGEL PORRÚA, librero-editor

Derechos reservados conforme a la ley
ISBN 978-607-401-700-7

Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta del contenido de la presente obra, sin contar previamente con la autorización expresa y por escrito de GEMAPORRÚA, en términos de lo así previsto por la *Ley Federal del Derecho de Autor* y, en su caso, por los tratados internacionales aplicables.

IMPRESO EN MÉXICO



PRINTED IN MEXICO

www.maporrúa.com.mx

Amargura 4, San Ángel, Álvaro Obregón, 01000 México, D.F.

Presentación

Guillermo Haro Bélchez

Procurador Federal de Protección al Ambiente

La energía, entendida como un recurso natural, constituye actualmente un tema de especial interés y preocupación para todos, ya que entre los retos técnicos más importantes de nuestro siglo se encuentra el contar con una provisión asequible y suficiente de energía limpia. Para ello se requerirán no sólo nuevas y mejores tecnologías, sino también formas innovadoras de pensamiento.

El consumo de energía se ha elevado de manera muy significativa en las últimas décadas como resultado del crecimiento poblacional y de una legítima aspiración social de gozar de niveles de vida más altos. En este sentido, el incremento y la diversificación de la cartera energética juegan un papel fundamental para que la demanda del recurso se vea satisfecha en el marco de un desarrollo sustentable.

A lo largo de su historia, la humanidad ha aprovechado distintas fuentes de energía, transitando de la biomasa al carbón y los combustibles fósiles, hasta la generación hidro y geotérmica, pasando por lo que hoy se conoce como fuentes alternativas de energía, entre ellas la solar y la eólica.

En este camino, todas las actividades asociadas con el uso de energía han provocado, en mayor o menor medida, impactos en el ambiente de muy diversa índole, algunos de ellos de gran relevancia como el efecto invernadero que está propiciando un cambio climático global.

La nanociencia y la nanotecnología estudian y llevan a cabo la manipulación de las cosas extremadamente pequeñas, es decir, controlan átomos y moléculas. Con ello es posible crear dispositivos de menor tamaño, más ligeros y más

veloces, para llevar a cabo funciones inteligentes. La ventaja de esta tecnología es que requiere menos materiales para sus procesos de fabricación y también demanda menos energía. La ecuación es clara: la nanociencia significa la posibilidad de usar energía barata, limpia y eficiente.

La nanotecnología emula en muchos sentidos los procesos biológicos: aprovecha la energía contenida en los combustibles sin necesidad de quemarlos y desperdiciar por lo mismo una gran parte de ella, genera energía a partir de fuentes difusas (actualmente poco rentables), realiza procesos de producción generando pocos residuos y obtiene materias primas a partir de materiales locales, con lo que evita la necesidad de transportarlos grandes distancias con las consecuentes emisiones de gases.

El uso de la nanotecnología en la separación de materiales ofrece también oportunidades para mejorar radicalmente los procesos de control de la contaminación. Por ejemplo, es de esperarse que con la ayuda de la nanoquímica se logren notables avances en el tratamiento de aguas residuales, la purificación del aire y el almacenamiento de energía.

El campo de la nanotecnología tiene, por supuesto, aún mucho por descubrir y aportar al desarrollo de nuestras sociedades. El cambio que está produciendo en nuestras vidas quizá sea más veloz de lo que podemos percibir actualmente. En este camino habrán de enfrentarse importantes retos para que los nuevos desarrollos no resulten en nuevos o mayores impactos ambientales sino, por el contrario, en proyectos económicos más eficientes y limpios.

Esperamos que la obra que hoy se pone a disposición del público, contribuya a ampliar su conocimiento sobre las enormes repercusiones que el desarrollo de la nanociencia tiene para el medio ambiente. Sus aplicaciones nos permiten vislumbrar un futuro en el que la calidad y la permanencia de los recursos naturales es posible, un futuro en el que la protección ambiental se concentra en cuestiones relacionadas con el desempeño de las actividades humanas y no en las características nocivas de los materiales o en las consecuencias de un uso ineficiente de la energía.



Noboru Takeuchi

Energía y medio ambiente

La edición de este libro fue parcialmente financiada por la DGAPA-UNAM, el Fondo Mixto Conacyt-Baja California y el Conacyt a través de los proyectos PAPIME PE100709, Fondo Mixto de BC 117258 y Proyecto de Comunicación 190607 respectivamente.

Por conducto del Grupo Editorial Miguel Ángel Porrúa, al proyecto final de edición se unieron los esfuerzos de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

Así también, participó la LXII Legislatura de la Cámara de Diputados, a través de su Consejo Editorial.

A Marisol Romo le agradezco su apoyo en la recopilación de información y la redacción de la obra; a Kiyoshi Takeuchi el trazo de algunas ilustraciones; así también, a los profesores Nancy Sandler y Sergio Ulloa por su hospitalidad durante mi estancia sabática en la Universidad de Ohio, donde fue escrito.

Nota de interés

El autor

A Marisol

El propósito inicial de Energía y medio ambiente. Manual básico de innovaciones tecnológicas para su mejor aprovechamiento, fue el escribir un artículo de revisión sobre las aportaciones de la nanociencia y la nanotecnología a la solución del problema energético en el mundo actual. Sin embargo, pronto nos dimos cuenta de que para lograr un mejor resultado, era necesario presentar una introducción de los diferentes métodos de obtención de energía, tanto renovables como no renovables. De esta manera, el “artículo” se transformó en este manual, el cual esperamos que también sirva como texto de consulta y de divulgación sobre la energía y el problema energético. De esa manera, con el doble objetivo de introducir y mantener actualizados a los lectores sobre el tema de las innovaciones tecnológicas para el mejor aprovechamiento de la energía, se recopilaron, analizaron y seleccionaron materiales de diver-

sas fuentes, entre ellas, libros, páginas de internet de instituciones relacionadas con la energía, especialmente la de la Agencia de Información de Energía (EIA, en inglés Energy Information Agency), de Estados Unidos de América (de donde se tomaron muchas definiciones básicas), y artículos tanto de divulgación como de investigación. En todos los casos se ha tratado de citar la fuente de información para aquellos usuarios interesados en profundizar más sus conocimientos sobre algún tema en particular.

También, debido a que queremos que el manual pueda ser de utilidad por un público en general, hemos separado los temas que pueden ser un poco más especializados. Para esos casos se recomienda la lectura previa del libro Nanociencia y Nanotecnología: la construcción de un mundo mejor átomo por átomo, del autor, publicado en 2009 por el Fondo de Cultura Económica.

Introducción

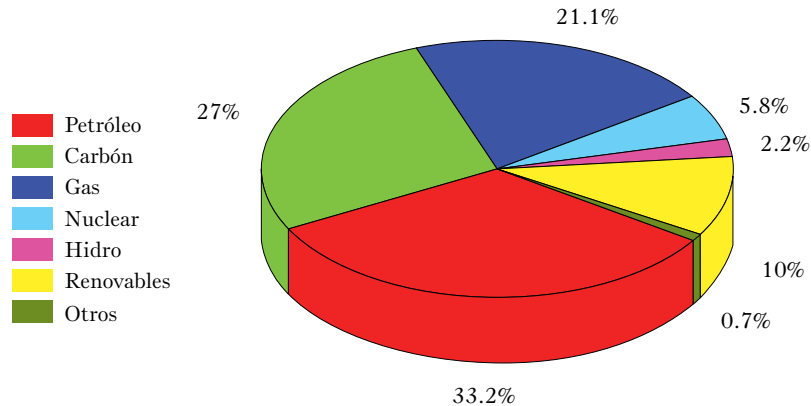
Noboru Takeuchi

Desde que nuestros antepasados descubrieron cómo obtener y controlar el fuego, hemos quemado la madera de los árboles para calentarnos, cocinar nuestros alimentos, protegernos de los animales salvajes y escapar de la oscuridad de la noche. Mucho después comenzamos a usar el carbón, el gas natural y el petróleo para satisfacer nuestras necesidades energéticas. Estas últimas fuentes de energía se han almacenado en la tierra durante millones de años. Sin embargo, desde el siglo pasado, se ha cobrado conciencia de los problemas causados por el uso inmoderado de estos combustibles. Las reservas se consumen muchísimo más rápidamente de lo que se pueden reemplazar o encontrar nuevas, y de paso se ha puesto en peligro la vida en la tierra: la quema de los combustibles basados en el carbono genera no sólo contaminantes como óxidos de

azufre y metales pesados, sino también la emisión del dióxido de carbono, responsable principal del efecto invernadero. La búsqueda de nuevos yacimientos de petróleo ha llevado la exploración y explotación a lugares de muy difícil acceso tales como las aguas profundas, lo cual trae consigo nuevos problemas. La explosión del pozo “Horizonte de aguas profundas” en el Golfo de México a principios de 2010, es un ejemplo de las tragedias que pueden suceder (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA1, 6 de agosto de 2011).

Es poco probable que en un futuro cercano dejemos de usar los combustibles fósiles, debido a que en la actualidad, más del 80 por ciento de la energía que se produce en el mundo proviene de ellos como se muestra en la gráfica 1. Una solución a este problema energético es hacer eficiente la exploración, producción,

Gráfica 1
Porcentaje de las contribuciones de las diferentes fuentes, a la energía total producida en el mundo en 2008



Fuente: Adaptado de IEA.

transporte y uso de lo que nos queda de estos combustibles, mientras desarrollamos fuentes alternas de energía que no provengan de combustibles fósiles, tales como la energía solar, geotérmica y eólica.

La historia ha demostrado que los avances tecnológicos son indispensables en la solución de los problemas que ha enfrentado la humanidad. En particular, las nanociencias y la nanotecnología ya comienzan a dar frutos en aplicaciones que tienen la capacidad de influir prácticamente en todos los aspectos de nues-

tras vidas, aún más, muchos anticipamos que tendrán un papel predominante en la solución de nuestros problemas energéticos.

La nanociencia es el estudio de los procesos que ocurren en las estructuras de un tamaño entre 1 y 100 nanómetros, las cuales se conocen como nanoestructuras (Takeuchi, 2009). Un nanómetro (abreviado 1 nm), es una medida de longitud igual a 1/1,000'000,000 (una milmillonésima) parte de un metro, o más fácil de visualizar, un milímetro dividido un millón de veces. La nanotecnología es el área de investiga-

ción que estudia, diseña y fabrica materiales a escalas nanoscópicas y los usa para alguna aplicación práctica. Sin embargo, en muchas ocasiones se denomina nanotecnología a la habilidad de controlar la materia átomo por átomo.

A escalas nanométricas, las propiedades físicas, químicas y biológicas de los materiales difieren en muchos aspectos de las propiedades de la materia a tamaños a los que estamos acostumbrados en nuestra vida cotidiana. Es por eso que los materiales nanoestructurados, como nanopartículas nanotubos y nanoalambres tienen ventajas únicas que los hacen útiles en la solución del problema energético (Aydil, 2007).

En primer lugar, los nanomateriales tienen un área superficial muy grande, propiedad que presenta ventajas significativas en procesos como la absorción de la luz y de separación de

carga en semiconductores, las dos propiedades críticas en la conversión de energía solar a eléctrica. Una segunda ventaja de las nanopartículas es la dependencia de sus propiedades ópticas con su tamaño. Cuando los electrones están confinados en una partícula muy pequeña (tamaño nanométrico) sólo pueden ocupar niveles de energía bien definidos y la separación entre estos niveles de energía depende del tamaño de la partícula, esto se conoce como el efecto de confinamiento cuántico y en este caso las nanopartículas se denominan puntos cuánticos. En tercer lugar, los dispositivos basados en nanomateriales pueden ser más baratos de fabricar.

En este libro, discutiremos la manera cómo la nanotecnología en particular, y otras tecnologías en general, nos pueden ayudar a resolver el problema energético que estamos viviendo a comienzos de este siglo XXI.

Fuentes de energía no renovables: petróleo, gas natural y carbón mineral

El petróleo, el carbón y el gas natural son materiales de origen fósil, producidos a partir de animales y plantas que vivieron en océanos y pantanos hace cientos de millones de años. Después de morir, se comenzaron a descomponer y sus restos fueron cubiertos por capas de arena, piedras y otros sedimentos. El calor y la presión de estos materiales ayudaron a convertir los restos orgánicos en carbón, petróleo o gas natural (EIA-oil).

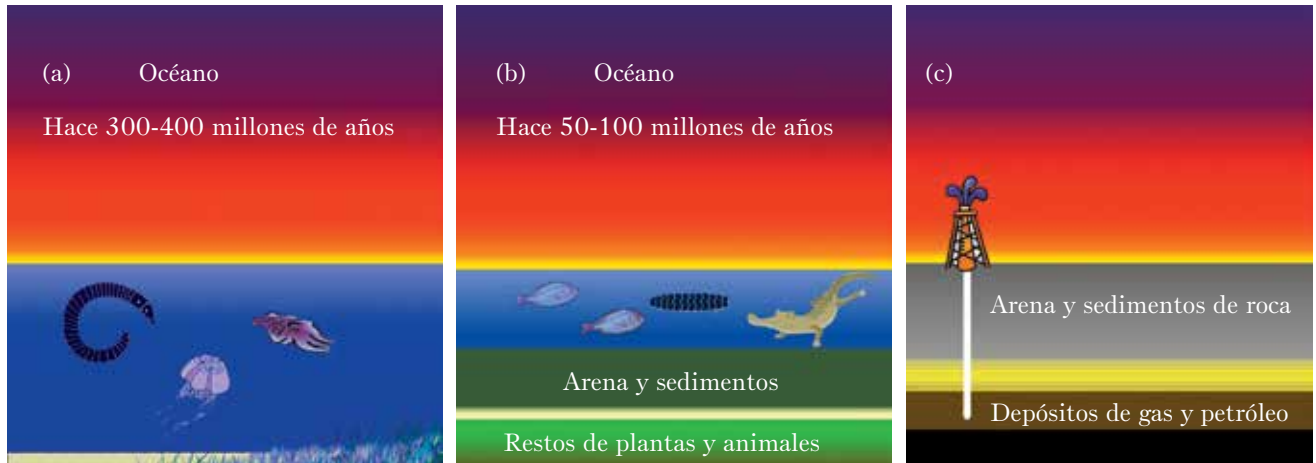
EL PETRÓLEO

El petróleo es una mezcla heterogénea de hidrocarburos, o sea compuestos orgánicos de carbono e hidrógeno. También contiene, en menores cantidades, otras sustancias como sulfuros orgánicos, y compuestos de nitrógeno y de oxígeno. Se pueden encontrar trazas de metales como plomo,

hierro, sodio y níquel, En condiciones normales (temperatura y presión ambiental), el petróleo es un líquido y sus propiedades físico-químicas, tales como color, viscosidad y contenido, pueden variar mucho, dependiendo del lugar de donde se extrajo.

En un yacimiento, el petróleo está atrapado a alta presión por rocas impermeables que no permiten que ascienda hacia la superficie a pesar de ser menos denso que los otros materiales que lo rodean. Para extraerlo, se perfora un pozo el cual atraviesa todas las capas que cubren el yacimiento y si la presión es suficientemente grande, el petróleo sale de una manera natural. Sin embargo, después de extraer una gran cantidad, la presión desciende y para poder continuar con el proceso de explotación es necesario usar otras técnicas como la inyección de agua, gas o el uso de bombas.

Figura 1
Diagrama esquemático de la formación del petróleo y del gas natural



(a) Animales y plantas murieron y fueron sepultados en el fondo marino. Con el tiempo fueron cubiertos por capas de arena y sedimentos.

(b) Después de millones de años, los restos se fueron sepultando más profundamente. El calor y la presión los convirtieron en petróleo y gas natural.

(c) Hoy, se perforan los pozos petroleros a través de las capas de arena, sedimentos y rocas para alcanzar los depósitos que contienen gas y petróleo.

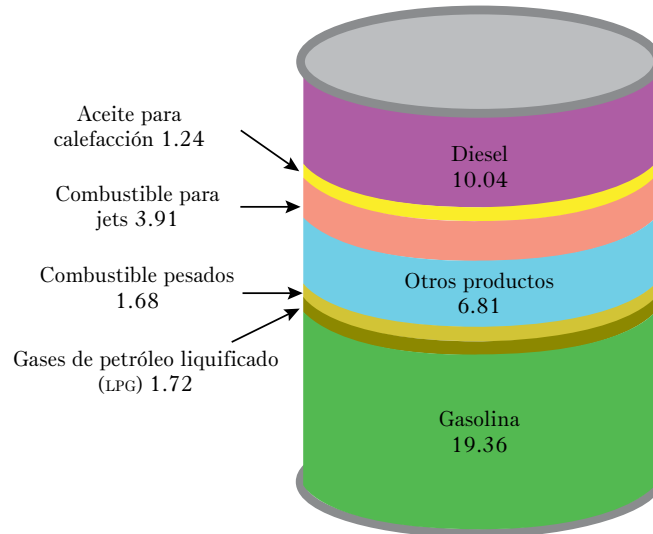
Fuente: Adaptado de EIA-oil.

El petróleo tal y como se extrae de la tierra no se puede usar en las aplicaciones que queremos. Para hacerlo, debe ser sometido a varios procesos de tratamiento y transformación (refinación) para separar los diferentes productos que se usan comercialmente.

Algunos productos que se obtienen en el proceso de refinación del petróleo son: la gasolina, el

diesel, el keroseno, aceites lubricantes, asfaltos, gases como el propano y el butano, etcétera. En la figura 2, se puede observar los diferentes productos que se obtienen de un barril (42 galones) de petróleo. A partir del petróleo también se pueden elaborar otros productos derivados, como plásticos, pesticidas, herbicidas, fertilizantes y fibras sintéticas.

Figura 2
Diferentes productos hechos con un barril del petróleo crudo.
Un barril tiene 42 galones



Fuente: Adaptado de EIA-oil.

EL CARBÓN MINERAL

El carbón es una roca de color negro o negro-marrón compuesta principalmente por carbono y varios hidrocarburos. Es el combustible fósil más abundante en nuestro planeta.

El carbón se clasifica en cuatro tipos principales: antracita, carbón bituminoso, sub-bituminoso y lignito, dependiendo de la cantidad de

carbono que contiene y de la cantidad de energía térmica que puede producir al quemarse. Estas propiedades diferentes se deben a las variaciones en la presión y el calor ejercido sobre los restos de las plantas y animales, durante sus etapas de formación (EIA-coal).

Algunos ingredientes que se obtienen a partir de este mineral tales como el etileno y el metanol, se utilizan en la fabricación de alquitrán,

plásticos, fibras sintéticas, fertilizantes y medicamentos. También se usa el carbón para fabricar acero.

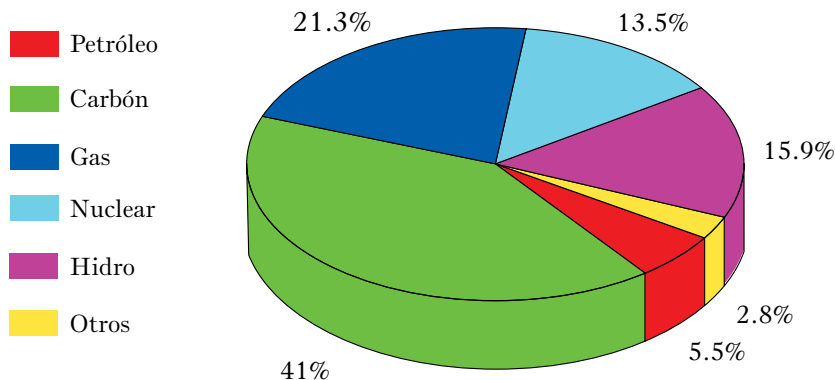
El 40 por ciento de la energía eléctrica que se genera en el mundo, es producida a partir de carbón (véase gráfica 2). En las centrales eléctricas se quema para calentar agua y producir vapor, el cual mueve las turbinas de los generadores de electricidad.

EL GAS NATURAL

El gas natural contiene principalmente metano, un compuesto formado por un átomo de carbono y cuatro de hidrógeno (véase figura 3). También hay presencia en menores cantidades de butano y de propano.

Como se muestra en la gráfica 2 más del 20 por ciento de la energía usada en el mundo para generar electricidad proviene del gas natural.

Gráfica 2
Porcentaje de las contribuciones de las diferentes fuentes de energía para generar electricidad en 2008

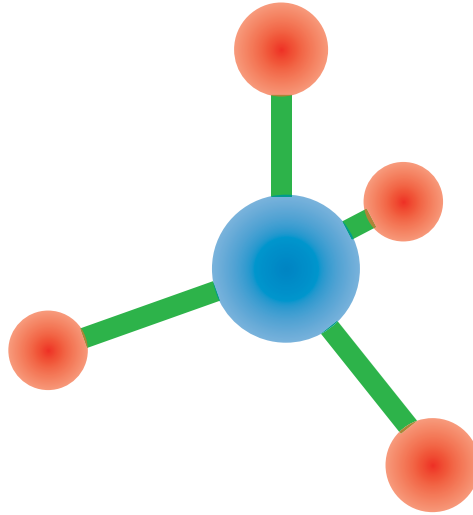


Fuente: EIA.

Figura 3

Dibujo esquemático de una molécula de metano.

La esfera azul representa al átomo de carbono, las rojas a los de hidrógeno



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

En Estados Unidos, más del 50 por ciento de las casas lo usan en el sistema de calefacción (EIA-outlook).

El gas natural también se usa como materia prima para fabricar productos como: fertilizantes, anticongelantes, plásticos, medicinas y explosivos.

Como hemos visto, el petróleo, el carbón y el gas natural son indispensables para mantener la

calidad de vida que tenemos. Sus productos derivados se usan como combustibles para nuestros automóviles, barcos, camiones y aviones, también para calentar las casas en lugares muy fríos o con inviernos muy crudos. La mayor parte de la energía que se produce en el mundo y mantiene la producción de los bienes y servicios que usamos todo el tiempo, se genera a partir de ellos. Además, son materia prima para elaborar pro-

ductos indispensables como pinturas, plásticos y medicinas. Sin embargo, su exploración, explotación, transporte y consumo están causando grandes problemas a nuestro planeta. La explotación y el transporte del petróleo pueden resultar en derrames con consecuencias catastróficas; el hundimiento del buque tanque Exxon Valdez en marzo de 1989 y la explosión del pozo “Horizonte de aguas profundas” en el Golfo de México a principios de 2010 son dos de los desastres ecológicos más difundidos en la historia. En el Exxon Valdez se transportaba más de 54 millones de galones de petróleo de Alaska hacia California, cuando encalló en la Bahía del Príncipe William (NOOA). El accidente resultó en el derrame de cerca de 11 millones de galones de petróleo en las prístinas aguas de la costa de Alaska. En la segunda tragedia, el pozo “Horizonte de aguas profundas” explotó matando a 11 trabajadores que laboraban en la plataforma marina. Durante 86 días se estuvo escapando petróleo hacia las aguas del Golfo de México; no se sabe exactamente cuánto crudo se derramó, pero se habla de aproximadamente 5 millones de barriles, o sea más de 200 millones de galones.

Todavía se está valorando el efecto ecológico de este desastre (NOOA, 2011). La magnitud de los dos derrames antes mencionados hizo que fueran la noticia principal en los medios de comunicación y que la mayoría de la población se enterara. Sin embargo, derrames en menor escala están ocurriendo constantemente; otros pozos marinos están derramando petróleo en los mares, mientras tuberías en mal estado se rompen causando catástrofes ecológicas más locales.

Por otro lado, la explotación del carbón mineral también tiene consecuencias adversas en el medio ambiente. Si se encuentra a profundidades menores a los 60 metros, se puede extraer por medio de grandes máquinas para quitar la capa superior del suelo y algunas capas de rocas para exponer la veta de carbón. Para profundidades mayores se debe construir túneles subterráneos para sacar el carbón. Por otro lado, la extracción superficial es muy agresiva para el medio ambiente y destruye completamente los ecosistemas de la región. Debido a que las actividades de explotación de este mineral están siempre en contacto con las fuentes de agua, puede degradar la calidad de los mantos acuíferos.

Otro problema ecológico de los combustibles fósiles es que para producir energía a partir de ellos, es necesario quemarlos, resultando en la emisión de gases y partículas que pueden alterar negativamente el medio ambiente y nuestra salud (IPCC).

Algunos de los productos liberados al quemar el petróleo y el carbón son: el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el benceno, el formaldehído y el acetaldehído. Algunos de estos gases irritan los ojos y las vías respiratorias, pudiendo ocasionar daños en los pulmones. Otros son responsables de la conocida

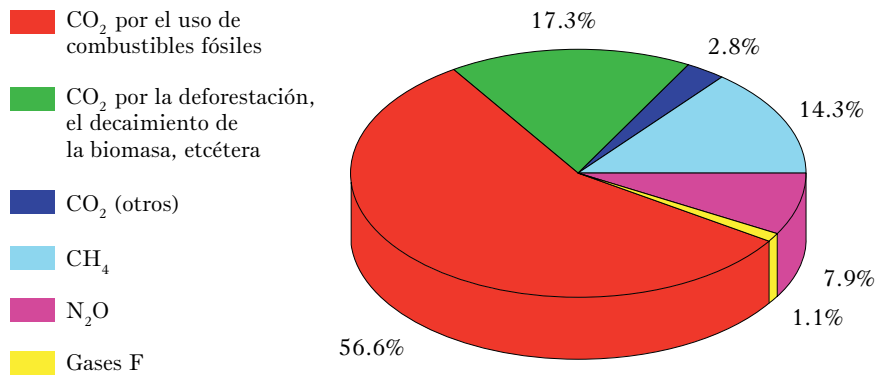
lluvia ácida, la cual afecta las aguas de lagos, ríos y mares, dificultando el desarrollo de las plantas y animales.

También se libera el CO_2 gaseoso, el cual aunque no es tóxico es el principal productor del efecto invernadero (IPCC). Los invernaderos son construcciones dedicadas al cultivo de las plantas, y se utilizan especialmente en el invierno o en lugares muy fríos. En su diseño, sus paneles de vidrio dejan pasar la luz pero evitan que se escape el calor.

Se denomina efecto invernadero al aumento de temperatura que experimenta la tierra debido

Gráfica 3

Porcentaje de los diferentes gases de invernadero generados por el hombre



Fuente: Adaptado de IPCC.

Figura 4
Diagrama explicativo del efecto invernadero en la tierra



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

a que ciertos gases en la atmósfera (vapor de agua, dióxido de carbono, óxido nítrico y metano, por ejemplo) actúan como los paneles de vidrio de un invernadero dejando que llegue la luz solar a la superficie de la tierra, pero evitando la salida de la radiación infrarroja. Sin estos gases,

el calor se escaparía hacia el espacio y la temperatura media de la tierra sería de unos 18 °C bajo cero. El efecto invernadero “natural”, o sea el que no es producido por el ser humano, mantiene la temperatura de la superficie de la tierra aproximadamente a 15 °C, una temperatura

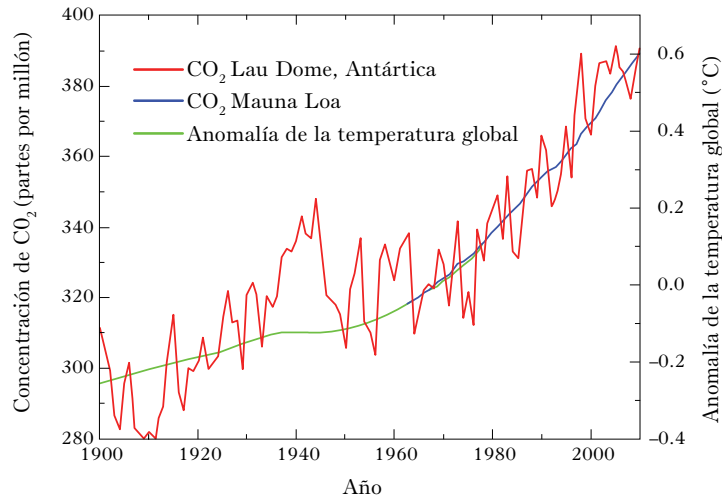
adecuada para la vida. Pero si el efecto invernadero se hace más fuerte, podría hacer la tierra más caliente de lo normal, con resultados catastróficos para la vida de las plantas, los animales y los seres humanos.

Es difícil imaginarse que nosotros podamos modificar el clima de la tierra. Sin embargo, a partir de la Revolución Industrial, como consecuencia de la agricultura y de la industria, hemos comenzado a cambiar el medio

ambiente y el clima; antes de ello, la actividad humana liberaba muy pocos gases a la atmósfera. Desde entonces y debido al crecimiento de la población, la deforestación y la quema de combustibles, se está aumentando la cantidad de gases de invernadero en la atmósfera. La gráfica 4 muestra las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono desde 1900, a partir del cual se puede observar un aumento significativo (CDIAC).

Gráfica 4

Aumento de la concentración de dióxido de carbono (izquierda, fuente (CDIAC)) y de la temperatura global en la superficie de la tierra



Fuente: CDIAC y GISTEMP.

Se estima que las emisiones que nosotros producimos, fueron responsables de un aumento en la temperatura global de la superficie de la tierra de aproximadamente $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el siglo XX (véase gráfica 4) (GISTEMP). Si no se reducen esas emisiones, los científicos predicen que la temperatura de la superficie de nuestro planeta puede subir de 1.4 a $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (según los modelos) en el siglo XXI (IPCC). Como se mencionó anteriormente, este incremento puede ser catastrófico para los seres que vivimos en ella ya que podría aumentar la frecuencia de eventos climáticos extremos como huracanes, tornados, sequías e inundaciones. Se predice que los niveles de los mares podrían elevarse en promedio medio metro, inundando las costas y las tierras bajas de nuestro planeta. Como consecuencia de todo esto, la agricultura, la ganadería y en general todas las fuentes de alimentación se alterarían, pudiendo causar hambrunas en todo el mundo. Esta posibilidad de una catástrofe ambiental muestra la necesidad de disminuir nuestras emisiones de dióxido de carbono. Se requieren reducciones de entre 60-80 por ciento para el final del siglo XXI y finalmente un cambio a fuentes que no emitan gases invernadero, tales como las energías renovables (IPCC).

APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGÍA EN LAS FUENTES CONVENCIONALES DE ENERGÍA

Las industrias del petróleo, del carbón y del gas natural necesitan nuevos desarrollos tecnológicos para hacer frente a las futuras demandas de energía. Como hemos mencionado anteriormente, el agotamiento de los recursos de hidrocarburos convencionales ha hecho que la exploración y extracción del petróleo sea cada vez más difícil, resultando en costos de producción más elevados. Es necesario emplear nuevos métodos y buscar nuevas herramientas para aumentar la eficiencia de su explotación. La nanotecnología puede ayudar a la industria del petróleo, del carbón mineral y del gas natural a resolver algunos de estos retos. Curiosamente, se ha utilizado la nanotecnología en la perforación de los pozos por muchos años. Como lubricantes, se usan los lodos de perforación, arcillas en las que se producen en forma natural discos de aluminosilicatos de aproximadamente 1 nanómetro de espesor. Lo que se espera con la nanotecnología es que se pueda por ejemplo, dise-

ñar y fabricar nanopartículas artificiales con tamaños, forma y propiedades químicas específicas para su uso en la industria petrolera (Krishnamoorti, 2006). Algunas de las aplicaciones que se enumeran a continuación ya se están usando en la industria petrolera, se están desarrollando en universidades y laboratorios, o son aplicaciones potenciales que necesitan más investigación.

Fluidos inteligentes

En la industria petrolera, se está comenzando a usar una clase de líquidos, llamados “fluidos inteligentes” en ciertas aplicaciones específicas (Mokhatab, 2006). Cuando estos fluidos se fabrican usando nanopartículas, los llamamos nanofluidos (Monfared). A líquidos tales como el agua, el petróleo, el aceite, o alguna mezcla de ellos, se les adiciona nanoestructuras para aumentar o mejorar algunas de sus propiedades. Normalmente estas nanoestructuras son materiales inorgánicos que no se disuelven o se agregan en el medio líquido, sino que quedan en suspensión. En el caso de la industria petrolera se

busca que sean compatibles con los fluidos del yacimiento, pero al mismo tiempo que no tenga consecuencias nocivas para el medio ambiente. A continuación mencionaremos algunos ejemplos. Al combinar los lubricantes avanzados de perforación con nanopartículas especialmente diseñadas, puede lograrse un aumento en las velocidades de perforación y al mismo tiempo, disminuir el desgaste de las piezas de excavación de manera significativa. Se busca eliminar el daño en la roca del depósito al perforarlo y poder extraer más petróleo. También se están desarrollando fluidos con una reducción en su arrastre o fricción, aglutinantes para la consolidación de arenas, recubrimientos anticorrosivos y fluidos con propiedades térmicas mejoradas (Chaudhury, 2003; Wasan, 2003).

Sensores y marcadores

En las condiciones de altas temperaturas y presiones que se tienen en los pozos y depósitos petroleros, los sensores eléctricos convencionales y otras herramientas de medición pueden dejar de funcionar en forma adecuada (Mokhatab,

2006). Por esta razón se está trabajando constantemente en el diseño de nuevos sensores confiables y económicos.

Gracias a sus nuevas propiedades ópticas, magnéticas o eléctricas (en comparación con las propiedades del sólido macroscópico), los nanomateriales pueden ser excelentes herramientas para el desarrollo de sensores y la fabricación de marcadores de contraste de imagen (Monfared). Estos nanomateriales, cuando se combinan con los fluidos inteligentes, se pueden utilizar como sensores de gran sensibilidad para medir la temperatura, la presión y el estrés en el fondo de un pozo petrolero bajo condiciones extremas. También podrían medir concentraciones de hidrógeno o azufre dentro del pozo. Tal vez lo más importante del uso de nanomateriales como sensores es su capacidad de poder realizar las mediciones de interés (por ejemplo, temperatura, presión, tensión) sin necesidad de un contacto directo y de poder amplificar las mediciones usando propiedades únicas como la absorción y fluorescencia de las nanopartículas. El uso de nanosensores para estudiar las propiedades en la profundidad del depósito, permitirá entender por ejemplo, la compleja naturaleza

de las interacciones entre la roca y el petróleo y de esta forma diseñar un mejor plan de explotación (Mokhatab, 2006). Del mismo modo, cuando se combina con sondas espectroscópicas y magnéticas y con métodos computacionales, las nanopartículas tienen un gran potencial como marcadores de imagen.

El uso de nanopartículas (a diferencia de los materiales a escalas más grandes) es crucial, debido al tamaño de los poros en los depósitos, la mayor movilidad de las nanopartículas y su mayor área superficial (Mokhatab, 2006). Además, el aumento de la sensibilidad de las sondas y la intensidad de las señales ópticas y espectroscópicas de las nanopartículas requieren sólo pequeñas cantidades de material, lo que podría conducir al desarrollo de instrumentos y métodos para la evaluación de pozos, necesitando solamente pequeños agujeros de prueba que reduzcan al mínimo los costos de perforación de pozos exploratorios.

Nanomembranas

La idea de filtrar sustancias en la nanoescala utilizando una membrana es tomada directa-

mente de la naturaleza. Las células vivas utilizan una forma de nanomembrana para funcionar en procesos que incluyen la transferencia de las sales desde la sangre y el transporte de oxígeno y dióxido de carbono.

Los métodos de fabricación de los nanomateriales han llevado al desarrollo de nanomembranas ligeras y resistentes a gran escala. Una nueva generación de materiales que funcionan como nanomembranas está siendo desarrollada e implementada para la separación de impurezas de metales presentes en el petróleo pesado (Krishnamoorti, 2006). Mediante la explotación de los métodos usados en la industria de la microelectrónica, se pueden fabricar membranas altamente uniformes y reproducibles a un precio muy competitivo.

El uso de nanomembranas también va a ser muy importante en la explotación del llamado gas compacto natural (en inglés Natural Tight Gas). Este es un gas no convencional difícil de extraer debido a que generalmente está atrapado en un tipo de roca dura e impermeable, o en una formación de piedra caliza que es inusualmente impermeable y no porosa. Las nanomembranas permitirán mejorar la explotación de este tipo de

gases, proporcionando métodos eficaces para eliminar las impurezas, separar las diferentes corrientes de gases, y permitir la implementación de tecnologías de gas a líquido (GTL, en inglés Gas to Liquid) (Krishnamoorti, 2006).

La contaminación por productos químicos o gases es un aspecto importante, pero difícil de controlar en la producción de petróleo. La nanotecnología puede hacer que la industria petrolera sea mucho más verde. Se están desarrollando filtros con nanoestructuras que permitan eliminar los compuestos orgánicos volátiles provenientes de los vapores del aceite y el mercurio de los suelos y los mantos acuíferos. Los filtros y las membranas diseñados con precisión nanométrica nos puede proporcionar un control absoluto de lo que fluye a través de dichos filtros o membranas.

Nanomateriales

La nanotecnología puede ayudar en la fabricación de materiales ligeros y al mismo tiempo estructuralmente muy resistentes, cruciales para muchas aplicaciones en la industria petrolera (Krishnamoorti, 2006).

Un compósito es un material hecho de dos o más “componentes”, uno de ellos se escoge con base en sus propiedades de cohesión, mientras el otro, llamado matriz, sirve de refuerzo (Takeuchi, 2009). Nanocompósitos podrían usarse, por ejemplo, para reducir el peso de las plataformas en alta mar, los buques de transporte del crudo y las piezas de perforación.

Por ejemplo, desde hace varios años se fabrican plásticos reforzados con nanopartículas minerales. Cantidades relativamente pequeñas (2-5 por ciento) de partículas de arcilla de tamaño nanométrico pueden proporcionar grandes mejoras en las propiedades mecánicas y térmicas del polímero, así como brindar una protección y una resistencia al fuego. También reducen la contracción y deformación del material. Todos estos beneficios están disponibles sin aumentar significativamente la densidad del compuesto.

Los elastómeros, polímeros que tienen un comportamiento elástico (como cauchos), son componentes muy importantes para la perforación petrolera en condiciones extremas de temperatura y presión, son primordiales en el desarrollo de materiales más fuertes y resistentes, además de ser

inertes y confiables para la perforación en aguas profundas y ultra profundas (Krishnamoorti, 2006). Se ha logrado fabricar una nueva clase de elastómero muy fuerte y resistente al combinar polímeros con nanotubos de carbón y silicatos en capas. Por otro lado, mediante el uso de pequeñas cantidades de nanopartículas se pueden fabricar materiales con módulos de compresión comparables a los elastómeros tradicionales utilizados en las aplicaciones pero con una reducción significativa de peso.

Además, el desarrollo de métodos para controlar la incorporación y distribución de materiales nanocristalinos en matrices de metal pueden resultar en tuberías más resistentes y de menor peso para el transporte de petróleo y gas natural.

Nanorrecostrucciones

La exploración y explotación de petróleo en aguas profundas, son muy difíciles y se complican aún más cuando se realizan a temperaturas y presiones elevadas (Monfared). Además, la tubería y los tanques de almacenamiento son atacados por la corrosión de las sales marinas y ne-

cesitan cambiarse, lo que ocasiona que se detengan los procesos de explotación, con una pérdida económica. Es por eso que la industria petrolera necesita materiales fuertes y resistentes que puedan soportar estas condiciones adversas de presión, temperatura y salinidad. Una solución es usar nanorrecubrimientos, los cuales pueden proporcionar aislamiento térmico y evitar la corrosión. Por ejemplo, se pueden usar recubrimientos de carburo de tungsteno y de nitruro de boro para la producción de equipos de perforación, tuberías y camiones cisterna más duraderos (Monfared).

Nanomateriales con memoria de forma

Otro tipo de nanocompuestos tienen el potencial para fabricar materiales con memoria de forma, que se activan como resultado de cambios en la temperatura, la luz infrarroja, la corriente eléctrica o el pH. Estos materiales podrían ser utilizados en dispositivos para mover o controlar un mecanismo o sistema, ya sea en el fondo de un pozo o en la superficie.

Nanocatálisis

Un catalizador es una sustancia que cambia la velocidad de una reacción química, acelerándola o retrasándola, pero permaneciendo inalterada (no se consume durante la reacción) (Takeuchi, 2009). Generalmente, el catalizador reduce la cantidad de energía necesaria para producir la reacción.

El efecto de los catalizadores está muy relacionado con las superficies y esto lo debemos tomar en cuenta si queremos mejorar la eficiencia de una reacción química. Si el catalizador tiene más área superficial, entonces hay más lugares donde los otros agentes químicos puedan enlazarse y reaccionar. Entre más pequeños son los objetos, su relación área superficial/volumen se incrementa, y la proporción de átomos cercanos, o en la superficie aumenta también. Como consecuencia, al disminuir el tamaño de las partículas crece su reactividad, lo cual es el objetivo de los catalizadores.

Los catalizadores son muy importantes en la industria petrolera, ya que se usan en los procesos de refinación del petróleo crudo en gasolina,

combustible para aviones y para fabricar plásticos y otras sustancias petroquímicas. Se espera que usando la nanotecnología, se puedan crear algunos catalizadores más eficientes para así ahorrar más energía. Algunos procesos que ocurren en la refinación del petróleo y donde la

nanocatálisis juega un papel importante son: la reformación de nafta, el craqueo, el hidrocraqueo y el hidrotratamiento (Davis, 2010). Para aquellos interesados en aprender sobre estos procesos, al final de este capítulo se presenta un apartado especial un poco más avanzado.

Figura 5
Refinería de petróleo



Fuente: Foto cortesía de FEMA.

EXPLOTACIÓN DE PETRÓLEOS PESADOS Y BETUNES

Otra área de gran desafío para la nanotecnología radica en el tratamiento de los crudos pesados y de los betunes. Debido a su alta densidad y viscosidad, son difíciles de manejar y transportar a lugares en los que puedan ser convertidos en productos útiles. Es por esto que se están desarrollando investigaciones sobre catalizadores y procesos catalíticos que puedan usarse en el mismo campo de explotación para mejorar estos hidrocarburos, y que además permitan obtener hidrógeno.

Los petróleos pesados y betunes, pueden ser explotados en la superficie o mediante la perforación de pozos subterráneos. En la perforación, se debe inyectar vapores y otros disolventes para que el petróleo pesado pueda ser bombeado a la superficie. En los procesos de convertir el agua en vapor, bombear los hidrocarburos a la super-

ficie y luego transformarlos a crudos más ligeros se utiliza una gran cantidad de energía y agua. Se genera entre dos a cuatro veces la cantidad de gases de efecto invernadero que los producidos en la explotación de petróleos convencionales. Es por esto que en los campos de petróleos pesados de Canadá, la empresa General Electric (GE) está aprovechando investigación de vanguardia en nanotecnología para hacer frente a estos dos retos ambientales más apremiantes que enfrentan la explotación de los crudos pesados: la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas a la extracción y proceso de mejora, y el tratamiento de agua de producción generada durante la recuperación del petróleo.

La tecnología se basa en zeolitas naturales y en este proyecto se pretende usar estos materiales como membranas en la separación de gases a altas temperaturas. Los materiales también tienen el potencial de ser utilizados como filtros para el agua contaminada.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Procesos que ocurren en la refinación del petróleo y donde la nanocatálisis juega un papel importante (Davis, 2010).

Reformación de nafta

La nafta es un derivado del petróleo obtenido por destilación directa y que se usa principalmente como materia prima de la industria petroquímica, en la producción de alquenos, como etileno y el propileno, así como de otras fracciones líquidas como benceno, tolueno y xilenos. En la industria química se usa como disolvente. También es utilizada para producir gasolina de alto octanaje, mediante el proceso conocido como reformación de nafta.

Para usarse en los autos modernos, las gasolinas deben tener octanajes de 80 a 100, mientras que la nafta obtenida por destilación directa tiene octanajes mucho más bajos de 45 a 55. En el proceso de reformación de naftas, a condiciones de presión moderada y altas temperaturas, se llevan a cabo reacciones catalíticas que

generan hidrocarburos con formas moleculares más complejas, los cuales tienen valores de octanaje más altos. Simultáneamente, en dichas reacciones se produce hidrógeno, que se utiliza en la misma refinería en los procesos de hidrotatamiento.

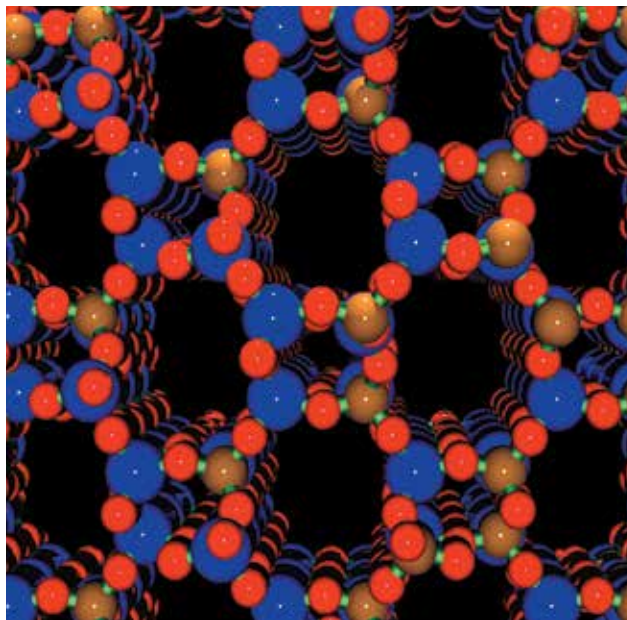
Inicialmente (alrededor de 1950) se usaron catalizadores basados en alúmina (Al_2O_3) como soporte del metal activo platino Pt. El alto costo del platino requería que se obtuviera la máxima eficiencia del metal, lo que se logró con una alta dispersión del platino. En un principio se usaba una alta proporción (10-50 por ciento de peso) del componente activo (Pt) con respecto al soporte, con el problema de que se obtenía un producto gaseoso en lugar de la gasolina de alto octanaje que se deseaba. La reducción del porcentaje de Pt resolvió el problema, y con un porcentaje de 0.5 por ciento de peso, el platino se encuentra en forma de nanopartículas.

Un problema que se tiene con los catalizadores, es que después de un tiempo se desactivan, dejando de funcionar en forma adecuada. La regeneración del catalizador por

oxidación del carbono y re-reducción del Pt puede tomar varios días y durante ese tiempo el reactor queda fuera de servicio. A finales de 1960 se introdujo el elemento renio en los catalizadores de Pt-alúmina, incrementando el tiempo entre regeneraciones del catalizador por un factor de dos. Más adelante se comenzó a usar catalizadores bimetálicos estaño-platino.

Las nanopartículas Pt-Re, Pt-Sn pueden estar en diferentes configuraciones atómicas, con diferentes proporciones de los metales. Su actividad catalítica depende crucialmente de estos factores. Es por esto que hay un continuo interés en el estudio de nanopartículas metálicas y sus propiedades catalizadoras. Estos estudios se realizan con técnicas experimentales tales como la técnica de estructura fina de la absorción de rayos X (EXAFS, en inglés Extended X-ray Absorption Fine Structure), la microscopía de transmisión de electrones (TEM, en inglés Transmission Electron Microscopy), la espectroscopía de la pérdida de energía de los electrones (EELS, en inglés Electron Energy Loss Spectroscopy) y cálculos mecánico cuánti-

Figura 6
Modelo atómico de una zeolita



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

cos. Se espera que estos trabajos sirvan para poder diseñar mejores catalizadores.

En lugar de usar alúmina como soporte del metal noble, también se ha demostrado que se pueden usar zeolitas, las cuales son compuestos cristalinos de silicatos con aluminio. El tamaño de las cavidades y de los túneles, junto con el efecto local de la reactividad de las par-

tículas favorece la producción de hidrocarburos de cierta forma y composición. Se han fabricado catalizadores de diferentes metales como platino, bario y lantano soportados en zeolitas.

Hidrotratamiento

El proceso de hidrotratamiento es utilizado en la industria petroquímica para reducir los compuestos indeseables de azufre (dañinos para el medio ambiente y la salud) en los combustibles. Se usa el hidrógeno, el cual reacciona con los compuestos de azufre contenidos en los hidrocarburos, formando ácido sulfhídrico. En una reacción posterior, este compuesto se convierte en azufre elemental sólido, el cual encuentra su destino final en aplicaciones industriales. En el proceso ocurren reacciones adicionales que permiten eliminar compuestos nitrogenados, convertir las olefinas en compuestos saturados y reducir el contenido de hidrocarburos aromáticos.

En casi todos los procesos de hidrotamiento se usan como catalizadores cuatro metales

combinados de alguna manera: cobalto con molibdeno o tungsteno, y níquel con molibdeno o tungsteno. El reciente interés en producir gasolinas con muy bajos contenidos de azufre, ha motivado el estudio de las propiedades del catalizador activo y de cómo mejorarlo. Al igual que en el caso de reformación de nafta, en los procesos de hidrotratamiento, los catalizadores se encuentran como nanopartículas, y es muy importante conocer su estructura atómica para entender sus propiedades catalíticas. En particular, investigaciones realizadas por la compañía Haldor-Topsoe de Dinamarca han mostrado el potencial de la nanotecnología en la preparación y uso de estos catalizadores. Como resultado directo de estas investigaciones se han desarrollado nuevos catalizadores de molibdeno con cobalto, y de níquel con cobalto para pre-tratamientos de craqueo catalítico fluido (FCC, en inglés Fluid Catalytic Cracking) y un nuevo catalizador de cobalto y molibdeno para la producción de diesel con ultra bajo contenido de azufre. Estos catalizadores ya se están usando en reactores de hidrotratamientos comerciales.

Craqueo

El craqueo catalítico es un proceso utilizado en la refinación del petróleo. Consiste en la descomposición por medio de calor de hidrocarburos pesados del petróleo en presencia de un catalizador, con el propósito de convertirlos en hidrocarburos livianos de cadena corta. En volumen el craqueo catalítico es el proceso más grande en la refinación del petróleo y económicamente es muy importante. Como catalizadores también se pueden usar las zeolitas. La forma y la estructura interna de los poros de tamaño nanoscópico de una zeolita puede afectar la selectividad con la que las moléculas de determinado producto se forman en las transformaciones químicas catalizadas por la zeolita. Aunque hay muchas zeolitas naturales, también se pueden sintetizar en forma artificial controlando el tamaño de sus cavidades y de los canales que las conectan. La introducción de otros silicatos como los de titanio, ha abierto nuevas posibilidades para su uso como catalizadores en las reacciones de craqueo.

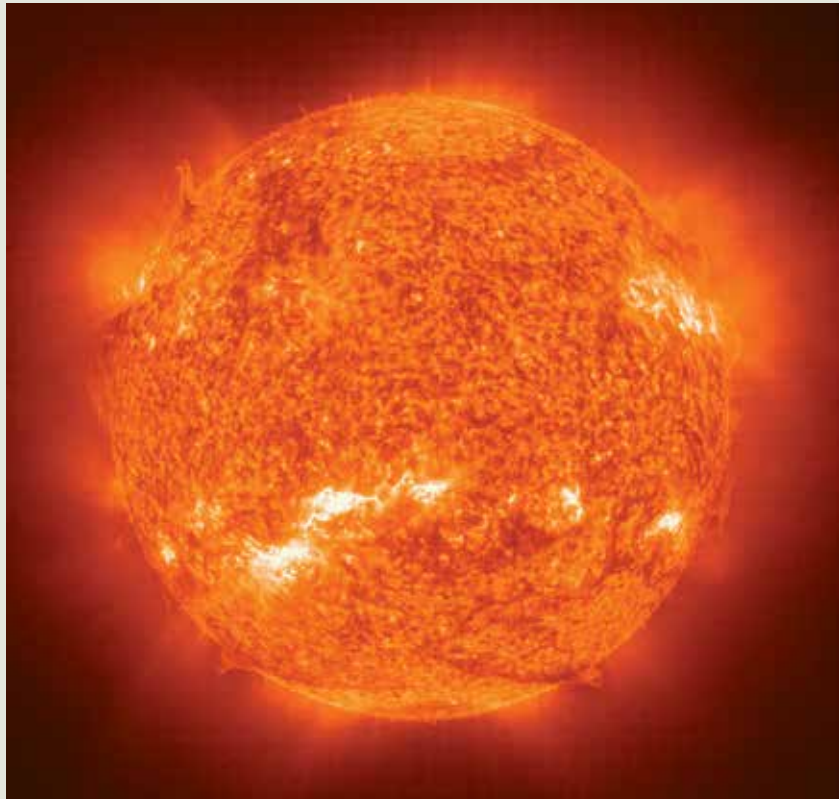
Hidrocraqueo

En este método se emplea el gas hidrógeno. Como catalizadores se usan principalmente 1) sistemas binarios como los descritos en el hidrot ratamiento, o 2) zeolitas con metales nobles.

Oxidación del monóxido de carbono

También se puede usar nanocatalizadores para tratar los gases tóxicos producidos por la combustión de la gasolina en nuestros automóviles. El platino sirve como catalizador en la reacción química en la cual el monóxido de carbono y el óxido nítrico producidos en la combustión de la gasolina, son convertidos en algo menos perjudicial como el dióxido de carbono y el nitrógeno. Se piensa que el empleo de nanopartículas de platino podría reducir los costos de los convertidores catalíticos. También se investiga el potencial uso de otros materiales que normalmente no se consideran como buenos catalizadores como el oro, pero que en forma de nanopartículas sí lo son.

Figura 7
El sol



Fuente: Foto cortesía NASA.

Fuentes de energía renovables: energía solar

El sol es una esfera enorme de gas caliente que brilla en el centro de nuestro sistema solar; nos proporciona luz, calor y energía. Gracias al sol, existe vida en la tierra.

La temperatura del sol es de unos 5,500 °C en la superficie y más de 15.5 millones de grados centígrados en el centro. Su masa está formada por hidrógeno y helio con un 72 y 26 por ciento respectivamente. El resto de los elementos (siendo el oxígeno, el carbono y el nitrógeno los siguientes más abundantes) representan sólo un 2 por ciento (NASA).

La energía del sol proviene de reacciones de fusión nuclear que se producen en el interior de su núcleo. En una reacción de fusión típica, dos núcleos atómicos de hidrógeno se unen, creando un nuevo núcleo de helio. La fusión produce la energía mediante la conversión de la materia en

energía. Esto ha estado sucediendo por cerca de 4,500 millones de años y se ha utilizado casi la mitad del hidrógeno en su núcleo. El sol continuará ardiendo a través del hidrógeno por otros 5 mil millones de años, y el helio se convertirá en su principal combustible.

La mayor parte de la energía emitida por el sol es en forma de luz visible y una forma de radiación conocida como rayos infrarrojos, que sentimos como calor. El sol también emite radiación de partículas, compuesta principalmente de protones y electrones.

La cantidad de energía que llega del sol es muy abundante y se calcula que cada hora la tierra recibe suficiente como para satisfacer las necesidades energéticas globales para todo un año. Esta fuente se podría aprovechar de muchas maneras, por ejemplo, para producir energía térmica con

calentadores, o para obtener energía eléctrica usando celdas fotovoltaicas.

ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

Una de las formas más directas de usar la energía del sol, es como energía calorífica, la cual se puede usar para calentar el interior de los hogares y edificios, así como el agua que se consume en ellos. Los sistemas de calefacción solar pueden ser clasificados como pasivos o activos (EIA). En la calefacción pasiva, la energía solar es absorbida directamente en la casa o edificio para reducir el consumo de energía para calentar los espacios habitacionales. En general, ningún equipo mecánico, como bombas o ventiladores, es necesario. Requieren de un colector, el cual generalmente es parte integral de la edificación. Los invernaderos son un ejemplo de calefacción solar pasiva.

Los sistemas activos de calefacción requieren de un colector para recoger la radiación solar y calentar el aire o algún líquido. Se usan ventiladores o bombas para circular el aire caliente o el líquido que absorbe el calor. Los sistemas activos

muchas veces incluyen algún tipo de sistema de almacenamiento de energía (EIA-collectors).

Colectores de energía solar

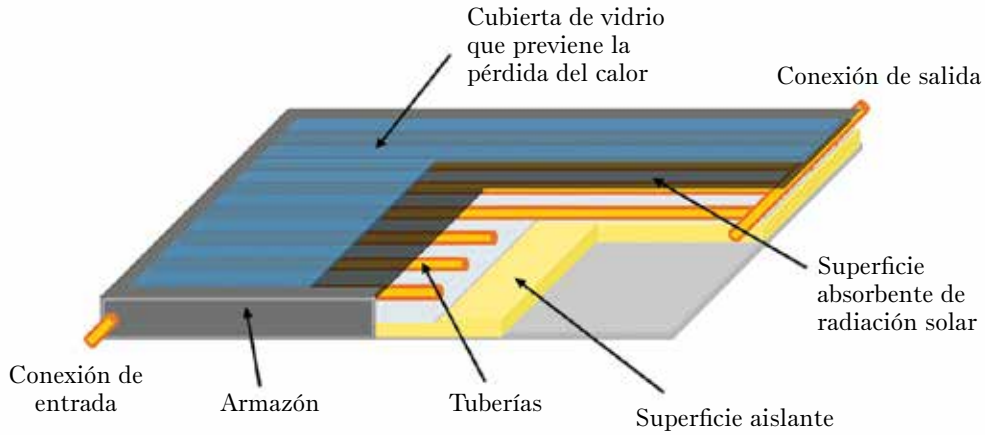
Dependiendo de la temperatura que se necesite alcanzar, se tienen diferentes tipos de colectores. En los de baja temperatura, el área del colector que intercepta la radiación es la misma que el área de absorción de la radiación (EIA-collectors).

Los colectores solares planos normalmente no llegan a temperaturas superiores a los 60 °C y a menudo se utilizan para la calefacción de edificios. En general están formados por una superficie metálica que lleva adherida una tubería, estando todo el conjunto revestido de pintura negra (que en el caso ideal no refleja la luz incidente). Por las tuberías circula agua que es calentada por la radiación solar. Para evitar las pérdidas de calor, se coloca una cubierta transparente de vidrio entre la superficie de absorción y el medio ambiente. En su parte posterior se tiene un soporte hecho de material térmicamente aislante.

La eficiencia de un colector solar de baja temperatura depende en gran medida de las

Figura 8

Diagrama esquemático de un colector de energía plano



Fuente: Cortesía de Stan Zurek.

propiedades del vidrio de la cubierta. La más importante es la de ser transparente a la luz visible y a la radiación infrarroja de onda corta, pero opaco a la radiación infrarroja de onda más larga. El sol incide sobre el vidrio del colector, que deja pasar la mayor parte de la energía. Ésta calienta el material que absorbe la luz la cual a su vez, se convierte en emisora de radiación en onda larga infrarroja. Como el vidrio es muy opaco para esas longitudes de onda, a pesar de las pérdidas por transmisión (el vidrio es un mal aislante térmico), el colector se calienta.

Si se requieren temperaturas más altas, se usan los concentradores, los cuales, como su nombre lo indica, concentra la radiación solar en un área más pequeña y generalmente son espejos parabólicos.

Generadores de energía solares

La energía solar térmica puede también usarse para producir energía eléctrica. En una planta termoeléctrica tradicional se calienta agua a temperaturas muy altas quemando combustibles fósiles como el carbón, petróleo o gas natural. El

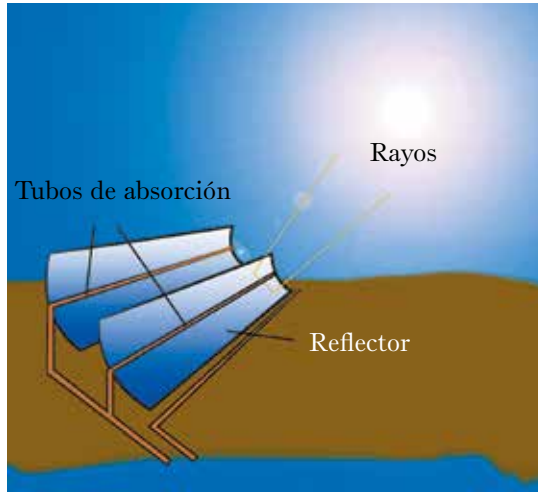
vapor producido pasa a presión por las turbinas de un generador de energía eléctrica. La diferencia en una planta generadora de energía solar es que en este caso no se usan combustibles fósiles, y el vapor se produce utilizando sistemas de concentración solar para alcanzar las altas temperaturas necesarias para calentar el agua (EIA-plants, Texas).

Dependiendo del tipo de concentrador, las plantas solares generadoras de energía se clasifican en tres categorías principales: las de canales parabólicos, plato o disco parabólico y torre central.

Plantas de canal parabólico

La energía solar es enfocada por espejos alargados en forma de canaleta y con un perfil parabólico. A lo largo del foco de la parábola se tiene un tubo, dentro del cual circula un líquido, el cual absorbe la radiación solar y se calienta. Un canal parabólico puede enfocar la luz solar de 30 a 100 veces su intensidad normal, alcanzando temperaturas de funcionamiento de alrededor de 400 °C (EIA-plants). El fluido dentro del tubo que va en el foco de la parábola puede ser un

Figura 9
Diagrama esquemático de una planta generadora
de canaleta parabólica. Planta de Boron California (derecha)



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.



Fuente: Cortesía del Laboratorio Nacional Sandia.

aceite térmico, o cualquier sustancia con una buena capacidad para retener el calor, estable a temperaturas elevadas y lo suficientemente fluido para poder recorrer grandes longitudes.

El colector se inclina con el sol cuando éste se mueve durante el día de este a oeste, para asegurarse de que la luz del sol siempre esté enfocada en el receptor (Texas). Generalmente, una planta solar está formada por varias filas paralelas de colectores solares de canal parabólico. El

fluido que se calienta a medida que circula por los tubos, llega a una serie de “intercambiadores de calor” donde transfieren su calor y generan vapor sobrecalentado a alta presión, el cual se usa para generar electricidad en una turbina convencional (EIA-plants).

Plantas de disco o plato parabólico

Un sistema de plato o disco solar consta de dos partes principales: un concentrador solar que

sigue el movimiento del sol y concentra su energía en el punto focal del disco y una unidad de conversión de energía que incluye un receptor térmico y un generador (Texas). El coeficiente de concentración del disco solar es mucho mayor que el del canal parabólico, en promedio más de 2 mil, y puede calentar la temperatura del líquido a más de 750 °C (EIA-plants).

Su funcionamiento es diferente al del sistema de canal parabólico y no es necesario transportar un fluido caliente por tuberías. El generador en un sistema de disco parabólico transforma la energía del sol en energía mecánica mediante la compresión de un fluido de trabajo (cuando éste está frío). Al calentarlo y dejar que se expanda, empuja un pistón o mueve una turbina. Este sistema está acoplado a un generador eléctrico para convertir la energía mecánica en energía eléctrica (EIA-plants).

Plantas de torre de energía solar o de receptor central

Este sistema utiliza miles de espejos planos, llamados heliostatos, que se mueven continuamente siguiendo el sol. Por medio de ellos se refleja

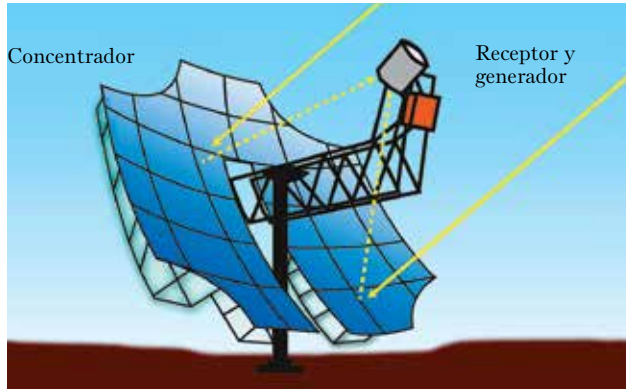
y concentra la energía solar en una torre de recepción central (EIA-plants). Allí, se calienta un fluido de transferencia de calor, por ejemplo, una sal de nitrato fundida, la cual se utiliza para producir el vapor usado para generar electricidad. La sal fundida puede alcanzar temperaturas de más de 550 °C y normalmente se almacena en un tanque para conservar su calor (Texas).

Las pérdidas de energía por el transporte de energía térmica se reducen al mínimo, debido a que la energía solar se transfiere directamente por reflexión de los heliostatos a un sólo receptor.

Mejoramiento de la eficiencia en colectores solares

Como se mencionó anteriormente la eficiencia de los colectores solares depende crucialmente del vidrio que se use. Durante los últimos años se ha puesto un esfuerzo enorme para mejorar las propiedades del vidrio. En primer lugar, debe ser lo más transparente para la luz incidente. Su transmitancia, o sea la fracción de la luz incidente que pasa a través del vidrio, debe ser máxima, pero a su vez se necesita que sea

Figura 10
Diagrama esquemático de una planta generadora de disco parabólico



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.



Fuente: Cortesía del Laboratorio Nacional Sandia.

Figura 11
Diagrama esquemático de una planta reguladora de torre de energía



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.



Fuente: Cortesía Esolar.

Cuadro 1
Transmitancia de vidrios de diferentes materiales

<i>Material</i>	<i>Grosor (mm)</i>	<i>Transmitancia solar</i>	<i>Transmitancia de la radiación infrarroja</i>
Vidrio normal	3.9	0.83	0.02
Vidrio bajo en hierro	3.2	0.90	0.02
Perspex	3.1	0.82	0.02
Fluoruro de poli vinil (tedlar)	0.1	0.92	0.22
Poliéster (milar)	0.1	0.87	0.18

Fuente: Boyle, 2004.

opaco a la radiación infrarroja (para que no se escape el calor). Aumentar la transmitancia de la luz solar incidente, se logra reduciendo el contenido de hierro que tiene el vidrio. También se puede usar plásticos con propiedades similares al vidrio, aunque éstos deben estar protegidos contra los efectos de la luz ultravioleta que los puede dañar. En el cuadro 1 se muestra la transmitancia de algunos vidrios.

La limpieza es muy importante para mantener una buena transmitancia en los vidrios de los colectores, y una buena reflectancia de los espejos en los concentradores solares. Existen en el mercado varios artículos para la protección de las superficies de vidrios y plásticos a la intem-

perie. Uno de estos productos crea una capa nanométrica de un material hidrofílico. El proceso foto catalítico, funciona con los rayos ultravioletas del sol para que de una manera gradual y continua se descomponga la suciedad orgánica. Se venden en el mercado con marcas como nano-solar, nanosafeguard, entre otras.

CELDA FOTOVOLTAICAS

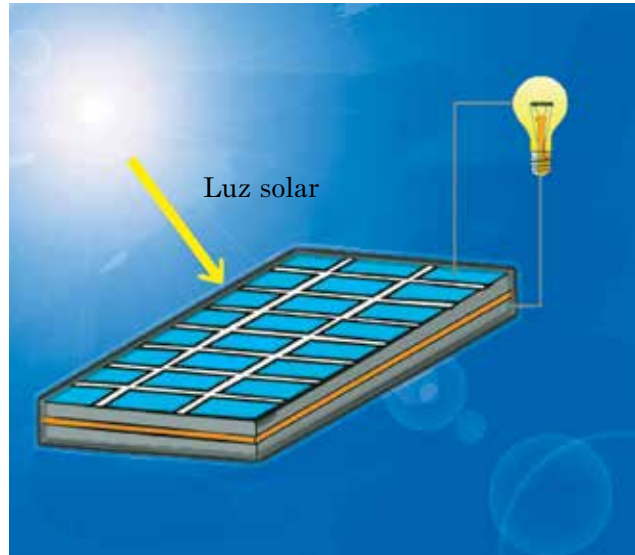
A diferencia de los ejemplos anteriores en los que la energía solar se transforma en energía calorífica como paso intermedio o final, en las celdas fotovoltaicas la energía del sol se transforma directamente en energía eléctrica (EIA-photo), usando una propiedad que presentan

algunos materiales, llamada efecto fotoeléctrico: si se incide luz sobre estos materiales, se emiten electrones, los cuales son capturados y pueden producir una corriente eléctrica (Takeuchi, 2009). Las celdas solares están fabricadas de materiales semiconductores como el silicio, el cual es el segundo elemento más abundante en nuestro planeta.

No todos los materiales permiten el paso de la corriente eléctrica con la misma facilidad. A los que ofrecen menos resistencia se les denomina conductores. En general, los metales son buenos conductores de la electricidad. Otros materiales casi no conducen la corriente eléctrica y se llaman aislantes, como por ejemplo: la madera, las cerámicas, los plásticos, y los cauchos. Los semiconductores son materiales que conducen la electricidad de forma intermedia entre un aislante y un conductor. Ejemplos de semiconductores son: el silicio, el germanio, el arseniuro de galio y el nitruro de galio.

La celda solar más sencilla se puede fabricar uniendo dos capas delgadas de materiales semiconductores con diferentes propiedades, conocidos respectivamente como semiconduc-

Figura 12
Celda fotovoltaica

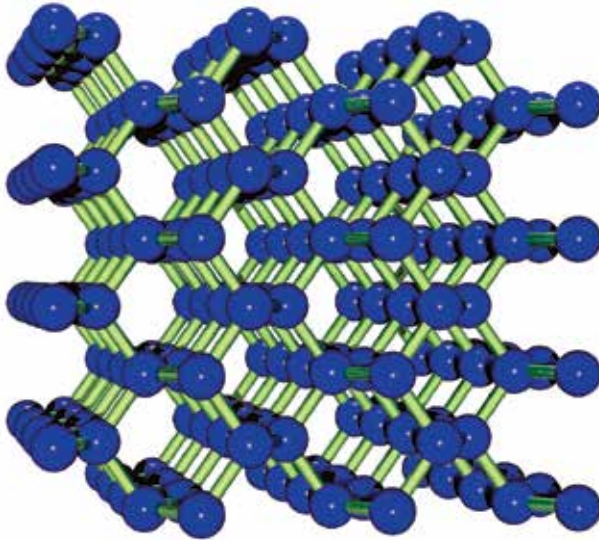


Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

tores tipo “p” (positivos) y tipo “n” (negativos). Un semiconductor de tipo “p” se puede crear dopando el silicio con una pequeña cantidad de átomos de boro, mientras que el tipo “n” se puede crear dopándolo con una pequeña cantidad de fósforo.

La explicación del funcionamiento de la celda fotovoltaica se presenta el apartado de información adicional.

Figura 13
Estructura cristalina del silicio



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

INFORMACIÓN ADICIONAL

El silicio

El silicio tiene cuatro electrones de valencia y su estructura cristalina es cúbica centrada en las caras, similar a la del diamante (véase figura 13). En ella, los átomos tienen cuatro vecinos en un arreglo de tetraedro regular (piramidal). Su estabilidad se debe a que cada átomo comparte

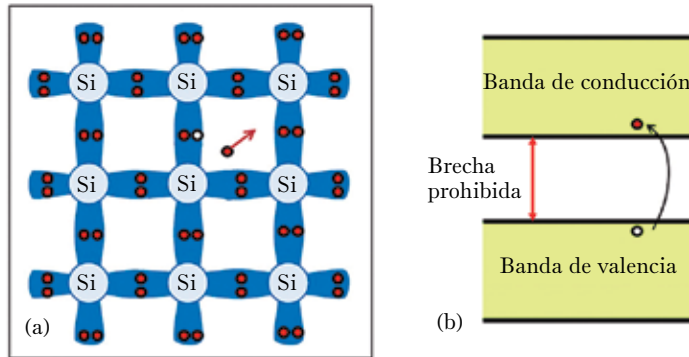
un electrón con cada uno de sus vecinos cercanos formando enlaces covalentes muy fuertes (McKelvey, 1980).

En la figura 14 mostramos esquemáticamente en dos dimensiones (por simplicidad) esta situación. Los círculos grandes representan los átomos, mientras los pequeños representan los electrones de valencia.

Los electrones del silicio (y en general de los sólidos) no pueden tener cualquier energía, sino que deben de estar en ciertas bandas de energía (Takeuchi, 2009). Los electrones de valencia, responsables de los enlaces entre los átomos de silicio, están en la banda de valencia. En el caso de los semiconductores esta banda está completamente ocupada y no le caben más electrones. En ciertas ocasiones, los electrones pueden adquirir energía suficiente para ocupar la siguiente banda, llamada de conducción, y se pueden mover dentro del material (en la figura 14a se muestra como un círculo pequeño con una flecha), produciendo una corriente eléctrica. Al abandonar su posición inicial, el electrón deja un hueco (círculo pequeño vacío en la figura 14b) o sea una región con carga positiva. Los huecos pueden

Figura 14

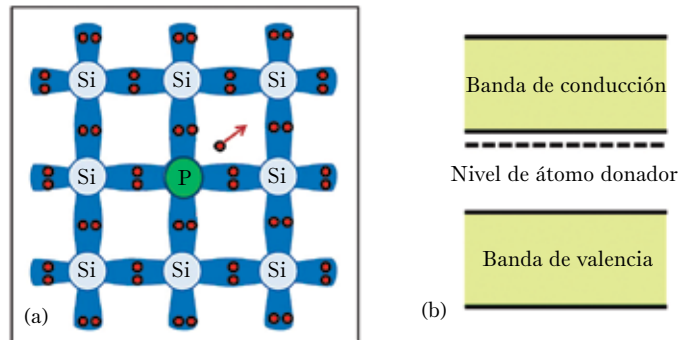
- (a) Modelo en dos dimensiones de la creación de un par electrón-hueco en el silicio
- (b) Bandas de energía en el silicio, y la creación de un par electrón-hueco



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Figura 15

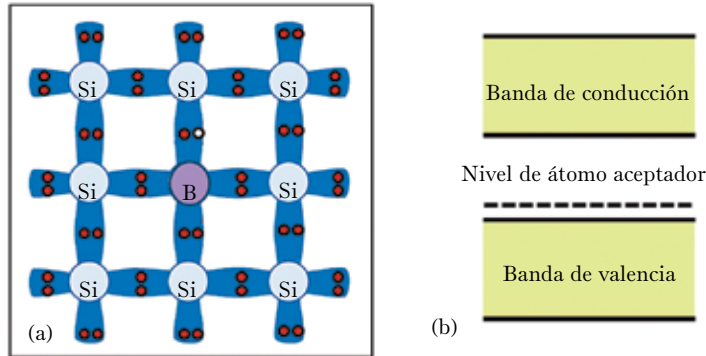
- (a) Modelo en dos dimensiones del silicio dopado con fósforo (tipo "n")
- (b) Bandas de energía en el silicio dopado con fósforo



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Figura 16

- (a) Modelo en dos dimensiones del silicio dopado con boro (tipo “p”)
 (b) Bandas de energía en el silicio dopado con fósforo



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

moverse y también contribuyen a la corriente eléctrica. El proceso inverso también sucede: la desaparición de un electrón y de un hueco.

La energía entre las bandas de valencia y conducción se conoce como brecha o banda prohibida (en inglés Band-gap) y en el caso del silicio es de 1.11 eV.

Semiconductores extrínsecos

La conductividad de un material semiconductor se puede mejorar por medio del dopaje, es decir, añadiendo una impureza, ésta puede ser un ele-

mento con tres o cinco electrones de valencia. Un semiconductor se llama intrínseco cuando no contiene ninguna impureza y extrínseco en caso contrario.

Un semiconductor de tipo “n” se puede crear dopando el silicio con una pequeña cantidad de fósforo (símbolo químico P) (Boyle, 2004). Cada átomo de fósforo reemplaza a uno de silicio, y como tiene cinco electrones de valencia, uno más que el silicio, este electrón extra no es necesario para la formación de enlaces con los otros cuatro átomos de silicio (véase figura 15a).

El exceso de electrones en la red ocasiona que la conductividad sea mucho mejor en comparación con los semiconductores intrínsecos. Estos electrones forman niveles de energía en la brecha prohibida muy cerca de la banda de conducción y pueden saltar fácilmente a ella con muy poca energía (véase figura 15b). Como los electrones son partículas cargadas negativamente, el silicio dopado de esta manera se conoce como semiconductor tipo “n” (negativo).

Cuando una pequeña cantidad de átomos trivalentes (por ejemplo, el boro (B)) se añade al silicio cristalino, cada átomo de boro reemplaza a uno de silicio, pero el boro tiene tres electrones de valencia, uno menos que el silicio, la falta de este electrón para formar el cuarto enlace covalente produce un hueco (véase figura 16a) (Boyle, 2004). Los huecos crean niveles muy cercanos a la banda de valencia, y fácilmente pueden pasar a ella con muy poca energía (véase figura 16b). Como la ausencia de carga negativa puede considerarse equivalente a una carga positiva, el silicio dopado de esta manera se conoce como semiconductor tipo “p” (positivo).

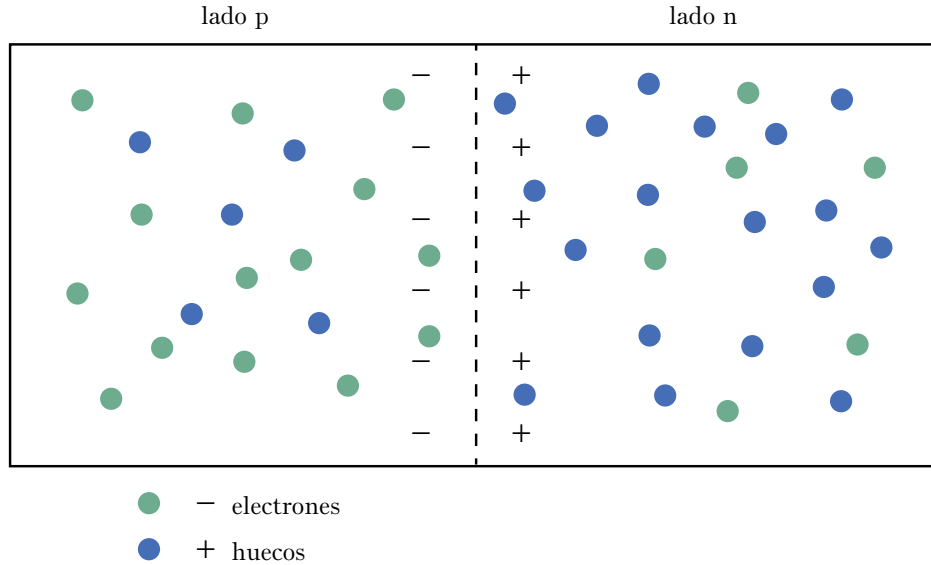
La unión pn

Cuando un semiconductor tipo “n” y un semiconductor de tipo “p” se ponen en contacto, las concentraciones desiguales de electrones y huecos resultan en una difusión de los electrones a través de la unión desde el lado “n” al lado “p” y otra de los huecos en dirección opuesta hasta que se establece el equilibrio. Al difundirse los electrones, dejan iones cargados positivamente en la región “n”, mientras que los huecos dejan iones fijos con carga negativa en la región “p”. La zona cercana a la interfaz pn pierde su neutralidad y forma una región que se denomina de agotamiento de carga, la cual a medida que progresa el proceso de difusión se va incrementando en anchura. Sin embargo, al acumularse los iones positivos en la zona “n” y los iones negativos en la zona “p”, se crea un voltaje que se opone al proceso de difusión para los electrones y los huecos (McKelevey, 1980).

Celda fotovoltaica de unión pn

La celda solar más sencilla es una unión pn: una oblea de silicio tipo “p” con una capa muy delgada de silicio tipo “n” en uno de sus lados (Boyle,

Figura 17
Unión pn



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

2004). Cuando la luz solar incide sobre la unión pn, y lleva una energía mayor que la brecha prohibida, puede promover electrones de algunos de los átomos de silicio a la banda de conducción, generando un hueco en la banda de valencia.

El voltaje que está en la zona de agotamiento hace que los electrones se muevan hacia la región “n”, mientras los huecos lo hacen hacia la región “p”, y de esta forma se genera una corriente eléctrica.

~

Figura 18

La estación espacial internacional genera su energía con celdas solares



Fuente: Cortesía de la NASA.

El éxito que tuvieron las celdas solares en sus aplicaciones en el espacio exterior, generó un gran interés en su mejoramiento, acompañado de una reducción en sus costos.

En la actualidad, celdas fotovoltaicas sencillas dan la energía para que calculadoras y relojes de mano funcionen. Sistemas más complicados proporcionan electricidad para bombear el agua, equipos de comunicaciones e incluso proveen de electricidad a edificios y hogares.

OTROS TIPOS DE CELDAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

A pesar de que las celdas solares de silicio cristalino dominan el mercado, siguen siendo bastante caras debido a que para su fabricación se usa silicio mono cristalino (un pedazo de silicio con la estructura que se muestra en la figura 13) sin defectos y sin impurezas. El proceso para obtener esta calidad de silicio es complicado y muy

Figura 19
Celdas solares para proveer electricidad a un edificio



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

costoso. Otra desventaja de las celdas solares es que son pesadas, frágiles y además difíciles de instalar. Por esta razón, hay búsqueda continua de nuevos materiales que den como resultado fotoceldas más baratas, eficientes y fáciles de manipular.

Uno de estos materiales es el silicio policristalino, es decir un material formado por agregados de pequeños cristales de silicio, a menudo llamados granos. Son mucho más simples

y baratos de fabricar. Esto los hace mucho menos costosos para los compradores. Aunque su durabilidad es comparable a la de las celdas monocristalinas, las celdas solares policristalinas son menos eficientes, debido a que los huecos y electrones se pueden recombinar en las fronteras entre granos. Sin embargo, se puede procesar el material de tal manera que se tenga granos más grandes y por ende celdas más eficientes (Boyle, 2004).

CELDA SOLARES DE PELÍCULAS DELGADAS

Arseniuro de galio

El arseniuro de galio (GaAs) es un semiconductor compuesto con una estructura cristalina similar a la del silicio, pero con dos tipos diferentes de átomos: el galio (Ga) y el arsénico (As). El GaAs es un material muy bueno para la fabricación de celdas solares de gran eficiencia por varias razones (Boyle, 2004). Para obtener la máxima eficiencia en la conversión de luz en energía eléctrica, es importante que la energía de la banda prohibida del material semiconductor coincida muy bien con la energía de la radiación incidente. En el caso de luz solar en el rango amarillo-verde es de aproximadamente 1.5 eV y la banda prohibida del GaAs es de 1.43 eV, casi la ideal para una celda solar de unión pn. Además el arseniuro de galio tiene una capacidad de absorción alta y requiere una celda de tan sólo unas pocas micras de espesor para absorber la luz solar, mientras una celda de silicio cristalino requiere un grosor de 100 micras o más. A diferencia de las fotoceldas de silicio, las de GaAs

son relativamente insensibles al calor, algo muy importante para aplicaciones de las celdas a altas temperaturas. Además el arseniuro de galio es muy resistente al daño por radiación, esto es útil para aplicaciones en el espacio (Sandia-photo).

En las celdas de silicio, la unión pn se forma por el tratamiento de la parte superior de una oblea de silicio de tipo “p” con un dopante tipo “n”. Este proceso no funciona en el caso de GaAs. Es por esto que una celda solar de GaAs se fabrica como una secuencia de capas delgadas de monocristales dopados con diferentes impurezas. Estas capas delgadas se crecen con métodos tales como la epitaxia de haces moleculares o MBE (siglas en inglés de Molecular Beam Epitaxy) o la deposición química de vapor o CVD (siglas en inglés de Chemical Vapor Deposition). En estos métodos se tiene un control de crecimiento capa por capa, y es por esto que la nanotecnología es muy importante en la fabricación de celdas solares más eficientes (Sandia-photo).

El gran inconveniente de las celdas solares de GaAs es su costo y por eso solamente se usa en aplicaciones donde tener una buena eficiencia es muy importante, como es el caso de satélites y naves espaciales.

Silicio amorfo

Las celdas solares pueden también ser fabricadas a partir de películas delgadas de un material llamado silicio amorfo (a-Si), en el cual, los átomos no están tan ordenados como en el caso del silicio cristalino (Boyle, 2004). En el silicio amorfo no todos los átomos están enlazados con otros cuatro átomos vecinos, resultando en enlaces libres, o no saturados, los cuales pueden absorber los electrones adicionales en la celda, haciéndola poco efectiva. Una manera de solucionar este problema es usando átomos de hidrógeno para saturar dichos enlaces (Boyle, 2004).

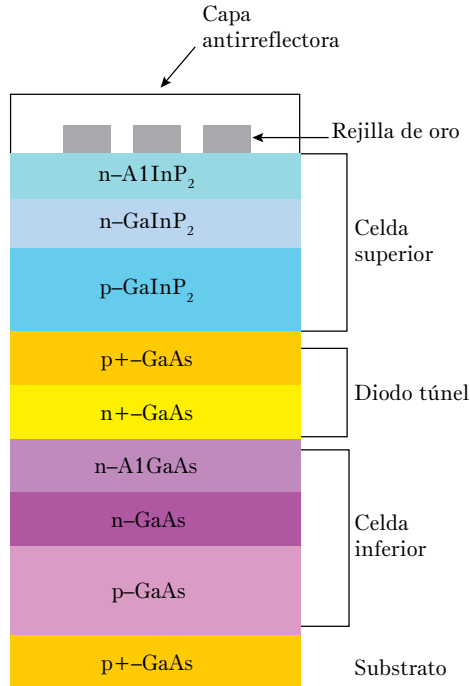
Las celdas solares de a-Si son mucho más baratas de producir, además de que el silicio amorfo absorbe mejor la luz, por lo cual se pueden usar películas delgadas para fabricarlas. Sin embargo, tienen el problema de que son muy poco eficientes, además de que se degradan de manera significativa cuando se exponen al sol. Pero debido a su bajo costo, son muy usadas en aplicaciones donde lo importante no es la eficiencia, sino el precio, como en el caso de las calculadoras.

Otros materiales usados en celdas solares de películas delgadas son por ejemplo: el di-seleniuro de cobre e indio (CuInSe_2 , abreviado CIS), di-seleniuro de cobre, indio y galio (CuInGaS_2 , o CIGS) y telurio de cadmio (CdTe). En el laboratorio, las celdas de CIGS han sido las más eficientes. Aunque el valor de la banda prohibida del CdTe es muy cercana al óptimo y las celdas solares fabricadas con este material tienen una eficiencia razonablemente buena y no se degradan con el sol como las de a-Si, su uso se está descontinuoando debido a que el cadmio es un material muy tóxico, y se deben tomar muchas precauciones para la fabricación, el uso y el eventual deshecho de este tipo de celdas (Boyle, 2004).

Multicapas

Se obtienen celdas más eficientes usando celdas solares múltiples, con más de una unión pn (multiuniones) apiladas una sobre otra. Cada una de estas uniones está hecha de un tipo de semiconductor con una brecha prohibida específica que los hace eficientes en la absorción de luz de una determinada longitud de onda (color). Los semi-

Figura 20
Diagrama de una celda solar de multicapas



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

conductores son cuidadosamente seleccionados para que el sistema de multicapas pueda absorber la mayor cantidad de energía posible del espectro solar (Boyle, 2004).

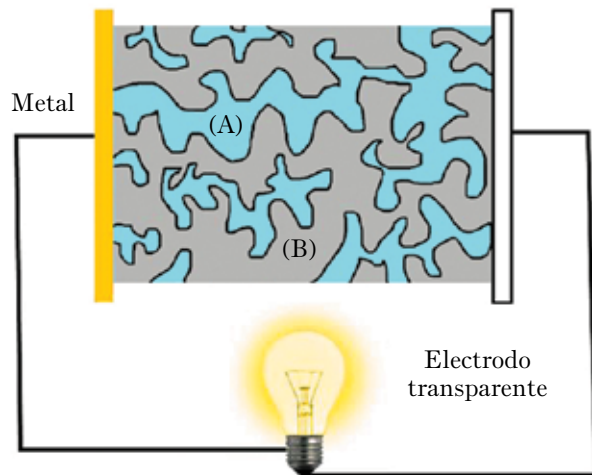
Las multicapas también se fabrican con métodos usados en la nanotecnología, como la epitaxia de haces moleculares o MBE, debido a que se ne-

cesita un control muy preciso en el crecimiento capa por capa.

CELDAS ORGÁNICAS

En lugar de usar películas delgadas de semiconductores, otra opción en celdas solares es emplear polímeros y materiales orgánicos sintéticos. En éstos, se utilizan moléculas orgánicas que se obtienen de la industria petroquímica y cuyos procesos de fabricación son más baratos,

Figura 21
Esquema de una celda solar orgánica



Fuente: Adaptado de Aydil.

además, energéticamente mejores que los de las celdas basadas en semiconductores (Aydil, 2007). Como consecuencia, además del costo, son más ligeras, flexibles y menos frágiles. Estas características las hace muy convenientes para integrarlas en materiales flexibles o polímeros orgánicos o incluso en fibras textiles.

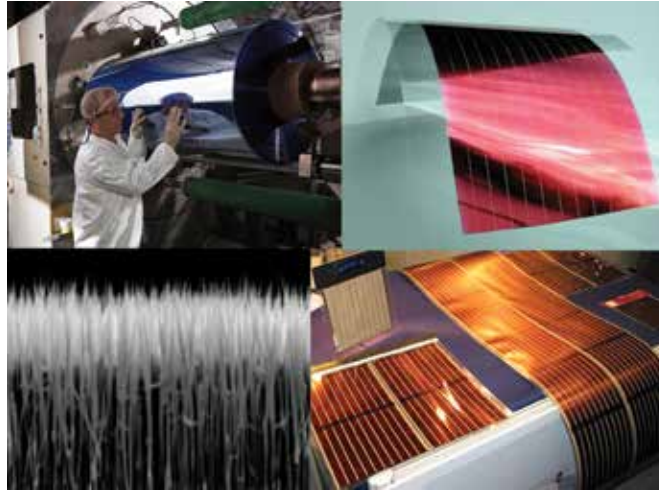
Siempre hemos aprendido que un ejemplo de material aislante son los plásticos, los cuales a diferencia de los metales, son malos conductores de la electricidad. Esto es cierto en la mayoría de casos y por esa razón se usan los plásticos como aislantes en los cables eléctricos. Sin embargo, es posible hacer que sean conductores eléctricos. Los plásticos son polímeros, o sea moléculas orgánicas que se repiten periódicamente para formar cadenas largas. Para que un polímero pueda conducir electricidad, debe tener las siguientes características: sus enlaces carbono-carbono deben alternar entre enlaces sencillos y enlaces dobles, y además deben doparse (en el mismo sentido que hablamos de dopaje en semiconductores), lo que significa que se remueven electrones para formar huecos (por medio de procesos de oxidación) o se le adicionan electrones por medio de

procesos de reducción. Los electrones o huecos así generados son los que conducen la electricidad.

En las celdas descritas en secciones anteriores, los electrones y los huecos se forman en la interface entre dos regiones de la celda solar, de tal manera que los electrones y huecos se mueven hacia regiones diferentes, evitando los procesos de recombinación. En cambio, las celdas solares orgánicas generalmente se fabrican con otro tipo de configuración (Aydil, 2007), en las que se tiene dos materiales diferentes que se interpenetran como se muestra en la figura 21. En una celda solar orgánica típica, los dos materiales pueden absorber los fotones para crear pares electrón-hueco en cualquier lugar de A o B. Estos pares deben moverse hacia las interfaces entre A y B y separarse a su llegada a esta interfaz para crear una corriente eléctrica. Esta separación puede lograrse si el electrón tiene una energía más baja en uno de los materiales. El material que tiende a ceder electrones recibe el nombre de donador y el material que recibe los electrones se conoce como aceptor.

Un ejemplo de este tipo de celdas solares se obtiene al insertar moléculas de fulerenos (C_{60}) como aceptores de electrones entre las cadenas

Figura 22
Celdas solares fabricadas con nanomateriales



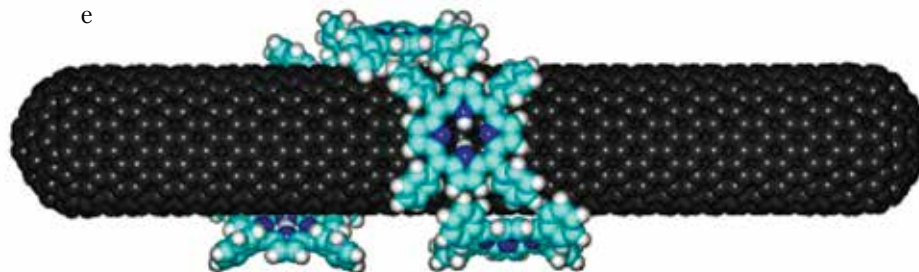
Fuente: Takeuchi, 2009.

de polímeros conjugados como material donador de electrones. Con este tipo de celdas solares se ha alcanzado eficiencias de hasta el 5 por ciento en el laboratorio (Janssen, 2005).

Hay varias compañías que producen celdas solares con polímeros y materiales nanoestructurados. Por ejemplo, Konarka fabrica celdas solares orgánicas con el nombre comercial de “Power Plastic”. Estos materiales pueden sencillamente ser impresos en una hoja de plástico, usando técnicas de impresión similares a la forma como

se imprime un periódico con tinta en grandes rollos de papel. Los productos obtenidos, pueden fácilmente ser integrados en una gran variedad de aplicaciones de generación de energía; pueden ser producidos y usados prácticamente en cualquier lugar, tanto en exteriores como en interiores. Este tipo de celdas solares son mucho más delgadas, ligeras, flexibles y baratas. Otras compañías que desarrollan celdas solares basadas en nanotecnología son Nanosolar y Nanosys (Takeuchi, 2009).

Figura 23
Nanotubos de carbono con moléculas de porfirina



Fuente: Takeuchi, 2011.

CELDA SOLARES USANDO NANOTUBOS DE CARBONO

La eficiencia de las celdas solares puede ser mejorada con la incorporación de nanotubos de carbono en las matrices de otros semiconductores. Por ejemplo, se ha demostrado que electrones de las paredes de un nanotubo pueden ser transferidos a la molécula de porfirina cuando este sistema se ilumina con luz visible. Este resultado demuestra que se pueden fabricar celdas solares basadas en nanotubos de carbono (Hecht, 2006).

También se ha podido construir una nueva celda solar en tres dimensiones compuesta de arreglos de nanotubos de carbono. Los inves-

tigadores primero crecieron torres de tamaño micrométrico de nanotubos de carbono de multipared sobre una oblea de silicio con una película delgada de hierro grabada con fotolitografía. Las microtorres fueron entonces cubiertas con los materiales fotoactivos telurio de cadmio y sulfuro de cadmio los cuales sirven como capas fotovoltaicas tipo “p” y “n” respectivamente (Gatech).

También se ha desarrollado una manera de concentrar la energía solar mediante el uso de nanotubos de carbono, usándolos para formar antenas que capturan y enfocan la energía de la luz, lo que podría usarse para fabricar celdas solares más potentes y más pequeñas (Sciencedaily, 2010; Han, 2010).

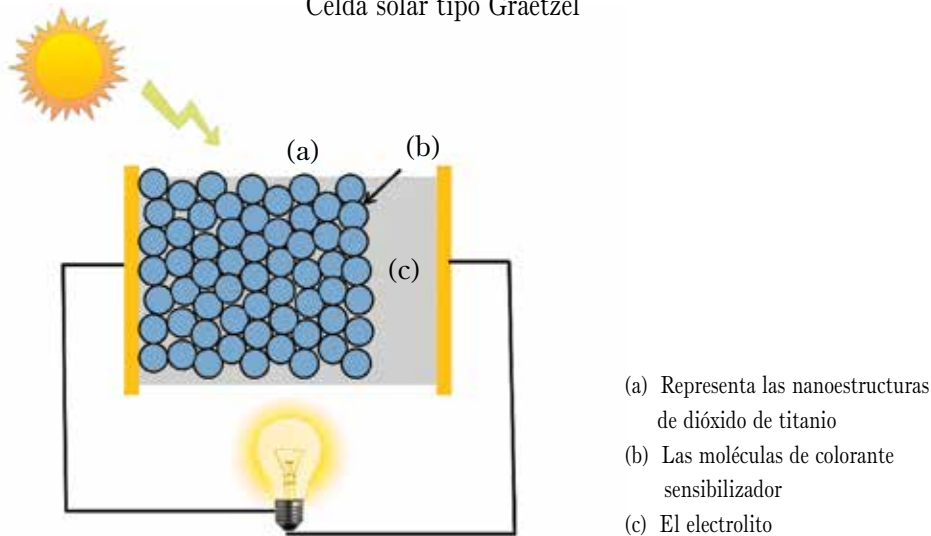
INFORMACIÓN ADICIONAL

La celda solar sensibilizada por colorante

La celda solar sensibilizada por colorante fue inventada en 1991 por Michael Graetzel, profesor de la EPFL, Lausana, Suiza, y puede ser construida con materiales de bajo costo y mediante un proceso de fabricación muy sencillo (O'Regan, 1991; Graetzel, 2001).

La estructura de la celda consiste esencialmente de dos electrodos planos, los cuales son básicamente láminas delgadas de vidrio cubiertas de una capa transparente de óxido de estaño. A uno de estos electrodos (al cual llamamos electrodo compuesto) se le agregan nanopartículas del semiconductor dióxido de titanio (TiO_2) de 5-10 nm, para formar una capa muy rugosa de este material de aproximadamente 10 micras. Se usan nanopartículas para incrementar la absorción de la luz en el TiO_2 . Los

Figura 24
Celda solar tipo Graetzel



Fuente: Adaptado de Aydil.

materiales nanoestructurados tienen la ventaja de tener una gran área superficial, lo cual es muy ventajoso tanto para la absorción de la luz, como para la separación de cargas, los dos pasos críticos en la conversión de la energía solar a eléctrica.

Sobre el TiO_2 , se coloca una capa de una sola molécula de un colorante sensibilizador, el cual está formado por un compuesto que contiene un metal de transición (rutenio u osmio). Entre los dos electrodos hay una capa gruesa de un electrolito basado en yodo.

La luz solar pasa a través del electrodo simple, y si su longitud de onda es la adecuada, una molécula del colorante absorbe la luz, al hacerlo, un electrón pasa a ocupar un estado excitado y puede saltar a la banda de conducción del TiO_2 . Los electrones así generados se mueven hacia la capa conductora del electrodo y desde allí pasan a un circuito externo, generando una corriente eléctrica. Los electrones pueden reentrar a la celda por el electrodo simple, desde donde inician un proceso de reducción-oxidación en la solución de yodo, donde se generan electrones para la capa sensibilizadora y de esta manera hay un proceso continuo de generación de corriente eléctrica (Aydil, 2007).

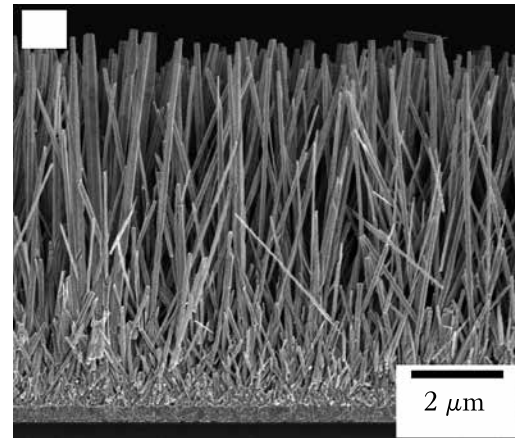
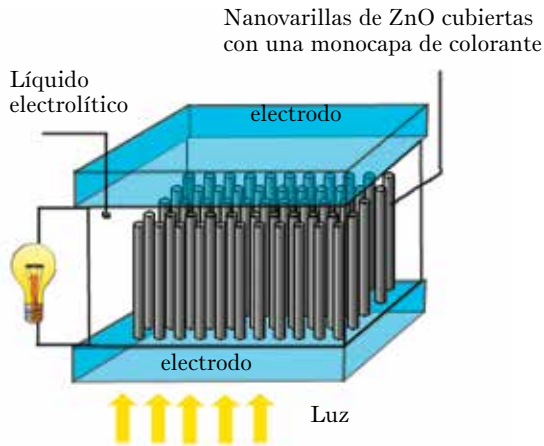
LA CELDA SOLAR DE NANOALAMBRES SENSIBILIZADA POR COLORANTE

En la celda solar sensibilizada por colorante, los electrones generados en el proceso deben saltar muchas veces entre las nanopartículas para poder llegar al electrodo. Estos saltos, hacen que el transporte de los electrones sea más lento y aumenta la posibilidad de que se recombinen en el electrolito, reduciendo la eficiencia de la celda Graetzel. Algunos investigadores estudian la posibilidad de usar nanoalambres o nanotubos en lugar de las nanopartículas en la celda solar sensibilizada por colorante. Los nanoalambres, o nanotubos, también tiene la ventaja de tener una gran área superficial (Baxter, 2005; Law, 2005).

Los nanoalambres son crecidos sobre uno de los electrodos transparentes y son recubiertos con una capa del colorante. Este arreglo permite que los electrones viajen directamente al electrodo, sin necesidad de saltar de nanopartícula a nanopartícula. No hay necesidad que los nanoalambres estén todos paralelos u ordenados. Sin embargo, es importante poder fabricar alambres monocristalinos largos, delgados y empacados muy densamente en un área superficial grande, lo cual no es algo fácil.

Figura 25

Esquema de una celda solar de nanoalambres sensibilizada por colorante (izquierda) (Baxter).
Micrografía electrónica de barrido de nanocables de ZnO que fueron utilizados para hacer celdas solares sensibilizadas por colorante (derecha) (Kurtis)



Fuente: Adaptado de Baxter (izquierda) y Kurtis (derecha).

Esta clase de celdas solares no ha alcanzado una eficiencia similar a la de las celdas sensibilizadas usando nanopartículas.

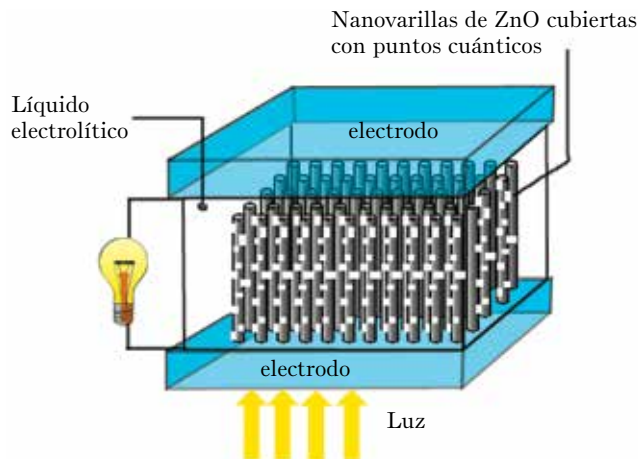
LA CELDA SOLAR SENSIBILIZADA CON PUNTOS CUÁNTICOS

Una segunda ventaja de usar nanopartículas, es el cambio de las propiedades ópticas del material debido a su tamaño. Cuando los electrones y los

huecos están confinados en una partícula muy pequeña (de tamaño nanométrico) sólo pueden ocupar niveles de energía muy bien definidos, los cuales dependen del tamaño de la partícula. En este caso, se dice que los niveles de energía de los electrones y de los huecos están cuantizados y las nanopartículas sólo pueden absorber fotones con energías que dependen de la diferencia de estos niveles. Esto se conoce como el efecto de confinamiento cuántico y dichas na-

Figura 26

Esquema de una celda solar de nanoalambres sensibilizada con puntos cuánticos



Fuente: Adaptado de Kurtis.

nopartículas se denominan puntos cuánticos (Takeuchi, 2009).

Las celdas solares sensibilizadas con colorante usan la propiedad de las nanoestructuras de tener una gran área superficial, pero debido a que las nanopartículas y nanoalambres usados son muy grandes, no se utilizan las propiedades ópticas que surgen por los efectos de confinamiento cuántico (Kurtis, 2007).

Es por esto que hay varias propuestas de diseño de celdas solares que utilizan puntos cuánticos,

para aprovechar los efectos de confinamiento cuántico. Uno de los más sencillos se basa en la celda de nanoalambres (véase figura 26), pero se sustituye las moléculas de colorante con una capa de puntos cuánticos adsorbidos en los nanoalambres. Esta celda funciona de manera similar a las celdas solares sensibilizadas con colorante, pero la luz es absorbida por los puntos cuánticos en lugar de las moléculas de colorante (Aydil, 2007).

El hidrógeno: las celdas de combustible

EL HIDRÓGENO

El hidrogeno es el elemento más abundante en el universo y se tiene la esperanza de tener una economía de hidrógeno, donde este elemento se use para transportar energía de un lugar a otro.

La electricidad es el portador de energía más conocido, y se usa para transportar la energía del carbón, el uranio y otras fuentes a hogares y empresas (García Martínez, 2010). Decimos que el hidrógeno sólo es un portador de energía debido a que debe ser producido usando otras fuentes de energía, ya sea combustibles fósiles, fuentes de energías renovables o energía nuclear. El interés en el hidrógeno como combustible se debe a sus muchas ventajas; como mencionamos anteriormente, puede servir para transportar energía, también para almacenarla y además no genera

CO₂, el gas causante del efecto invernadero. El único producto de su combustión es el agua (EIA-hidrógeno).

Sin embargo, existen varios problemas para que el hidrógeno pueda realmente ser el combustible del futuro: no existe en la tierra en forma de gas, debe ser obtenido de otros compuestos y, en general, es difícil producir y almacenar grandes cantidades de él. Además, los costos para construir la infraestructura necesaria para tener una economía de hidrógeno son gigantescos.

PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Como mencionamos en el capítulo II, el hidrógeno es utilizado en algunos procesos de refinación del petróleo y en cantidades abundantes en la industria química para fabricar fertilizantes.

Actualmente, la forma más económica de producir hidrógeno es por “re-formación” del gas natural (metano) usando vapor de agua: los átomos de hidrógeno se separan de los átomos de carbono en la molécula del metano (CH_4) al combinarlo con el vapor de agua (H_2O). El problema es que también se produce el dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que está vinculado con el calentamiento global (EIA-hydrogen).

Hay otras formas de producir hidrógeno a partir del agua o de la biomasa sin producir el dióxido de carbono (Everet):

1. Por medio de la electrólisis del agua. Al pasar electricidad entre dos electrodos sumergidos en agua, se obtiene hidrógeno en el electrodo negativo y oxígeno en el positivo.

El voltaje teórico necesario para producir la electrólisis es de 1.23 voltios, pero en los electrolizadores comerciales se usan voltajes entre 1.5 y 2.0 voltios. Generalmente, se le agrega al agua algunas sales para que pueda conducir la corriente eléctrica, además de que es necesario usar un catalizador para facilitar las reacciones de oxidación y reducción. Al

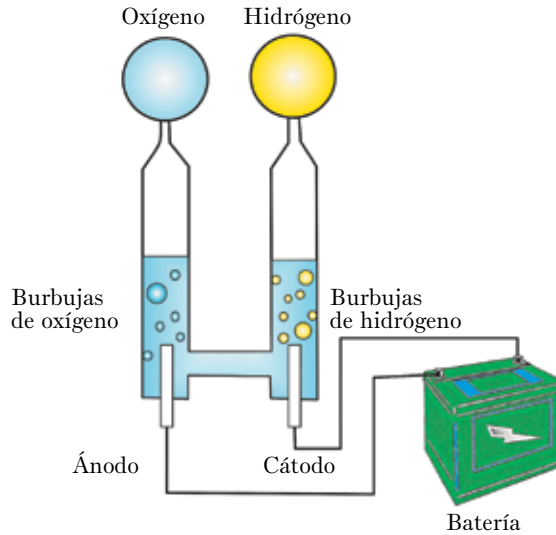
electrodo donde ocurre la reacción de oxidación (donador de electrones) se le denomina ánodo y allí se genera el gas oxígeno, mientras el electrodo donde ocurre la reducción (en la que se ganan electrones) se denomina cátodo y allí se genera el hidrógeno.

2. Por medio de la gasificación de la biomasa de cultivos como el maíz se puede producir grandes cantidades de hidrógeno dejando como residuo carbón, el cual puede usarse para aplicaciones químicas.
3. Por medio de disociación térmica del agua en hidrógeno y oxígeno usando concentradores solares. Aunque se requieren altas temperaturas, arriba de los 2 mil °C, usando otros procesos que involucran otros compuestos químicos, la temperatura puede reducirse a menos de 700 °C.

La electrólisis puede ser un proceso limpio si la electricidad que se utiliza para obtenerlo proviene de fuentes renovables de energía. Es por esto que se están realizando grandes esfuerzos para obtener el hidrógeno a través de la electrólisis usando energía solar.

Figura 27

Diagrama de la electrólisis del agua para producir hidrógeno y oxígeno



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Una solución es tener un sistema de celdas fotovoltaicas acoplado con un electrolizador de agua. Desde hace algunos años la empresa automotriz Honda de Japón, ha construido una serie de sistemas de esta clase, de tamaño semejante al de un refrigerador cubierto con celdas fotovoltaicas (Regalado, 2010). Las moléculas de agua se rompen usando la electricidad generada por las fotoceldas solares. El dispositivo deja escapar el oxígeno resultante al medio ambiente, mientras

comprime y guarda el hidrógeno, el cual se usa para recargar los autos que funcionan con celdas de combustible (las cuales se describirán más adelante).

Las celdas que generan hidrógeno y oxígeno usando la energía que proviene de un sistema fotovoltaico en un mismo dispositivo se denominan celdas fotoelectroquímicas (PEC, en inglés Photo Electrochemical Cell). Muchas de las contribuciones de la nanotecnología para mejorar las

celdas solares presentadas en el capítulo II también se aplican en el caso de las PEC.

Hay varias posibilidades en el arreglo de los electrodos de la celda fotoelectrolítica. En uno de ellos, un semiconductor fotovoltaico se sumerge dentro del líquido reemplazando al ánodo, mientras el cátodo es un metal. También se pueden reemplazar los dos electrodos por sistemas fotovoltaicos, y en un tercer tipo de arreglo, el cátodo es reemplazado por el sistema fotovoltaico. En estos sistemas la energía necesaria para disociar el agua en oxígeno e hidrógeno es generada directamente en la interfaz líquido-semiconductor.

En los primeros dispositivos para la producción de hidrógeno con luz solar el ánodo estaba formado por una fotocelda de dióxido de titanio y funcionaban de la siguiente manera:

1. La luz es absorbida en el foto/electrodo donde se forma un par electrón-hueco. Los electrones son transferidos por el circuito externo hacia el cátodo.
2. El agua se oxida (pierde electrones) en el ánodo debido a los huecos generados. Este proceso

ocurre en la interfaz fotoánodo/líquido. El oxígeno, en forma molecular se libera (o se puede almacenar) en el ánodo, mientras que los protones (átomo de hidrógeno sin electrones) migran por el líquido hacia el cátodo.

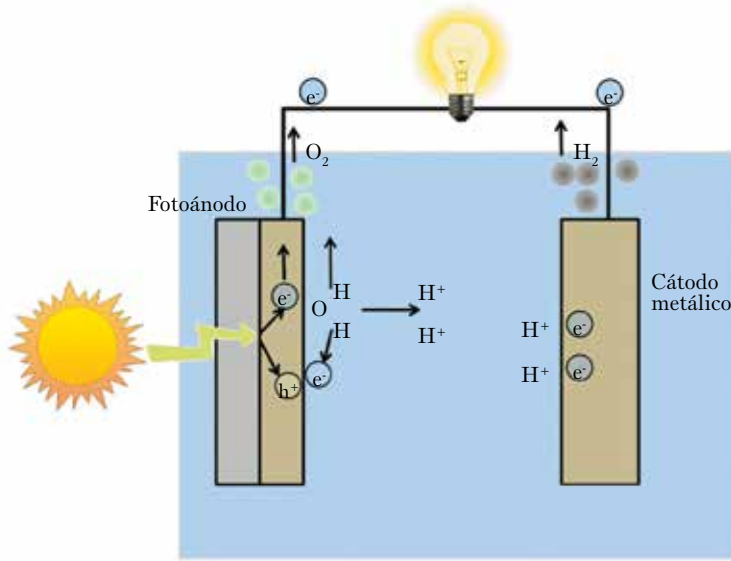
3. Los iones de hidrógeno se reducen (ganan electrones) en el cátodo y allí se liberan las moléculas de hidrógeno.

El dióxido de titanio es un material usado como fotoelectrodo debido a su gran estabilidad en un rango de pH y voltajes, es además abundante y no es tóxico. Sin embargo, tiene una banda prohibida ancha de 3.2 eV, limitando la adsorción a una pequeña fracción del espectro solar en el ultravioleta y resultando en una eficiencia baja (Chen, 2011). Se han probado otros materiales como el óxido de tungsteno (WO_3), el de hierro (Fe_2O_3), el óxido de estaño (SnO_2), el sulfuro de cadmio (CdS), o el carburo de silicio (SiC), los cuales tienen otros problemas, tales como estabilidad a largo plazo y la pérdida de actividad en una solución acuosa.

El uso de nanoestructuras puede mejorar el rendimiento de las celdas fotoelectrolíticas. A

Figura 28

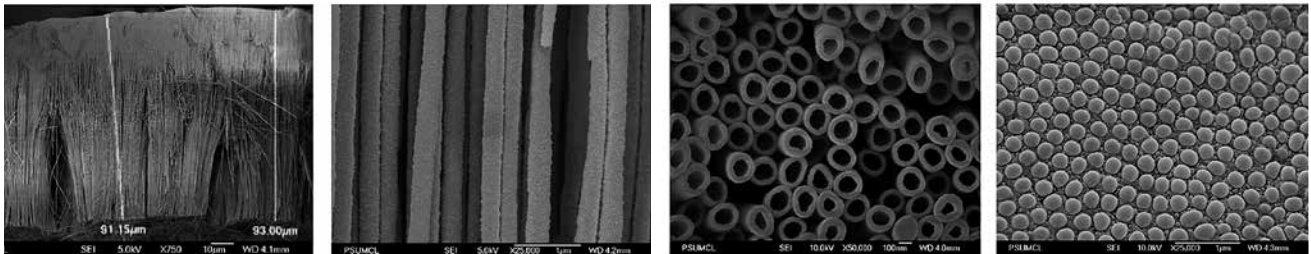
Celda fotoelectrolítica en la cual se tiene una fotocelda en el ánodo, mientras el cátodo es metálico



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Figura 29

Imágenes de microscopía electrónica de transmisión de nanotubos de dióxido de titanio



Fuente: Imágenes de Shankar.

pesar de que tienen una banda prohibida más amplia que los materiales en volumen, también tiene una relación superficie/volumen muy grande, lo que puede aumentar la eficiencia fotocatalítica. Al igual que en el caso de las celdas de Graetzel, se puede fabricar el fotoelectrodo con nanopartículas del semiconductor dióxido de titanio (TiO_2) de tamaños 5-10 nm, para formar una capa muy rugosa de este material.

Otra opción es el uso de materiales semiconductores con formas especiales. En particular el TiO_2 en forma de nanotubos tiene una gran área superficial y se ha demostrado que tiene mejores propiedades que cualquier otra forma para las aplicaciones en fotoelectrólisis del agua (Grimes, 2007). Recientemente se ha podido lograr la fabricación de arreglos muy ordenados de nanotubos de dióxido de titanio con longitudes de hasta 220 nm de largo (Shankar, 2007).

Actualmente se realizan investigaciones de muchos otros nanomateriales, para su uso potencial en la fabricación de fotoelectrodos, o como catalizadores que puedan hacer más eficiente la generación de hidrógeno a partir del agua y usando la energía del sol.

Hojas artificiales

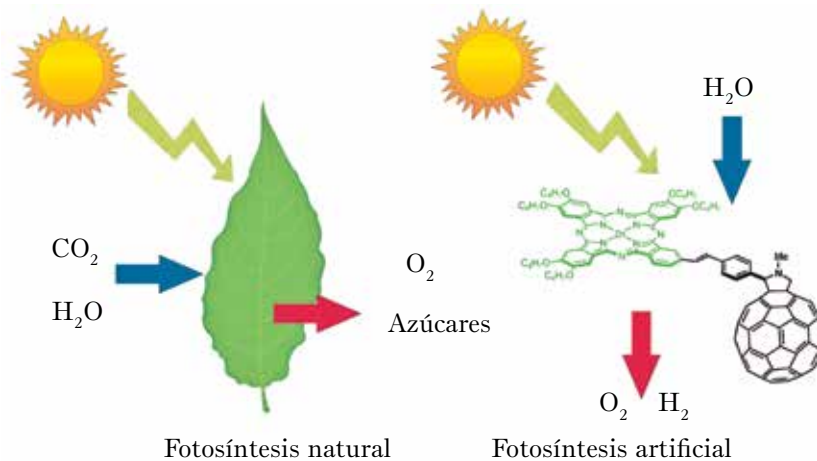
Las plantas adsorben la energía del sol para convertir el dióxido de carbono y el agua en glucosa, un combustible químico que puede ser almacenado. Actualmente, se está tratando de crear hojas artificiales que usen la luz solar para separar las moléculas de agua, creando un combustible: el hidrógeno. Investigadores del Instituto Tecnológico de California están diseñando una “hoja artificial” con arreglos de nanoalambres de silicio capaces de producir hidrógeno. Los nanoalambres están embebidos en una película delgada de un material plástico transparente y el arreglo podría enrollarse y desenrollarse como una cobija (Regalado, 2010).

Almacenamiento de hidrógeno

Uno de los principales retos para alcanzar una economía de hidrógeno es encontrar un buen método de almacenamiento. Debido a su muy baja densidad es muy difícil de guardar en espacios pequeños; lo ideal es poder guardarlo en grandes cantidades a presiones y temperaturas cercanas a las del medio ambiente, en forma eco-

Figura 30

Diagrama de la fotosíntesis en la cual se combina el agua con el oxígeno para formar dióxido de carbono y azúcar (izquierda) y de la fotosíntesis artificial en la que se usa el agua para fabricar hidrógeno y oxígeno



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

nómica y segura. También debe ser posible liberarlo en forma rápida y sencilla cuando se necesite usarlo. Hasta ahora no existe ningún método que cumpla con todas las exigencias descritas anteriormente. El hidrógeno puede ser almacenado como gas, líquido o sólido (RSC, 2007). Como mencionamos anteriormente, en estado gaseoso, se tiene el problema de la baja densidad del hidrógeno, por lo que se tendría que mantener en contenedores metálicos a muy altas presiones, los cuales serían muy pesados. Además, la energía

necesaria para comprimir el gas representa cerca del 10 por ciento de la energía almacenada en el hidrógeno (Zuttel, 2003). Por último, se tienen los problemas de seguridad para transportar los contenedores de hidrógeno a alta presión.

Se puede almacenar el hidrógeno como líquido, enfriándolo a temperaturas de 253 °C bajo cero.

Aunque esto reduce sustancialmente el tamaño de los contenedores al comprimir el H₂, es necesario usar depósitos criogénicos para aislarlo térmicamente, resultando en una pérdida consi-

derable de energía tratando de mantener el hidrógeno en estado líquido (BNL).

Una alternativa que se está investigando muy activamente es el almacenamiento de hidrógeno en el estado sólido. Esencialmente, lo que se está buscando es la síntesis de un material que pueda almacenar un gran volumen de hidrógeno, pero al mismo tiempo sea capaz de liberar el gas en forma sencilla. Hay dos mecanismos diferentes que difieren en la forma en que el hidrógeno se une al sólido: en el primero el átomo de hidrógeno forma enlaces químicos con el material sólido. Es decir, hay una adsorción química y los enlaces hidrógeno-hidrógeno de la molécula se rompen para formar un nuevo compuesto con el sólido. En el otro caso, hay una adsorción física, las moléculas de hidrógeno se adsorben en la superficie del material sin formar nuevos enlaces químicos (RSC, 2007).

Cada uno de los dos métodos tiene sus ventajas y sus desventajas. En el caso de la adsorción química se puede almacenar mayores cantidades de hidrógeno, pero los enlaces que forma con el sólido se deben romper para poder liberar el hidrógeno y para eso se necesitan altas temperaturas, aproximadamente de 250 a 300 °C, ade-

más de que se requieren presiones y temperaturas altas para el almacenamiento. Este problema no existe en el caso de adsorción física debido a que el hidrógeno permanece en forma molecular y se puede liberar a temperatura ambiente. Sin embargo, se necesita enfriar el material a muy bajas temperaturas para almacenar el hidrógeno, del orden de unos -200 °C. En ambos casos, se requiere de energía, ya sea para calentar el material como para liberar el hidrógeno o para enfriarlo y poder almacenar el hidrógeno (RSC, 2007).

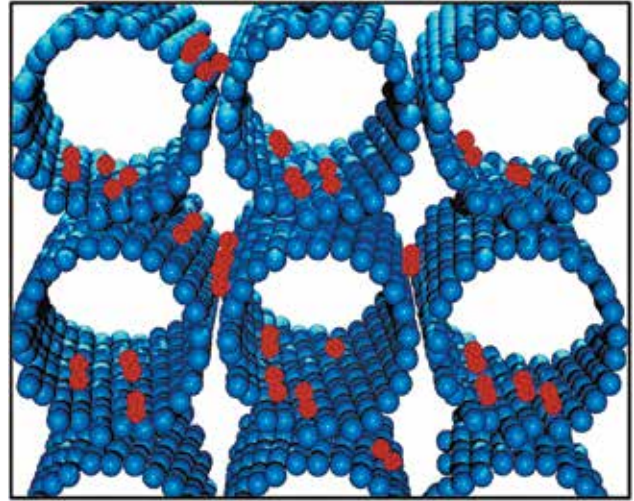
Para tener un sistema de almacenamiento práctico de hidrógeno se necesita que funcione entre la temperatura ambiente y hasta aproximadamente 70 °C, la temperatura máxima de funcionamiento de las pilas de combustible (que estudiaremos más adelante) (RSC, 2007). Los nanomateriales con sus propiedades especiales, tanto físicas, químicas, termodinámicas como cinéticas pueden ofrecer soluciones viables, mediante la creación de nuevos materiales ya sea para el almacenamiento o como catalizadores. Se busca poder optimizar la temperatura de funcionamiento de los dispositivos en los que el hidrógeno es almacenado, además de aumentar la capacidad de almacenamiento.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Almacenamiento de hidrógeno por adsorción física

En la adsorción física, el hidrógeno se une al material de almacenamiento por medio de fuerzas intermoleculares muy débiles que siente la molécula al acercarse a la superficie, conocidas como de Van der Waals. Este proceso de absorción se produce por completo en la superficie del material y por lo tanto la capacidad de almacenamiento de un material depende de su área superficial. Dado que las fuerzas implicadas son débiles, el hidrógeno se almacena a temperaturas muy bajas ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) (RSC, 2007). Los materiales nanoestructurados tienen propiedades ventajosas para la adsorción molecular del hidrógeno: tienen áreas superficiales muy grandes y muchas veces cavidades de tamaños micro o nanométricos, donde se puede encapsular o atrapar el hidrógeno (Sepehri, 2010). A continuación describiremos algunos de estos materiales:

Figura 31
Nanotubos de carbón usado como almacenamiento de hidrógeno



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Carbono nanoestructurado

Algunos materiales de carbono con una alta área superficial han sido considerados como buenos candidatos para el almacenamiento del hidrógeno. Entre ellos están las nanofibras gráficas (GNF, en inglés Graphitic Nano Fibers), los nanotubos de carbono de multipared (MWNT, en inglés Multiple Wall Nanotubes), o de una sola capa (SWNT, en inglés Single Wall Nanotubes),

aerogeles de carbón, el grafeno y nanoalambres de carbono (Sepehri, 2010).

En particular se piensa que los nanotubos de carbón son sistemas ideales para el almacenamiento de hidrógeno, debido a que los tubos son huecos y poseen un área superficial alta. Se podría, por ejemplo, fabricar nanotubos de carbono de diámetro pequeño, de tal manera que la molécula de hidrógeno esté lo suficientemente cerca como para sentir las fuerzas de Van der Waals con los dos lados del nanotubo de carbón. Este aumento en la fuerza de interacción resulta en un aumento de la temperatura de funcionamiento del material de almacenamiento (RSC, 2007).

Inicialmente se reportaron capacidades de almacenamiento del 67 wt por ciento (porcentaje del peso) de hidrógeno en nanotubos de carbono y en nanofibras gráficas. Aunque varios experimentos han confirmado la posibilidad del almacenamiento de hidrógeno en nanoestructuras de carbono, hasta ahora no se han podido alcanzar estos porcentajes de almacenamiento (Sepehri, 2010). Investigaciones recientes sobre la absorción física de hidrógeno en nanoestructuras de carbono buscan aumentar el área superficial del carbono para ofrecer más

sitios de enlace, además de incorporar grupos funcionales (como dopantes) al carbono para incrementar la energía de enlace entre la molécula de hidrógeno y las superficies de carbono.

Zeolitas

Como se mencionó en un capítulo anterior, las zeolitas son compuestos cristalinos de silicatos con aluminio con cavidades y túneles de tamaños nanoscópicos. Se ha visto que las zeolitas pueden albergar en forma reversible diferentes tipos de gases.

El principio de almacenamiento de hidrógeno en una zeolita es el siguiente: por medio de altas presiones y temperatura, las moléculas son introducidas dentro de las cavidades de la zeolita. Al bajar la temperatura, las moléculas de hidrógeno quedan atrapadas en las cavidades y solamente pueden ser liberadas elevando de nuevo la temperatura (Sepehri, 2010).

Debido a la alta densidad de la estructura de la zeolita que contiene átomos de silicio, aluminio, oxígeno y cationes pesados, va a ser muy difícil alcanzar una capacidad grande de almacenamiento de hidrógeno (la máxima capacidad

calculada es de 3 wt por ciento) (Vitillo, 2005). Es por esto que las investigaciones que se llevan a cabo incluyen el uso de elementos livianos en la fabricación de la estructura de la zeolita y el aumento de la interacción entre las moléculas de H_2 y la zeolita.

Jaulas metal-orgánicas

Las jaulas metal-orgánicas (MOF, en inglés Metal Organic Frames) son materiales híbridos, formados por bloques moleculares de naturaleza orgánica que se enlazan a metales o cúmulos de metales de transición para formar una estructura enrejada (Sepehri, 2010; RSC, 2007).

Las MOF forman estructuras de poros interconectados en tres dimensiones, uniformes y proporcionan una red ordenada de canales. Las MOF pueden ser modificadas cambiando las condiciones de reacción o los agentes reactivos. Las moléculas de H_2 se adsorben en sitios correspondientes a los átomos metálicos. Sin embargo, las moléculas orgánicas son importantes, debido a que son ellas las que definen las dimensiones de los poros y los procesos de adsorción, en estos materiales son mejores en poros pequeños. En

general se necesitan presiones elevadas para lograr la adsorción de cantidades considerables de H_2 .

Con respecto a las zeolitas, estos materiales tienen la ventaja de que hay una amplia variedad de unidades orgánicas, que permiten un diseño más preciso de la forma, el tamaño y la funcionalización de los poros, además de que las estructuras MOF son más flexibles. Tienen la desventaja de que son menos estables térmicamente.

Otros materiales

para la absorción física del hidrógeno

Un clatrato es una estructura cristalina formada por una armazón de un determinado tipo de molécula la cual forma una red con cavidades donde se puede atrapar o retener un segundo tipo de molécula (Sepehri, 2010). Algunos gases naturales, como el metano y el dióxido de carbono forman clatratos de agua. Mediante enlaces de hidrógeno, las moléculas de agua forman estructuras de jaulas poliédricas de diferentes tamaños capaces de contener en su interior las moléculas del gas. Es por esto que se busca almacenar el hidrógeno en clatratos de agua. Cuando estas jaulas están desocupa-

das, no son estables y se colapsan en una estructura de hielo, pero la inclusión del gas puede estabilizar las jaulas. La formación y estabilización de clatratos de hidrógeno/agua requiere altas presiones y bajas temperaturas, es por esto que el uso de estos materiales como almacenadores de hidrógeno necesita de mucha más investigación.

Polímeros orgánicos porosos. Es posible fabricar polímeros porosos de moléculas grandes y rígidas para formar cadenas y redes que contengan poros interconectados y áreas superficiales grandes. Estos polímeros pueden ser considerados como potenciales materiales para el almacenamiento del hidrógeno.

Almacenamiento de hidrógeno por adsorción química

Los materiales en los que el hidrógeno es absorbido químicamente tienden a tener una densidad de sitios de almacenamiento más grande comparado con los materiales donde el hidrógeno es adsorbido físicamente. Sin embargo, la absorción química requiere de energías más altas para romper la molécula del hidrógeno y alma-

cenarlo en forma atómica. También se requieren mayores energías para poder liberar al hidrógeno cuando se necesite (RSC, 2007).

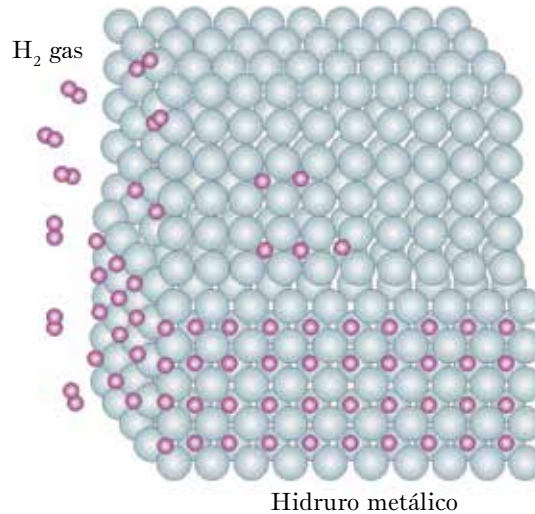
Hidruros metálicos

Los hidruros metálicos son aleaciones que resultan cuando el hidrógeno queda atrapado en los sitios intersticiales de cierto tipo de metales. Algunos hidruros son el MgH_2 , el CaH_2 , el NaH y el LiH , los cuales pueden ser usados para almacenar el hidrógeno, muchas veces en forma reversible.

Inicialmente el metal no contiene hidrógeno y a una temperatura determinada, se disuelve el hidrógeno en la fase metálica incrementando la presión. A cierta temperatura el hidrógeno se disuelve en el metal, el cual estaba inicialmente libre de hidrógeno. Como consecuencia se tiene un aumento en la presión. Conforme sube la temperatura hay una transformación de la fase metálica inicial a una de hidruro. Entre más hidrógeno se almacene, más sube la presión en el material y los incrementos en el contenido de hidrógeno son cada vez menores hasta que el material no puede recibir más hidrógeno. Se dice entonces que el hidruro está cargado (RSC, 2007).

Figura 32

Formación de un hidruro a partir de un metal al que se le agrega hidrógeno



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

En la mayoría de los hidruros metálicos, el hidrógeno forma enlaces muy fuertes con el metal y como consecuencia se requieren temperaturas muy altas de alrededor de 120-200 °C para poder liberar su contenido de hidrógeno. Se pueden reducir estas temperaturas mediante el uso de aleaciones de dos hidruros: uno en el que el enlace metal-hidrógeno es fuerte con otro en el que el enlace sea débil.

Un hidruro que ha despertado mucho interés para ser usado como almacenador de hidrógeno es el hidruro de aluminio (AlH_3) debido a la gran cantidad de hidrógeno que puede estar contenido en un volumen relativamente pequeño (BLN). Con base en consideraciones termodinámicas, se ha predicho que el AlH_3 se descompone en hidrógeno y aluminio a la temperatura ambiente. Sin embargo, los primeros experimentos mostraron que debido a la formación de una capa de

óxido, la evolución del hidrógeno es muy lenta a temperaturas menores de 150 °C. Experimentos más recientes han demostrado que materiales formados con nanopartículas de AlH_3 se descomponen a temperaturas inferiores a los 100 °C y el rendimiento total de H_2 se aproxima al valor teórico de 10 wt por ciento.

Otros hidruros

El amoníaco (NH_3), también llamado hidruro de nitrógeno es un compuesto formado por un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de hidrógeno (H). El amoníaco puede ser reformado para producir hidrógeno sin residuos peligrosos. A temperatura ambiente es un gas de olor desagradable, pero se puede licuar bajo condiciones adecuadas de presión y temperatura. También se puede almacenar como un líquido a temperatura y presión ambiental cuando se mezcla con agua. El amoníaco es un producto químico muy abundante y, por lo tanto, existe una gran infraestructura para su obtención, transporte y distribución.

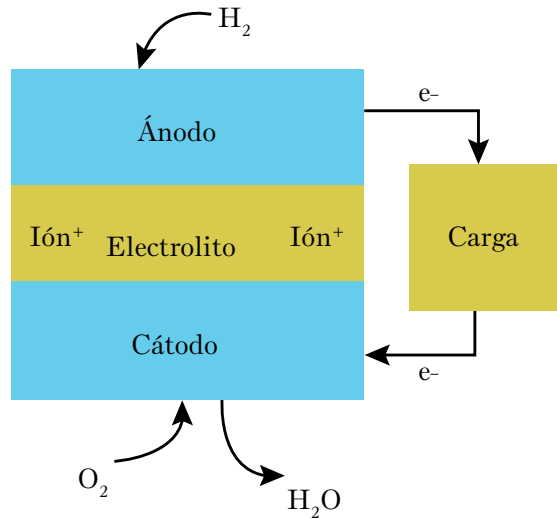
Algunos hidruros de boro pueden tener un alto contenido de hidrógeno. Por ejemplo, el compuesto borano de amoníaco (AB) NH_3BH_3 tiene una capacidad de almacenamiento de hasta 19.6 wt por ciento. Además se ha encontrado que puede liberar parte del hidrógeno a los 110 °C y el resto a los 150 °C. Actualmente se realizan investigaciones para bajar estas temperaturas.

Nanocompuestos

Se ha encontrado que el uso de materiales nanoporosos puede facilitar la formación de hidruros de tamaños nanométricos (Sepelari, 2010). Dichos nanocompuestos pueden bajar las temperaturas de liberación del hidrógeno. Entre los materiales nanoporosos que se están usando encontramos: sílica, aerogeles y criogeles de carbono (CA y CC), los cuales son formas nanoporosas de carbono con gran área superficial. Algunos de los hidruros incorporados son el AB y el LiBH_4 .

Figura 33

Modo de funcionamiento de una celda de combustible



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

CELDAS DE COMBUSTIBLE

Al igual que las baterías, las celdas de combustible son aparatos que producen electricidad mediante el uso de reacciones químicas, con la diferencia de que en ellas se tiene un abastecimiento continuo de los reactivos que se consumen. En otras palabras, las celdas de combustible producen electricidad a partir de una fuente externa de combustibles, a diferencia de las baterías que

consumen reactivos almacenados en su interior, los cuales al terminarse, deben ser recargados, generalmente con electricidad.

Los reactivos típicos usados en una celda de combustibles son el hidrógeno y el oxígeno, los cuales al reaccionar liberan una gran cantidad de energía y se obtiene como producto el agua.

Hay muchas variedades de celdas de combustible, sin embargo, todas funcionan de manera semejante. Están formadas por tres partes prin-

Figura 34
Nave espacial Apolo, la cual usaba celdas
de combustible alcalina



Fuente: Foto cortesía NASA.

cipales intercaladas entre sí: el ánodo, el electro-
lito y el cátodo. En el ánodo, con ayuda de un
catalizador, se oxida el combustible, el cual gene-
ralmente es el hidrógeno y pasa a ser un ión car-
gado positivamente y se libera un electrón (carga
negativa). Los electrones liberados viajan a través

de un circuito externo y generan una corriente
eléctrica. Los iones de hidrógeno viajan a través
del electrolito hacia el cátodo, donde se reúnen con
los electrones y reaccionan con el combustible
(oxígeno) para formar agua. Los electrodos están
recubiertos con catalizadores que ayudan en las reac-
ciones de oxidación y reducción (RSC, 2007). El
catalizador del ánodo, el cual facilita la ioni-
zación del combustible, es generalmente una hoja
de carbono recubierta por una fina capa de plati-
no (USDOE-fuelcell), mientras el del cátodo, que
ayuda en la formación del agua, es normalmente
un compuesto de níquel.

Aunque el combustible más usado es el hidró-
geno, también se pueden usar otros compuestos
como el metanol.

Se usan muchas clases de celdas de combus-
tible, las cuales generalmente se clasifican según
el nombre del electrolito que usan. Algunas son:

1. Celda de Combustible Alcalina (AFC, en in-
glés Alkaline Fuel Cell). Fue desarrollada
para el programa espacial de Estados Unidos
en los años sesenta. Utilizan una solución de
hidróxido de potasio en agua como electrolito

y funcionan a temperatura ambiente con una eficiencia del 60 al 70 por ciento. El problema con esta celda es que el electrolito se contamina fácilmente con el dióxido de carbono (CO_2) y por esto se debe usar oxígeno e hidrógeno puros (USDOE-fuelcells).

2. Celda de Combustible de membrana de intercambio de protones o membrana de electrolito de polímero (PEMFC, en inglés Proton Exchange Membrane Fuel Cell) (USDOE-fuelcells). También requiere de hidrógeno puro como combustible, pero se puede usar aire filtrado como oxidante. El electrolito en una PEMFC es una membrana delgada sólida, mientras que los electrodos están fabricados de carbono poroso con platino como catalizador. Las celdas con electrolito de estado sólido pueden operarse a bajas temperaturas y requieren menos tiempo para que comiencen a funcionar. Además, el hecho de que el electrolito sea una membrana delgada, permite que la celda pueda tener un menor volumen y peso, lo que la hace ideal para aplicaciones en transporte en autos, aviones o barcos o en aparatos electrónicos portátiles como computadoras laptops.

Se ha empleado una gran variedad de materiales para la fabricación de membranas, pero la más usada es un polímero fabricado por la compañía Dupont llamada Nafion® (Serrano, 2010). La membrana permite que los protones de hidrógeno pasen del ánodo al cátodo, mientras mantiene separados los gases de hidrógeno y oxígeno. Es posible alcanzar eficiencias de entre 40 y 60 por ciento dentro de un rango de temperaturas entre -20 y 93 °C.

Esta clase de celda de combustión se usa en los autos de hidrógeno, como el FCX de Honda, el cual se comenzó a vender comercialmente en Estados Unidos en 2008.

3. Celda de Combustible Directa de Metanol, un tipo especial de PEMFC que puede separar el hidrógeno directamente del metanol líquido, pero su eficiencia eléctrica es más baja. Todavía está en desarrollo.
4. Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC, en inglés Phosphoric Acid Fuel Cell) (USDOE-fuelcells). En estas celdas se usa ácido fosfórico líquido como electrolito, mientras que los electrodos son de carbono

poroso y platino como catalizador. Son menos sensibles a la contaminación del CO_2 que las pilas PEMFC. Las PAFC son consideradas como la primera generación de celdas de combustible modernas y son usadas normalmente en plantas de energía estacionarias, aunque también han sido usadas en vehículos como autobuses.

Las celdas descritas anteriormente funcionan a temperaturas relativamente bajas (menos de $200\text{ }^\circ\text{C}$), tienen tiempos cortos para comenzar a funcionar, pero tienen la desventaja de necesitar combustibles relativamente puros. Hay otro tipo de celdas que funcionan a más altas temperaturas (sobre $600\text{ }^\circ\text{C}$) (Serrano, 2010) con la ventaja de que pueden usar diferentes tipos de combustible, además de que contaminan menos los electrodos. Algunos ejemplos son: la Celda de Combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC, en inglés Molten Carbonate Fuel Cells) y la de óxidos (SOFC, en inglés Solid Oxide Fuel Cells).

Hay muchos otros tipos de celdas de combustible que todavía están en etapa de desarrollo. También aquí la nanotecnología va a jugar un

papel muy importante en la fabricación de celdas más eficientes y baratas. Algunas aplicaciones son las siguientes:

Como mencionamos anteriormente, las PEMFC funcionan a temperaturas relativamente bajas y por lo tanto, necesitan catalizadores para generar corrientes eléctricas de alguna utilidad, especialmente en el electrodo donde el oxígeno se reduce (el cátodo). En la actualidad, los catalizadores basados en el platino son los más utilizados en las celdas de combustible PEMFC. Sin embargo, este metal es demasiado caro para que las celdas de PEMFC sean comercializadas más ampliamente. Se ha demostrado que nanopartículas de aleaciones de platino con otros metales mejoran la actividad catalítica en las reacciones de reducción. Además, el uso de otros metales ayuda a rebajar el costo de las celdas de combustibles. Por ejemplo, en un experimento, se depositó una capa de un nanómetro de espesor de platino y de hierro en nanopartículas esféricas de paladio. En las pruebas a escala de laboratorio se encontró que un catalizador con estas nanopartículas genera 12 veces más corriente que un catalizador de platino puro, y además dura 10 veces más (Mazumder, 2010).

Otra manera de mejorar la actividad específica del platino es usar nanocables de platino como catalizadores de la reacción de reducción. Para fabricar estas nanoestructuras se usa carbón negro como núcleo y los nanocables de platino crecen radialmente. Dichas nanoestructuras muestran una mayor actividad catalítica para las reacciones de reducción que cuando se tienen nanopartículas de Pt con formas más tradicionales (Sun, 2008). Recientemente se han podido fabricar nanoalambres de aleaciones de Pt con otros metales como el cobre, hierro o níquel (Koenigsmann, 2011).

Investigadores en Estados Unidos han desarrollado una manera de utilizar menos cantidad de platino para el cátodo de una celda de combustible, lo que podría reducir significativamente su costo. En primer lugar se combina el platino con diferentes cantidades de cobre para crear una aleación de cobre y platino. Luego se saca el cobre de la región de la superficie de la aleación, resultando en distancias platino-platino más pequeñas. El platino en estas condiciones resulta ser un catalizador más eficaz (Strasser, 2010).

En otro trabajo, un grupo de investigadores usaron como molde un filtro de alúmina porosa

con agujeros cilíndricos de 200 nanómetros de diámetro para fabricar nanocables de una aleación de platino y cobre. A continuación remojaron el material resultante en ácido nítrico, disolviendo no solamente el filtro, sino también el cobre de la aleación. En lugar de un nanoalambre sólido, se obtuvo uno de platino poroso, estructuralmente complejo y con un área superficial enorme para su tamaño e ideal para ser usado como catalizador (Lux, 2006).

La nanotecnología adicionalmente puede ayudar en el mejoramiento de la membrana de intercambio de protones. Investigadores de la Universidad de Illinois han desarrollado una membrana de intercambio de protones con una capa de silicio con poros de aproximadamente 5-7 nanómetros de diámetro a la cual se le adicionó una monocapa de un autoensamblado molecular en la superficie del poro, y luego se taparon los poros con una capa de sílice porosa. La capa de sílice reduce el diámetro de los poros y asegura su hidratación, resultando en un aumento en la conductividad de los protones de dos a tres órdenes de magnitud (Moghaddam, 2010).

Figura 35
El calentamiento desigual de la superficie
de la tierra produce el viento



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Otras fuentes de energía renovables: eólica, hidroeléctrica y marina

LA ENERGÍA EÓLICA

El término de energía eólica se usa para describir el proceso mediante el cual se utiliza el viento para generar energía mecánica o electricidad. La palabra eólico proviene del latín *Aeolicus*, perteneciente o relativo a *Eolo*, dios de los vientos en la mitología griega.

El viento

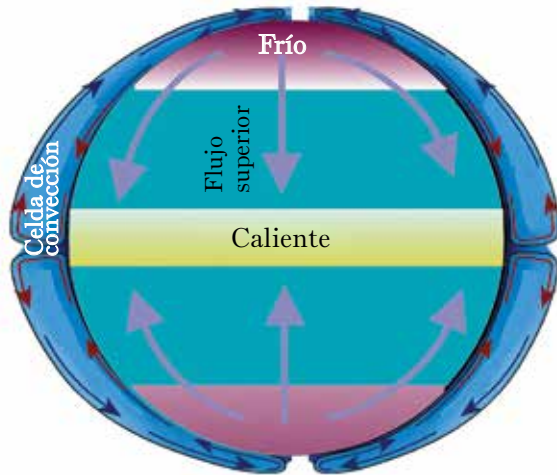
El viento es simplemente aire en movimiento. Los vientos son producidos por las variaciones en las presiones atmosféricas, las cuales a su vez son el resultado del calentamiento desigual en las diferentes regiones de la superficie de la tierra por el sol (EIA-wind). Un ejemplo de este calentamiento desigual se puede encontrar en el ciclo

diario de viento. Durante el día, el aire que está sobre la tierra se calienta más rápidamente que el aire sobre el agua. Este aire caliente es menos denso y se eleva, de tal manera que el aire frío que estaba sobre el agua toma su lugar produciendo viento. En la noche la dirección del viento se invierte porque el aire se enfría más rápidamente en la tierra que en el agua (EIA-wind).

De manera similar, los sistemas de vientos atmosféricos a gran escala que circulan la tierra se deben al calentamiento diferencial de la superficie terrestre según la latitud (más caliente en el Ecuador que en los polos) (EIA-wind), y a la rotación del planeta. Sin este movimiento, el aire se movería del Ecuador a los polos y viceversa, tal como se muestra en la figura 36.

Sin embargo, como la tierra sí tiene una rotación, todo objeto que se mueve sobre ella experi-

Figura 36
Formación de corrientes de vientos
si la tierra no rotara



Fuente: Adaptado de Stimac. John P. Stimac,
<http://www.ux1.eui.edu/~cfjps/1400/circulation.htm/>

menta una fuerza llamada de Coriolis, esto hace que el patrón de los vientos se vuelva mucho más complejo como explicaremos enseguida (Taylor, 2004).

En el Ecuador, el aire caliente por ser menos denso, subirá hasta llegar a la tropopausa, que es la zona de transición entre la troposfera y la estratosfera. Cerca a la superficie en la región ecuatorial se forma una zona de baja presión. En la tropopausa el aire se mueve hacia el norte

en el hemisferio norte y hacia el sur en el hemisferio sur. El aire se enfría gradualmente y cerca de los 30 grados de latitud desciende hacia la superficie creando una zona de alta presión, con climas secos y soleados. Es por esto que la mayoría de los desiertos del mundo se encuentran en estas regiones de alta presión.

Parte de ese aire que alcanza la superficie es regresada a la zona de baja presión en el Ecuador, completando el ciclo que se conoce como celda de Hadley.

Sin embargo, no todo el aire que baja en los 30 grados de latitud se mueve hacia el Ecuador. Parte se mueve hacia los polos hasta llegar a los 60 grados de latitud, donde se encuentra con aire frío que proviene del polo (los frentes polares), lo que causa que el aire más caliente suba y la mayor parte regrese a los 30 grados de latitud donde se completa el ciclo llamado celda de Ferrer.

El resto del aire que sube con el frente polar se mueve hacia los polos donde baja a la superficie para completar el ciclo denominado celda polar.

Como la tierra está rotando, los vientos sienten el efecto de la fuerza de Coriolis: en el hemis-

ferio norte los vientos que van hacia el norte son desviados hacia el este (vientos del oeste) y los que van hacia el sur son desviados hacia el oeste (vientos alisios). Lo opuesto sucede en el hemisferio sur (Taylor, 2004).

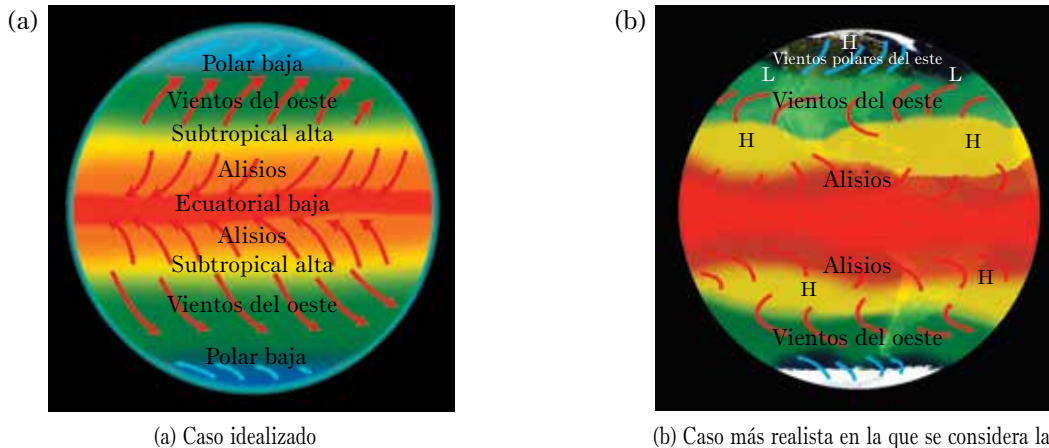
El uso de la energía eólica es muy antiguo. El viento ha impulsado las embarcaciones de vela de los sumerios y los barcos de los egipcios a lo largo del río Nilo desde hace más de 5 mil años. En el siglo XI, en el Medio Oriente se usaron ampliamente los molinos de viento para la produc-

ción de alimentos. Los comerciantes y cruzados llevaron esta idea de vuelta a Europa y ya en el año 1180 se empleaban molinos de viento en Normandía. En Europa se desarrollaron tres tipos principales de molino: el de pedestal en el siglo XII, el molino hueco para bombeo de agua en el siglo XV y el molino de torre (Jaramillo, 2010).

Los colonos trajeron esta tecnología al Nuevo Mundo y se comenzaron a usar los molinos de viento para bombear agua en granjas y ranchos, así como para moler el trigo y el maíz (EIA-wind). En Estados

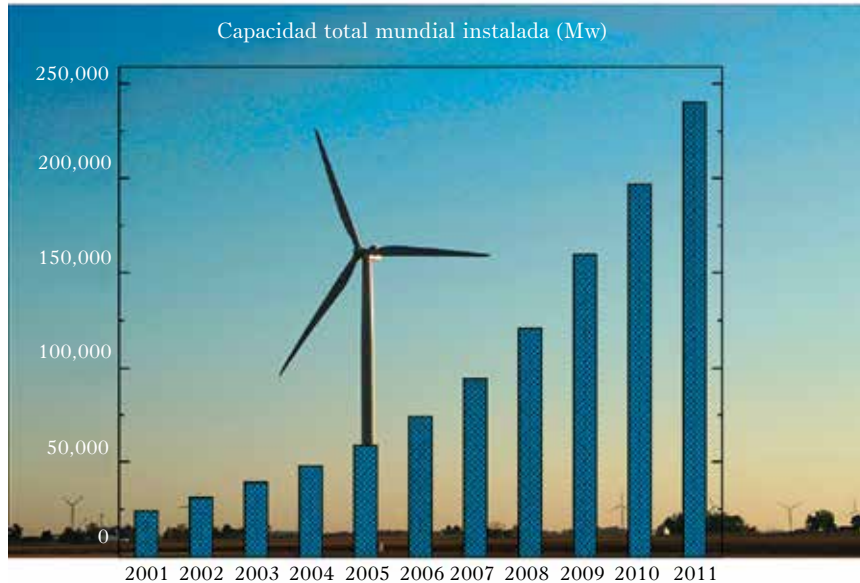
Figura 37

Formación de corrientes de vientos considerando la rotación de la tierra



Fuente: Adaptado de Stimac. John P. Stimac, <http://www.ux1.eui.edu/~cfjps/1400/circulation.htm/>

Figura 38
Crecimiento de la energía total generada usando el viento



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Unidos se usaron pequeños molinos de viento para generar electricidad en las áreas rurales donde no llegaba el servicio eléctrico, hasta que en los años treinta se construyeron líneas de alta tensión que llegaron hasta las zonas rurales y poco a poco los molinos de viento se dejaron de usar (EIA-wind).

Después de la Segunda Guerra Mundial, cuando el precio del petróleo era muy barato, el uso de turbinas de viento no era nada atractivo.

Pero cuando el precio del petróleo se disparó por el embargo petrolero en la década de los setenta, surgió un gran interés en las energías renovables, incluyendo la energía eólica (EIA-wind). Actualmente, la eólica es la fuente de energía de más rápido crecimiento en el mundo. Y la capacidad total instalada en el mundo en energía eólica ha crecido exponencialmente en los últimos años como se ve en la figura 38 (Ewea, 2010).

Las turbinas eólicas o de viento

Las turbinas de viento transforman la energía cinética del viento en energía mecánica. Esta última se puede utilizar para tareas específicas (como por ejemplo, moler el grano o bombear el agua) o por medio de un generador, convertirla en electricidad. Los aerogeneradores, como también se denominan a las turbinas de viento, se pueden clasificar en dos grupos principales

dependiendo de la orientación de su eje de rotación: de eje vertical u horizontal (Texas, EIA-wind).

Las turbinas de viento se montan sobre una torre, aproximadamente a 30 metros o más sobre el suelo, para obtener la mayor cantidad de energía, aprovechando el viento más rápido y menos turbulento (NREL). Las turbinas capturan la energía del viento con las aspas o palas. En los aerogeneradores modernos se tienen por lo general

Figura 39
Aerogenerador de eje paralelo (izquierda)
y de eje vertical (derecha)

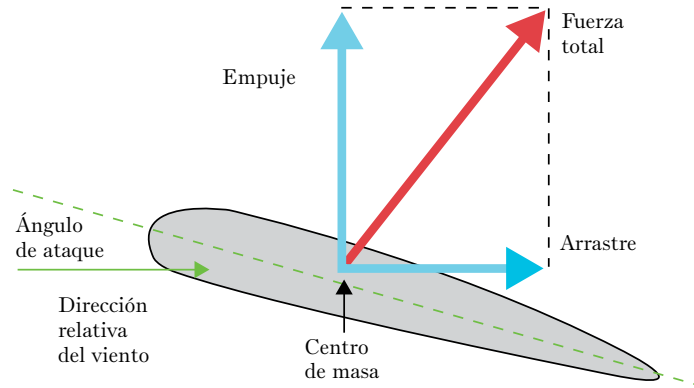


Fuente: Noboru Takeuchi.



Fuente: Tomado de Wikipedia Commons.

Figura 40
Fuerzas que actúan en un aspa



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

dos o tres aspas sobre un eje, formando lo que se conoce como el rotor. El perfil de las aspas es similar al de las alas de los aviones y realizan su función mediante el mismo principio que permite que un avión pueda volar.

Un objeto en una corriente de aire siente una fuerza que es impartida por la corriente. Esta fuerza la podemos dividir en dos componentes actuando en direcciones perpendiculares y que se conocen como la fuerza de arrastre y la fuerza de empuje (Hewitt, 2004).

La fuerza de arrastre es la componente que es paralela a la dirección de la corriente del aire,

mientras que la fuerza de empuje es perpendicular a la dirección de la corriente. Esta fuerza es la que permite que un avión se eleve sobre la tierra. El ala de un avión está diseñada para que la velocidad relativa del viento en la parte inferior sea menor que en la parte superior y, de acuerdo con el principio de Bernoulli (Hewitt, 2004), la presión sea mayor bajo el ala que sobre ella. Esta diferencia de presiones es responsable de la fuerza de empuje y por lo tanto, de que el avión pueda elevarse. En el caso de la turbina, esta fuerza es mucho más fuerte que la fuerza de arrastre y la combinación de las dos hace que gire como una hélice.

Las partes más importantes de un aerogenerador son las siguientes (USDOE-wind):

1. La torre, la cual soporta todos los otros componentes principales del aerogenerador, y permite que las aspas estén a una altura apropiada donde el viento sea más rápido y menos turbulento.
2. El rotor, el cual convierte la energía cinética del viento en energía mecánica. Debe tener un sistema de regulación, que le confiera una velocidad de rotación estable a partir de cierta velocidad del viento, y un sistema de seguridad destinado a frenar la máquina en caso necesario.
3. El generador eléctrico para transformar la energía mecánica del rotor en energía eléctrica.
4. Una caja de engranajes o multiplicador. En los aerogeneradores pequeños, las palas están directamente montadas en el eje del generador. Sin embargo, en los grandes aerogeneradores el rotor gira muy lentamente y se debe usar una caja de engranajes para obtener una alta velocidad de rotación para poder generar la electricidad.
5. Un mecanismo de rotación, para que el aerogenerador esté orientado en la dirección del viento en todo momento.

Perspectivas de la energía eólica

La energía eólica es una fuente de energía limpia, no contamina el aire produciendo emisiones de gases de efecto invernadero ni gases tóxicos que causan la lluvia ácida como las plantas que usan los combustibles fósiles. Es una energía renovable, no se puede acabar, debido a que se basa en el viento, el cual proviene indirectamente del sol. Los parques eólicos se pueden construir en granjas o ranchos, beneficiando así la economía en las zonas rurales. Los aerogeneradores solamente usan una fracción pequeña de dichas granjas y sus dueños puede seguir trabajando sus tierras. Aunque en la actualidad la energía eólica es una de las tecnologías de energía renovable de menor precio, debe competir con las fuentes de generación convencional. A pesar de que el costo de la energía eólica ha disminuido dramáticamente en los últimos 10 años, la tecnología requiere una inversión inicial

más alta que las plantas de energía de combustible fósil (USDOE-wind).

Figura 41
Parque marino de Thornton Bank



Fuente: Foto cortesía de Hans Hillewaert©.

Parques marinos

En la actualidad, hay una tendencia hacia la construcción de granjas eólicas en alta mar, donde la velocidad del viento es mayor que en la tierra. En general los costos de una instalación eólica en el mar y su mantenimiento son superiores que en tierra, debido a mayores costos provenientes de la construcción en alta mar y que incluyen materiales con más altas especificaciones que puedan resistir el ambiente marino corrosivo. Sin embargo, los parques marinos tienen una vida útil más larga y la producción de electricidad es mayor, resultando en una mayor rentabilidad (Taylor, 2004).

En septiembre de 2010 se inauguró “Thanet Offshore Wind Farm”, en ese momento, el parque eólico *off shore* más grande del mundo. Se encuentra cerca de la costa de Kent en Inglaterra y costó 780 millones de libras, aproximadamente 1,400 millones de dólares. El proyecto Thanet posee 100 turbinas Vesta V90 de tres megavatios de potencia cada una; están distribuidas en filas separadas por 800 metros, y dentro de una fila la distancia entre turbinas es de 500 metros, ocupando una superficie de 35 kilómetros cua-

drados. Las turbinas alcanzan una altura de 115 metros y están ubicadas en áreas con profundidades de entre 20 y 25 metros. Los 300 megawatts que puede producir la granja eólica de Thanet pueden proveer de energía a cerca de 200 mil hogares (Thanet Offshore Wind Farm, 2010).

LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

Las plantas hidroeléctricas aprovechan la energía del agua que fluye y mediante turbinas y generadores la convierten en electricidad. Para luego repartirla a la red eléctrica para su uso en hogares y la industria.

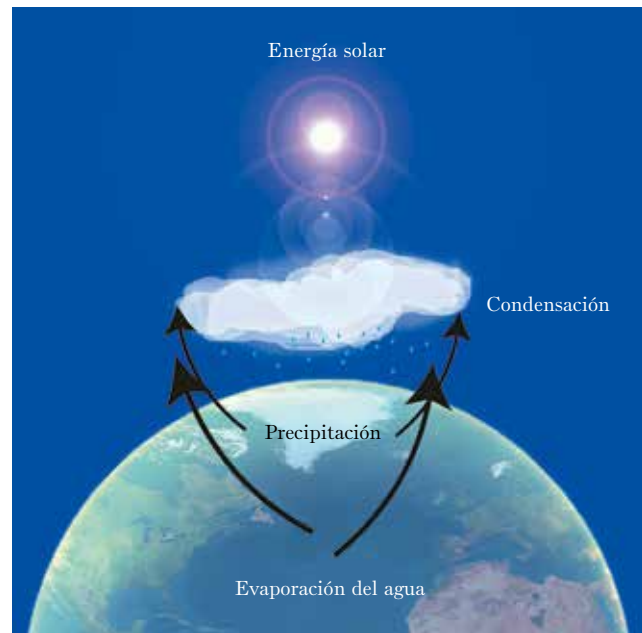
El agua se mueve constantemente a través de un ciclo global amplio conocido como el ciclo del agua. El sol calienta la superficie de los ríos, lagos y océanos, haciendo que el agua se evapore, a medida que sube a la atmósfera, el vapor se condensa y se forman las nubes. Luego el agua cae de nuevo a la tierra: es la precipitación, ya sea en forma de lluvia, nieve, etcétera.

El agua fluirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano, o se filtrará a través del suelo, formando depósitos de agua subterránea,

conocidos como acuíferos. Tarde o temprano el agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido a la evaporación para completar el ciclo.

La energía del agua se puede aprovechar para producir electricidad o para tareas mecánicas como la molienda de los granos, además es una energía renovable, ya que su fuente es el agua que no se consume en el proceso.

Figura 42
Ciclo del agua



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

El uso de la energía hidroeléctrica es muy antiguo. Hace más de 2 mil años los griegos usaban ruedas movidas por agua para moler el trigo y hacer harina. También se usó el agua para cortar madera y como molinos textiles. Se construyeron centrales hidroeléctricas en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña y en 1882 en el río Fox en Appleton, Wisconsin, Estados Unidos (Texas). Por muchos años no se construyeron muchas centrales hidroeléctricas, pero el aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX provocó un auge en su construcción y para 1920 ya generaban un porcentaje grande de la producción total de electricidad. La tecnología de las centrales hidroeléctricas no ha cambiado mucho durante el siglo XX y comienzos del XXI.

Tipos de instalaciones de energía hidroeléctrica

Hay tres tipos principales de instalaciones de energía hidroeléctrica: las centrales de embalse, de desvío y las de acumulación por bombeo.

Las centrales de embalse

El tipo más común de planta de energía hidroeléctrica es una instalación de embalse, la cual, como su nombre lo indica utiliza una represa para almacenar agua del río. En las centrales hidroeléctricas de embalse se represa un río para elevar el nivel de agua y luego se permite que caiga haciendo mover una turbina conectada a un generador eléctrico. De esta manera, la energía potencial del agua se transforma al caer en energía cinética, que se convierte en energía mecánica de la turbina para transformarse en energía eléctrica en el generador (Texas).

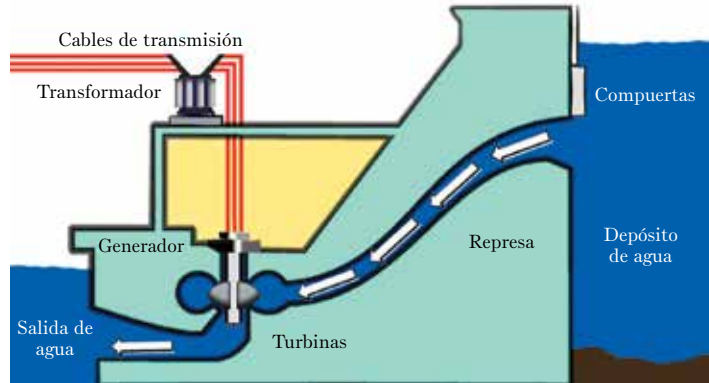
Centrales de desvío

Esta clase de plantas hidroeléctricas canalizan una parte del río por un canal o tubería para generar la electricidad y no requieren el uso de una presa.

Centrales de bombeo

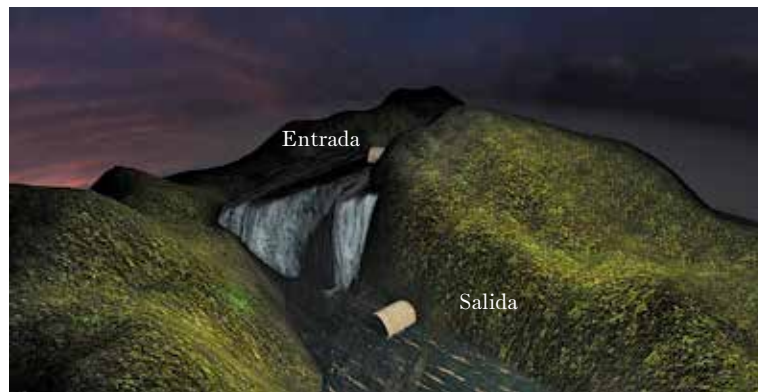
Las centrales de bombeo son un tipo especial de centrales hidroeléctricas que sirve también como

Figura 43
Central hidroeléctrica de embalse



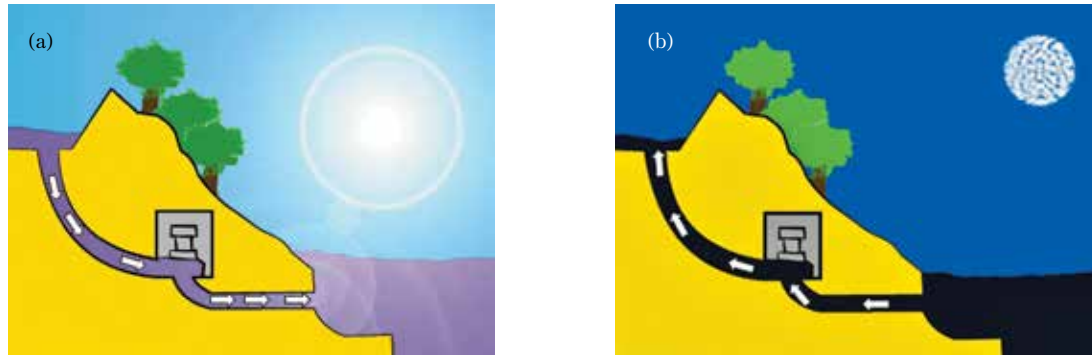
Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Figura 44
Central hidroeléctrica de desvío



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Figura 45
Central hidroeléctrica de bombeo



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

forma de almacenamiento de energía obtenida por otros medios.

En este tipo de planta, se dispone de dos embalses situados a diferente nivel. Cuando la demanda de electricidad es baja, se bombea agua desde el depósito inferior al superior. Durante los periodos de alta demanda, el agua se libera de nuevo al depósito inferior para generar electricidad en la forma convencional de una central hidroeléctrica (Texas).

Las centrales hidroeléctricas tienen muchas ventajas: primero que todo, no requieren combustible, es una forma renovable de energía limpia, pues no contamina el medio ambiente.

Después de construidas, los costos de mantenimiento y funcionamiento son relativamente bajos; las plantas hidroeléctricas tienen un tiempo de vida considerablemente largo y la turbina hidroeléctrica es un dispositivo eficiente, sencillo y seguro. Sin embargo, la construcción de las represas puede tener un impacto grande en el medio ambiente, modificando los ecosistemas del lugar donde se construyen. Sin embargo, son pocas las represas que se construyen con el propósito de generar electricidad, y la mayoría se edifican para controlar los flujos de agua y evitar inundaciones (Texas).

ENERGÍA DEL MAR

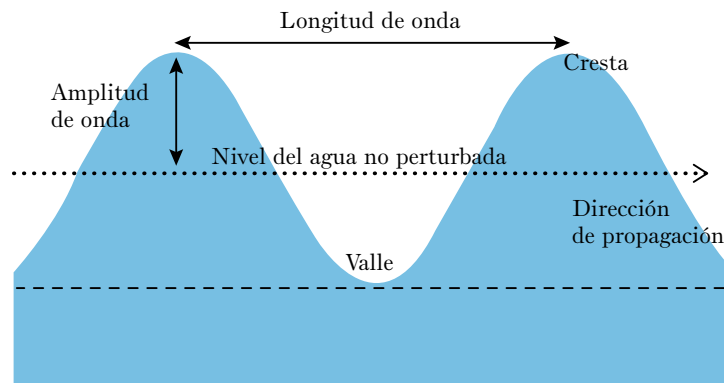
Aproximadamente las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta está cubierta por océanos, los cuales representan una gran fuente de energía que ha estado relativamente sin explotar. La energía almacenada en los océanos del mundo podría satisfacer todas nuestras necesidades energéticas. Aunque hay varias tecnologías para aprovechar la energía del mar, por ejemplo, las que provienen de las olas o de las mareas, no es una tarea fácil debido a las dificultades que implica trabajar en el mar.

Energía de las olas

Las olas son ondas que se forman en la superficie de las aguas, tales como mares, océanos, lagos y ríos. Debido a su movimiento, tienen energía cinética, la cual puede usarse para accionar una turbina y transformarla en energía mecánica.

Cualquier perturbación del agua, desde las producidas por los barcos hasta las de los terremotos, puede producir olas. Sin embargo, la causa más común es el viento, al soplar por encima de la superficie del agua, la fricción produce una ondulación. La fuerza del viento, la distancia

Figura 46
Diagrama de las partes de una ola



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

que avanza y la duración de la ráfaga determinan el tamaño de las ondas.

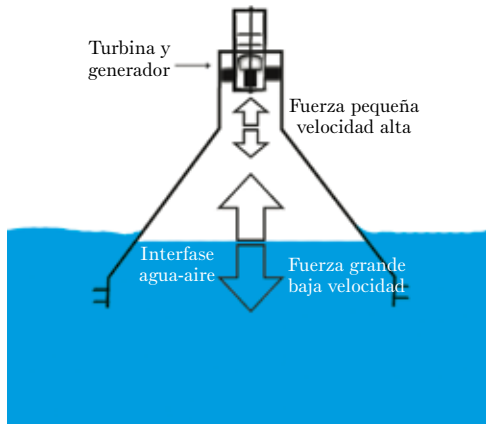
Si en la superficie del agua hay algún objeto flotando, se puede observar que, al ser alcanzado por las olas no se desplaza con ellas sino que sube y baja en la misma posición horizontal (en la dirección en la que se mueve la onda) (Takeuchi, 2009). A la posición vertical más alta con respecto a la altura inicial se le llama amplitud y, donde esto ocurre, generalmente se le llama cresta de la onda, mientras que donde se tiene la posición vertical más baja se le llama valle. La distancia entre dos crestas de la onda se llama su longitud de onda. El número de crestas que pasan por algún lugar en un segundo se llama la frecuencia de la onda. Un periodo de la onda se puede medir escogiendo un punto estacionario y contando los segundos que tardan dos crestas consecutivas o canales en pasar. El periodo y la frecuencia están relacionados en forma inversa.

Las olas pierden muy poca energía al avanzar por los océanos, por lo cual al llegar a las costas, y después de viajar por enormes regiones oceánicas, han acumulado una gran cantidad de energía.

Los dispositivos de conversión de energía de las olas, se clasifican dependiendo de la forma en que interactúan con el mar. Algunos de ellos son por ejemplo:

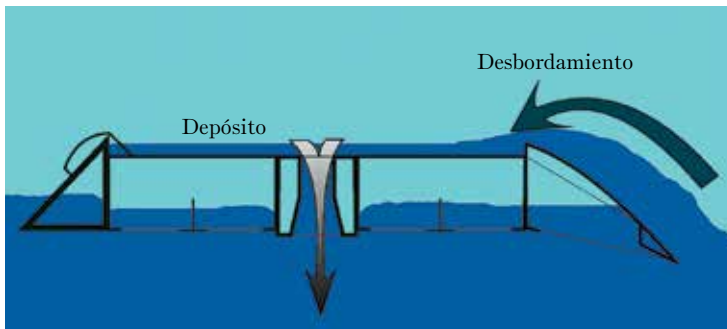
1. La Columnas Oscilante de Agua (OWC, en inglés Oscillating Water Columns): es una estructura que se construyen en las costas, con una entrada lo suficientemente grande, de tal manera que las ondas puedan entrar y salir libremente de una cámara central (BBC, 2000). El movimiento del agua comprime el aire de la cámara cuando entra y lo descomprime cuando sale. Esta oscilación de la presión del aire hace girar una turbina para generar electricidad. La turbina ha sido diseñada de tal manera que rota en la misma dirección sin importar la dirección del flujo de aire (Heath). Se han instalado dispositivos experimentales OWC en Escocia y Portugal que generan alrededor de 0.5 megawatts.
2. Dispositivos de desbordamiento (dragón de olas o wave dragon). Es una estructura flotante que recoge el agua de las olas que lle-

Figura 47
Diagrama esquemático de un dispositivo
de columna oscilante de agua



Fuente: Foto cortesía NOAA.

Figura 48
Diagrama esquemático de un dispositivo
de desbordamiento y su prototipo en el mar



Fuente: Foto cortesía de Wave Dragon.

gan y la almacena en un depósito. Sólo las olas que sobrepasan una barrera se recogen. A continuación, el depósito se desocupa y el agua pasa a través de una turbina que genera energía eléctrica (wave dragon).

Los dispositivos de desbordamiento combinan en forma novedosa dos tecnologías bien desarrolladas: la de las hidro-turbinas y las de alta-mar. Actualmente son los sistemas convertidores de energía de olas en desarrollo más grandes, con una potencia nominal de entre 4-11 megawatts. Además puede aumentarse su tamaño sin muchas restricciones. El primer prototipo experimental comenzó a operar en marzo de 2003 en Nissum Bredning, Dinamarca.

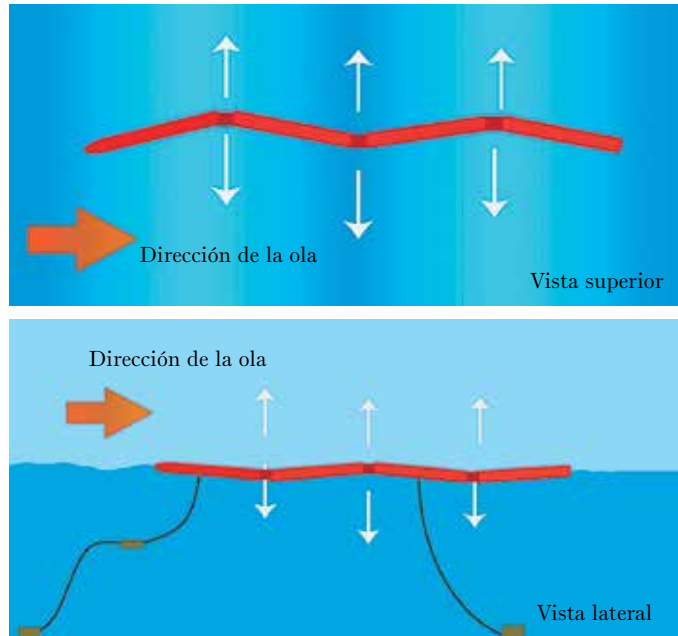
3. Dispositivos de superficie (Pelamis). Son dispositivos que utilizan directamente el movimiento de la superficie del océano. Por lo general, incluyen una estructura flotante y articulada compuesta por secciones cilíndricas unidas entre sí. En las uniones de los flotadores se tienen compresores, los cuales se resisten a su movimiento y bombean aceite a alta presión a través de motores hidráulicos,

los cuales a su vez hacen que los generadores produzcan electricidad. Generalmente se conectan varios dispositivos juntos y la energía generada se transporta por un solo cable que va por el lecho marino. El primer prototipo, de 750 kilowatts, tiene un largo de 120 metros y un diámetro de 3.5 metros y está formado por tres módulos de conversión de energía, de 250 kilowatts cada uno (Pelamis).

En la actualidad se está investigando algunos otros métodos de generación de energía a partir de las olas, los cuales están en diferentes estados de desarrollo. La energía de las olas tiene muchas ventajas con respecto a las otras formas renovables y no renovables (Alam, 2008). Es un recurso energético muy predecible y consistente, lo que se puede traducir en menos problemas técnicos relacionadas con la producción de energía, y un mayor beneficio económico.

También puede tener efectos ecológicos favorables: al absorber la energía de las olas, los dispositivos generadores de electricidad pueden resultar en regiones de calma en las aguas detrás de ellos, lo que contribuye a la defensa de las

Figura 49
Dispositivo Pelamis



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.



Foto: Wikipedia Commons.

costas y la generación de un área de aguas tranquilas que podrían ser usadas por ejemplo, en actividades de recreación. Pueden también funcionar como arrecifes artificiales, los cuales pueden ayudar a conservar la biodiversidad de las aguas donde se instalen (Alam, 2008).

Energía de las mareas

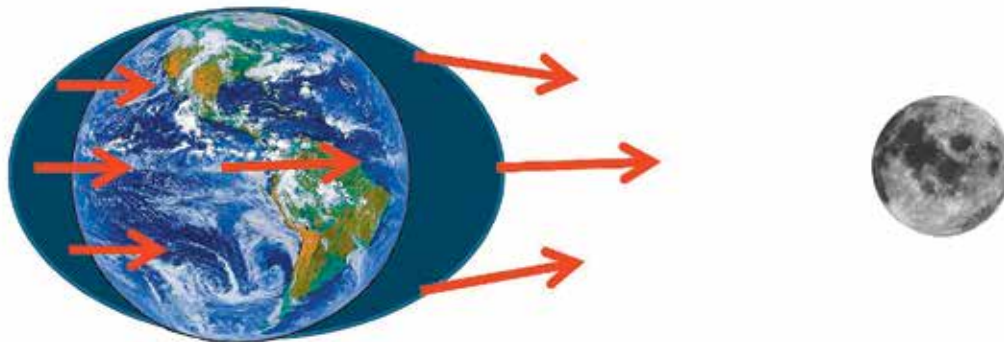
La energía mareomotriz es la que se obtiene a partir de las mareas, su uso no es nuevo y se ha empleado desde la Edad Media en Europa para la molienda de granos (Texas).

Mareas

Las mareas son causadas por la atracción gravitacional de la luna y el sol, y la rotación de la tierra. El nivel del mar puede cambiar hasta por unos 12 metros cerca de las costas debido a las mareas (EIA-mar), sube y baja unas dos veces durante el día. Cuando el nivel del mar está más alto se dice que hay marea alta y cuando está más bajo, marea baja.

La interacción de la luna y la tierra da como resultado que los océanos del planeta sean atraídos hacia la luna. La fuerza gravitacional es

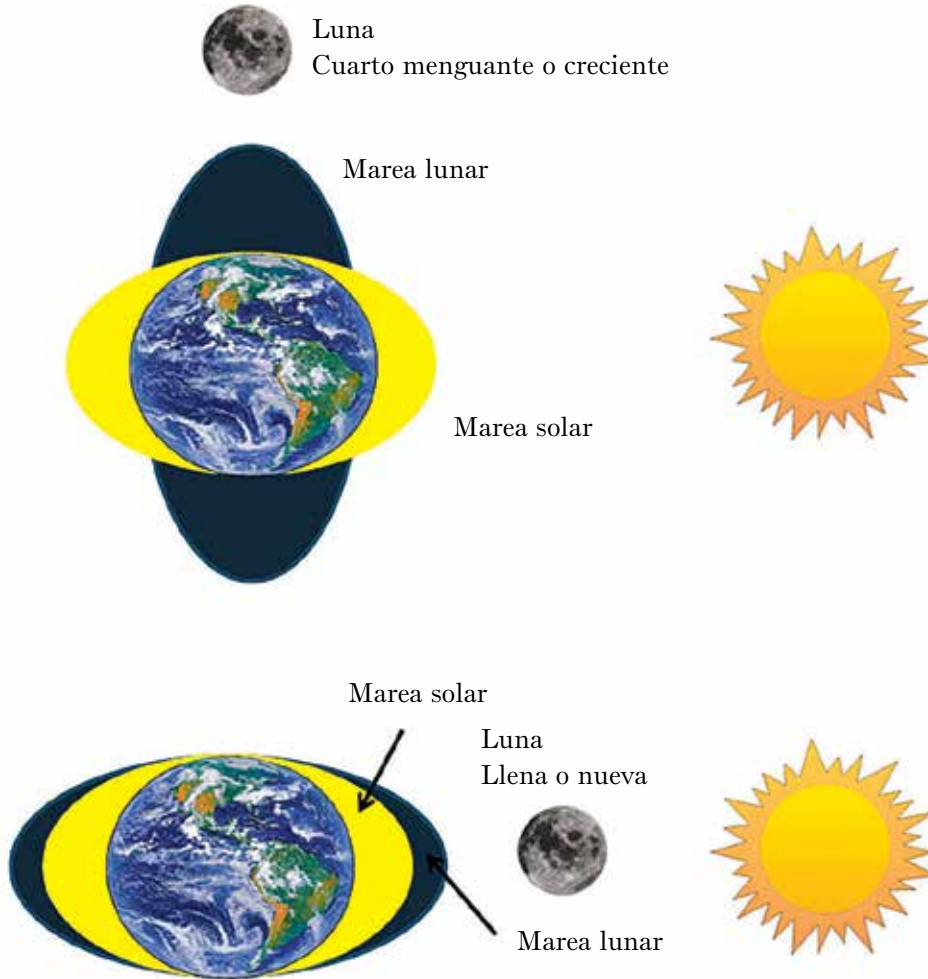
Figura 50
Diagrama de la formación de mareas



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Figura 51

Marea muerta y marea viva



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa los cuerpos que interactúan, como consecuencia, en el lado opuesto de la tierra a la luna, el efecto es menor como se muestra en las figuras siguientes.

De la misma manera, el sol influye en las mareas debido a que también hay una fuerza gravitacional entre el sol y los mares. Durante los días de luna nueva y luna llena, cuando la luna, la tierra y el sol están alineados, la fuerza gravitacional total sobre los mares es mayor, resultando en mareas más grandes, se les llama mareas vivas. Por otro lado, cuando la luna está en los cuartos crecientes o menguantes, las fuerzas gravitacionales del sol y de la luna sobre los mares tienen direcciones perpendiculares, resultando en mareas más pequeñas, llamadas mareas muertas.

Hay varias formas en las que se puede extraer la energía de las mareas. Algunas de ellas son las siguientes:

Presas

Se pueden usar presas o embalses para convertir la energía de las mareas en electricidad, forzando el agua a través de turbinas, que activan un

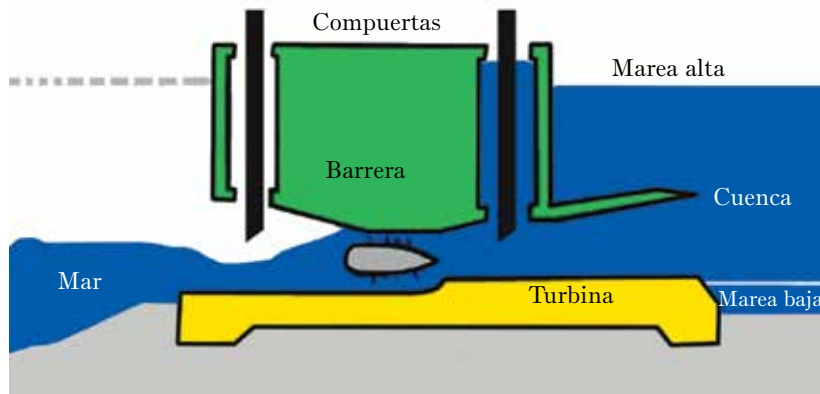
generador. Las compuertas en la barrera del embalse permiten que éste se llene durante los periodos de mareas altas, llamadas mareas de flujo y que el agua salga durante las mareas altas o mareas de reflujo (USDOE-tidal). El funcionamiento de las presas de mareas es muy parecido al de una planta hidroeléctrica: cuando el agua fluye a través de las turbinas transforman la energía cinética del agua y por medio de un generador producen electricidad. Algunas presas de marea pueden generar energía usando las mareas entrantes o salientes, mientras que otras son sistemas de dos vías que generan electricidad al llenarse y desocuparse el embalse.

Las presas de mareas pueden tener un impacto negativo en la vegetación y fauna de los lugares donde se instalan. Por ejemplo, al cambiar el nivel del mar en el embalse, pueden modificar la cantidad de materia en suspensión en el agua y hacerla más turbia. También podrían perjudicar la navegación así como la industria de la recreación.

La primera presa de mareas, con una turbina de 240 megawatts, se construyó en La Rance, Francia, donde las mareas tienen una amplitud de 14 me-

Figura 52

Planta de presa de mareas



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

tros. Otra planta, de 20 megawatts, se encuentra en Anápolis Royal, Nueva Escocia, Canadá.

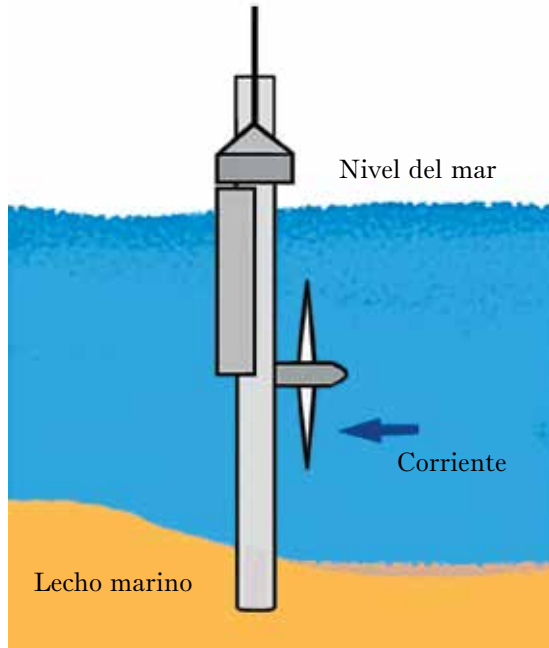
Vallas para marea

En otro tipo de plantas generadoras de energía, se construye una cerca, donde se colocan una serie de turbinas de eje vertical. La estructura está diseñada de tal manera que toda el agua debe pasar por las turbinas (USDOE-tidal). A diferencia de las plantas de presas, las de vallas para marea no confinan el agua del mar inundando una cuenca y se pueden construir en los canales entre dos islas pequeñas o a través de

estrechos entre el continente y una isla. Por esto, las vallas para mareas tienen un impacto negativo mucho menor en las regiones donde se instalan, aunque podrían modificar las rutas migratorias de ballenas y otros animales marinos de gran tamaño.

Las vallas para mareas también son mucho más económicas de instalar, además de que se pueden instalar en forma escalonada y pueden funcionar tan pronto como cada generador sea instalado, a diferencia de las plantas de presa que sólo generan energía una vez que todo el sistema esté completamente terminado.

Figura 53
Turbina de mareas



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Las turbinas de mareas

Son muy similares a las turbinas de viento de eje horizontal, pero están sumergidas dentro del agua en cualquier lugar en el que haya un flujo de mareas fuertes. Se colocan en filas bajo el agua, en forma similar a los parques eólicos. Las turbinas funcionan mejor en las corrientes coste-

ras donde se tiene velocidades de entre 6 y 8 kilómetros por hora. Lugares ideales para las granjas de turbinas de mareas están cerca de la costa en aguas con profundidades de entre 20 y 30 metros (USDOE-tidal).

Debido a que el agua de mar es aproximadamente 800 veces más densa que el aire, las turbinas de mareas pueden producir mucha más electricidad que las turbinas eólicas, sin embargo, por esa misma razón, deben ser mucho más resistentes. Las turbinas de mareas ofrecen ventajas significativas sobre los sistemas de presas y de vallas debido a que representan menores efectos nocivos sobre el medio ambiente.

DESARROLLO E INVESTIGACIÓN

La demanda mundial de energía aumenta a un ritmo muy rápido, por ello, es muy importante mejorar la eficiencia y la sustentabilidad de las tecnologías de generación de energía. En particular, esto es muy importante en el caso de las energías renovables que hemos estado discutiendo en este capítulo. Es por esto que se lleva a

cabo un continuo trabajo de investigación y desarrollo en esta área. Las mejoras provendrán tanto de las tecnologías tradicionales como de áreas más nuevas como la nanotecnología.

En lo que resta del capítulo discutiremos algunas contribuciones de la ciencia y la tecnología a la producción de energías renovables. Nos concentraremos principalmente en la energía eólica, pero muchas de las técnicas y métodos que discutiremos también son aplicables a los otros tipos de energía.

Dentro de las tecnologías tradicionales, es innegable la importancia que juega el diseño de nuevos sistemas, el modelado computacional y la investigación aplicada en ingeniería mecánica y eléctrica. En 1985, los aerogeneradores podían producir una energía de 25 kilowatts. Gracias a la continua labor de investigación y desarrollo, ya para el 2010 este valor fue de 4 mil kilowatts (4 megawatts); en 25 años se multiplicó por 160. Mucha de la investigación que se hace hoy en día tiene que ver con el diseño de componentes más eficaces, tales como las aspas de los aerogeneradores o de las turbinas.

Modelaje y herramientas de diseño

Por ejemplo, se está desarrollando programas computacionales que podrían mejorar los análisis estructurales y aeroelásticos usados en la industria eólica. Usando dichos programas se podría mejorar el diseño de aspas nuevas, así como revisar y mejorar los diseños existentes actualmente. Este sería el paso inicial en un programa integral, seguido por la construcción y finalmente la prueba de las aspas. Se busca reducir los tiempos de diseño y mejorar su calidad, con el propósito final de fabricar turbinas de viento más eficientes, de mejor calidad (Sandia-wind).

Herramientas aerodinámicas y aeroacústicas

La predicción precisa de las cargas aerodinámicas en las láminas de las turbinas de viento es un componente esencial en el diseño del aspa. En el Laboratorio Nacional Sandia se están desarrollando métodos de dinámica de fluidos computacional (DFC) para que usando supercomputadoras se pueda estudiar y carac-

terizar el comportamiento aerodinámico de las aspas y la estabilidad del aerogenerador. En particular, se buscan eliminar ruidos aeroacústicos que afecten la estabilidad de los aerogeneradores (Sandia-wind).

Iniciativas de fabricación avanzada (AMI)

La fabricación de las aspas de los aerogeneradores contribuye a una porción significativa del costo total de una turbina de viento moderna. Aunque están hechas de materiales compósitos relativamente baratos, los procesos de fabricación actuales requieren del uso de mano de obra intensiva, elevando los costos de fabricación. Es por esto que se están diseñando procesos de fabricación avanzados más sencillos que puedan hacerse en forma automática (Sandia-wind).

Para finalizar mencionaremos brevemente algunas contribuciones de la nanotecnología. También en este caso se enfatizará en posibles aplicaciones a la energía eólica, pero las técnicas aquí descritas pueden ser igualmente aplicadas en otros campos.

Materiales anticorrosivos para las torres

La mayoría de los grandes aerogeneradores son sostenidos por torres de acero en forma tubular. Es por esto que la corrosión es un factor muy importante que se debe tener en cuenta cuando se construyen los parques eólicos, sobre todo en alta mar. Normalmente, los revestimientos anticorrosivos están fabricados con sustancias tóxicas como el plomo, el cadmio y el cromo. Cuando se comienzan a desgastar es necesario usar compuestos orgánicos volátiles para poder removerlos, añadiendo más productos tóxicos al proceso (Casey, 2009). Recientemente se ha encontrado una manera de sustituir estas sustancias químicas tóxicas, al usar un tratamiento de luz infrarroja que enlaza nuevos nanomateriales con el acero, formando una capa más durable, reduciendo los costos y aumentando la vida útil de las torres de acero. El nuevo proceso es simple: una capa de un nanocompósito metal-cerámico con polímero se funde con el acero cuando se ilumina con luz infrarroja y se puede usar en otras superficies grandes de acero, tales como puentes y hasta aviones (Casey, 2009).

Mejores materiales para las aspas de las turbinas

Las contribuciones más prometedoras de la nanotecnología se pueden obtener de la integración de la tecnología de materiales avanzados para la fabricación de las aspas de los aerogeneradores en forma de nanocompuestos. Las propiedades de estos materiales pueden proporcionar gran resistencia mecánica en materiales relativamente ligeros.

Comúnmente, las aspas están fabricadas de resinas reforzadas con fibras. Como se ha visto ampliamente en este libro, los nanotubos de carbono son materiales muy fuertes y muy resistentes al estirarlos, al igual que las fibras de carbono. Pero a diferencia de éstas, los nanotubos son muy flexibles, pueden ser retorcidos, aplanados y doblados sin romperse y se piensa también que después de deformarlos pueden recobrar su forma original. Estas propiedades los hacen ideales en aplicaciones donde se requiera gran resistencia, pero a su vez que sean muy ligeros. Se está trabajando en la fabricación de nanocompuestos con nanotubos de carbono para su uso en la industria de la energía eólica. Por ejemplo,

se ha usado un nanocompuesto de polímeros y nanotubos de carbono, para fabricar un aspa fuerte pero ligera, lo que permite producir aspas de mayor longitud, aumentando la cantidad de electricidad que puede ser generada por cada turbina de viento.

Se ha desarrollado nanocompuestos multifuncionales aplicando recubrimientos de un material de nanofibras de carbono sobre la superficie de un compuesto reforzado con fibras. El material del recubrimiento posee propiedades especiales como una buena conductividad, con destacadas propiedades de amortiguamiento y de alta dureza. Todas estas propiedades lo hacen ideal para aplicaciones en aspas de turbinas de viento, como protección contra rayos, erosión de la superficie y amortiguamiento vibracional (Gou, 2010).

Materiales que cambian de forma

Materiales compósitos como la fibra de vidrio y la fibra de carbono enlazados en una resina de plástico son ya ampliamente utilizados para sustituir el metal en la fabricación de, por ejemplo,

automóviles y aviones. Se está trabajando en una clase nueva de materiales compósitos cambiantes que ajustan su forma bajo ciertas condiciones. Esto se puede lograr mediante el control de la dirección y la tensión de las fibras durante su fabricación.

En los materiales compósitos las fibras están en una dirección particular, de tal forma que el material puede ser rígido en una dirección y débil en la otra. De tal manera que si en una capa las fibras están en cierta orientación, mientras que en la siguiente tienen otra, el material resultante va a tender a curvarse. Si se fabrica el material de manera adecuada, se puede obtener un material bi-estable.

Estos compuestos cambiantes podrían ser utilizados para producir aspas de turbinas más eficientes en los generadores de viento y mareas. Un compuesto bi-estable capaz de cambiar su perfil aerodinámico con rapidez cuando el viento y las condiciones cambian puede ayudar a eliminar tensiones no deseadas en las aspas. Eso aumentaría su eficiencia y podría extender la vida útil de los sistemas de generación de energía (Daynes, 2011).

Mejores lubricantes para las turbinas

También se usa la nanotecnología en la fabricación de nuevos lubricantes que contienen nanopartículas, las cuales actúan como mini-balines, reduciendo la fricción generada por la rotación de las turbinas y disminuyendo el desgaste de la máquina durante su ciclo de vida (Halder, 2007). Un ejemplo, es el nuevo producto, NanoLub, utilizado como aditivo de lubricantes para mejorar el rendimiento de engranajes y lograr mayores durabilidades, menores costos de operación, y mejor eficiencia (Zak, 2009). El producto está basado en nanopartículas inorgánicas de disulfuro de tungsteno WS_2 tipo fullereno, el cual se puede conseguir ya sea como un aceite concentrado o en pasta y ha sido desarrollado para mejorar las propiedades de lubricación de aceites y grasas al disminuir la fricción y el desgaste. Numerosas investigaciones de laboratorio y experiencia en el sector industrial indican que el uso de NanoLub tiene ventajas significativas en comparación con los lubricantes convencionales, tanto en condiciones de presión moderada como extrema.

Nanosensores para monitorear la estructura de las turbinas de viento

Las aspas de los aerogeneradores funcionan de forma adecuada bajo un viento constante, pero pueden ser dañadas por vibraciones inducidas por ráfagas de viento. Se ha propuesto la creación de pequeños parches de nanocompósitos que actuarían como sensores y que puedan ser colocados selectivamente en lugares claves donde se piensa que puedan iniciarse los daños (Shand, 2010). Los parches estarían hechos de la misma materia prima del aspa, pero con una pequeña cantidad de nanotubos de carbono, lo que funcionaría como un sensor de nanocompósitos que no aumentarían el peso de la estructura en forma significativa.

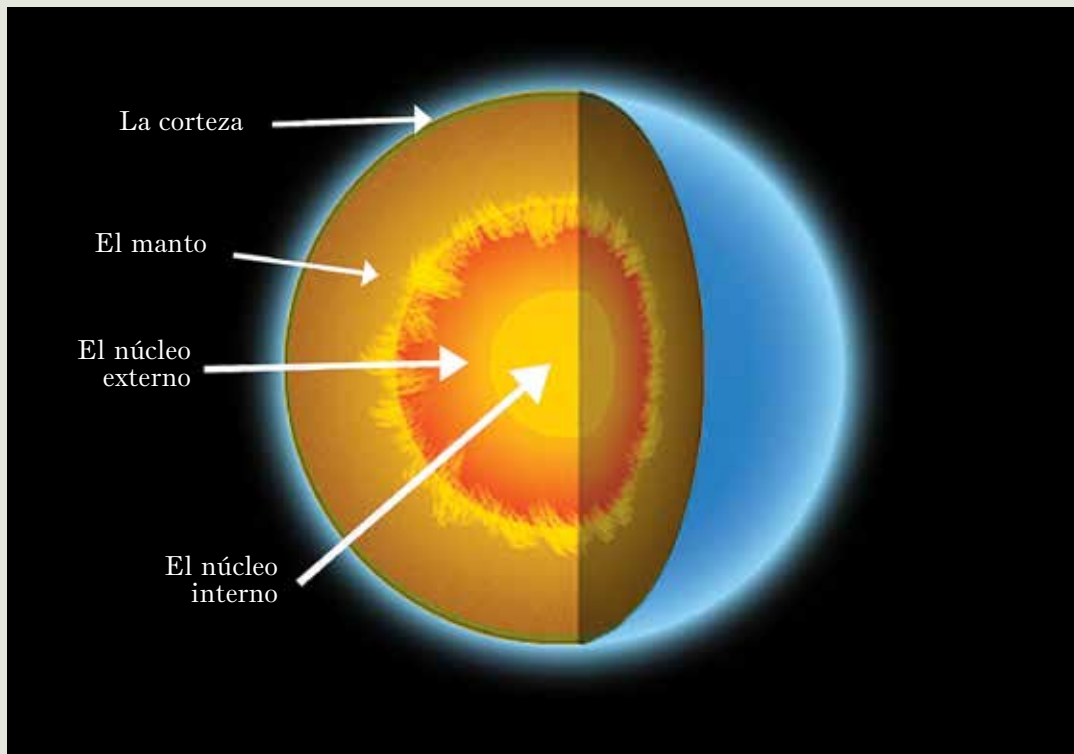
Algunos nanotubos de carbono son muy buenos conductores de la electricidad, y al co-

locarse dentro de un material de polímero se obtiene un nanocompósito sensible eléctricamente a la deformación. Cuando el material es deformado por una presión sobre el aspa, los nanotubos se acercan unos a otros, aumentando la conductividad. Este cambio sirve como señal de que el aspa tiene problemas y el operador puede apagar la turbina para evitar daños mayores.

Turbinas que se limpian solas

Los avances en nanorrevestimientos, con tecnologías de deshielo y de autolimpieza, también podrían ayudar a mejorar la eficiencia haciendo que el hielo y la acumulación de suciedad en las turbinas sea prácticamente inexistente.

Figura 54
Interior de la tierra



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

La energía geotérmica

La palabra geotérmica proviene del griego *geo* que significa tierra y *therme*, calor. Así, la geotérmica es la energía que se obtiene del calor que proviene del interior de la tierra (GEO). Este calor de la tierra puede explotarse comercialmente, al extraer de ella vapor o agua caliente y utilizarlo para calentar casas y edificios o para generar electricidad (EIA-geo). Se considera una fuente de energía renovable ya que el calor se produce continuamente en el interior de la tierra. Sin embargo, los yacimientos geotérmicos pueden enfriarse y agotarse. Es por esto que debe entenderse que la energía geotérmica no es estrictamente renovable en el mismo sentido que la hidroeléctrica o la solar.

EL INTERIOR DE LA TIERRA

La esfera terrestre tiene zonas bien definidas a las que llamamos capas: la corteza, el manto y el

núcleo como se muestra en la figura 54. La corteza, la zona más externa es una capa rígida y delgada comparada con las otras dos. Es de un espesor muy variable: alrededor de 5 kilómetros debajo de los océanos, mientras que debajo de los continentes puede llegar a medir hasta 100 kilómetros. La corteza terrestre está formada por piezas llamadas placas, que se mueven como si fueran bloques rígidos.

La siguiente zona es el manto, una capa de roca semisólida mucho más densa y caliente que la corteza, debido a que la presión y la temperatura de la tierra aumentan con la profundidad. Tiene un grosor de aproximadamente 2,900 kilómetros (USGS).

En el centro de nuestro planeta se encuentra el núcleo, el cual es mucho más denso que el manto debido a que está formado principalmente por una aleación metálica de hierro y níquel,

en lugar de piedra. Esta capa se compone de dos partes bien diferenciadas. La primera se conoce como núcleo externo y mide como unos 2,200 kilómetros de espesor, su consistencia es la de un líquido de flujo libre. El núcleo interno es un sólido de 1,250 kilómetros de espesor. A medida que la tierra gira, el núcleo externo líquido también lo hace, creando el campo magnético de la tierra (USGS).

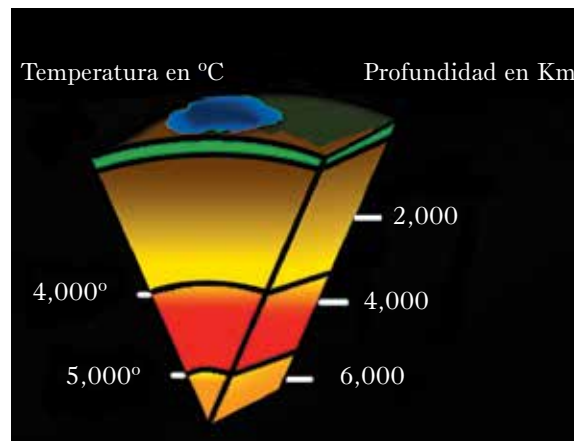
Aunque los grosores del núcleo y del manto son aproximadamente iguales, el núcleo ocupa sólo el 15 por ciento del volumen del planeta,

mientras que el manto el 84 por ciento. El 1 por ciento faltante está ocupado por la corteza.

ENERGÍA DE LA TIERRA

A medida que nos vamos moviendo de la superficie hacia el centro de la tierra hay un aumento de temperatura; en la corteza este aumento es de 17-30 °C por kilómetro de profundidad (GEO). Por debajo de la corteza de la tierra, está la capa superior del manto hecha de un material viscoso de piedra parcialmente fundida, llamada magma,

Figura 55
Temperaturas en el interior de la tierra



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Figura 56
Planta geotérmica de Cerro Prieto, Baja California



Fuente: Noboru Takeuchi.

que está a temperaturas entre 650 y 1,250 °C. En el núcleo de la tierra las temperaturas pueden variar de 4-7 mil °C (GEO).

Como la transferencia de calor se realiza de las regiones con temperaturas más altas a las más frías, los flujos de calor en la tierra son des-

de su interior hacia la superficie. Cuando la corteza terrestre tiene rupturas, el magma puede subir, generando grandes cantidades de calor cerca de la superficie y formando los volcanes. Sin embargo, la mayor parte del magma se mantiene muy por debajo de la superficie, en grandes

regiones subterráneas de roca muy caliente. Cerca de esas regiones la temperatura cambia muy rápidamente de un sitio a otro y se dice que tiene altos gradientes de temperatura (GEO). Si en los alrededores de estas regiones existen fallas profundas y grietas subterráneas, el agua de la lluvia o del deshielo puede filtrarse bajo tierra y al llegar a las regiones de altas temperaturas se calienta por la roca caliente y circula de nuevo a la superficie, para aparecer como aguas termales, géisers, o fumarolas. Si el agua caliente se encuentra en su camino ascendente con una capa de roca impermeable, queda atrapada bajo tierra, llenando los poros y grietas de la roca circundante y formando una reserva geotérmica, que puede alcanzar temperaturas de más de 350 °C y son una fuente importante de energía que puede ser explotada (GEO).

GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Cuando las reservas geotérmicas están lo suficientemente cerca de la superficie, se puede llegar a ellos mediante la perforación de pozos. El

agua caliente y el vapor pueden salir de forma natural de los pozos o puede ser necesario bombearlos a la superficie. Cuando se tienen temperaturas de entre 120 a 370 °C se utilizan para generar electricidad en plantas de energía geotérmica (GEO).

Hay tres tecnologías principales de plantas de energía geotérmica usadas para convertir las reservas geotérmicas en electricidad: conversión de vapor seco, flash y de ciclo binario. El tipo de método utilizado depende del estado del fluido geotérmico, ya sea vapor o agua y de su temperatura.

LAS PLANTAS DE ENERGÍA DE VAPOR SECO

Usan el vapor de agua proveniente del reservorio geotérmico, el cual es enviado directamente desde el pozo hacia las turbinas/generadores para producir la electricidad (GEO, USDOE).

LAS PLANTAS DE VAPOR FLASH

Son actualmente el tipo más común de plantas de generación de energía geotérmica y funcionan

Figura 57
Planta de vapor seco

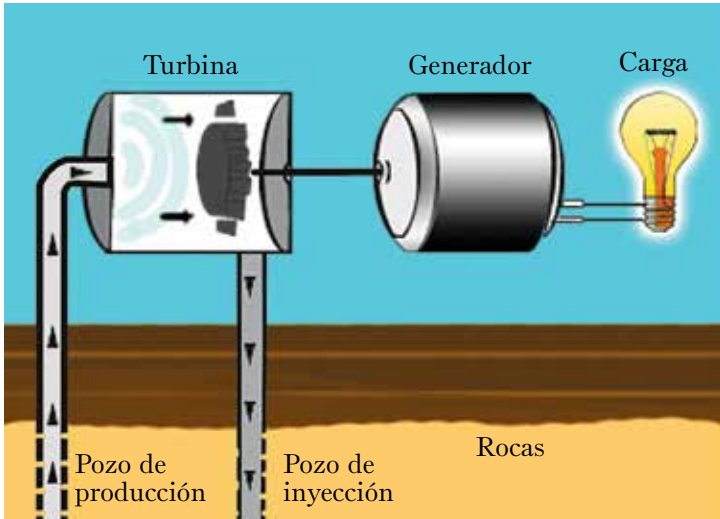
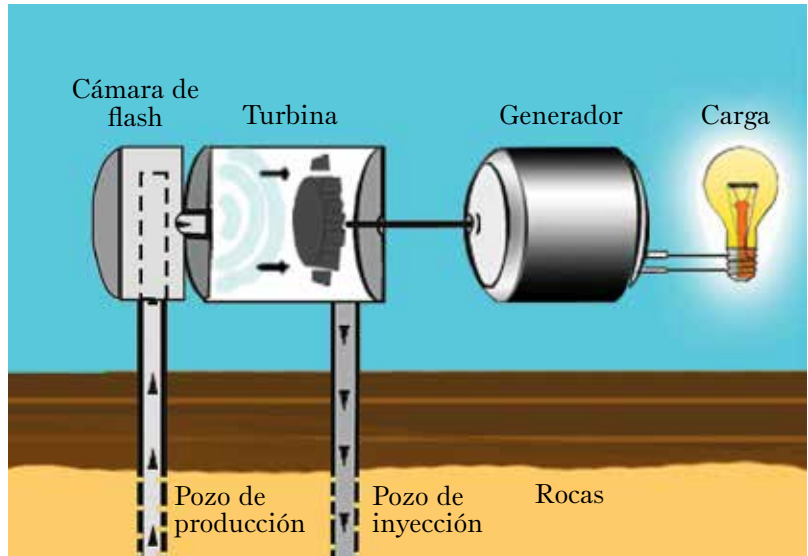


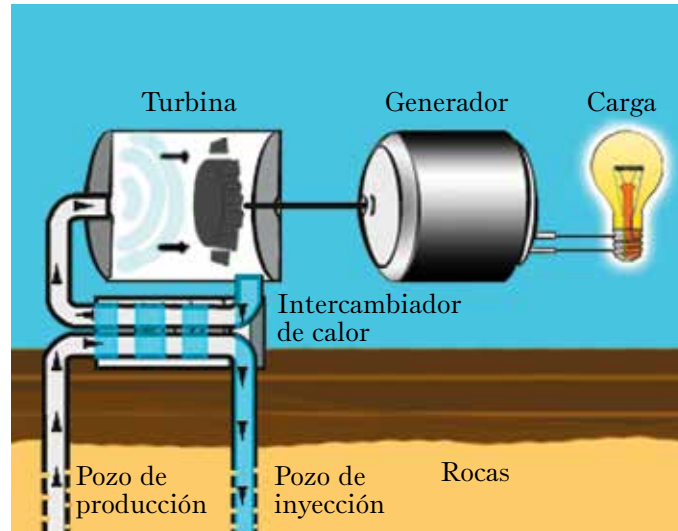
Figura 58
Planta de vapor flash



Fuente: Adaptado de USDOE.

Fuente: Adaptado de USDOE.

Figura 59
Planta de ciclo binario



Fuente: Adaptado de USDOE.

cuando el agua del pozo tiene temperaturas superiores a 182 °C, la cual se bombea a alta presión a los equipos de generación en la superficie y se pasa a través de uno o dos separadores en los que parte de ella, al ser liberada de la alta presión del reservorio profundo, se transforma en forma explosiva en vapor. La fuerza del vapor se utiliza para hacer girar la turbina del generador. Para conservar el agua y mantener la presión del reservorio, el agua geotérmica y el vapor condensado se envían hacia

un pozo de inyección en la periferia del reservorio, para ser recalentada y reciclada (GEO, USDOE).

PLANTAS DE CICLO BINARIO

En una planta de ciclo binario el agua proveniente del pozo geotérmico se pasa por un intercambiador de calor, de ahí, el calor se transfiere a un segundo líquido (normalmente isopropano o isobutano), llamado líquido de funcionamiento.

El líquido de funcionamiento se evapora y mueve la turbina del generador. A continuación se condensa de nuevo en ciclo continuo. El agua proveniente del pozo geotérmico pasa sólo a través del intercambiador de calor y de inmediato se vuelve a reciclar en el depósito (GEO, USDOE).

LAS PLANTAS GEOTÉRMICAS Y EL MEDIO AMBIENTE

En las centrales eléctricas geotérmicas no se quema combustibles para generar electricidad, por lo que sus niveles de emisión de gases contaminantes son muy bajos: menos del 1 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono que una planta de combustibles fósiles. Además, las plantas geotérmicas utilizan sistemas de depuración para limpiar el aire de ácido sulfhídrico que se encuentra en forma natural en los reservorios geotérmicos (EIA-geo).

LA ENERGÍA GEOTÉRMICA Y LA NANOTECNOLOGÍA

Muchas de las aplicaciones de la nanotecnología que hemos discutimos en capítulos anteriores,

también podrían facilitar la generación de energía geotérmica: desde nuevos materiales para ayudar en la perforación de pozos, fabricación de las aspas de las turbinas, construcción de grandes plataformas o de bombas para traer los líquidos geotérmicos, hasta materiales lubricantes que ayuden en los procesos, tanto de perforación como en generación eléctrica. En las siguientes líneas discutiremos algunas investigaciones que se están realizando específicamente para la industria geotérmica, aunque también podría aplicarse para explotar las otras fuentes de energía.

Investigadores de Estados Unidos, han estado desarrollado un mejor fluido de extracción de calor que podría mejorar dramáticamente la economía de la producción de energía renovable a partir de recursos geotérmicos de baja temperatura. El líquido se utiliza para absorber el calor del agua caliente que ha sido bombeada del subsuelo en el intercambiador de calor de una planta geotérmica y puede aumentar la tasa de captura de calor entre un 20 y un 30 por ciento (Borrel, 2009). Los investigadores diseñaron nanomateriales compuestos de metales enlazados por moléculas orgánicas. Ellos en-

contraron que la adición de los nanomateriales a un fluido como el hexano o pentano mejora significativamente sus propiedades para atrapar el calor del agua.

La generación de electricidad a partir de fuentes termales de baja temperatura podría ser más barata con el uso de materiales termoeléctricos más eficientes (Humphrey, 2005). Se ha visto que algunos materiales nanoestructurados tienen propiedades termoeléctricas muy buenas y podrían usarse en la fabricación de generadores que podrían alcanzar el tipo de rendimiento necesario para la aplicación generalizada de la tecnología termoeléctrica en la generación de energía y refrigeración. En los materiales termoeléctricos (generalmente semiconductores), un gradiente de temperatura crea el movimiento de partículas cargadas (electrones y huecos), las cuales producen una corriente eléctrica cuando el material está conectado en un circuito. Este efecto podría ser utilizado para extraer energía de los gradientes de temperatura pequeños, tales como los producidos por algunos procesos geotérmicos, actual-

mente, demasiado pequeños para resultar viables económicamente (Ball, 2005).

También se puede usar nanosensores para estudiar las propiedades físicas y químicas de los materiales en las regiones donde se encuentran los pozos geotérmicos (o en donde se están buscando) (Alaskar, 2010). La adquisición de datos específicos sobre la presión y la temperatura no solamente cerca del pozo sino en cualquier lugar de un depósito geotérmico y el poder correlacionar esta información con la conectividad de la fractura y la geometría, son claves para una óptima extracción de los recursos geotérmicos. Las herramientas existentes para la caracterización de la fractura son inadecuadas porque solamente se realizan mediciones cerca del pozo. Avances tecnológicos en nanociencias podrían dar un impulso en el área de mediciones *in situ* del depósito usando nanosensores. Es por esto que se está investigando las propiedades de transporte de los nanomateriales en un medio poroso, inyectándole varias suspensiones de nanofluidos (nanopartículas y nanoalambres) al material.

Energía nuclear

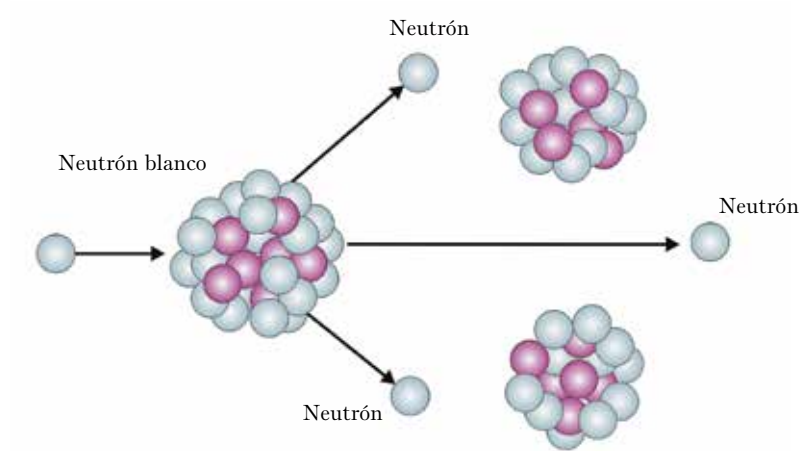
La energía nuclear es aquella que proviene del núcleo atómico. El átomo es la unidad más pequeña posible de un elemento químico, que mantiene todas sus propiedades, y que no es posible dividir mediante procesos químicos. Está compuesto por un núcleo, formado por neutrones y protones, los cuales son llamados conjuntamente nucleones (en el caso del átomo de hidrógeno no hay neutrones). Los protones tienen una carga eléctrica positiva y los neutrones son neutros. Los electrones de carga eléctrica negativa se encuentran alrededor del núcleo formando capas. Los electrones son muy importantes para definir las propiedades físicas y químicas de un elemento. Todos los átomos en su estado más estable son eléctricamente neutros, teniendo igual número de protones que de electrones.

La energía nuclear puede ser utilizada para producir electricidad, pero primero debe ser liberada. Esto se puede lograr por dos procesos físicos diferentes: la fisión y la fusión (Hewitt, 2004).

FISIÓN NUCLEAR

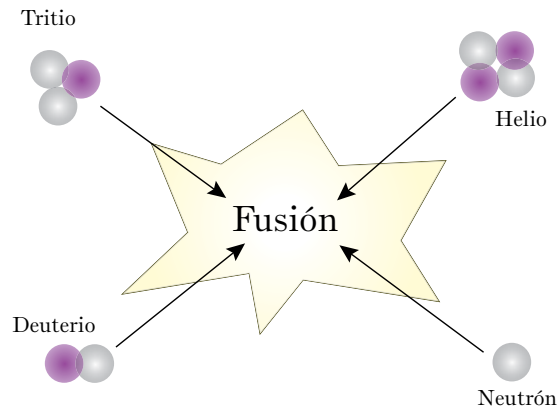
En el proceso de fisión nuclear el núcleo de un átomo pesado (el más usado es el uranio) se bombardea con neutrones y se divide en dos núcleos más pequeños liberando una gran cantidad de energía. Como el neutrón no tiene carga eléctrica, atraviesa fácilmente el núcleo, el cual al dividirse, libera más neutrones los cuales colisionan con otros átomos creando la denominada reacción en cadena.

Figura 60
Diagrama esquemático del proceso de fisión nuclear



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Figura 61
Diagrama esquemático de la fusión nuclear



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

FUSIÓN NUCLEAR

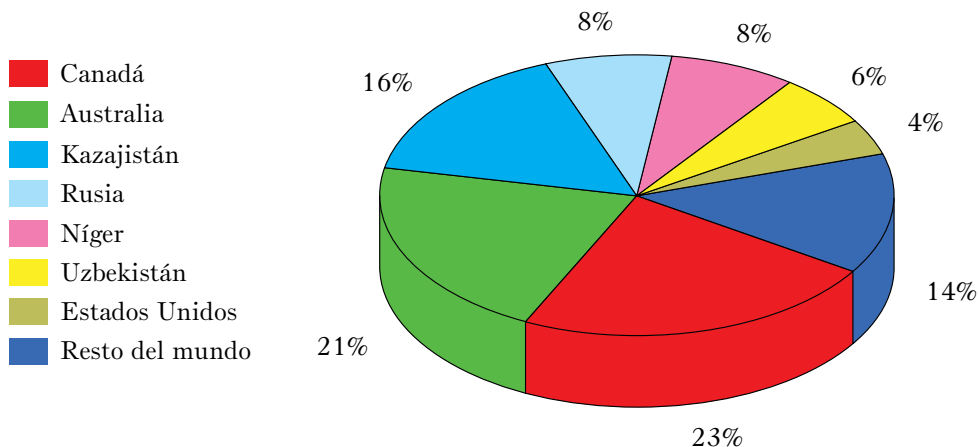
En la fusión nuclear dos núcleos ligeros (por ejemplo de hidrógeno) se unen para formar uno mayor (por ejemplo helio). Este tipo de reacciones son las que se están produciendo en el sol y en las otras estrellas, emitiendo grandes cantidades de energía, como consecuencia de la diferencia de masa entre los núcleos iniciales y el resultante.

PLANTAS NUCLEARES

Las plantas de energía nuclear se basan en el proceso de la fisión nuclear, usando uranio como combustible.

Específicamente se usa el isótopo 235 del uranio. Se denominan isótopos a los átomos de un mismo elemento cuyos núcleos difieren en su número de neutrones. Como el mineral de uranio se encuentra en la naturaleza en cantidades limitadas es un recurso energético no renovable.

Gráfica 5
Producción mundial de uranio en 2007



Fuente: World Nuclear Association, 2011.

Este elemento, suele hallarse casi siempre junto a rocas sedimentarias. Como se puede ver en la gráfica 5, el país productor más importante del mundo es Canadá, seguido de Australia y Kazajistán.

ENRIQUECIMIENTO DEL URANIO

Hemos mencionado que en las reacciones de fisión nuclear se usa el uranio 235 (U235). En yacimientos de uranio natural, alrededor de 0.71 por ciento del uranio es el U235 (tiene 143 neutrones); más del 99 por ciento es U238 (con 146 neutrones), y menos del 0.01 por ciento corresponde al U234 (con 142 neutrones).

El U238 no es un material adecuado para usar en la fisión nuclear debido a que puede absorber neutrones, pero normalmente su núcleo no se fisiona. En este caso, las reacciones nucleares no pueden sostenerse y el reactor se apaga (Hewit, 2004).

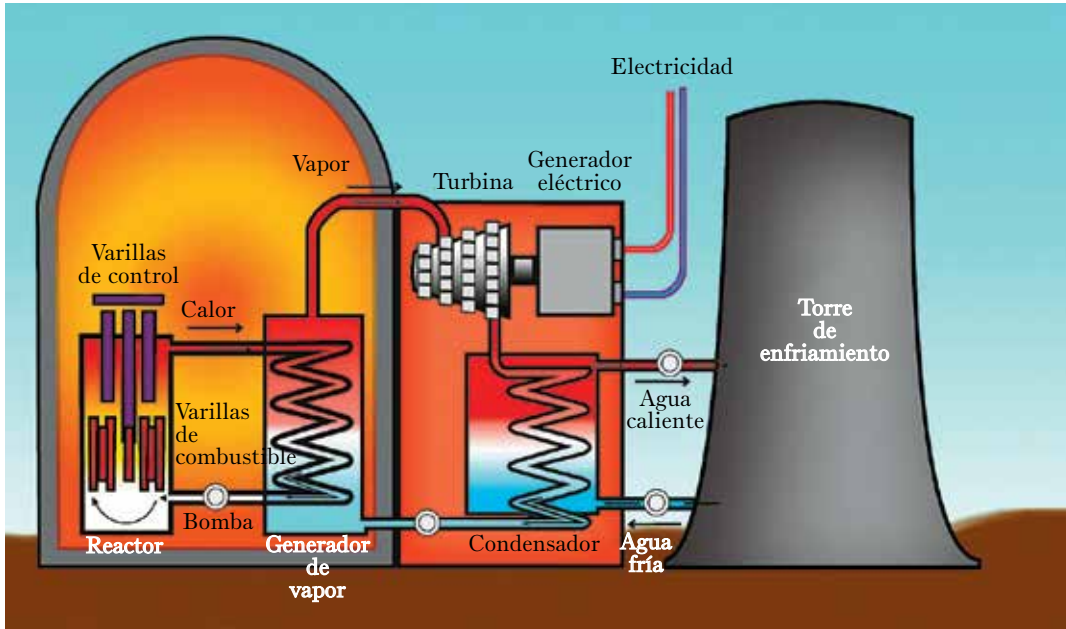
Es por esto que el mineral de uranio natural, con esta mezcla de isótopos, debe ser sometido a un proceso de purificado y refinado que se conoce como enriquecimiento. Actualmente se usan dos

tecnologías principales: la de difusión gaseosa y la de gas centrifugado (USDOE-enuclear). En ambos casos el uranio se combina con el flúor para crear un compuesto químico llamado hexafluoruro de uranio, el cual se calienta hasta que se evapora. En una planta de difusión gaseosa, el gas de UF₆ se hace pasar a través de una serie de filtros. Las moléculas de hexafluoruro de uranio formadas con el isótopo U235 son un poco más pequeñas y pueden pasar más fácilmente a través de los filtros, obteniéndose hexafluoruro de uranio con una mayor proporción de U235.

En el proceso de gas centrifugado, el UF₆ gaseoso se hace girar con rapidez en unos cilindros, la diferencia en masas isotópicas permite a las fuerzas centrífugas separar los dos isótopos, concentrando el U238, que es un poco más pesado, cerca de la pared del cilindro. La tecnología de centrifugadoras de gas consume sólo un 5 por ciento de la electricidad que la de difusión gaseosa (USDOE-nuclear).

En ambos casos al material filtrado se le extrae el uranio, produciendo el combustible enriquecido. Por lo general, las plantas de energía nuclear necesitan uranio con una cantidad de aproximadamente 3 o 4 por ciento de U235.

Figura 62
Esquema del funcionamiento de una central nuclear



Fuente: Adaptado de PRIM.

PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN LA CENTRAL NUCLEAR

La fisión controlada del U^{235} libera una gran cantidad de energía que se usa en la planta nuclear para convertir agua en vapor, el cual se usa para mover una turbina que genera la electricidad.

Una central nuclear tiene cuatro partes principales: el reactor, el generador de vapor, la turbina y el condensador.

1. En el reactor nuclear se produce la fisión (USDOE-atom). En él se encuentra el uranio en forma de pastillas de combustible, las cuales están apiladas en tubos metálicos huecos,

llamados barras o varillas de combustibles, que mantienen las pastillas en la posición correcta. Estas varillas de combustible están intercaladas con unas barras de control que están fabricadas con materiales que absorben neutrones pero no se fisianan (como carburo de boro o aleaciones de plata, indio y cadmio, entre otros). Introduciendo o quitando estas barras de control la velocidad de reacción aumenta o disminuye ajus-

tándola a las necesidades de generación de electricidad.

2. El generador de vapor en el que circula el agua calentada por el reactor y se usa para hervir el agua y producir el vapor en un circuito secundario.
3. La turbina, donde se produce la electricidad usando el vapor.
4. El condensador, el cual se usa para enfriar el vapor transformándolo nuevamente en agua líquida.

Figura 63
Planta nuclear de Beaver Valley



Fuente: Foto cortesía de United States Nuclear Regulatory Commission.

REPERCUSIONES AMBIENTALES DE LA ENERGÍA NUCLEAR

A diferencia de las plantas de energía que funcionan con combustibles fósiles, los reactores nucleares no contaminan el aire con gases tóxicos o de efecto invernadero como el dióxido de carbono. Sin embargo, la energía nuclear produce residuos radiactivos, los cuales permanecen como materiales peligrosos para la salud humana durante miles de años (USDOE-nuclear).

ENERGÍA POR FUSIÓN NUCLEAR

Se piensa que la energía nuclear usando la fusión es clave en la solución al problema de la energía. Como hemos visto anteriormente, la energía del sol proviene de la fusión de átomos de hidrógeno; cuando se funden dos núcleos pequeños, la masa del núcleo resultante es más pequeña que la masa de los núcleos separados, generando una gran energía (Hewitt, 2004). Una reacción nuclear de fusión puede generar mucha más energía que una de fisión. Además, no contamina tanto como la de fisión.

Sin embargo, se tienen problemas técnicos para poder usar la fusión nuclear como fuente de energía. Los núcleos de los átomos están cargados positivamente y al acercarse sienten una fuerza de repulsión muy grande y es por eso que se necesitan muy altas temperaturas para iniciar la reacción. A estas temperaturas todos los materiales se funden y evaporan, por lo cual se debe encontrar una forma para confinar la reacción. Una manera es por confinamiento magnético, es posible iniciar y mantener la reacción usando grandes campos magnéticos que hacen las veces de recipientes de las cargas nucleares. El otro método es por confinamiento inercial, el calentamiento se consigue con láseres de gran potencia y el confinamiento del plasma con la propia inercia de la materia (Hewitt, 2004).

Actualmente se ha producido energía de fusión nuclear en el JET (Joint European Torus), de la Unión Europea en Oxfordshire, y el TFTR (Toroidal Fusion Thermonuclear Reactor) en Princeton usando confinamiento magnético.

Hoy la energía aplicada al proceso de fusión es mayor que la obtenida, lo cual no es rentable. Sin embargo, se espera que la energía de fusión

sea una de las grandes energías limpias y eficientes del futuro debido a que no hay contaminación del aire con gases de efecto invernadero porque el producto de la reacción nuclear es el helio. Además, a diferencia de la fisión nuclear, se producen muy pocos desechos radiactivos. En la actualidad, se está construyendo el Reactor Internacional Termonuclear Experimental (ITER, en inglés International Thermonuclear Experimental Reactor), y se espera que pueda demostrar la factibilidad científica y tecnológica de la fusión nuclear.

ENERGÍA NUCLEAR Y NANOTECNOLOGÍA

Tanto la nanotecnología como las reacciones nucleares involucran interacciones entre cosas muy pequeñas. Sin embargo, las escalas de las interacciones nucleares son muchísimo más pequeñas que las interacciones moleculares. No obstante, la nanotecnología también puede tener aplicaciones potenciales para el procesamiento de materiales y dispositivos útiles en las tecnologías nucleares.

Las condiciones dentro de un reactor son muy difíciles: los materiales están expuestos conti-

nuamente a altas temperaturas, grandes presiones y un continuo bombardeo de diferentes tipos de radiaciones. Es por esto que es muy importante el poder fabricar materiales sólidos que puedan soportar dichas condiciones extremas.

Existen varios proyectos de investigación que están tratando de identificar las características inherentes de los materiales a nivel atómico que los permite sobrevivir (o no) en ambientes extremos. Después de esto, se espera poder diseñar de forma selectiva y crear estructuras a escala nanométrica para explotar los puntos fuertes o eliminar las deficiencias en estos materiales y adecuarlos para sobrevivir en ambientes extremos.

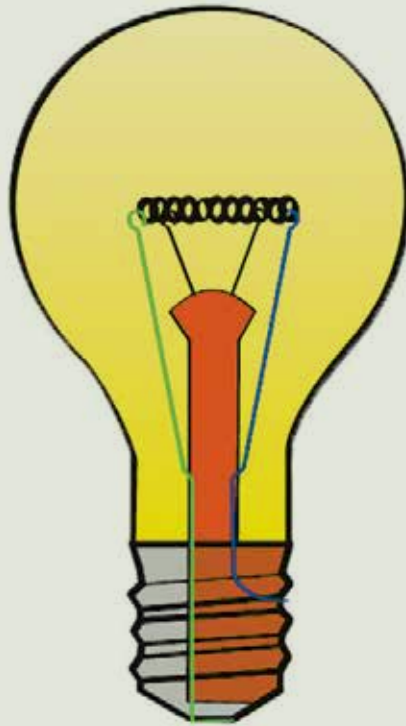
Científicos de Estado Unidos están investigando la posibilidad de fabricar materiales que puedan auto-repararse dentro de un reactor nuclear. Uno de los efectos de la radiación en los materiales es la de desplazar átomos de su lugar original, creando vacancias. Esta clase de defectos se van acumulando con el tiempo, resultando en el cambio de propiedades del material, haciéndolo por ejemplo más duro, o quebradizo, con posibles consecuencias catastróficas. Los materiales nanocristalinos están formados por

partículas de tamaños nanométricos, llamados granos, y una *interface* entre ellos llamadas las fronteras de grano. Los investigadores han encontrado que las fronteras de grano pueden absorber y remover defectos, en particular, localizaron un efecto de carga y descarga que permite al material autorrepararse (Los Álamos).

Para generar energía eléctrica, dentro de los reactores nucleares, un líquido refrigerante (por lo general agua) pasa por las barras calientes de combustible recogiendo el calor y llevándolo a un intercambiador que produce vapor de agua para generar la electricidad. En las superficies

metálicas, a cierta temperatura, la capacidad del refrigerante para eliminar el calor disminuye dramáticamente. Al superar dicho límite térmico, la superficie del metal se puede recalentar e incluso se puede dañar. Investigadores del Instituto Tecnológico de Massachusetts encontraron que es posible aumentar esta temperatura crítica, usando como refrigerante un nanofluido compuesto por agua a la cual le agregaron nanopartículas de alúmina. Se encontró que el uso del nanofluido podía elevar el límite de eliminación de calor hasta en un 70 por ciento (MIT).

Figura 64
Foco incandescente



Iluminación artificial

En los capítulos anteriores hablamos de cómo podemos hacer más eficientes las fuentes de energía tradicionales provenientes de combustibles sólidos y del desarrollo de fuentes alternativas de energía como la solar y la eólica, entre muchas otras. Sin embargo, para resolver el problema energético y el de la contaminación generada por la quema de combustibles fósiles, es igualmente importante hacer más eficiente el uso de la energía.

En los países desarrollados, más de la tercera parte de la energía se usa en edificios y viviendas, lo cual no es de sorprender debido a que un gran porcentaje de la población permanece en espacios interiores por aproximadamente un 80-90 por ciento de sus vidas y espera tener las mayores comodidades en dichos ambientes. Esta energía se utiliza en calefacción, refrigeración e iluminación.

La luz artificial sigue siendo un factor importante que contribuye a la calidad y la productividad de la vida humana y como consecuencia, estamos dispuestos a utilizar grandes cantidades de energía para producirla. Actualmente, la iluminación absorbe el 20 por ciento del consumo mundial de energía, es importante señalar que la eficiencia de los métodos tradicionales para producir luz todavía es muy baja, lo que muestra la necesidad de introducir cambios y mejoras. En muchos hogares, todavía se usan los focos incandescentes, los cuales producen la luz mediante el calentamiento de un filamento de metal a una temperatura alta hasta que se ilumine. El filamento caliente está protegido del aire por una cubierta de vidrio que se llena de un gas inerte o en el cual se ha creado un vacío. Este método de iluminación data de los años 1800. En 1802,

Humphry Davy logró obtener la primera luz incandescente al pasar una corriente eléctrica a través de una tira delgada de platino, un metal elegido por tener un punto de fusión muy alto. Sin embargo, no era lo suficientemente brillante ni duraba el tiempo necesario para ser algo práctico. Usando un filamento de carbón, Thomas Alva Edison logró construir un foco incandescente duradero y además pudo comercializarlo. Treinta años después, en 1910, el filamento de carbón fue reemplazado por uno de tungsteno, debido a que los filamentos fabricados con este metal duraban más. Los focos que actualmente usamos son muy parecidos a los que se usaban hace 100 años.

La lámpara halógena es similar a la bombilla incandescente convencional y produce la luz cuando un filamento de tungsteno alcanza temperaturas muy altas. Sus principales diferencias son las siguientes: contiene en su interior un gas inerte con una pequeña cantidad de un compuesto de halógeno, la presión y temperatura de este gas son mucho más altas que en los focos incandescentes, y como consecuencia el vidrio se sustituye por un compuesto de cuarzo

u otro material que pueda soportar las temperaturas más altas (Silvania).

En las lámparas incandescentes convencionales las moléculas de tungsteno se evaporan del filamento caliente y se difunden por convección, hasta finalmente depositarse en la superficie interna de la bombilla (la cual está relativamente fría), formando una película delgada que aumenta gradualmente en espesor durante la vida útil de la lámpara. Estos fenómenos disminuyen la eficiencia y durabilidad de la bombilla, pues al formarse en el interior de la bombilla, la capa de tungsteno reduce la transparencia del vidrio y la evaporación del tungsteno reduce el diámetro del filamento, aumentando su resistencia y acortando su tiempo de vida.

En las lámparas de halógeno estos efectos pueden reducirse. El vapor de tungsteno formado al calentarse el filamento a altas temperaturas inicia una reacción química reversible con el gas de halógeno para producir moléculas gaseosas de un compuesto de tungsteno. La diferencia de temperaturas entre el filamento y el tubo de cuarzo hace que las moléculas se dirijan hacia el filamento, donde la alta temperatura

del filamento las transforma de nuevo en metal tungsteno. Como resultado, el filamento se regenera liberando gas halógeno durante este proceso, efectuándose el llamado “ciclo del halógeno” (Silvana).

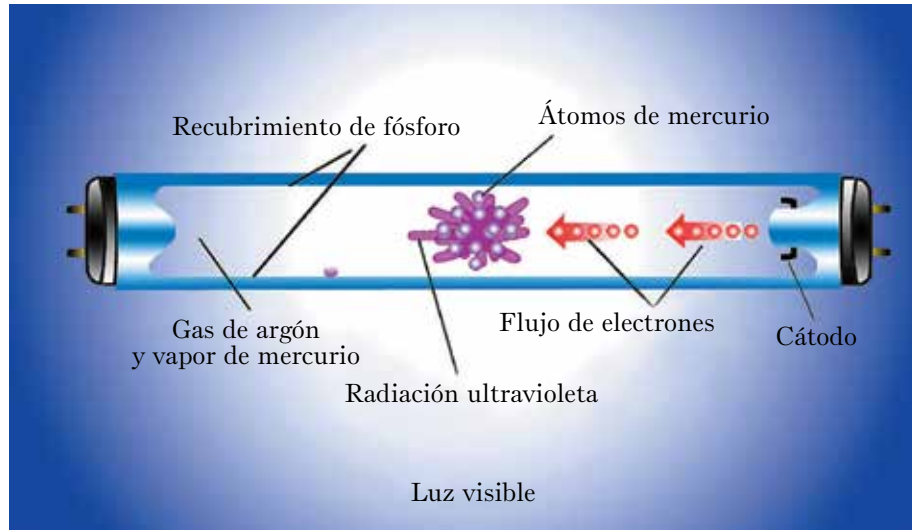
En las lámparas incandescentes la mayor parte de la energía consumida es emitida en forma de calor en lugar de luz visible. Es por eso que mundialmente se reconoce que es necesario dejar de usar esta clase lámparas, a lo que algunos países han presentado propuestas para retirarlas del mercado. En Estados Unidos de América, se aprobó en 2007 el Acta de Independencia Energética y Seguridad que prohíbe la fabricación de focos incandescentes de 100 watts a partir de 2012, los de 75 watts en 2013 y los de 60 y 40 watts un año después (Koeppel, 2011). En México el Congreso aprobó en 2010 una ley similar que prohíbe la fabricación y comercialización de focos incandescentes a partir de 2012.

Una alternativa a las bombillas incandescentes, son las lámparas fluorescentes, las cuales funcionan por medio de una descarga eléctrica en una atmósfera de vapor de mercurio a baja

presión, en las que la luz se genera por el fenómeno de la fluorescencia. El elemento principal de una lámpara fluorescente es un tubo de vidrio sellado que está recubierto internamente de un fósforo (Bodenschatz, 1998). Aquí, para evitar confusiones, vamos a definir algunos conceptos: se llama fósforo a un material que presenta el fenómeno de la luminiscencia y no debe de ser confundido con el elemento del mismo nombre. La luminiscencia es la emisión de luz de más baja frecuencia debido a la excitación con luz de frecuencia mayor. Este fenómeno incluye la fluorescencia y la fosforescencia. La fluorescencia es la emisión de luz visible cuando se encuentran bajo la influencia de luz ultravioleta. La emisión de luz desaparece poco después que lo hace la radiación incidente. La fosforescencia es la emisión, durante un tiempo, de luz visible de menor frecuencia después de haber sido sometida previamente a luz visible de mayor frecuencia. Este efecto se aprovecha en la práctica para hacer brillar en la oscuridad las manecillas de los relojes.

En las lámparas fluorescentes, el tubo contiene un gas inerte (normalmente argón) con una

Figura 65
Diagrama esquemático de una lámpara fluorescente



pequeña cantidad de mercurio. El tubo tiene dos filamentos de tungsteno en cada extremo. Cuando una corriente eléctrica fluye a través de los filamentos se comienzan a calentar y a brillar como en una bombilla normal. Al encender la lámpara, se produce una diferencia de voltaje entre los filamentos y los electrones se mueven a través del gas de un lado al otro del tubo (Bodennschatz, 1998). Parte del mercurio pasa de estado líquido a gaseoso. Como los electrones y átomos cargados se mueven a través del

tubo, algunos de ellos chocan con los átomos de mercurio gaseoso. Estas colisiones excitan los átomos y se libera energía en forma de radiación electromagnética. En el caso de los átomos de mercurio, la emisión de luz ocurre en la región ultravioleta, por lo cual no podemos verla y no sirven para iluminar.

Aquí es donde la capa de fósforo del tubo es necesaria. En la lámpara fluorescente, la energía liberada en forma de luz ultravioleta es absorbida por los átomos del fósforo, los cuales emiten

luz visible que podemos ver (Bodennschatz, 1998). El color de la luz se puede variar mediante el uso de diferentes combinaciones de fósforos.

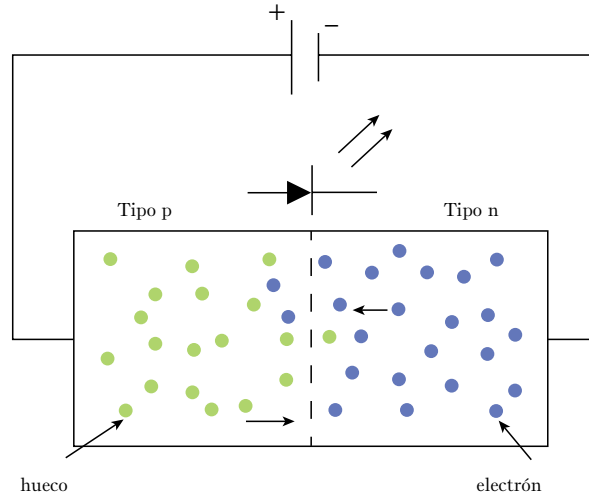
Las lámparas fluorescentes han sido muy usadas en las tiendas, oficinas y otros edificios comerciales, pero por mucho tiempo no fueron muy populares en los hogares por algunos inconvenientes que tenían: el proceso de funcionamiento requiere de un dispositivo electrónico llamado balastro para controlar el flujo de electricidad, a menudo producían un parpadeo molesto, su color era extraño, y se llevaba varios segundos para producir la luz. La gran mayoría de estos problemas se han resuelto en forma parcial con las bombillas fluorescentes compactas (LFC). Inicialmente hubo un gran interés del público por cambiar las lámparas incandescentes por LFC, esto gracias a campañas para ahorrar energía y a programas gubernamentales de distribución. Aunque más costosos que los focos incandescentes, se prometía que las LFC consumían muchísima menos energía y además se podrían usar por tiempos muchísimo más largos. Sin embargo, este interés ha disminuido en

años recientes debido a algunos problemas que no han sido resuelto con las LFC: aunque en pequeñas cantidades las LFC contienen mercurio (un material tóxico), no se pueden usar en algunos dispositivos, como aquellos usados para variar la intensidad de la luz y el más importante su color extraño. Los biólogos piensan que las preferencias de iluminación que tenemos provienen de nuestro sistema de visión tricromático. Aunque otros dicen que también hay una componente antropológica, desde hace 400 mil años la forma en la que hemos vencido la oscuridad es a través del fuego, y en la bombilla incandescente se está quemando un filamento de tungsteno (Koeppel, 2011).

Se piensa que los LED (LED, en inglés Light-Emitting Diode, “diodo emisor de luz”) sean los que realmente van a poder reemplazar a las lámparas incandescentes. Un diodo es una unión pn, la cual se describió en el capítulo II, cuando hablamos de celdas solares y se obtiene al poner en contacto un semiconductor tipo “n” y un semiconductor de tipo “p”.

Los LED se usan en muchos dispositivos electrónicos como indicadores, y desde el invento de

Figura 66
Funcionamiento de un diodo emisor de luz



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

LED azul se está comenzando a usar con mucha frecuencia en la iluminación.

Cuando un LED se encuentra en polarización directa, los electrones pueden recombinarse con los huecos en el dispositivo, liberando energía en forma de luz cuyo color depende del ancho de la banda de energía prohibida del semiconductor. Los primeros diodos fabricados, fueron de silicio o germanio, los cuales emiten luz infrarroja muy lejos del espectro visible. Sin embargo, otros materiales semiconductores emiten luz con longitu-

des de onda en el visible. En particular es posible modificar el tamaño de la brecha prohibida de los semiconductores por medio de variaciones de sus composiciones químicas. Por ejemplo, el arseniuro de galio (GaAs) y el arseniuro de aluminio tienen brechas prohibidas de 1.4 y 2.2 eV, respectivamente. Reemplazando una fracción de Ga por Al en GaAs se pueden formar compuestos de AlGaAs con brechas prohibidas que varían entre 1.4 y 2.2 eV, energías que corresponden a los colores que van desde el infrarrojo hasta el rojo

visible en el espectro electromagnético (Takeuchi, 2009). Combinando el GaAs con el fosforo de Ga (GaP) podemos obtener los colores rojo, anaranjado y amarillo. El color verde se puede obtener a partir del fosforo de galio (GaP), o el nitruro de galio (GaN), mientras que el azul a partir del seleniuro de zinc (ZnSe), el carburo de silicio (SiC) o combinando el GaN con el nitruro de indio (InN) (Schubert).

En los años setenta se empezaron a usar en forma amplia los LED rojos en muchos equipos electrónicos, como en los radios con alarma para despertar, calculadoras digitales y en los relojes. Actualmente los diodos rojos, amarillos y verdes son muy baratos (los diodos azules y ultravioleta actualmente son más costosos) y desde hace algunos años se emplean en diversas aplicaciones comerciales, por ejemplo, en los semáforos nuevos (Koeppel, 2011).

La posibilidad de fabricar diodos LED de luz blanca ha aumentado el interés de usar LED para la iluminación. Se puede producir luz blanca a partir de LED usando dos métodos: 1) Combinando LED de colores rojo, verde y azul. Esta técnica (RGB) permite crear una variedad de

colores diferentes y se puede usar en aplicaciones donde se requieren muchos colores y en los años de 1990 era el método favorito para buscar luz blanca con un color agradable. Sin embargo, desde el punto de vista técnico es muy complicada. 2) Usando un LED azul y recubriéndolo con un fósforo para filtrar el azul. Es el método más usado actualmente. El fósforo es un material de color amarillo y cambiando su composición y cantidad se pueden obtener luz blanca con diferentes tonalidades.

Actualmente se están desarrollando, y también empezando a comercializar, LED con características muy buenas en lo que respecta a potencias y eficiencias luminiscentes.

Para que las lámparas de LED puedan reemplazar las bombillas incandescentes de los hogares es necesario resolver dos problemas técnicos: el enfriamiento de los diodos y la forma de la luz emitida por la lámpara. El enfriamiento de los LED es muy importante si se quiere que éstos tengan una vida larga, además de que manteniendo el diodo a bajas temperaturas se puede mejorar su potencia. La forma de la luz es importante para tener una buena iluminación de la

habitación. Los LED emiten luz en una sola dirección lo que los hace muy buenos para las luces de los autos o las linternas de mano, sin embargo, para que puedan ser usadas en iluminación de interiores es necesario que se emita la luz en una forma redondeada. En el año 2011, la compañía Switch Lighting anunció su bombilla equivalente a 100 watts. Para resolver el problema de la luz LED en una sola dirección, Switch montó LED en unos “dedos” metálicos. Pero la verdadera clave de la bombilla más brillante es la tecnología City of Light (“ciudad de la luz”) que permite maximizar el brillo de la lámpara con menos LED. Esto lo logró creando un ambiente propio de refrigeración dentro de la bombilla. Para extraer el calor de los LED, un líquido no tóxico circular por la bombilla cuando se calienta disipando el calor de manera uniforme en su superficie (Koeppel, 2011).

OLED

Otra forma de iluminación de estado sólido son los diodos orgánicos emisores de luz (OLED) que comienzan a desarrollarse y comercializarse a principios del siglo XXI. Son LED en los cuales

el material que emite la luz es un material orgánico y puede estar formado de moléculas pequeñas o de un polímero, en cuyo caso se denomina PLED. Los OLED tienen una estructura sencilla, la cual consiste en una lámina delgada orgánica entre dos conductores eléctricos, usualmente uno de ellos es transparente. Cuando se le aplica un voltaje directo, las moléculas orgánicas de la capa emisora pueden generar luz. Se ha encontrado que estructuras de multicapas orgánicas son mucho más eficientes que OLED de una sola capa (Li, 2010).

Actualmente los OLED se usan en pantallas de televisión, monitores de computadora, y en pantallas pequeñas y portátiles de sistemas como teléfonos celulares inteligentes o relojes. Los OLED también comienzan a utilizarse como fuentes de luz para la iluminación.

La tecnología de los OLED no se encuentra tan desarrollada como la de los LED, pero las posibles ventajas son muchas, entre ellas, muy bajos costos debido a la abundancia de la materia prima y la posibilidad de imprimirla sobre ciertas superficies flexibles, pudiéndose enrollar, de la misma forma como en el caso de las celdas solares.

Figura 67
Semáforo que usa LED en lugar de focos incandescentes



Fuente: Kiyoshi Takeuchi/Noboru Takeuchi.

Comentarios finales

La energía es muy importante para todas nuestras actividades diarias. Usamos energía en nuestros hogares, para cocinar nuestros alimentos, calentar el agua, ver la televisión o escuchar música. También en nuestros trabajos y en nuestro transporte, la energía mueve nuestros autobuses, nuestros carros, los trenes y aviones. Se necesita para calentar nuestros hogares y también para enfriarlos cuando hace calor. La disponibilidad de energía está muy ligada a nuestra calidad de vida y a nuestra salud. Vivimos en una sociedad que depende completamente de tener acceso a las fuentes de energía.

Como se ha mencionado varias veces en este libro, nuestras fuentes más importantes de energía provienen de combustibles fósiles: el carbón, el petróleo y el gas natural. Sin embargo, son fuentes no renovables, lo que significa que en algún momento se van a acabar. Otro

problema que representan los combustibles fósiles es que para producir energía a partir de ellos se necesita quemarlos, resultando en la emisión de gases y partículas que son tóxicos como el dióxido de azufre o los óxidos de nitrógeno, o gases que contribuyen al efecto invernadero como el dióxido de carbono. Sin embargo, vivir en un mundo libre de combustibles fósiles no es posible. Hay muchos obstáculos técnicos, sociales, políticos y económicos que impiden reemplazar completamente los combustibles fósiles por fuentes renovables de energía.

Los países desarrollados, encabezados por Estados Unidos, utilizan la mayor parte de la energía del mundo. Sin embargo, esta situación está cambiando de forma drástica. Los países en vías de desarrollo están experimentando un rápido aumento en su consumo de energía debido al

incremento que tienen tanto en sus poblaciones como en sus economías.

Es por esto que es muy importante hacer eficiente la exploración, producción, transporte y uso de lo que nos queda de los combustibles fósiles y hacerlo de tal manera que no se perjudique el medio ambiente. Como vimos en este libro, la ciencia y la tecnología jugarán un papel muy importante para lograr este objetivo. También será necesario desarrollar las fuentes alternas de energía, tanto renovables, incluyendo la energía solar, la geotérmica y la eólica, como no renovables como la energía nuclear.

Para que las fuentes de energía renovables puedan contribuir en forma más importante a la energía total consumida en el mundo se necesita tomar en cuenta varios factores: reconocer la importancia de la inversión en la investigación y desarrollo de fuentes renovables de

energía. La historia ha demostrado que la ciencia y la tecnología han sido indispensables para el desarrollo de la humanidad. Investigaciones en diversas áreas científicas pueden ayudar a hacer más eficiente el uso de energías renovables.

También es indispensable que nos demos cuenta de que no podemos seguir dependiendo del petróleo y los combustibles fósiles para satisfacer nuestras necesidades energéticas. Esta es una tarea urgente por la amenaza del cambio climático global y otros problemas ambientales y además porque es una fuente de energía no renovable que se está agotando.

Y algo más importante es que debemos aprender a usar la energía en forma eficiente. Estamos obligados a alcanzar un nivel de vida y de trabajo que evite el uso desmedido de los recursos naturales como el agua y la energía sin malgastarlos.

Fuentes consultadas

- ALAM, Mohammad-Reza, *Wave Energy*, IRIS Magazine, Technology Avenue, Issue 1, verano de 2008, pp. 12-13.
- ALASKAR, Mohammed, Ames Morgan *et al.*, *In-situ Multifunction Nanosensors for Fracture Reservoir Characterization*, PROCEEDINGS, Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, Stanford University, 1-3 de febrero de 2010.
- AYDIL, Eray S., “Nanomaterials for Solar Cells”, *Nanotechnology Law and Business*, otoño de 2007, p. 275.
- BALL, Philip, “Nanomaterials Draw Electricity from Heat”, *Nanozone News*, Nature Publishing Group, 2005. Disponible en <http://www.nature.com/materials/nanozone/news/050324/portal/m050324-2.html>
- BAXTER, Jason B. y Eray S. Aydil, *Nanowire-Based Dye-Sensitized Solar Cells*, 86(5), APPLIED PHYSICS LETTERS 053114, 2005.
- BBC News, *How it Works: Wave Power Station*, 20 de noviembre de 2000. Disponible en <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/1032148.stm>
- Brookhaven National Laboratory, Energy Resources Division, *Hydrogen Storage*. Disponible en <http://www.bnl.gov/est/erd/hydrogenStorage/>
- BODENZCHATZ, Eberhard, *Fluorescent Light Mystery Solved at Last*, Cornell Center for Material Research, Ask a Scientist. Disponible en <http://www.ccmr.cornell.edu/education/ask/index.html?quid=167>
- BORREL, Brendan, “Can Cagey Solution: Will Nano Traps Make Geothermal Power Earthquake-Safe?”, *Scientific American*, 20 de julio de 2009.
- BOYLE, Godfrey, “Solar Photovoltaics”, en *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*, 2a. ed., Oxford University Press, 2004.
- CASEY, Tina, “Infrared Light and Nanomaterials Could Yield Non-Toxic Corrosion Fighters”, *Clean Technica*, 21 de diciembre de 2009. Disponible en <http://cleantechnica.com/2009/12/21/infrared-light-and-nanomaterials-could-yield-non-toxic-corrosion-fighters/>
- Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). Disponible en <http://cdiac.ornl.gov>
- CHAUDHURY, M.K., “Complex Fluids: Spread the Word about Nanofluids”, *Nature* 423, 10, 2003, pp. 131-132.
- CHEN, Yi Wei, Jonathan D. Prange y Simon Dühnen, “Atomic Layer-deposited Tunnel Oxide Stabilizes Silicon Photoanodes for Water Oxidation”, *Nature Materials*, vol. 10, 2011, p. 539.
- COAKLEY, K.M. *et al.*, *Ordered Organic-Inorganic Bulk Heterojunction Photovoltaic Cells*, 30(1), MRS BULL. 37, 2005.
- DAYNES, S. y P.M. Weaver, *A Shape Adaptive Airfoil for a Wind Turbine Blade*, SPIE Smart Structures/NDE, San Diego, 7979, 2011, pp. 1-11.
- DAVIS, Burtron H., “Nanocatalysis for Fuel Production”, en Javier García Martínez (ed.), *Nanotechnology for the Energy Challenge*, Gran Bretaña, Wiley, 2010.
- European Wind Energy Association (EWEA), *Wind Energy Factsheets*, 2010.
- GARCÍA MARTÍNEZ, Javier, “Nonotechnology for Energy Production”, en Elena Serrano y Guillermo Rus, *Nanotechnology for the Energy Challenge*, Gran Bretaña, Wiley, 2010.

- Ge Energy (GE). Disponible en www.ge.com/energy
- Georgia Tech Research Institute (Gatech), *Nano-Manhattan: 3D Solar Cells Boost Efficiency While Reducing Size, Weight and Complexity of Photovoltaic Arrays*. Disponible en <http://www.gtri.gatech.edu/casestudy/3d-solar-cells-boost-efficiency>
- Geothermal Education Office (GEO), *Geothermal Energy Facts*. Disponible en <http://geothermal.marin.org/geoenergy.html#using-geo>
- Giss Surface Temperature Analysis (GISTEMP). Disponible en <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- GOU, Jihua, Fei Liang *et al.*, *Multifunctional Nanocomposites for Offshore Wind Energy*, Proceedings of the Twentieth, International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, 20-25 de junio de 2010.
- GRAETZEL, Michael, *Photoelectrochemical Cells*, 414 NATURE 338, 2001.
- GRIMES, C.A., O.K., Varghese y S. Ranjan, *Light, Water, Hydrogen: The Solar Production of Hydrogen by Water Photoelectrolysis*. Springer, Norwell, 1a. ed., noviembre de 2007.
- HALDAR, Pradeep, "The 'Power' of Nanotechnology", *Nanotech News*, 13 de julio de 2007. Disponible en <http://www.nanotech-now.com/columns/?article=078>
- HAN, Jae-Hee, L.C. Geraldine Paulus *et al.*, "Exciton Antennas and Concentrators from Core-Shell and Corrugated Carbon Nanotube Filaments of Homogeneous Composition", *Nature Materials* 9,833-839, 2010.
- HEATH, T.V., *The Development of a Turbo-Generation System for Application in OWC Breakwaters*. Disponible en <http://www.wavegen.co.uk/EWTEC%202007%20PAPERS/tom.pdf>
- HECHT, David S., Roberto J.A. Ramirez *et al.*, "Bioinspired Detection of Light Using a Porphyrin-Sensitized Single-Wall Nanotube Field Effect Transistor", *NANO LETTERS*, vol. 6, núm. 9, 2006, pp. 2031-2036.
- HEWITT, Paul G., *Física conceptual, novena edición*, Mexico, Pearson, Addison Wesley, 2004.
- HUMPHREY, T.E. y Linke H. Phyps, *Reversible Thermoelectric Nanomaterials*. Rev. Lett. 94, 096601, 2005.
- International Energy Agency (IEA), *2010 Key World Energy Statistics*.
- IPCC, *4th Assessment Report: Climate Change 2007, Synthesis Report*.
- JANSSEN, R.A.J. *et al.*, *Polymer-Fullerene Bulk Heterojunction Solar Cells*, 30(1), MRSBULL. 33, 2005.
- JARAMILLO SALGADO, Oscar A. y Marco A. Borjas Díaz, "Energía del Viento", *Ciencia*, vol. 61, núm. 2, 2010, p. 18.
- KOENIGSMANN, Christopher, Alexander C. Santulli *et al.*, "Enhanced Electrochemical Performance of Processed, Ultrathin, Supported Pd-Pt Core-Shell Nanowire Catalysts for the Oxygen Reduction Reaction", *J. Am. Chem. Soc.*, 133 (25), 2011, pp. 9783-9795.
- KOEPPEL, Dan, *Let there be LED*, Wried, septiembre de 2011.
- KRISHNAMOORTI, Ramanan, *Extracting the Benefits of Nanotechnology for the Oil Industry*, JPT, noviembre de 2006.
- LAW, Matt *et al.*, "Nanowire Dye-Sensitized Solar Cells", 4 NATURE MATERIALS 455, 2005.
- LESCHKIES, Kurtis S. *et al.*, "Photosensitization of ZnO Nanowires with CdSe Quantum Dots for Photovoltaic", *Device*, NANO LETTERS, 1793, 2007.

- LI, Juo-Hao, Jinsong Huang y Yang Yang, "Nanostructure Organic Light Emitting Devices", *Nanotechnology for the Energy Challenge*, Gran Bretaña, Wiley, 2010.
- Los Alamos, National Laboratory, "Safer Nuclear Reactors Could Result from Los Alamos Research". Disponible en http://www.lanl.gov/news/releases/safer_nuclear_reactors_could_result_from_los_alamos_research.html
- LUX, Kenneth W. y Karien Rodriguez, "Template Synthesis of Arrays of Nano Fuel Cells", *Nano Letters* 6, 2006.
- MAZUMDER, Vismadeb, Miaofang Chi *et al.*, "Core/Shell Pd/FePt Nanoparticles as an Active and Durable Catalyst for the Oxygen Reduction Reaction", *J. Am. Chem. Soc.*, 132 (23), 2010, pp. 7848-7849.
- MCKELVEY, J.P., *Física del estado sólido y de semiconductores*, México, Limusa, 1980.
- MIT Energy Research Council. *Nanotech + nuclear= more electricity*. Disponible en http://web.mit.edu/erc/spotlights/nano_nuclear.html
- MOGHADDAM, S., E. Pengwang *et al.*, "An Inorganic-organic Proton Exchange Membrane for Fuel Cells with", *Controlled Nanoscale Pore Structure*, *Nat Nanotechnol*, 5(3), marzo de 2010, pp. 230-236.
- MOKHATAB, Saeid, Mariela Araujo *et al.*, *Applications of Nanotechnology in Oil and Gas E&P*, JPT, vol. 58, núm. 4, abril de 2006.
- MONFARED, Siavash, *Applications of Nanotechnology in the Oil and Gas Industry*, Technical Communication 3022-002, University of Oklahoma, Norman.
- NASA. Disponible en <http://sse.jpl.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Sun&Display=Facts>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA1). Disponible en http://www.education.noaa.gov/Ocean_and_Coasts/Oil_Spill.html, 6 de agosto de 2011.
- _____ (NOAA2). Disponible en <http://response.restoration.noaa.gov/>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), *Learning about Renewable Energy, Wind Energy Basics*. Disponible en http://www.nrel.gov/learning/re_wind.html
- O'REGAN, Brian y Michael Grätzel, *A Low-Cost, High-Efficiency Solar-Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO2 Films*, 353 NATURE 737 (1991).
- Pelamis*, Pelamis Wave Power. Disponible en www.pelamiswave.com
- PRIM, Luis Echarri, *Ciencias de la tierra y del medio ambiente*. Disponible en <http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/07Energ/130EnNuclear.htm>
- REGALADO, Antonio, "Reinventing the Leaf", *Scientific American*, 23 de septiembre de 2010. Disponible en <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=reinventing-the-leaf>
- RSC, "Fulfilling the Future: Solid Phase Hydrogen Storage", *Advancing the Chemical Sciences*, noviembre de 2007. Disponible en http://www.rsc.org/Education/EiC/issues/2007Nov/Fuelling_Future_SolidPhase_HydrogenStorage.asp
- Sandia National Laboratory, *Concentrating Solar Power Photo & Document*. Disponible en <http://www.energylan.sandia.gov/>
- _____, *Photovoltaics* (Sandia-photo). Disponible en http://photovoltaics.sandia.gov/docs/PVFS/Gallium_Arsenide_Solar_Cells.htm
- _____, *Wind Energy Technologies*. Disponible en <http://wind-power.sandia.gov/ACADT.htm#MATERIALS>
- SCHUBERT, E. FRED, *Light Emitting Diodes*, Cambridge, Cambridge University Press, 2006.
- Sciencedaily, *Funneling Solar Energy: Antenna Made of Carbon Nanotubes Could Make Photovoltaic Cells More Efficient*, 13 de septiembre de 2010. Disponible en <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/09/100912151548.html>
- SEPEHRI, Saghar y Guazhong Cao, "Nanostructured Materials for Hydrogen Storage", en Javier García Martínez (ed.), *Nanotechnology for the Energy Challenge*, Gran Bretaña, Wiley, 2010.
- SERRANO, Elena *et al.*, "Nanotechnology for Energy Production", en Javier García Martínez (ed.), *Nanotechnology for the Energy Challenge*, Gran Bretaña, Wiley, 2010.
- SHAND, Fraser, "Nanocomposites to Monitor Wind Turbine Blade Structure", *Nano, the Magazine for Small Science*, 27 de mayo de 2010. Disponible en http://www.nanomagazine.co.uk/index.php?option=com_content&view=article&id=526:nanocomposites-to-monitor-wind-turbine-blade-structure&catid=38:nano-news&Itemid=159

- SHANKAR, Karthik, Gopal K Mor *et al.*, “Highly-ordered TiO₂ Nanotube Arrays up to 220 μm in Length: Use in Water Photoelectrolysis and Dye-sensitized Solar Cells”, *Nanotechnology*, 18, 2007.
- SILVANA, <http://www.sylvania.com/en-us/pages/default.aspx>
- STRASSER, Peter, Shirlaine Koh *et al.*, “Lattice-strain Control of the Activity in Dealloyed Core-Shell Fuel Cell Catalysts”, *Nature Chemistry* 2, 2010, pp. 454-460.
- SUN, Shuhui, Frédéric Jaouen y Jean-Pol Dodelet, *Controlled Growth of Pt Nanowires on Carbon Nanospheres and Their Enhanced Performance as Electrocatalysts in PEM Fuel Cells*, *Advanced Materials*, vol. 20, Issue 20, 17 de octubre de 2008, pp. 3900-3904.
- TAKEUCHI, Noboru, *Nanociencia y nanotecnología: la construcción de un mejor mundo átomo por átomo*, México, Fondo de Cultura Económica, 2009.
- _____, Vladimir Basivk y Elena Basivk (EIA, coal), *Investigación en nanoestructuras en México, en nanociencia y nanotecnología: panorama actual en México*, México, UNAM, 2011.
- TAYLOR, Derek, “Wind Energy”, en *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*, 2a. ed., Godfrey Boyle, Oxford University Press, 2004.
- Texas Comptroller of Public Accounts, *The Energy Report*, 2008. Disponible en <http://www.window.state.tx.us/specialrpt/energy/>
- Thanet Offshore Wind Farm, Comunicado de prensa del Gobierno de Thanet, 20 de septiembre de 2010. Disponible en <http://www.thanet.gov.uk/news/latest-press-releases/thanet-offshore-wind-farm.aspx>
- United States Department of Energy (USDOE), *Geothermal Technologies*. Disponible en <http://www1.eere.energy.gov/geothermal/power-plants.html>
- _____, (USDOE-atom), *Nuclear Energy and Electricity, The Harnessed Atom*. Disponible en <http://www.osti.gov/speeches/doene0072.pdf>
- _____, (USDOE-fuelcell), *Fuel cells*. Disponible en <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells>
- _____, (USDOE-nuclear), *Nuclear Energy*. Disponible en <http://www.ne.doe.gov/default.html>
- _____, (USDOE-tidal), *Tidal Energy*. Disponible en http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/tidal_energy.html
- _____, (USDOE-wind), *Wind and Water Program*. Disponible en <http://www1.eere.energy.gov/windandhydro/index.html>
- United States Energy Information Administration, *Oil Crude and Petroleum Products Explained* (EIA-oil). Disponible en http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=oil_home
- _____, *Coal Explained* (EIA, coal). Disponible en http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=coal_home
- _____, *Annual Energy Outlook 2011* (EIA-outlook). Disponible en US [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383er\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383er(2011).pdf)
- _____, *Solar Explained, Solar Thermal Collectors* (EIA-collectors). Disponible en http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=solar_thermal_collectors
- _____, *Solar Explained, Solar Thermal Power Plants* (EIA-plants). Disponible en http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=solar_thermal_power_plants
- _____, *Solar Explained, Photovoltaics and Electricity* (EIA-photo). Disponible en http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=solar_photovoltaics
- _____, *Hydrogen Explained* (EIA-hydrogen). Disponible en http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=hydrogen_production
- _____, *Geothermal Explained* (EIA-geo). Disponible en http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=geothermal_home
- _____, (EIA-mar).
- _____, *Wind Explained* (EIA-wind). Disponible en http://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=wind_home
- United States Geological Service (USGS), *Inside the Earth*. Disponible en <http://www.pubs.usgs.gov/gip/dynamic/inside.html>
- VITILLO, J.G. y G. Ricchiardi, “Theoretical Maximal Storage of Hydrogen in Zeolitic Frameworks, Phys”, *Chem Chem. Phys.* 7, 3948, 2005.

WASAN, D.T. y A.D. Nikolov, "Spreading of Nanofluids on Solids", *Nature* 423, 2003, pp. 156-159.

Wavegen Voith Hydro Wavegen Limited. Disponible en <http://www.wavegen.co.uk/>

Wavedragon. Disponible en http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_frontpage&Itemid=1

World Nuclear Association (2011). Disponible en <http://www.world-nuclear.org/info/uprod.html>

ZAK A., N. Fleischer *et al.*, diciembre de 2009. Disponible en <http://www.gearsolutions.com/article/detail/5953/nanomaterials-for-gear-lubrication-solutions->

ZOLFAGHARIFARD, Ellie, "Morphing Materials Form the Shape of Wings to Come", *The Engineer*. Disponible en www.theengineer.com, 20 de junio de 2011.

ZUTTEL, A., "Materials for Hydrogen Storage", *Mat. Today*, 6 (9), 24, 2003.

Índice

PRESENTACIÓN	
GUILLERMO HARO BÉLCHEZ	. 3
NOTA DE INTERÉS	
EL AUTOR	. 7
INTRODUCCIÓN	
NOBORU TAKEUCHI	. 8
CAPÍTULO I	
FUENTES DE ENERGÍA NO RENOVABLES:	
PETRÓLEO, GAS NATURAL Y CARBÓN MINERAL	. 11
El petróleo	. 11
El carbón mineral	. 13
El gas natural	. 14
Aplicaciones de la nanotecnología en las fuentes convencionales de energía	. 20
Explotación de petróleos pesados y betunes	. 27
Información adicional	. 28
CAPÍTULO II	
FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES: ENERGÍA SOLAR	. 33
Energía solar térmica	. 34
Celdas fotovoltaicas	. 40
Información adicional	. 42

Otros tipos de celdas solares fotovoltaicas .....	.47
Celdas solares de películas delgadas .....	.49
Celdas orgánicas .....	.51
Celdas solares usando nanotubos de carbono .....	.54
Información adicional .....	.55
La celda solar de nanoalambres sensibilizada por colorante .....	.56
La celda solar sensibilizada con puntos cuánticos .....	.57
 CAPÍTULO III	
EL HIDRÓGENO: LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	.59
El hidrógeno .....	.59
Producción de hidrógeno .....	.59
Información adicional. ....	.67
Celdas de combustible .....	.73
 CAPÍTULO IV	
OTRAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES:	
EÓLICA, HIDROELÉCTRICA Y MARINA .....	.79
La energía eólica .....	.79
La energía hidroeléctrica .....	.87
Energía del mar .....	.91
Desarrollo e investigación .....	.100
 CAPÍTULO V	
LA ENERGÍA GEOTÉRMICA .....	.107
El interior de la tierra.....	.107
Energía de la tierra .....	.108
Generación de electricidad .....	.110
Las plantas de energía de vapor seco .....	.110
Las plantas de vapor flash .....	.110
Plantas de ciclo binario .....	.112
Las plantas geotérmicas y el medio ambiente .....	.113
La energía geotérmica y la nanotecnología .....	.113

CAPÍTULO VI	
ENERGÍA NUCLEAR	.115
Fisión nuclear	.115
Fusión nuclear	.117
Plantas nucleares	.117
Enriquecimiento del uranio	.118
Producción de electricidad en la central nuclear	.119
Repercusiones ambientales de la energía nuclear	.121
Energía por fusión nuclear	.121
Energía nuclear y nanotecnología	.122
CAPÍTULO VII	
ILUMINACIÓN ARTIFICIAL	.125
OLED	.132
COMENTARIOS FINALES	.134
FUENTES CONSULTADAS	.136

Energía y medio ambiente

Manual básico
de innovaciones
tecnológicas
para su mejor
aprovechamiento



se terminó en la Ciudad de México
durante el mes de junio del año 2014.

La edición, impresa sobre papel
de alta opacidad, estuvo
al cuidado de la oficina
litotipográfica de la casa editora.

Vivimos en una civilización en la cual se consumen inmensas cantidades de energía diariamente. ¿Podrá la humanidad encontrar ofertas energéticas suficientes para continuar funcionando antes de que se agoten las reservas existentes? Los especialistas en diferentes áreas de la innovación tecnológica enfocan sus esfuerzos en producir energía de manera eficiente y sustentable. Debido a que en la actualidad, más del 80 por ciento de la energía que se produce en el mundo proviene de usar los combustibles fósiles, es poco probable que en un futuro cercano dejemos de depender de ellos. Una solución a este problema energético es hacer eficiente la exploración, producción, transporte y uso de lo que nos queda de estos combustibles, mientras desarrollamos fuentes alternas de energía que no provengan de combustibles fósiles, tales como la energía solar, geotérmica y eólica.

En este libro, el doctor Noboru Takeuchi presenta una recopilación de los principales métodos de obtención de energía a partir de fuentes tanto renovables como no renovables, así como los proyectos de investigación que en este campo se están realizando en varias partes del mundo.

Particularmente, se sabe que las nanociencias y la nanotecnología comienzan a dar frutos en aplicaciones que tienen la capacidad de influir prácticamente en todos los aspectos de nuestras vidas, aún más, muchos anticipan que tendrán un papel predominante en la solución de nuestros problemas energéticos. De ahí la pertinencia de incluir estas disciplinas y sus avances en este importante tema.



MEDIO AMBIENTE
Y ECOLOGÍA

