

# LA QUÍMICA HACIA LA CONQUISTA DEL SOL

**Autor:** MAGDALENA RIUS DE RIEPEN / C. MAURICIO CASTRO-ACUÑA

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [INTRODUCCIÓN](#)



© Fondo de Cultura Económica  
Primera edición, 1986  
Primera reimpresión, 1995  
ISBN 968-16-5224-X  
Impreso en México

- [I. EL SOL EN LAS RELIGIONES ANTIGUAS Y EN LA MITOLOGÍA](#)
- [II. LAS PLANTAS , LAS ELEGIDAS DEL SOL](#)
- [III. ¿EXISTEN MATERIALES SIN VIDA QUE, COMO LAS PLANTAS, UTILICEN LA ENERGÍA SOLAR PARA PRODUCIR CAMBIOS EN LA MATERIA?](#)
- [IV. LA QUÍMICA HACIA LA CONQUISTA DEL SOL \(ELECTROQUÍMICA Y FOTOELECTROQUÍMICA\)](#)
- [V. FRENTE A UNA NUEVA ERA CON EL SOL COMO ALIADO](#)
- [VI. EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL SIGLO XXI](#)
- [BIBLIOGRAFÍA](#)
- [COLOFÓN](#)
- [OTROS TÍTULOS DE QUÍMICA](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



# COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

**Coordinadora:**

María del Carmen Farías



la

**ciencia / 10**

para todos

Primera edición (La ciencia desde México), 1986

Primera reimpresión, 1995

Segunda edición (La Ciencia para Todos), 1997

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1986 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S.A. DE C. V.

D.R. © 1997 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-5224-X

Impreso en México



# INTRODUCCIÓN

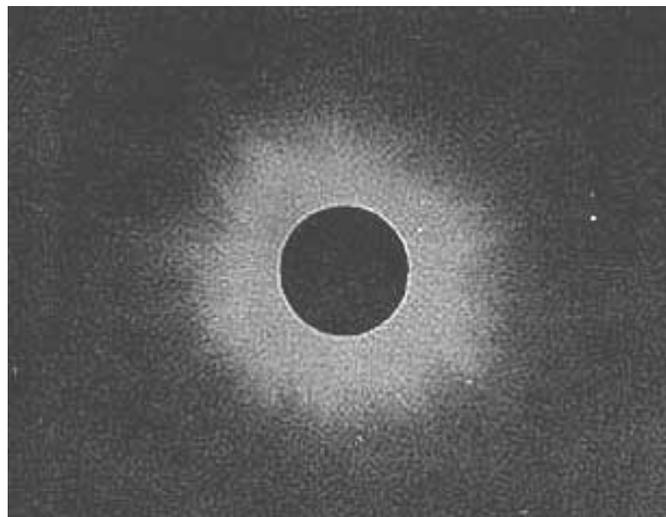
El estudio de las estrellas es la ciencia más antigua de la humanidad. El Sol y la Luna fueron adorados como dioses y los días de la semana fueron llamados de acuerdo a ellos y a los planetas.

Nuestro conocimiento del Universo se incrementa día a día. Sabemos más de sus secretos y de cómo nuestra civilización actual se ajusta al esquema de la armonía del Universo. También tenemos teorías, todavía imperfectas, de la evolución, no tanto del origen, de la especie humana, sino de cómo los átomos de nitrógeno y oxígeno se producen y combinan en las estrellas.

La estrella más importante en la vida de la Tierra es, indudablemente, el Sol: esférico y con un diámetro 100 veces el de la Tierra, nos proporciona calor, luz y otras radiaciones que permiten el proceso de la vida en el planeta. La temperatura en la región central del Sol es de unos quince millones de grados centígrados. En la fotosfera es de unos 6000 grados centígrados.

El interior del Sol está tan caliente que no pueden existir allí los átomos individuales, debido a las colisiones de alta velocidad que constantemente separan los electrones del núcleo de los átomos. Estos núcleos y electrones tienen cargas positiva y negativa respectivamente, se mueven a gran velocidad y de manera casi independiente, en forma análoga a como lo hacen las moléculas de un gas, generando así el cuarto estado de la materia conocido como plasma. La fotosfera del Sol está compuesta en un 94% de hidrógeno, 5.9% de helio y 0.1% de elementos más pesados como carbono, oxígeno, nitrógeno y neón. Se cree que el interior está constituido de manera similar, aunque no hay ninguna prueba experimental de ello.

La propiedad más importante del Sol es que brilla, o que libera energía debido a reacciones de fusión nuclear. El Sol ha estado brillando en el firmamento unos 5 mil millones de años. Cada segundo, en el interior del Sol, se convierten 630 millones de toneladas de hidrógeno en 625.4 millones de toneladas de helio, proceso en el que se liberan 4.6 millones de toneladas de masa-energía. Con este ritmo, se calcula que el Sol brillará otros 5 mil millones de años.



**Figura 1. El Sol**

Desde el inicio de la Civilización, el hombre ha utilizado la energía para su beneficio. Hasta hace aproximadamente 200 años, su única fuente de energía era el Sol, por sí mismo o indirectamente en formas derivadas como los vientos o las caídas del agua. Hace 4 o 5 generaciones por lo general se usaba la madera para la calefacción y los animales para el transporte, es decir que también así, indirectamente, se aprovechaba la energía solar absorbida por las plantas en la fotosíntesis.

Los chinos utilizaban el carbón hace ya 2000 años; los griegos lo usaban especialmente en la fundición del bronce y en Europa, desde el siglo XII, se conoce la minería del carbón aplicada en la herrería y la fundición. Con este combustible se hizo funcionar la primera máquina de vapor (Papin, 1706), precedida sólo por el molino de viento y la rueda de agua.

En el siglo pasado, tras el descubrimiento de Oersted, en 1819, de la interacción entre una aguja magnética y un cable conductor de corriente, se inicia el desarrollo de las máquinas eléctricas. En forma paralela, comienza a desarrollarse la electroquímica con base en los estudios de Galvani (1780) y Volta (1800). En 1832 se construye el primer generador de corriente eléctrica, perfeccionando en 1867 por Siemens y Wheatstone. En 1834 Faraday estableció la relación entre el transporte de la carga eléctrica y las transformaciones químicas.

Si bien en Mesopotamia ya se utilizaba el petróleo desde la antigüedad, el consumo de combustibles fósiles fue insignificante hasta el siglo XVIII. Los primeros usos que se dieron al petróleo fueron para el alumbrado, el asfalto y los materiales de construcción. Se sabe que los mayas utilizaban el *chapotl* para estos fines. En la India y el Medio Oriente se usaba el gas natural como combustible.

La explotación a gran escala del carbón se inició en 1820 pero el petróleo no cobró gran importancia hasta el 12 de agosto de 1859, gracias al descubrimiento accidental de un yacimiento cuando se perforaba un pozo en Pennsylvania. El desarrollo de los motores de combustión interna desencadenó una inusitada demanda de petróleo.

La primera máquina de combustión interna de cuatro tiempos la construyó Otto en 1862 y representa la base para la aparición del automóvil y del aeroplano. Por otra parte, la primera estación de energía eléctrica fue construida por Edison, en Nueva York, en 1882. El desarrollo de la energía nuclear y sus impresionantes aplicaciones se debe a Hahn, quien en 1938 logró la primera fisión artificial del uranio. En 1942 Fermi construyó el primer reactor nuclear en Chicago.

Así, desde el fuego hasta la energía nuclear, la humanidad ha ido haciendo suyas las fuentes de energía y esto ha permitido su extraordinario desarrollo tecnológico. Sin embargo, el empleo desordenado de estas fuentes ha traído como consecuencia grandes problemas económicos y políticos así como irreparables tragedias. En la crisis de energéticos (1972-1974) se tomó conciencia por primera vez de que el petróleo sería escaso y costoso hacia fines del siglo xx y esto obligaba a la humanidad a buscar otras opciones de fuentes de energía.<sup>1</sup> De esta manera el hombre vuelve los ojos a la fuente original: el Sol. Así se cierra en la civilización un ciclo importante que necesariamente transformará la historia de las futuras generaciones, orientándolas al empleo de esta fuente limpia e inagotable.

Las reservas de petróleo, gas natural, carbón y uranio son  $2.5 \times 10^{22}$  joules equivalentes a  $8 \times 10^{11}$  toneladas de carbón [Toe] <sup>2</sup> La superficie de la Tierra recibe  $3 \times 10^{24}$  joules por año de energía solar. Como se puede apreciar, la Tierra recibe *en menos de una semana* una cantidad de energía solar igual a las reservas totales de energía no renovable. Es decir, si la Tierra estuviera cubierta en un 0.1% de su superficie con colectores que convirtieran la luz solar con una eficiencia de sólo 10%, todas las necesidades energéticas del mundo ( $3 \times 10^{20}$  joules por año) estarían cubiertas. Sin embargo, la energía solar tiene dos grandes inconvenientes: es difusa e intermitente. El primer factor hace necesario el desarrollo de sistemas idóneos de gran superficie colectora, mientras que el segundo obliga a generar dispositivos de almacenamiento. En los siguientes capítulos se verá cómo el hombre, ancestralmente ligado al Sol por las religiones, se propone superar los obstáculos que hasta ahora han impedido el uso generalizado de la energía solar.

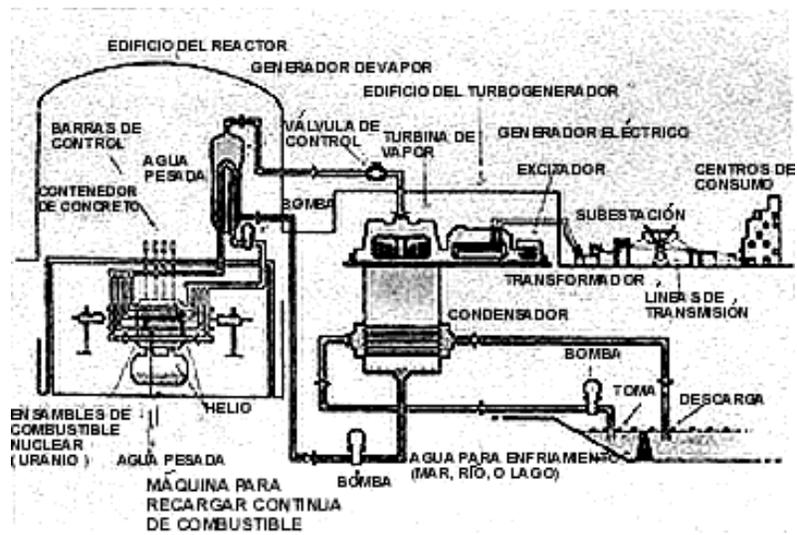


Figura 2. Reactor

## NOTAS

1 Se calcula que las reservas de petróleo alcanzarán para otros 30 años y las de carbón 300.

2  $Toe=8 \times 10^3$  kwh



# I. EL SOL EN LAS RELIGIONES ANTIGUAS Y EN LA MITOLOGÍA

RESULTA lógico que el hombre primitivo asociara los fenómenos naturales a fuerzas sobrenaturales y que los adorara como dioses del Sol, el rayo o la lluvia, ya que no tenía otra explicación para las causas de su existencia o de sus efectos sobre su vida diaria. Así, la historia de las religiones forma parte importante de la historia de la humanidad.

Si aceptamos que la religión es la afirmación de la existencia de poderes sobrenaturales —personales o impersonales—, en el pensamiento, la conducta y los deseos del hombre, podemos entender que éste se haya sentido dependiente de esos poderes y haya tratado de ganarlos para sí, o elevarse hacia ellos.

Por su concepción del mundo, los pueblos primitivos creían ver en todo lo que les rodeaba los efectos de las fuerzas mágicas o de los espíritus. Hasta en los sistemas metafísicos completamente cultos de las altas religiones se manifiesta el pensamiento del hombre religioso en una sobresaturación de formas que intentan aclarar los orígenes de la vida. A través de las experiencias cotidianas, busca dirigirse a la metafísica o lo sobrenatural.

El mito, que en griego (*mythos*) significa relato, y después, en el lenguaje de los filósofos, tomó un sentido más restringido: "relato fantástico, inventado o falso (por oposición al logos, discurso razonado)" vino a designar precisamente los relatos de origen religioso, en los cuales los pensadores habían dejado de creer. Los mitos, aun siendo oscuros desde el punto de vista racional, escondían verdades profundas bajo la apariencia de cuentos fantásticos (alegorías) o bien contenían hechos históricos reales deformados por la imaginación popular.

Para algunos investigadores el mito es una transposición libre e imaginativa de las experiencias humanas, mientras que, para otros, representa una tentativa rudimentaria de explicación de los fenómenos naturales. Sin embargo, no debe olvidarse el carácter específicamente religioso del mito. Por lo general, los mitos narran los orígenes de los fenómenos naturales, pero no tratan de explicarlos. El mito garantiza, ante todo, la estabilidad de la realidad existente (el cielo no se desplomará, el Sol saldrá todos los días, el fuego no desaparecerá). Evoca también los orígenes de las preocupaciones del hombre: la vejez, la muerte, las enfermedades, la guerra.

Todos los hechos adquieren sentido si se ubican en el tiempo de sus orígenes y sobre ellos se establece un orden humano. Siendo el Sol la fuente principal de la vida, es natural que haya sido la figura central en casi todas las religiones o mitologías primitivas. Desde el origen de la humanidad, se ha reconocido al Sol como una fuerza esencial.

## EL SOL EN LA RELIGIÓN EGIPCIA

La cosmogonía egipcia es una colección de creencias antiguas relacionadas con la Creación y el origen del Universo. Según éstas, el Universo estaba originalmente lleno de un océano primario e inmóvil llamado Nu (caos), a partir del cual surgieron la tierra y el agua.

Sobre el origen del dios Sol y otros dioses celestes existían un gran número de mitos, que describían el cielo como el océano por donde viajaban, en barcos, el Sol, la Luna y las estrellas. La aparición del Sol por las mañanas se explicaba por la existencia de un río subterráneo, por donde el Sol atravesaba de noche el bajo mundo. En la más famosa de las tres tradiciones cosmogónicas principales, la de Heliópolis, en el Bajo Egipto, Atum emergió de los desperdicios de Nu y descansó en la colina original. En el año 2300 a.C., Atum se relacionó con Ra, el dios Sol, como símbolo del advenimiento de la luz en oscuridad de Nu. Atum dio existencia a la primera pareja divina: Shu (el aire seco) y Tefnut (la humedad). Según la tradición, Atum es separado de Shu y Tefnut. Pero en su reencuentro, al llorar de alegría, sus lágrimas se transformaron en el hombre.

En el Alto Egipto (Hermópolis) emergen ocho deidades de Nu, las que crearon una flor de loto —que flotaba en las aguas de Nu— de la cual surgió el dios Sol, Ra.

La creación es el resultado de la voluntad del dios Sol, al nacer como un niño entre los pétalos de un loto. A este mito corresponde la ofrenda, en los templos, de un loto de oro que evoca el cotidiano regreso de la luz y una creación recomenzada.



**Figura 3. Sol Egipcio.**

En el transcurso del tiempo, muchos dioses se convirtieron en dioses Sol bajo las formas de Amon-Ra y Khnum-Ra, entre otros; lo cual significaba el reconocimiento, en cada uno de ellos, de la fuerza creadora del Sol. Osiris es, por ejemplo, el dios de la eterna renovación.

En la religión sumeria también aparece el dios Ud o Utu, "luz", ocupando un lugar central, como el dispensador de toda posibilidad de vida. El Sol es también —al igual que en la religión hitita— un elemento fundamental de la alegría de vivir y de la fuerza vital de la naturaleza. El hombre busca el amparo de la claridad del Sol, siempre en lucha con la oscuridad y los poderes malignos que en ella se ocultan.

## **EL SOL EN LAS RELIGIONES MESOAMERICANAS**

Desde su infancia, el mexicano oía decir que había venido al mundo para dar su corazón y su sangre a "nuestra madre y nuestro padre: la Tierra y el Sol" (*intonan intota tlaltecuhtli tonatiah*). [1](#) Sabe que si muere sacrificado lo espera una eternidad grandiosa, primero al lado del dios solar y más tarde reencarnando, bajo la forma de un colibrí

Para los aztecas, el Sol es un dios que se ha sacrificado, que ha querido morir para renacer eternamente. Los sacrificios que realizaban los aztecas con exaltación y esperanza constituían un deber cósmico: el Sol sólo se elevaría, la lluvia sólo descendería, el maíz sólo surgiría de la tierra y el tiempo sólo proseguiría su curso si se consumaban los sacrificios. La sangre de los hombres era la fuerza vital del Sol. Así, Huitzilopochtli —el Sol grande y duro de mediodía— se anuncia, en el himno ritual que le está dedicado, con el grito "yo soy el que ha hecho salir el Sol".

Huitzilopochtli es el dios de los nómadas, de los guerreros y de los cazadores que vinieron de las estepas desérticas. Promete, a los que lo siguen, la muerte violenta del sacrificio y la alegría del cortejo solar.

Los aztecas se consideraban "el pueblo del Sol"; su deber consistía en hacer la guerra cósmica para dar al

Sol su alimento. El bienestar y la supervivencia misma del universo dependía de las ofrendas de sangre y de corazones al Sol.

La salida cotidiana del Sol se iniciaba desde la media noche y, al amanecer, lo escoltaba un deslumbrante séquito integrado por los espíritus corporizados de los guerreros muertos en combate. A mediodía, el cadáver del Sol era conducido por el correspondiente séquito de las mujeres muertas en el parto, a la manera de los guerreros combatientes, y así al infinito el drama de la muerte y la resurrección.

En un ciclo de vida más amplio, consideraban al Sol en el curso de un año, lo imaginaban moviéndose por el cielo de sur a norte y de norte a sur. Esto se ha considerado como un reflejo de su conocimiento acerca de los solsticios y los equinoccios.



**Figura 4. Tonatiuh, El Dios del Sol**

Los astrónomos mesoamericanos colocaron al Sol en la más alta jerarquía del cielo, como el máximo dispensador de bienes a la Tierra y al hombre. Lo representaban en forma de disco y hablaban de su muerte diaria, aunque siempre supieron que era el mismo que aparecía todas las mañanas. Los pueblos del altiplano situaban, en sus cosmogonías, la creación del Sol en Teotihuacan. El sentido astronómico del Sol lo conservaron los quichés en su libro sagrado, el *Popol Vuh*: "Cuando sólo el cielo existía, y los dioses mismos estaban en una claridad deslumbrante [...] sólo la luz se mostraba en lo increado."

## **LA LEYENDA DE LOS CINCO SOLES**

Los mitos maya y nahua afirmaban que la era del quinto Sol —en la que se supone que vivimos— está en declinación. Las criaturas de la Tierra sufren continuamente al ser probadas por los dioses; cuando alguna especie falla, perece con el Sol al que pertenece.

Existían varias versiones de la bella leyenda del nacimiento y muerte de los soles.<sup>2</sup> En los *Anales de Cuauhtitlán*, una versión nahua relata que la primera de las cinco eras —cuatro de las cuales habían fenecido hacía mucho tiempo— estaba representada por el ocelote. Este era el reino del poder instintivo que habitaba en la forma de un animal y en la obscuridad. Ninguno de estos habitantes se salvó de la extinción: los ocelotes los devoraron a todos. Después llegó el Sol del Aire, la era del espíritu puro. El hombre de esta era se transformó en mono. Posteriormente vino el Sol de Lluvia y del Fuego, pero sus criaturas también estaban destinadas a perecer, excepto los pájaros capaces de volar para salvarse.

El último de los cuatro soles era el Sol del Agua, durante cuya era fueron creados los peces. Este Sol pereció en una inundación.

Los cuatro soles: de la energía animal de la tierra, del aire, del fuego y del agua, representaban, evidentemente, los cuatro elementos, cada uno de los cuales estaba condenado a morir. Sólo cuando nació

el quinto Sol —Naollín (cuatro movimientos)— fue posible, para los cuatro elementos separados, unirse y formar el Sol viviente de hoy. No podemos, sin embargo, considerar que el Sol es inmortal, sólo lo será si la humanidad es capaz de alcanzar la redención, que hemos visto representada en los nombres de los 20 días del calendario maya. Los nahuas también tenían un simbolismo para este proceso regenerativo que es la finalidad última de la creación. Si esta finalidad no se alcanza, el mundo será destruido.

Una danza indígena —que permanece en la actualidad como vestigio de un ritual anterior a la Conquista— representa la danza de los cuatro soles y la muerte, por turno, de cada uno de ellos. Sólo pueden renacer a través del poder del quinto sol, el cual gira a gran velocidad en el centro. Otra vez vemos en ella a los cuatro elementos, inertes e indefensos cuando están separados, y como generadores de vida cuando se unen en el movimiento.

A diferencia de los mitos, en las religiones mesoamericanas se observa una gran preocupación en torno a la constitución misma del Sol y a sus movimientos —consideraban a la Tierra inmóvil con respecto al Sol—. Su interés se ve, por ejemplo, en el estudio de los pasos del Sol por el cenit de Teotihuacan, o en la conciencia de que cuando el astro estaba más lejos producía menos calor y quemaba con intensidad cuando estaba más próximo. El calendario azteca es una bella muestra del alcance de los conocimientos de este pueblo en relación con los movimientos del Sol.

A medida que las civilizaciones han avanzado en el conocimiento de los fenómenos naturales, se ha ido perdiendo la mistificación del Sol para dar paso a su descripción científica.

El primer intento por describir al Sol como un cuerpo celeste separado de conceptos mitológicos o religiosos se debió a Anaxágoras en el siglo V a.C. Suponía que el Sol era una masa de hierro al rojo, más grande que el Peloponeso. Su suposición estaba basada en la observación de un meteorito que cayó en Aegospotamia y que él consideró que provenía del Sol.

Con el descubrimiento del telescopio, Galileo Galilei, Johannes Fabricius, Christoph Scheiner y Thomas Harriot —casi simultáneamente (1610-1611)— descubrieron las manchas solares. Fue Galileo el que reconoció su verdadera naturaleza de fenómenos solares. Dos siglos después, en 1843, tras haber realizado observaciones del Sol durante 33 años, Samuel Heinrich Schwabe, un aficionado a la astronomía, anunció que el número promedio de manchas solares variaba cíclicamente en un periodo de casi 10 años. En 1852 se precisó el periodo en 11.2 años y se reconoció la posibilidad de la existencia de un periodo de 80 años.

Muchos de los importantes avances logrados en la astronomía solar fueron resultado de la construcción de nuevos telescopios. La naturaleza física y química de las manchas solares se reconoció sólo después del desarrollo del espectroscopio. Actualmente el Sol está clasificado como una estrella GIV, distante **1.5 x 10<sup>8</sup> km** de nuestro planeta. Sin embargo, no se ha perdido su asociación con la fuerza vital que renueva e ilumina la vida del hombre.

Miles de años antes de que los primeros hombres se maravillaran ante la presencia del Sol, las plantas ya utilizaban la energía solar para obtener, mediante complejas reacciones fotoquímicas, las sustancias orgánicas básicas para desarrollar sus funciones vitales. Cómo las plantas absorben la energía solar, la almacenan y transforman en energía química es el contenido del siguiente capítulo.

## NOTAS

[1](#) Jacques Soustelle, *El universo de los aztecas*. FCE, 1982.

[2](#) Irene Nicholson, Comp., *Mexican and Central American Mythology*, Paul Hamlyn, Londres, 1967.

---

Indice



## II. LAS PLANTAS , LAS ELEGIDAS DEL SOL

CUALQUIERA que sea la explicación que aceptemos sobre el origen de la vida, es evidente que la aparición de las plantas hace  $3 \times 10^9$  años determinó la vida tal como la conocemos, dependiente del oxígeno y la materia orgánica que éstas producen utilizando la energía solar. Este proceso, llamado *fotosíntesis*, representa la capacidad de la clorofila —pigmento verde de las plantas— para convertir la luz del Sol en energía química. La fotosíntesis da cuenta de la liberación de aproximadamente 130 millones de toneladas de oxígeno por año, acompañada de la reacción de 2 mil millones de toneladas de bióxido de carbono que, a su vez, serán transformadas en carbohidratos. La asimilación anual de  $\text{CO}_2$  en la Tierra es de unos 10 mil millones de toneladas, mucho más que todo el petróleo, carbón y minerales usados cada año. El proceso fotosintético tiene una eficiencia de almacenamiento de energía de  $3 \times 10^{21}$  joules por año (equivalente a  $9.6 \times 10^{10}$  toneladas de carbón), diez veces mayor que la que el mundo necesita. Si esto es así, sería justo preguntarse por qué, aparentemente, hay escasez de alimentos en el mundo. El problema de la alimentación es de orden económico; el hambre es causada no porque el mundo no pueda producir suficiente alimento, sino porque *la energía es cara*, y el transporte de los alimentos requiere energía. La utilización de la energía y del carbono orgánico está unida, de manera compleja, a la economía y a las diversas estructuras de la sociedad humana.

Las formas más avanzadas de la agricultura moderna son procesos ineficientes de transformación de combustibles fósiles en productos comestibles, ya que dependen de fertilizantes sintéticos, herbicidas y de la maquinaria utilizada en el campo.

La agricultura primitiva, por otro lado, sólo utiliza el Sol como fuente de energía y es incapaz de cubrir las demandas actuales de alimentos.

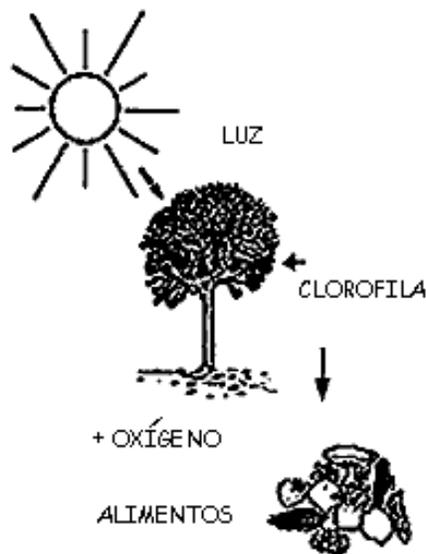


Figura 5.



Figura 6.

¿Cómo se realiza la fotosíntesis?

Más de la mitad de los procesos fotosintéticos tienen lugar en los océanos, donde existen muchas formas de plantas verdes (algas). Otra gran parte de ellos se realiza en áreas como la cuenca del Amazonas, donde abundan las plantas verdes. A las algas y plantas verdes se les llama *organismos fotoergónicos* ya que son los únicos capaces de convertir la luz en energía química (la cual queda almacenada en los alimentos).

Los *organismos quimioergónicos*, por el contrario, no pueden convertir la luz en energía química; en lugar de ello, utilizan nutrientes que transforman en energía para desarrollar sus funciones. Algunos de estos organismos son, por ejemplo, las bacterias, los hongos, los animales.

Durante la fotosíntesis la luz es captada por las plantas verdes y usada para convertir agua, bióxido de carbono y minerales en oxígeno y compuestos orgánicos con alto contenido energético. Sin fotosíntesis, la atmósfera de la Tierra no tendría oxígeno y sería imposible la existencia de la gran mayoría de los seres vivos que se conocen.

Todas las células vivas convierten los alimentos en energía y en componentes estructurales necesarios para el crecimiento, la restitución de células, la reproducción y, en general, para todos los procesos dinámicos que desarrollan los organismos vivos. La energía luminosa es absorbida por los pigmentos clorofílicos de las plantas y almacenada como energía química en los productos orgánicos, especialmente los *carbohidratos* (azúcar; almidón, glucosa).



Figura 7.

La eficiencia de la fotosíntesis se define en términos del rendimiento de producción de oxígeno por unidad de masa (o de área) de los tejidos de las plantas verdes, o por unidad de peso de la clorofila contenida en ellas. Plantas sanas, que crecen en presencia de aire que contenga de 0.03 a 0.04% de  $\text{CO}_2$  a  $25^\circ\text{C}$  son capaces de producir varios litros de oxígeno por hora y por gramo de clorofila utilizada.

### UN POCO DE HISTORIA

El primer intento de que se tiene noticia para explicar el proceso de la fotosíntesis tuvo lugar en el siglo IV a.C. y se debe a Aristóteles, quien resumía el fenómeno mediante la expresión:



Figura 8.

Aristóteles afirmaba que las plantas tomaban del suelo los nutrientes necesarios para producir alimentos.

En el siglo XVII, Jean Van Helmont llevó a cabo un interesante experimento: durante cinco años estuvo agregando agua a un sauce sembrado en una cantidad previamente pesada de tierra. Al final de su experimento, el sauce había aumentado 75 kg, mientras que el suelo había perdido solamente 70 gramos. Así, concluyó que era a partir del agua como se generaban los alimentos:



Figura 9.



Figura 10.

Priestley, 100 años después, comprobó que el aire también intervenía en el proceso y, de acuerdo con el lenguaje usado en esa época, propuso su conclusión:

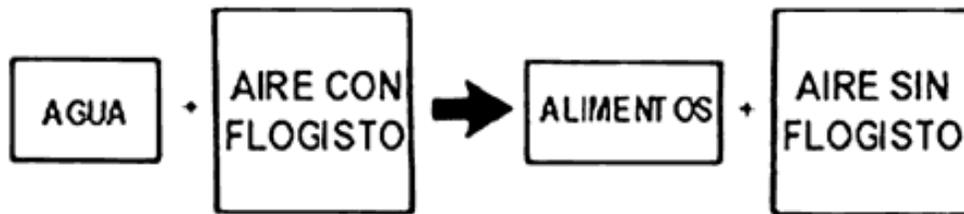


Figura 11.

Un científico contemporáneo de Priestley, Ingen-Housz, encontró la relación de la luz con la producción de alimentos en las plantas verdes:



Figura 12.

Gracias al rápido avance de la ciencia, en la última década del siglo XVIII se logró establecer las identidades.

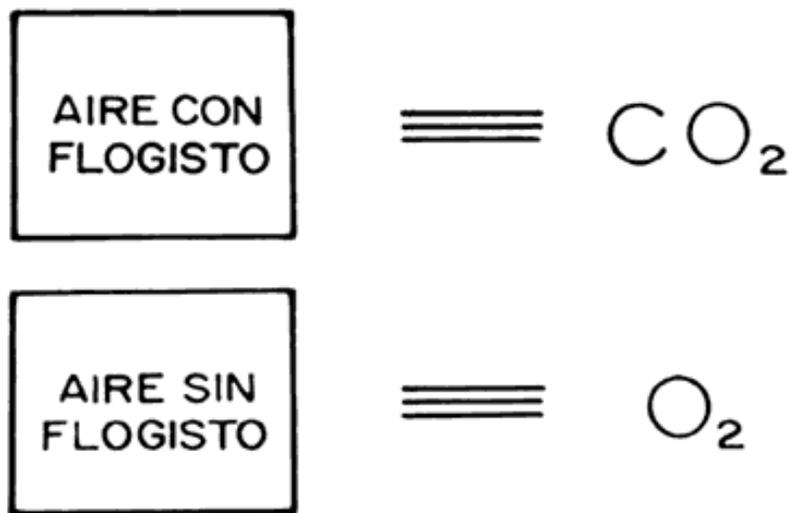


Figura 13.

Con esta nueva información, Nicolás de Saussure propuso un mecanismo según el cual la luz absorbida proporcionaba la energía para la ruptura de la molécula de CO<sub>2</sub>, esta molécula liberaba el oxígeno y así se producían directamente los compuestos orgánicos:

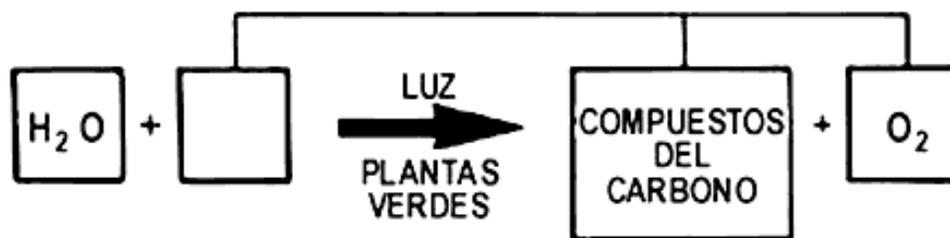


Figura 14.

Julius von Sachs encontró que el compuesto de carbono era un almidón (probablemente glucosa).



Figura 15.

Los estudios de Blackmann (1905) contribuyeron a impulsar las investigaciones para llegar a una mejor comprensión de las fases del proceso de la fotosíntesis y lograr identificar el pigmento verde responsable de la absorción de la luz: la clorofila.

Hasta 1930, muchos fisiólogos seguían creyendo que la energía luminosa se utilizaba para descomponer la molécula de CO<sub>2</sub> de tal forma que el carbono (C) se combinaba con el H<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub> del agua para producir los carbohidratos, mientras que el oxígeno del CO<sub>2</sub> se liberaba en forma de gas.

### EL AGUA Y NO EL BIÓXIDO DE CARBONO

Más tarde, los estudios de Van Niel sobre los procesos fotosintéticos en bacterias ayudaron a establecer que es el agua, y no el bióxido de carbono, la que se descompone para generar el hidrógeno y liberar el

oxígeno, mientras que el CO<sub>2</sub> genera los compuestos orgánicos:

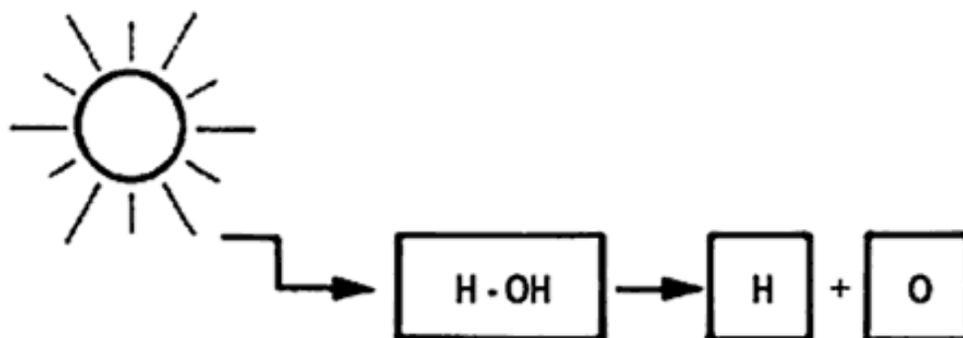


Figura 16.

Actualmente se ha establecido que, en la fotosíntesis, la energía solar es absorbida por el pigmento verde de las plantas llamado clorofila y utilizada para la ruptura de las uniones H-O del agua en un proceso llamado fotólisis. El oxígeno es liberado y el H<sub>2</sub> —unas veces como tal y otras como generador de electrones libres— se transporta a lo largo de una cadena compleja de reacciones de óxido-reducción en las que se genera energía según este esquema:



Figura 17.

¿Qué entienden los químicos por los términos reducción y oxidación?

La materia está formada por átomos —que a su vez pueden formar moléculas— constituidos por partículas elementales: protones y neutrones, que se encuentran en el núcleo, y por electrones distribuidos en orbitales<sub>1</sub> de diferente energía. En las reacciones químicas intervienen los electrones de los orbitales externos: los de mayor energía, llamados de valencia. Cuando un compuesto químico (o un elemento) acepta electrones, se dice que se reduce; por el contrario, si cede electrones, se oxida. Estos procesos ocurren simultáneamente y por ello son llamados reacciones de óxido-reducción. Por ejemplo, en la reacción de formación de la glucosa, el CO<sub>2</sub> se reduce mientras que el H<sub>2</sub> se oxida.

Las reacciones de óxido-reducción son también el fundamento de las celdas electroquímicas, como se verá más adelante. Por ejemplo, en una pila tipo Daniell, las reacciones son:



Las notaciones  $\text{Zn}^0$  y  $\text{Cu}^0$  se refieren a los elementos sin carga mientras que  $\text{Zn}^{2+}$  y  $\text{Cu}_2^+$  son los iones que suelen encontrarse en disolución.

### ALGO MÁS SOBRE LA FOTOSÍNTESIS

El proceso fotosintético ocurre en dos etapas:

1) Una fotorreacción en la cual la luz es transformada en energía química. Los dos productos importantes de esta reacción son el ATP (adenosín trifosfato), muy energético y que conduce la mayor parte de los procesos metabólicos, y los electrones libres necesarios para los procesos de reducción, que son transportados a través de las siguientes sustancias:  $\text{NADP}^+$  (fosfato del nicotín adenín dinucleótido) sustancia aceptora de electrones y el NADPH que es su forma reducida.

2) Una reacción en oscuro, que utiliza la energía química producida en la primera etapa para transformar el  $\text{CO}_2$ , un compuesto de baja energía, en un carbohidrato altamente energético. El ATP provee la energía necesaria para que se lleve a cabo la reacción, y los electrones sirven como agentes reductores.

El proceso fotosintético implica una cadena de (por lo menos) 30 reacciones complejas. Estas fueron descubiertas gradualmente, en un largo proceso de observación y experimentación que tomó cientos de años. Sin embargo, este misterioso proceso de la naturaleza por medio del cual las plantas producen alimentos y sobre el que la humanidad ha especulado durante casi 2 mil años, sigue guardando celosamente muchos secretos que los científicos buscan afanosamente desentrañar, y así poder hacerlos suyos.

¿Logrará el hombre reproducir la fotosíntesis fuera de las plantas verdes?

## NOTAS

1Un orbital es una función matemática a la cual se pueden asociar, a través de los formalismos adecuados, las propiedades de los electrones en un sistema. En este caso, la propiedad que nos interesa es la energía

---

Indice |



### III. ¿EXISTEN MATERIALES SIN VIDA QUE, COMO LAS PLANTAS, UTILICEN LA ENERGÍA SOLAR PARA PRODUCIR CAMBIOS EN LA MATERIA?

#### NADA TIENE COLOR PROPIO

LA MAYORÍA de las plantas que conocemos tienen hojas de color verde, sin embargo, es posible encontrarlas rojas, y en el otoño en una hermosa variedad de tonos amarillos y anaranjados. Las hojas, como toda la materia, cambian de color porque cambia su estructura química. Ciertos grupos orgánicos, como las dobles ligaduras carbono-carbono o ciclos con átomos de nitrógeno, suelen dar a las sustancias colores muy llamativos.

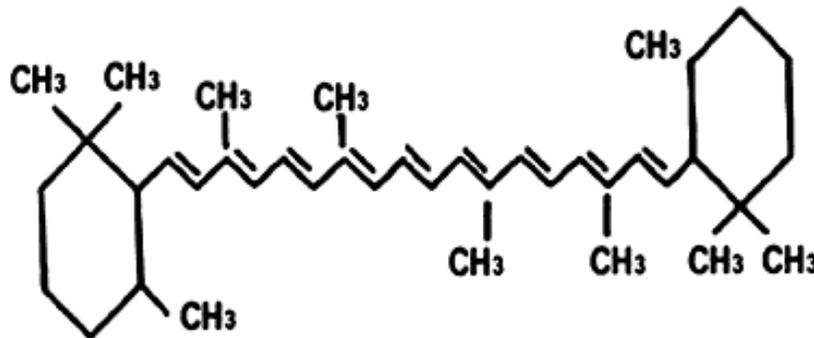


Figura 18. Estructura del B-Caroteno

Por otra parte, es muy interesante notar que el color de las cosas varía según sea la fuente de iluminación utilizada. Esto era muy claro hace algunos años, cuando estuvo tan de moda la "luz negra" que hacía brillar ciertos colores, especialmente los blancos y naranjas. Un automóvil color rojo a la luz del día puede verse de color amarillo claro en la noche, bajo la iluminación de una lámpara de sodio. Por esto se puede afirmar que nada tiene color propio. Este es un hecho bien conocido por los fotógrafos, que suelen emplear lámparas de neón con el fin de obtener el menor cambio posible en las tonalidades, pues este tipo de lámpara emite una radiación que excita una película fotográfica convencional en forma muy parecida a como lo hace la radiación solar.

La radiación solar está compuesta por la combinación de radiaciones de muy diversa energía: las más débiles son las de mayor longitud de onda, mientras que las más potentes tienen una longitud de onda pequeña. De todo este intervalo, los ojos del ser humano sólo pueden percibir una fracción: la comprendida en el denominado espectro visible y que abarca longitudes de onda desde 400 hasta 700 nanómetros.<sup>1</sup>

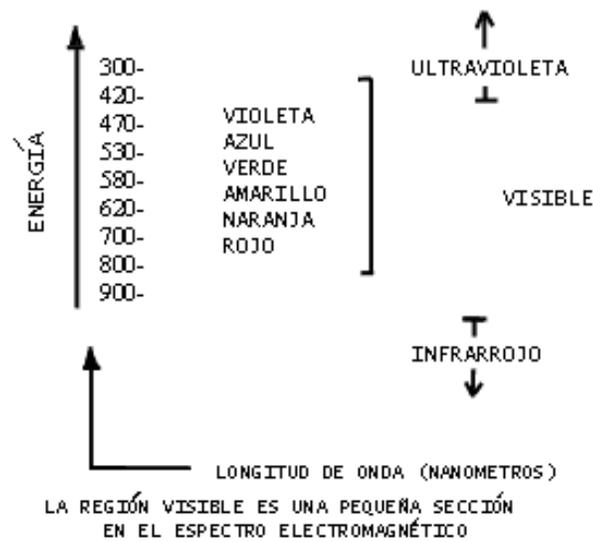


Figura 19.

Todos los materiales, pertenezcan o no a un sistema viviente, absorben en mayor o menor medida la radiación solar, y con ella retienen también la energía asociada. La energía luminosa se cuantifica en fotones,<sup>2</sup> los cuales, al interactuar con los electrones de la materia, ocasionan que estos electrones sean excitados a niveles de mayor energía. La separación energética de los niveles es característica de cada material y esto origina que cada sustancia absorba selectivamente una o más de las radiaciones que constituyen la luz solar. El color de un objeto es el efecto acumulativo sobre los receptores de luz presentes en la retina de todas aquellas radiaciones que no fueran absorbidas y, por lo tanto, son reflejadas. Un cuerpo cuyas moléculas absorben radiaciones en el intervalo del azul ( $\lambda \approx 470 \text{ nm}$ ) se verá de color rojo, que es color complementario del azul. De igual manera, el verde de la vegetación se debe al reflejo de la luz solar, por las hojas y tallos que contienen moléculas de clorofila, las cuales absorben el azul y el rojo ( $\lambda \approx 700 \text{ nm}$ ), colores complementarios del verde. Los objetos que reflejan todas las radiaciones del espectro visible se ven de color blanco. A esto se debe que en los climas cálidos se utilice mucho la ropa de este color, ya que, al absorber muy poca energía, suelen ser prendas que brindan frescura. Resulta, entonces, curioso que algunas tribus que habitan en los desiertos utilicen ropas oscuras. Sucede que, como estas prendas absorben una gran cantidad de energía, el aire que se encuentra entre las ropas y la piel se calienta, generando corrientes del mismo aire. Este movimiento puede incluso hacer sentir que la tela negra es más fresca que la blanca.<sup>3</sup>

En el capítulo anterior explicamos cómo las plantas utilizan la energía solar para promover reacciones químicas; ahora se verá cómo algunos elementos sin vida, llamados *semiconductores*, pueden transformar la luz solar en energía eléctrica o química, y cómo el hombre puede hacer uso de esta propiedad.

## MATERIALES SEMICONDUCTORES

Los semiconductores son elementos o sustancias químicas cuya conductividad eléctrica es intermedia entre la de un metal y un aislante. La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para conducir una corriente y se mide en  $\text{ohm}^{-1} \text{ m}^{-1}$  en el sistema MKS. Para un semiconductor los valores oscilan entre  $10^3$ ; y  $10^{-9} \text{ Q}^{-1}; \text{ cm}^{-1}$ ; en comparación con valores de  $10^7$  para los buenos conductores y  $10^{-17}$  para los buenos aislantes.

Los semiconductores exhiben propiedades conductoras que pueden ser dependientes de la temperatura, lo cual permite su uso como *termistores* (resistores dependientes de la temperatura), o también dependientes del voltaje, como en los *varistores*. Constituyen también los *diodos rectificadores*, cuyo efecto se debe a

que los semiconductores pueden presentar altas resistencias en función del sentido en que fluye la corriente eléctrica (véase el capítulo siguiente). Un uso muy extendido de dichos rectificadores se tiene en los componentes de equipos eléctricos diseñados para convertir la potencia eléctrica de corriente alterna a corriente directa. Son los constituyentes básicos de los llamados "eliminadores de baterías", que tanto se utilizan para calculadoras de bolsillo y otros equipos que funcionan con corriente directa, en nuestros hogares u oficinas, que reciben una corriente alterna (aproximadamente en 120 volts, a una frecuencia de 60 Hertz).

La resistividad eléctrica —o sea el inverso de la conductividad— de los semiconductores también es dependiente de la presión y de la frecuencia de la radiación electromagnética, así como de la pureza y la perfección de sus estructuras cristalinas. Por ejemplo, la resistividad del sulfuro de cadmio. (CdS) disminuye 13 órdenes de magnitud ( $10^{13}$  veces menos su valor original) cuando se le añade tan sólo el 0.01% de una impureza. En el grupo de elementos químicos semiconductores figuran el germanio, el silicio, el estaño gris, el selenio, el telurio y el boro.

Los tres primeros pertenecen al IV grupo de la tabla periódica de los elementos y tienen una estructura similar al diamante (forma cristalina del carbono del mismo grupo). El Si y el Ge son los más conocidos y se emplean extensamente en dispositivos como *rectificadores* y *transistores*. Los transistores presentan propiedades de amplificación o control de corrientes eléctricas muy pequeñas que han ido desplazando a los tubos de vacío (bulbos) en muchas aplicaciones. Existe un gran número de compuestos químicos con propiedades semiconductoras, como por ejemplo: óxido de cobre (II), sulfuro de zinc (ZnS), telururo de zinc (ZnTe), arseniuro de galio (GaAs), antimoniuro de indio (InSb), seleniuro de zinc (ZnSe), seleniuro de cadmio (CdSe), sulfuro de cadmio (CdS), óxido de titanio ( $TiO_2$ ), óxido de zinc (ZnO), y sulfuros, seleniuros y telururos de metales de transición entre otros.

Existe también un grupo de materiales orgánicos que exhiben propiedades semiconductoras, como por ejemplo: el cloruro de polivinilo, el polietileno, el polipirrol y las ftalocianinas. Otros compuestos de gran interés en la actualidad son los materiales amorfos (sin estructura cristalina), especialmente debido a su bajo costo.

Los rectificadores de selenio (o diodos rectificadores) se introdujeron al comercio en 1930, en Alemania. A pesar de que en 1947 aún no se tenía una clara explicación de las uniones p-n (véase el próximo capítulo), se inventó el transistor; elemento fundamental de la electrónica moderna.

Los diodos rectificadores se distinguen de otro tipo de diodos semiconductores por la naturaleza de sus aplicaciones, a diferencia de otros dispositivos de procesamiento de información, como los llamados diodos de computación y de túnel, los diodos esaki, o los dispositivos reguladores como los de Zener.

Numerosas e importantes invenciones han aparecido en los últimos cuarenta años, incluyendo el láser en 1957 y las uniones superconductoras en 1963.

Desde 1960 el número de componentes de un circuito integrado se ha duplicado cada año (fenómeno conocido como ley de Moore). Por ejemplo, un circuito integrado, en 1981, contenía más de  $10^5$  componentes electrónicos independientes. Las propiedades capacitivas y resistivas de las uniones p-n (de las que se tratará en el próximo capítulo) son explotadas en el varistor, el varactor y en el diodo de avalancha.

Una celda solar es un ejemplo importante de un foto-diodo, que es el dispositivo semiconductor que se describirá en los siguientes capítulos. Para poder comprender los fenómenos que toman parte en este proceso, es necesaria una breve revisión de los fundamentos del modelo llamado de *bandas de energía*.

Es sabido que cada átomo consta de un núcleo y uno o más electrones que se encuentran en diferentes niveles de energía. Cuando un átomo interacciona con otro, se generan nuevos niveles, llamados de "unión" y de "antiunión", según sea su influencia en el enlace químico. En un  $cm^3$  de cualquier material

sólido se tienen unos  $10^{22}$  átomos estrechamente unidos y por lo tanto en interacción mutua. Debido al gran número de átomos presentes, se genera una gran cantidad de nuevos niveles, los cuales llegan a tener energías tan semejantes que prácticamente constituyen una región continua denominada *banda de energía*. Esto equivale a construir entresijos en un edificio de muchos pisos, cada vez más cercanos entre sí, de hecho tan cercanos que ya no es posible distinguir uno de otro, ni determinar dónde empieza o termina cada piso o nivel. Ahora bien, si pensamos en un elevador que pasa por todos los pisos, vemos que puede ocupar cualquier posición, de igual manera el electrón puede ocupar cualquier posición dentro de la banda. Una variable discreta, al tomar valores muy próximos, tiende a convertirse en una variable continua.

Los electrones que ocupan los niveles de mayor energía son comúnmente llamados electrones de *valencia*, ya que son generalmente los únicos que intervienen en los procesos químicos. Al interactuar los electrones que se encuentran en estos niveles se constituye la *banda de valencia*. Los niveles inmediatos de mayor energía contienen pocos o ningún electrón y dan lugar a la formación de la *banda de conducción*. Estas dos bandas suelen ser suficientes para describir los fenómenos de excitación y conducción electrónica.

### VARIOS NIVELES FORMAN UNA BANDA

En el átomo, los electrones ocupan diferentes niveles de energía. Como se mencionó anteriormente, cuando estas partículas son excitadas con alguna manifestación de la energía (luminosa, térmica, etc.) se trasladan a niveles superiores.

Los niveles de energías son para los electrones lo que los diferentes pisos de un edificio son para un elevador: en condiciones normales de funcionamiento, éste podrá estar en el nivel del sótano, o en el piso 1, o en el 14, pero no podrá estar situado en una posición intermedia entre dos pisos ni en dos pisos simultáneamente. Cuando el elevador recibe una señal desde los botones de control, se desplaza hacia arriba o hacia abajo en forma análoga a los electrones cuando absorben o emiten energía. Los electrones sólo pueden ocupar ciertas posiciones: el piso o nivel 1, el 2, el 3, pero no el 1.50 el 2.3. Por esto se dice que la energía de los electrones está *cuantizada*, ya que absorben o emiten energía en cantidades definidas llamadas *cuantos*. La energía de los electrones es una variable discreta. [4](#)

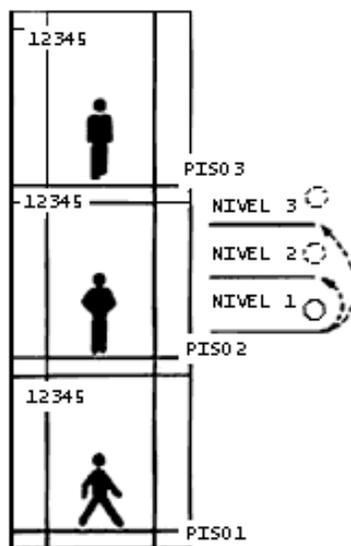


Figura 20

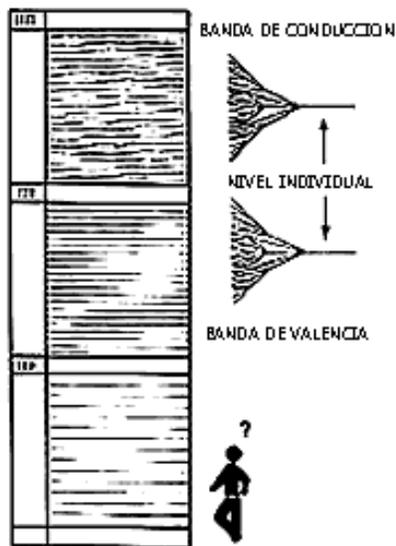


Figura 21. Analogía entre el elevador y la información de las bandas a partir de los niveles individuales.

### UNOS SON LIBRES Y OTROS NO

Para todos los elementos y sus compuestos puede proponerse el modelo de *bandas de energía* descrito en la sección anterior. Sin embargo, al analizar la estructura química de cada sustancia se encontrará que hay casos en que la *banda de valencia* y la de *conducción* están parcialmente superpuestas. Por otra parte, algunas sustancias presentan entre sus bandas de energía una "brecha" o zona de energía que, por efectos de la cuantización, no puede contener electrones y que por ello se denomina *banda prohibida*. Los electrones pueden atravesar esta banda pero no permanecer en ella, del mismo modo que los elevadores en algunos edificios que sólo se detienen en los pisos noes pero pasan momentáneamente por los pares.



Figura 22.

Los únicos electrones que pueden participar activamente en la conducción de un impulso eléctrico son los que se hallan en la *banda de conducción* y a ello se debe su nombre. Esta banda está esencialmente desocupada y, por tanto, permite a los electrones un fácil desplazamiento. La *banda de valencia*, por el contrario, suele estar saturada de electrones, razón por la cual las partículas que se encuentran en estos niveles de energía no participan generalmente en el transporte de carga. Una excepción a lo anterior se produce en materiales como el litio, cuya *banda de valencia* se encuentra "semi-llena" y por ello su conductividad es mayor.

En los materiales conocidos como *aislantes*, la banda prohibida es de gran magnitud (mayor de unos 4

eV),<sup>5</sup> lo que da lugar a que los electrones requieran energías excesivamente grandes para ser excitados a la *banda de conducción*. Si se pretende suministrar esta energía, primero ocurre la descomposición del material. El caso contrario es el de los metales, generalmente muy buenos conductores debido a que sus bandas de energía se encuentran traslapadas. Esta situación es la base del llamado *enlace metálico*, en el cual los electrones de valencia tienen gran libertad de traslación y constituyen de hecho una nube de carga.

La situación intermedia corresponde a los *semiconductores*. En ellos, la banda prohibida existe pero es relativamente pequeña (entre 0.3 y 3.5 eV), por lo que los electrones de la banda de valencia pueden ser excitados más fácilmente hacia la banda de conducción, por medio de una cantidad de energía suministrada ya sea, por vía térmica o luminosa. A bajas temperaturas y en condiciones de escasa o nula iluminación, un semiconductor tendrá una resistividad al paso de la corriente eléctrica, semejante a la de un aislante, ya que sus electrones estarán prioritariamente confinados a la banda de valencia. Bastará la temperatura ambiente (unos 25 °C) para que la mayoría de los semiconductores posea cantidades apreciables de electrones en la banda de conducción y, por tanto, su resistividad disminuya considerablemente. Es importante notar que la conductividad eléctrica de estos materiales es directamente proporcional a la temperatura, y por ello se afirma que su *coeficiente térmico de conductividad es positivo*, a diferencia de los metales cuyo coeficiente térmico de conductividad es *negativo*.

### CUADRO 1

<i>Elemento</i>	<i>Coeficiente de temperatura de resistividad por °C por ohm a 0°C</i>
Au	$3.65 \times 10^{-3}$
Ag	$4.11 \times 10^{-3}$
Pt	$3.7 \times 10^{-3}$
Zn	$4.0 \times 10^{-3}$

Ya que estos coeficientes son positivos, al aumentar la temperatura la resistividad de los metales aumenta o, en forma equivalente, su conductividad *disminuye*.

Por lo contrario, a temperaturas normales (aprox. 25°C), la conductividad de los *semiconductores* *aumenta* en un 5% por cada grado de incremento en la temperatura.

Ejemplo del uso de estos coeficientes:

Si el valor para el cobre es de  $4.27 \times 10^{-3}$  y se tiene alambre de cobre cuya resistencia es de 50 ohms a 0°C, el incremento en la resistencia será:

$$50 \times 4.27 \times 10^{-3} = 0.214 \text{ ohms}$$

por cada grado de incremento en la temperatura.

NOTA: No debe confundirse la *resistividad* del material con la resistencia del mismo. La resistividad es una propiedad característica de cada material, mientras que la resistencia depende de la forma geométrica.

## ELECTRONES Y HUECOS

¿Qué sucede en la banda de valencia de un semiconductor cuando uno de sus electrones la abandona al ser excitado hacia la banda de conducción? En el sitio que ocupaba este electrón se tendrá ahora una "ausencia de carga": un *hueco*. Dado que los electrones tienen carga negativa, al hueco se le asigna una carga positiva. Los electrones vecinos al hueco tenderán a ocuparlo para compensar el desequilibrio local de carga; sin embargo, al ocurrir este proceso, el electrón que pasa a ocupar el lugar del hueco deja en su lugar un nuevo hueco. Para un observador externo, es como si el hueco tuviera movimiento propio en sentido contrario al electrón. Es algo semejante a lo que ocurre en las marquesinas de los cines que tienen hileras de focitos que se prenden y apagan secuencialmente: se tiene la impresión de que son las sombras las que se mueven. En el semiconductor; los huecos son como estas sombras, no son partículas verdaderas. Sin embargo, para efectos descriptivos y aun para formular modelos complicados y ecuaciones de transporte, resulta muy conveniente considerar a los huecos como verdaderas partículas con masa y carga efectivas. Por lo anterior, los fenómenos de conductividad eléctrica en semiconductores se describen con base en dos tipos de partículas portadoras de carga: los electrones negativos y los huecos positivos



Figura 23 (a).

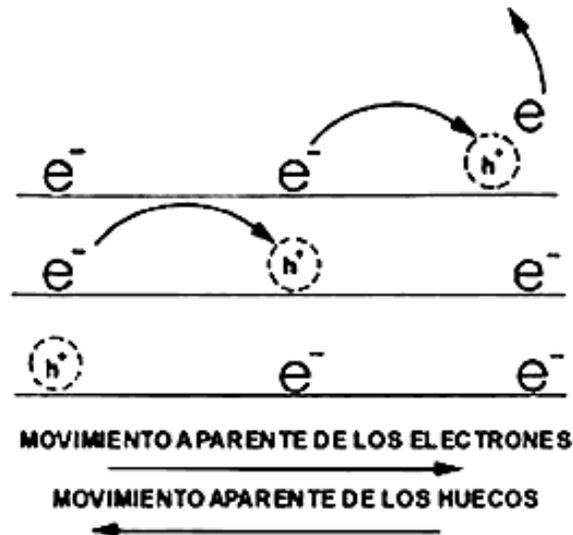


Figura 23 (b)

Más adelante se verá que el comportamiento de estas partículas guarda una estrecha relación con el conocido modelo iónico de las soluciones electrolíticas con base en iones positivos (cationes) y negativos (aniones)

## LAS MAYORÍAS Y LAS MINORÍAS

De lo expresado anteriormente es fácil deducir que por cada electrón que es excitado a la banda de conducción se genera el correspondiente hueco en la banda de valencia. Al proceso global se le conoce como la formación del "par electrón-hueco" y, aunque esto implica una separación de cargas, debe notarse que en su conjunto el material sigue siendo eléctricamente neutro. Cuando un semiconductor tiene la misma cantidad de electrones en la banda de conducción que de huecos en la valencia se dice que es *intrínseco*. Esta situación casi nunca se presenta en la realidad, pues pequeñas cantidades de impurezas o leves defectos estequiométricos ocasionan que las poblaciones de electrones excitados y de huecos no sean idénticas.

La presencia de la *banda prohibida* como región de energías inaccesible a los electrones se basa en la cuantización característica de cada material cuando es puro. Si se tiene la presencia de uno u otros elementos dentro de la red cristalina de dicho material, es probable que los niveles de energía de estas impurezas queden contenidos dentro de la banda prohibida del material de base.

Este fenómeno puede presentarse si el material contiene impurezas o defectos por sí mismo, o bien, si deliberadamente se introducen otros elementos en la red cristalina del semiconductor. Un caso típico es la impurificación del silicio, que se ha venido realizando durante años para fabricar diversos componentes de circuitos electrónicos (diodos y transistores).

El silicio, elemento del grupo IV en la Tabla Periódica, forma redes estables en las que cada átomo se encuentra tetracoordinado, es decir; se enlaza con otros cuatro:

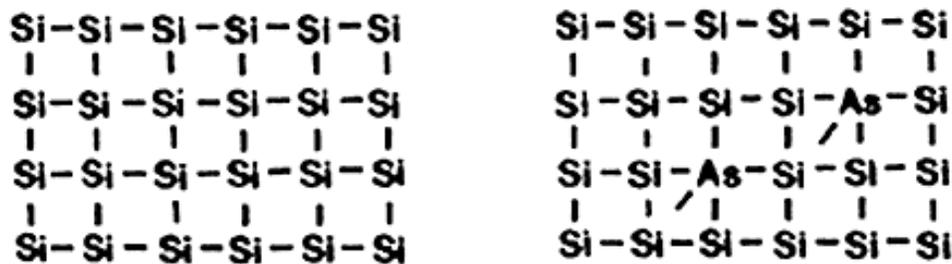


Figura 24.

Si se sustituyen uno o más de los átomos de Si por átomos de un elemento del grupo V, por ejemplo arsénico (As), que tiene cinco electrones de valencia, sus átomos se enlazarán con los cuatro átomos más cercanos, pero quedará en cada caso un electrón sobrante sin compartir.

Estos electrones, débilmente ligados, necesitan poca energía para poder trasladarse libremente, lo que equivale a decir que su energía promedio es ligeramente menor al nivel inferior de la banda de conducción y, por lo tanto, son fácilmente excitables a esta banda. A impurezas como el As dentro del silicio se les llama impurezas *donadoras*, ya que ceden sus electrones a la banda de conducción:

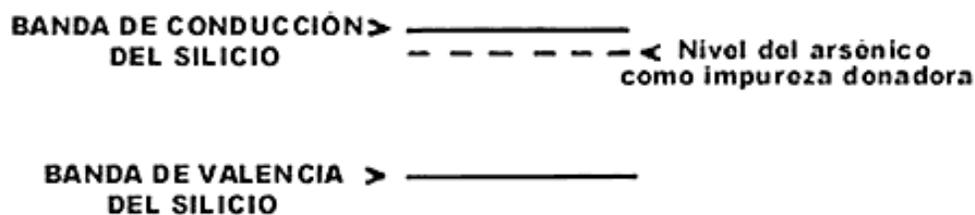


Figura 25.

El átomo de arsénico que al ceder su electrón adquiere una carga positiva se denomina *impureza donadora ionizada*. Esta carga positiva mantiene la electroneutralidad, pero está asociada al átomo de As y, por lo tanto, no es equivalente a un hueco en la banda de valencia. Se deduce ahora que la población de electrones excitados no es necesariamente igual a la de huecos, pues no todos provienen de la formación

de un par electrón-hueco dentro del silicio. Cuando la población de electrones es mayor se le denomina *portadores mayoritarios* y se dice que el semiconductor es *extrínseco* y de tipo "n" para indicar el exceso de portadores negativos generados por la ionización de las impurezas donadoras.

Un fenómeno análogo ocurrirá si los átomos de Si son substituidos por átomos de un elemento del grupo III, por ejemplo, del indio (In). Este elemento, trivalente, dejará un enlace sin compartir, creando así la ausencia de carga que constituye el hueco.

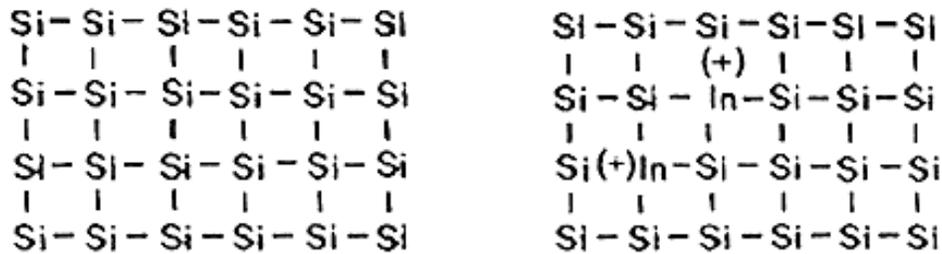


Figura 26.

El indio incorporado a la red del silicio actúa como una *impureza aceptora*, ya que tiende a capturar alguno de los electrones cercanos, originando el desplazamiento aparente de un hueco. Su papel se representa, en el modelo de bandas, como un nivel de energía ligeramente por encima del nivel superior de la banda de valencia, el cual sustrae electrones de esta banda y crea un exceso de huecos, que son ahora los *portadores mayoritarios*, mientras que los electrones pasan a ser los *portadores minoritarios*. En este caso se denomina al silicio *extrínseco* tipo "p" (positivo). Al igual que en el caso descrito anteriormente, las impurezas aceptoras ionizadas mantienen la electroneutralidad. Más adelante se verá que, curiosamente, son los portadores minoritarios los que desempeñan el papel principal en muchos de los fenómenos en semiconductores.

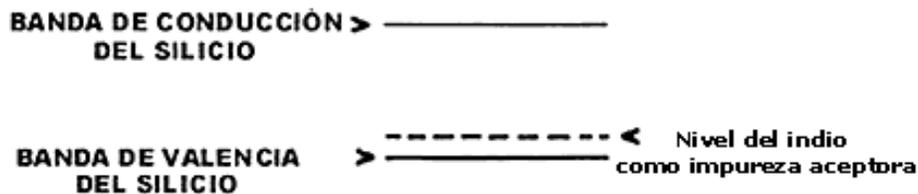


Figura 27.

Siempre que se representan las bandas como aparecen más arriba, se toma como ordenada la energía del electrón, la cual aumenta de abajo hacia arriba. Por este motivo, la tendencia natural de los electrones es siempre "bajar" hacia el estado de menor energía, mientras que la de los huecos es "subir" por la misma razón.

## Y AHORA, UN POCO DE ESTADÍSTICA

Es enorme la cantidad de electrones y huecos que existen en un  $\text{cm}^3$  de cualquier semiconductor. Aun en los casos en que el material es de alta pureza y tiene una cristalinidad casi perfecta, la temperatura ambiental es suficiente para generar unos  $10^{10}$  pares electrón-hueco.

Para semiconductores altamente impurificados se han determinado experimentalmente órdenes de  $10^{18}$  pares por  $\text{cm}^3$ . Por esto, al igual que cuando se estudia el comportamiento de grandes poblaciones humanas, para describir los fenómenos electrónicos se requiere un modelo estadístico.

Supóngase que la estadística de natalidad en México indica que cada vez que transcurren 14 segundos ocurre un alumbramiento. Con este dato se puede afirmar que la probabilidad de que haya nacido un niño mientras usted ha estado leyendo este capítulo es muy alta, de hecho, prácticamente igual a 1.<sup>6</sup> Lo que no

es posible saber es en qué lugar de la República Mexicana ha nacido este niño, ni el nombre de la madre. En el tratamiento estadístico la individualidad desaparece para dar paso a una observación global del comportamiento de un gran número de individuos. De la misma manera, cuando se dice que un electrón se excita a la banda de conducción, evidentemente no es posible determinar cuál ha sido el electrón elegido. Sin embargo, afortunadamente, este dato no es relevante, pues casi todo lo que observamos en la naturaleza y podemos determinar experimentalmente es el resultado global del comportamiento de millones de electrones o de átomos. Interesa conocer la posibilidad de que se formen pares electrón-hueco, pero no hace falta saber en qué lugar exacto de la red cristalina ocurre el proceso.

El modelo estadístico que hasta la fecha representa mejor el comportamiento de los electrones es el de *Fermi-Dirac*, llamado así en honor de los investigadores que lo desarrollaron: Enrico Fermi y P. A. M. Dirac.

Este modelo permite establecer cuáles niveles de energía en el átomo tienen una probabilidad alta ( $\approx 1$ ) o baja ( $\approx 0$ ) de encontrarse ocupados por un electrón. Se mencionó anteriormente que la de conducción es una banda esencialmente vacía. Esto equivale a decir que la probabilidad de ocupación de sus niveles de energía es muy baja. Por el contrario, los niveles de la banda de valencia suelen tener probabilidades de ocupación cercanas a 1, por lo cual se dice que la banda está "llena" o saturada. Una sencilla ecuación permite cuantificar la probabilidad ( $F_i$ ) de que un nivel  $i$  esté ocupado si se conoce la energía ( $E_i$ ) de este nivel:

$$F_i = \frac{1}{1 + \exp(E_i - E_f)/kT}$$

donde  $E_f$  es la energía de Fermi del material;  $k$ =cte. de Boltzmann y la  $T$  la temperatura.

¿Qué es la energía de Fermi del material? Es la energía potencial química que en promedio poseen los electrones de este material. Por la ecuación puede calcularse también que el nivel de energía, llamado *nivel de Fermi* y cuya energía es  $E_i = E_f$  tendrá una probabilidad de exactamente  $1/2$  de encontrarse ocupado, ya que  $F_i =$

$$1/[1 + \exp(0)] = 1/(1+1) = 1/2.$$

A  $25^\circ\text{C}$ , el valor de  $kT$  es  $4.11 \times 10^{-21}\text{J/m} = 0.0256 \text{ eV}$ . El lector podrá calcular que la probabilidad de ocupación para un nivel cuya energía es menor a  $E_f$  tan sólo en  $kT$  es muy alta: 0.99942, mientras que para un nivel con energía mayor a  $E_f$  en  $1 \text{ kT}$  es muy baja:  $5.74 \times 10^{-5}$ . Con base en estos cálculos, si se tiene un material metálico, puede afirmarse con gran precisión que los niveles que con energía menor de la Fermi estarán ocupados, mientras los que tienen energías superiores estarán desocupados. Para los semiconductores se aplica el mismo razonamiento, pero es muy importante recordar la existencia de la banda prohibida. En un semiconductor intrínseco, el nivel de Fermi se encuentra prácticamente a la mitad de la banda prohibida:



Figura 28.

Si existen impurezas donadoras ionizadas en el semiconductor, la probabilidad de encontrar electrones en la banda de conducción es mucho mayor que para el material intrínseco. Este cambio en la probabilidad de ocupación de dicha banda —que implica un aumento de la energía promedio electrónica del material— se representa en el modelo de bandas por un acercamiento del nivel de Fermi a la banda de conducción. Cuando la impurificación es de gran magnitud, como es el caso en muchos semiconductores comerciales de tipo n, el nivel de Fermi está localizado muy cerca del nivel inferior de la banda de conducción. Por el contrario, si las impurezas son aceptoras, la población electrónica en la banda de valencia disminuye y por tanto el nivel de Fermi es menor, situándose ligeramente por arriba del nivel superior de esta banda si la impurificación es de gran magnitud:

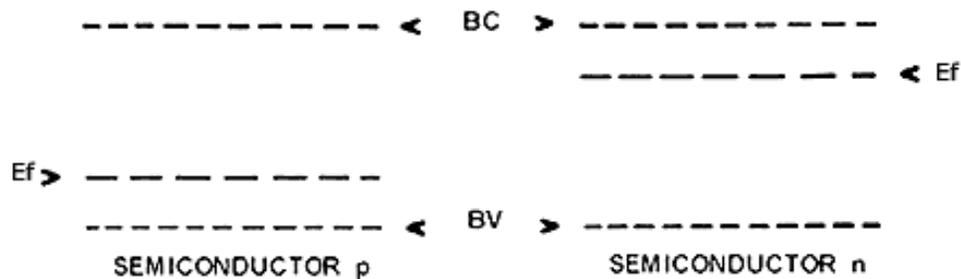


Figura 29.

Así como la temperatura de un cuerpo proporciona una idea de la energía contenida en sus átomos o moléculas, la energía de Fermi representa la energía global media electrónica del material. En el semiconductor tipo n se tiene un exceso de electrones con alta energía y por esto  $E_f$  es mayor que para el tipo p, donde los electrones son los portadores minoritarios. En este sentido, el semiconductor tipo n es "caliente", mientras que el tipo p es "frío". Al poner en contacto dos cuerpos con diferente temperatura, la tendencia natural será que se establezca un flujo de calor del material caliente hacia el frío hasta que la temperatura sea uniforme. De la misma manera, al poner en contacto materiales con diferente energía de Fermi, se producirá un flujo de carga de mayor a menor  $E_f$  hasta que el nivel de Fermi sea el mismo en todo el sistema y por tanto se haya alcanzado una situación de equilibrio.

## CONTACTOS CERCANOS

Con base en lo descrito en la sección anterior, veamos más detalladamente lo que sucede al poner contacto materiales con diferente  $E_f$ :

### 1. Metal-semiconductor

En la figura 30 se muestra el diagrama de bandas para un cierto metal (M) y un semiconductor tipo p (p-

SC) cuando ambos están en el vacío.<sup>7</sup> En estas condiciones, tanto las bandas como el nivel de Fermi aparecen constantes (horizontales), indicando que el sistema es uniforme y se encuentra en equilibrio.

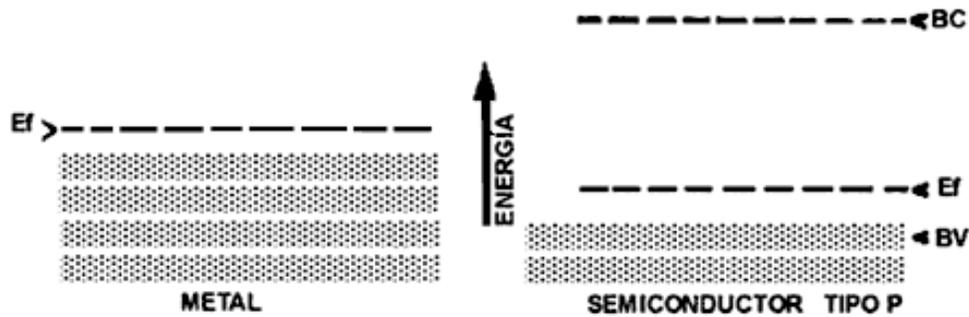


Figura 30.

Si estos materiales se ponen en contacto, el metal inyectará electrones al semiconductor tipo p hasta que los niveles de Fermi se igualen y se alcance el equilibrio. ¿Cuál será la energía de Fermi en el equilibrio, en comparación a la  $E_f$  que tenía cada material antes de producirse el contacto?

Para contestar esta pregunta es conveniente utilizar la analogía que se ha empleado con las temperaturas y recordar cómo se puede calcular la temperatura final de equilibrio para dos cuerpos, uno caliente y otro frío, que se ponen en contacto. Como se recordará, intervienen en este caso la capacidad calorífica y la masa de cada material. De cualquier manera, si la masa de uno de los cuerpos es mucho mayor que la del otro, la temperatura final será muy cercana a la que tenía originalmente el de mayor masa. Imaginemos, por ejemplo, que se introduce una sartén de cocina a  $70^\circ\text{C}$  en una alberca olímpica llena de agua a  $25^\circ\text{C}$ . Es fácil suponer que en el equilibrio que se alcance la temperatura será imperceptiblemente mayor a  $25^\circ\text{C}$ .

Para el contacto metal-semiconductor la situación es muy parecida a la de la sartén y la alberca. Debido a que la densidad electrónica del metal es mucho mayor que la de cualquier semiconductor, el nivel de Fermi en el equilibrio será prácticamente igual al que tenía el metal antes del contacto. Por esta razón se dice que el metal siempre *impone* su nivel de Fermi al semiconductor. Este efecto está relacionado con el hecho de que los efectos siempre son más notables en las regiones con menor población de portadores de carga, ya que el cambio relativo es mayor. Por ejemplo, la llegada de un grupo de 400 turistas a una población de 2 mil habitantes será un gran evento, pero el mismo grupo en la ciudad de México, donde viven varios millones de personas, pasará desapercibido. Por esta misma razón, los portadores minoritarios suelen tener un papel más importante que los mayoritarios en muchos procesos en semiconductores.

La situación final de equilibrio se representa en el modelo de bandas con base en dos suposiciones:

a) En el seno del semiconductor, esto es, lejos de la región donde se ha producido el contacto con el metal, la población electrónica no se ve alterada. Por lo tanto, la posición relativa del nivel de Fermi respecto a las bandas de valencia y conducción será la misma que antes del contacto.

b) En la superficie del semiconductor, la posición de los límites de las bandas (BC y BV) permanece invariable.

Así, en el equilibrio, el diagrama de bandas será como el de la figura:

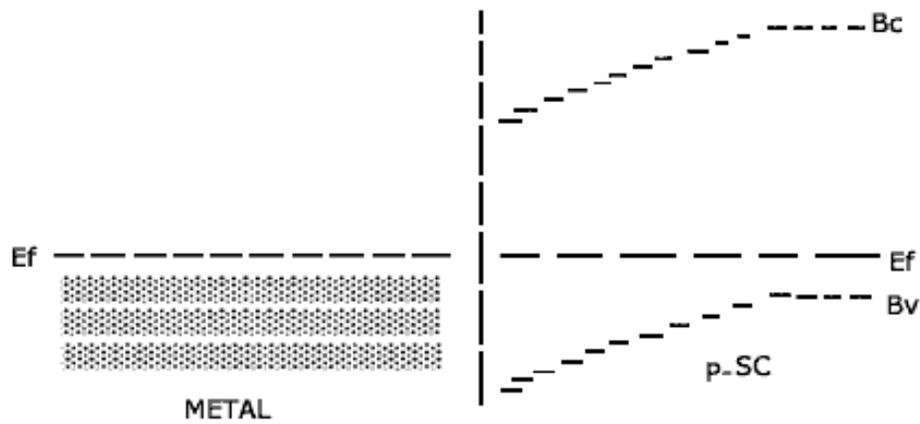


Figura 31.

Es importante notar el *doblamiento de las bandas*, el cual representa la aparición de una barrera de potencial originada por el contacto de ambos materiales. La región donde las bandas presentan curvatura se llama región o *zona de carga espacial*. Este doblamiento de las bandas es característico de casi todas las uniones en que participa al menos un semiconductor y es la base de muchas aplicaciones científicas y tecnológicas de estos materiales.

La situación de equilibrio puede alterarse mediante la aplicación de un campo eléctrico externo. Conectando el polo positivo al metal y el negativo al semiconductor tipo p, se impulsará un flujo de electrones del semiconductor al metal de tal manera que el nivel de Fermi disminuirá notablemente en el semiconductor y aumentará casi imperceptiblemente en el metal. Para un cierto valor de potencial aplicado, la posición de las bandas será nuevamente horizontal (como antes de producirse el contacto), si bien ahora el nivel de Fermi no será uniforme debido al campo eléctrico que está aplicando externamente al sistema. Al valor del potencial que genera esta situación se le llama justamente *potencial de banda plana* (horizontal).

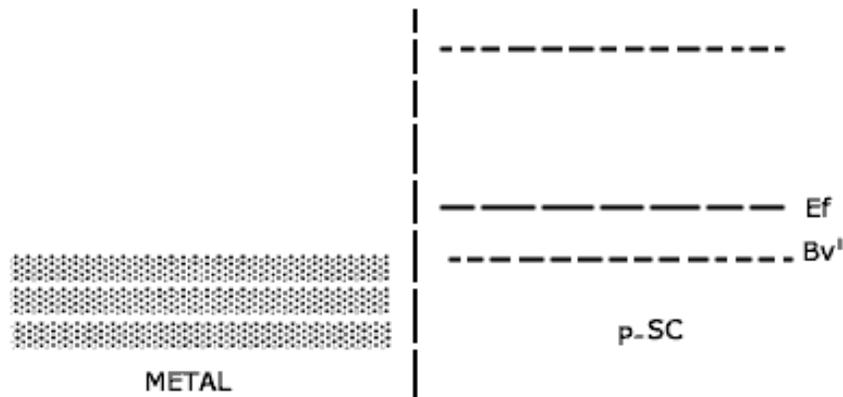


Figura 32.

## 2. Semiconductor-semiconductor

En este tipo de uniones, las de mayor importancia son llamadas "p-n", o sea las que involucran semiconductores extrínsecos de diferente naturaleza. Una manera sencilla de fabricar esta unión consiste en impurificar los extremos de una barra de silicio con impurezas de galio, por un lado, y de arsénico, por el otro, generándose un silicio tipo p y uno tipo n, respectivamente. En equilibrio térmico aparece el doblamiento de bandas como se muestra en la figura:

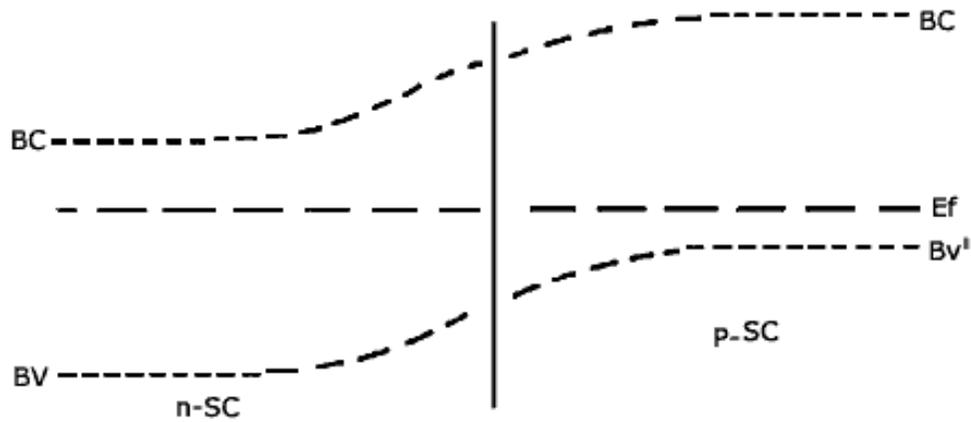


Figura 33.

La barrera de potencial que se origina en esta unión se opone al paso de los portadores mayoritarios de una zona y otra y se denomina *Barrera de Schottky*. Si se aplica un potencial eléctrico externo de forma que el polo positivo se conecte a la zona p y el polo negativo a la zona n, el nivel de Fermi se elevará en la zona n (que está recibiendo un flujo de electrones desde el exterior) mientras que descenderá en la zona p. Esto implicará un cierto "desdoblamiento" de las bandas en función del valor de potencial aplicado. Se dice que el potencial está aplicado en sentido *directo* ya que al disminuir la barrera de Schottky, se facilita el flujo de carga a través de la unión.

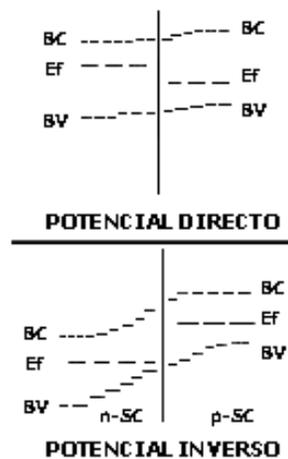


Figura 34.

Si se aplica el potencial en sentido *inverso* (el polo negativo a la región p y el positivo a la n), la barrera de potencial será todavía mayor y la unión representará gran resistencia al flujo de carga. Este es el principio utilizado en los diodos rectificadores que transforman la corriente alterna en corriente directa, pues permiten el transporte de carga en un sentido pero lo impiden en el otro.

### 3. Semiconductor-electrólito

Comúnmente, un electrólito es una solución acuosa o no acuosa que contiene especies disociadas en forma de iones positivos (cationes) y negativos (aniones). Las concentraciones que normalmente se utilizan van de 0.001 Molar a 1.0 Molar. Esto significa que, aun para el caso de la solución más diluida, se tienen unos  $10^{20}$  iones por  $\text{cm}^3$  y, por lo tanto, en las uniones semiconductor-electrólito, es este último el que impone su nivel de Fermi.

Pero, ¿es posible hablar de nivel de Fermi en un electrólito? En forma rigurosa no es posible, ya que los electrones no existen como tales es una solución electrolítica.

Sin embargo, si se considera al nivel de Fermi como el potencial electroquímico del material, es posible,

mediante algunas consideraciones, establecer un nivel de Fermi para las diferentes especies iónicas. Esta posibilidad es el corazón de la *fotoelectroquímica*, ya que permite incorporar el semiconductor al campo de la electroquímica, donde ya no se maneja el cero de potencial en el vacío (*escala absoluta*) sino un cero relativo asociado a la reacción del electrodo de referencia de hidrógeno (*escala convencional*). Este punto será tratado ampliamente en el siguiente capítulo.

#### 4. Metal-metal

También al unir piezas metálicas de diferente  $E_f$  se genera un potencial llamado *potencial de contacto*. Este fenómeno ha sido estudiado desde hace mucho tiempo porque en ocasiones este potencial es suficiente para promover reacciones de óxido-reducción. Un caso típico es el de las tuberías de zinc en que se colocan llaves de cobre. El fluido en la tubería funciona como medio de transporte de las cargas y el zinc, actuando como *ánodo*, se disuelve lentamente hasta que genera una perforación y el fluido comienza a escapar. Por esa razón, en todos los sistemas hidráulicos en general se evita la unión entre metales que generen estos "pares galvánicos".

#### 5. Metal-electrólito

Ésta es la unión típica que se presenta en todos los sistemas electroquímicos convencionales. Uno de los casos más estudiados es el de un metal en contacto con una solución que contiene iones del mismo metal, sistema para el cual se asigna un valor de potencial referido al electrodo de hidrógeno. Estos puntos serán tratados con más detalle en el siguiente capítulo.

#### 6. Electrólito-electrólito

Ya que generalmente los electrolitos son líquidos,<sup>8</sup> para estudiar sus uniones es necesario utilizar un medio intermedio, como un vidrio poroso o una membrana semipermeable, que mantenga separadas las soluciones. El potencial que se origina en este tipo de uniones se llama *potencial de unión líquida* y se debe a la diferente movilidad de las especies iónicas. En los puentes salinos que se utilizan en la práctica, se emplean especies iónicas de movilidad muy semejante para minimizar el potencial de unión líquida.

De todos los ejemplos anteriores se obtiene una conclusión muy importante: al ponerse en contacto dos materiales de diferente naturaleza, se tendrá una frontera de separación que contiene un potencial eléctrico. Esta frontera se denomina *interfase*.

### LA POBREZA Y LA RIQUEZA

En la figura 30 se muestra el efecto de unir un semiconductor tipo p con un metal de mayor  $E_f$ . Se produce un doblamiento de bandas tal que, si se recuerda que la tendencia natural de los huecos es "ascender" en estos diagramas, resulta en una transferencia de los portadores mayoritarios hacia el interior del material. La región de carga espacial es abandonada por los huecos, y por ello se denomina *zona de empobrecimiento*.

Es muy interesante notar que si se une el mismo metal con un semiconductor tipo n de mayor  $E_f$ ; el doblamiento de las bandas se produce en sentido contrario:



**Figura 35.**

Pero el efecto es análogo al descrito para el semiconductor tipo p, ya que los portadores mayoritarios, en este caso los electrones, se alejarán de la zona cercana a la unión. Así, para ambos casos, el empobrecimiento corresponde a una menor concentración de portadores mayoritarios en la zona de carga espacial con respecto a la totalidad del material semiconductor.

En raras ocasiones el doblamiento de las bandas se produce de tal forma que los portadores mayoritarios fluyan hacia la interfase. En este caso se denomina a la carga espacial como *zona de enriquecimiento*.

## CONCLUSIONES

Se han presentado algunas características de los semiconductores, dando mayor relieve a los conceptos que serán de utilidad para la comprensión de los siguientes capítulos. El lector interesado en profundizar en este tema deberá consultar obras especializadas que se encuentran en la bibliografía complementaria.

## NOTAS

1 Un nanómetro es igual a  $10^{-9}$  m.

2 Fotón, cantidad elemental de energía radiante.

3 En ocasiones, la radiación visible no es absorbida ni reflejada y simplemente atraviesa el material. Éste es el caso de las ventanas y, en general, de todos los objetos llamados transparentes. La absorción selectiva de radiaciones, que permite el paso de ciertas ondas y retiene otras, tiene mucha aplicación en la fotografía, el análisis químico, etc. El concepto es igualmente válido para otras radiaciones, como, por ejemplo, los rayos X ( $\lambda \approx 0.001$  nm). La piel humana es transparente a esta radiación y por ello generalmente en una radiografía sólo se observan los huesos y los órganos que si absorben a esta longitud de onda.

4 Se denomina discreta a una variable que sólo puede tomar ciertos valores preestablecidos, a diferencia de una variable continua que, dentro de ciertos límites, puede tomar cualquier valor. Variables discretas son, por ejemplo: el número de carros que caben en un estacionamiento o el número de átomos que constituyen una molécula gaseosa. Variables continuas son, por ejemplo, la concentración de una solución, el tiempo que tarda un corredor en recorrer 400 metros planos, etcétera.

5 En el modelo de bandas, la unidad de energía suele ser el electrón volt (eV). Por definición, un eV es la

energía que adquiere cualquier partícula con carga unitaria al pasar a través de un potencial de 1 volt 1 eV  $1.602 \times 10^{-19}$  joules.

6 Se define la probabilidad de que un evento ocurra como el cociente entre las veces que efectivamente sucede el fenómeno y el número total de eventos. Si durante el mes de octubre en 14 días llueve, la probabilidad de lluvia será  $14/31 = 0.452$ .

7 El vacío absoluto no existe. Sin embargo, actualmente hay aparatos capaces de generar condiciones de "ultra altovacío" donde la cantidad de partículas es tan pequeña que las presiones medidas son del orden unas  $10^{-13}$  atmósferas ( $\sim 1 \times 10^{-8}$  Pascales).

8 Muchos procesos de gran importancia tecnológica utilizan electrólitos en estado sólido.



# IV. LA QUÍMICA HACIA LA CONQUISTA DEL SOL (ELECTROQUÍMICA Y FOTOELECTROQUÍMICA)

## CELDA ELECTROQUÍMICA FUNDAMENTOS

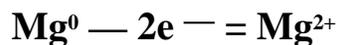
EN EL CAPÍTULO ANTERIOR se han descrito algunas de las principales características de los semiconductores. Se verá ahora el funcionamiento de estos materiales en celdas electroquímicas, por lo que resulta necesaria una breve revisión de los conceptos básicos de la electroquímica.

Recientes descubrimientos arqueológicos han llevado a los científicos a postular que ciertos procedimientos electroquímicos ya eran conocidos hace más de 2 mil años. Sin embargo, los inicios de la electroquímica como ciencia formal se sitúan en los últimos años del siglo XVIII. En 1786, Luigi Galvani descubrió una interesante relación entre las contracciones musculares de un anca de rana y ciertos impulsos que se obtenían al hacer contacto dos metales diferentes. Posteriormente, en 1796, Alessandro Volta estableció que, al formar uniones con diferentes metales, se generaba un potencial eléctrico que originaba las contracciones observadas por Galvani. De los nombres de estos científicos han surgido dos de los términos más conocidos en electroquímica: "voltaje", para designar el potencial de un sistema eléctrico, y "celda galvánica" para nombrar los dispositivos que transforman energía química en energía eléctrica, como son, por ejemplo las pilas que se utilizan a diario en radios, linternas, etcétera.

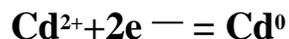
Una celda galvánica común está constituida básicamente por dos piezas metálicas, llamadas electrodos, y una solución que contiene iones, denominada electrólito. Los electrolitos son generalmente líquidos, pero algunas celdas de gran importancia tecnológica utilizan electrólitos sólidos o en forma de pasta.

El aspecto fundamental de una celda galvánica, como el de cualquier sistema *electroquímico*, es la transferencia de carga eléctrica entre materiales con diferentes características: por un lado, los metales, donde los portadores de carga son únicamente los electrones (conducción electrónica) y, por otro lado, el electrólito, donde la conducción se establece con base en iones negativos (aniones) y de iones positivos (cationes) (conducción iónica). Las reacciones químicas que ocurren en las interfaces [1](#) electrodo/electrólito generan el flujo de corriente eléctrica que proporciona la celda. Por ejemplo, una celda galvánica constituida por dos compartimientos -semiceldas-, como se muestra en la figura 35, actúa de la siguiente forma:

Átomos neutros  $Mg^0$  del electrodo de magnesio liberan electrones y pasan a la solución como iones  $Mg^{2+}$



Los electrones generados pasan a través de la conexión exterior al electrodo de cadmio, fluyen hacia la interfase y ahí reaccionan con los iones  $Cd^{2+}$  presentes en la solución:



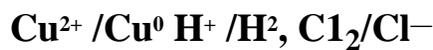
El movimiento interno de iones -a través del puente salino- ayuda a mantener la electroneutralidad completando el circuito. El puente salino es un medio iónico de baja resistividad que permite el paso de los iones pero evita que las soluciones se mezclen directamente. Esta celda permite el aprovechamiento de la energía química en forma de trabajo eléctrico, ya que mantiene unidos a los electrodos mediante una resistencia externa por la que fluyen los electrones. Es este flujo electrónico el que proporciona la energía para que un aparato funcione.

Cuando los electrodos se hallan en contacto directo (corto circuito), no se obtiene trabajo útil; por el contrario, sólo se malgastan los materiales. Este fenómeno constituye lo que conocemos como corrosión, que tantas pérdidas económicas y materiales ocasiona en todo el mundo. Un caso muy conocido es la degradación del hierro para formar un polvo pardo rojizo, que es el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). La reacción global es



La humedad del aire es suficiente para actuar como electrólito. Si se tiene la presencia de sales, como ocurre en las zonas cercanas al mar; la corrosión se acelera notablemente.

El solo hecho de poner en contacto un metal con una solución de sus propios iones genera un potencial eléctrico bien establecido. Esto se debe, como se vio en el capítulo anterior; a la formación de una interfase o frontera donde se encuentran dos medios de diferente estructura química. Cada pareja ión metálico/metal constituye un *par redox*. Este término se aplica en general a cualquier par de sustancias relacionadas por un proceso de óxido-reducción, como



Por convención, se asigna un valor de 0 de potencial al proceso que ocurre en un electrodo de hidrógeno:

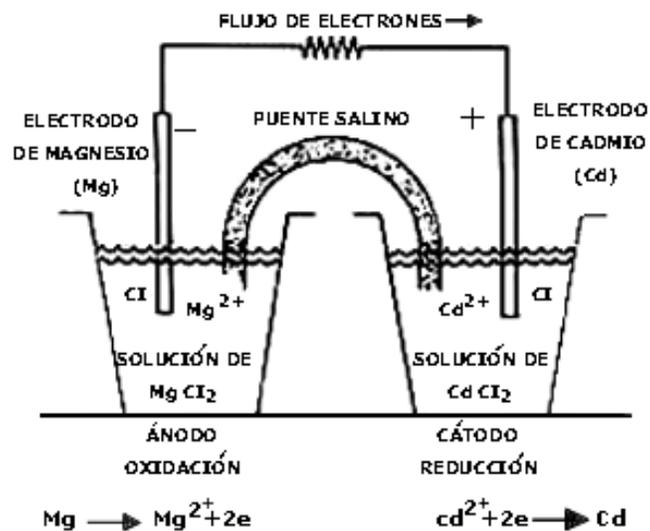


FIGURA 36.

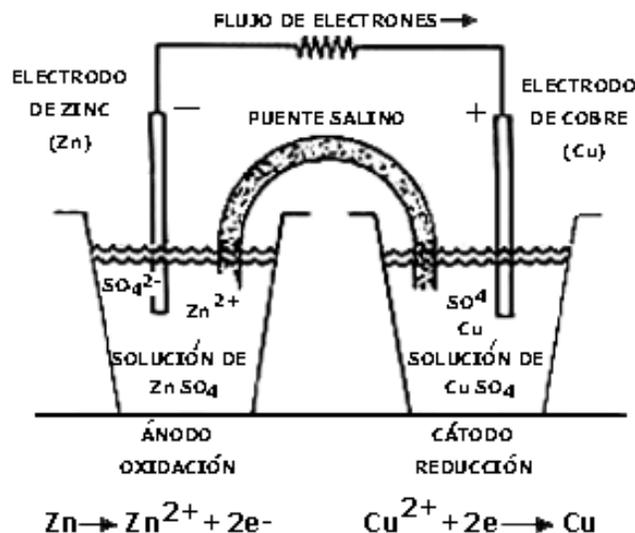


FIGURA 37.



$$E^\circ = 0.00 \text{ Volts}$$

Todas las demás reacciones tienen un cierto valor de potencial referido a este cero convencional. Así se puede formar una tabla de potenciales:

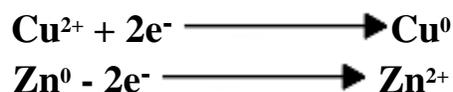
	<b>E0 (volts)</b>
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}^0$	<b>-2.375</b>
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}^0$	<b>-1.67</b>
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}^0$	<b>-0.763</b>
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}^0$	<b>-0.40</b>
$2 \text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	<b>0.0</b>
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^0$	<b>+0.346</b>
$\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Cl}^-$	<b>+1.358</b>

Estos valores de potencial son los obtenidos experimentalmente cuando los elementos son puros, la concentración de las soluciones es 1 mol por litro y la presión de los gases es 1 atmósfera a 25°C. En estas condiciones se utiliza el símbolo  $E^\circ$  y se denomina potencial de *electrodo estándar*.

Una de las celdas galvánicas más conocidas es la llamada celda Daniell (figura 37). Consta de dos semiceldas separadas por un vidrio poroso o puente salino. En una de ellas se coloca un electrodo de cobre y una solución 1 molar de sulfato de cobre, mientras que en la otra se coloca un electrodo de zinc en una solución 1 molar de sulfato de zinc. Al unir los electrodos mediante un medidor potencial, se determina que la celda genera un potencial máximo de 1.1 volts, denominado fuerza electromotriz (fem).

Este valor puede ser calculado con base en las reacciones químicas que tienen lugar en la celda y el potencial estándar asociado a estas reacciones. En este caso, los pares son  $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^0$  y  $\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}^0$ .

Un potencial más positivo indica una mayor tendencia de las especies a ganar electrones, esto es, a reducirse. En cambio, a medida que un potencial es más negativo (o menos positivo) se tiene una mayor tendencia a la oxidación, o sea a la pérdida de electrones. De acuerdo a lo anterior, se puede afirmar que las reacciones en la celda Daniell serán:



La fem de una celda se calcula mediante la relación: fem = Potencial más positivo — Potencial más negativo, sin cambiar nunca los valores reportados en la tabla a menos que las condiciones de concentración, presión o temperatura sean diferentes a las estándar.

Por definición, se llama cátodo al electrodo donde ocurre la reducción, y ánodo a aquel donde se lleva a cabo la oxidación. Por lo tanto, la relación también puede escribirse como

fem = Potencial del cátodo - Potencial del ánodo que, para la celda Daniell, resulta ser

$$fem = + 0.346V - (-0.763V) = 1.109V$$

Es muy importante notar que, si bien los valores de potencial estándar descritos en la tabla corresponden a las reacciones de reducción, estos valores no cambian de signo si el proceso que ocurre en la semicelda es una oxidación. Por esto, el valor de  $-0.763\text{ V}$  se mantiene en el caso del zinc y se hace la resta algebraica para obtener la fuerza electromotriz.

La celda Daniell no se puede recargar; esto es, no es posible recuperar las sustancias químicas que han reaccionado mediante la aplicación de un potencial externo en sentido contrario. Si se utiliza una fuente de poder para inyectar electrones al electrodo de zinc con la idea de obtener la reducción de los iones  $\text{Zn}^{2+}$  a zinc metálico, la reacción que se obtiene es la formación de hidrógeno a partir de los protones del agua. Esto se debe a que el potencial estándar del par  $\text{Zn}^{2+} / \text{Zn}^0$  es más negativo que el del par  $\text{H}^+ / \text{H}_2$  y, por lo tanto, este último es el que tiene mayor tendencia a reducirse. Por otra parte, la relación de potenciales debe servir únicamente como primer punto a considerar y no como una predicción definitiva de las reacciones por ocurrir. En ocasiones, no son únicamente los valores de potencial, sino la rapidez de la reacción lo que realmente determina la factibilidad de un proceso.

A los sistemas en que se aplica externamente un potencial eléctrico con el objeto de generar reacciones químicas de óxido-reducción, se les conoce como *celdas electrolíticas*. Uno de los procesos más conocidos es la *electrodeposición* de metales como cobre, níquel o zinc sobre diferentes sustratos metálicos.

En el *cátodo* los iones se reducen y, en condiciones adecuadas, empiezan a formar un recubrimiento bastante herencia, como en el caso del cromado de las defensas en los automóviles. Una técnica de purificación del cobre es el *electrorrefinado*. Se utilizan ánodos de un cobre impuro (cobre blister) y cátodos de cobre de gran pureza (99.96%) en una solución ácida de sulfato de cobre. Al aplicarse el potencial externo, el ánodo de blister se disuelve mediante la reacción de oxidación:



al mismo tiempo que las impurezas pasan a la solución para posteriormente sedimentarse en el fondo de la celda. En los cátodos ocurre la reacción de reducción.



obteniéndose un depósito de cobre de alta pureza. Las impurezas forman los que se llaman lodos anódicos.

En general, los procesos electroquímicos pueden separarse en dos grupos:

a) Procesos en que los electrodos no sufren ningún cambio.

Los materiales que se introducen al electrólito sirven únicamente como intermediarios para que en su superficie se realice la transferencia de carga y se oxiden o se reduzcan las especies presentes en el electrólito. Por ejemplo, la descomposición del agua se puede lograr aplicando un potencial superior a 1.3 volts entre dos electrodos de platino. En este proceso, denominado electrólisis, se observa la formación de hidrógeno en el cátodo, mientras que en el ánodo se desprende oxígeno. Sin embargo, las piezas de platino no sufren ninguna alteración.

b) Procesos en que los electrodos participan activamente.

Pertenecen a este grupo los casos en que el ánodo se disuelve en forma intencional, como en el electrorrefinado del cobre, o se oxida deliberadamente, como en el caso del aluminio para la obtención de aluminio anodizado que tanta aplicación tiene en la construcción. Desafortunadamente, en muchos casos los electrodos reaccionan cuando no están supuestos a hacerlo, esto es, se oxidan, se contaminan o se

disuelven, disminuyendo drásticamente la vida útil de los materiales y ocasionando grandes pérdidas económicas.

En general, los diferentes materiales que se utilizan como electrodos pueden ser utilizados sin problema dentro de ciertos intervalos de potencial eléctrico aplicado. Por ejemplo, un electrodo de mercurio es muy utilizado para reacciones de reducción en medios acuosos, porque inhibe la electrólisis del agua y permite así el estudio de muchas sustancias; pero es prácticamente inútil como ánodo, esto es para procesos de oxidación, ya que, a potenciales positivos, es el propio mercurio el que se oxida. Por otra parte, los electrodos de platino son muy utilizados en el laboratorio, pues permiten trabajar en zonas más o menos amplias de potencial sin verse ellos afectados. Esto es importante, porque en cualquier experimento *electroquímico* de que se trate es indispensable saber si la corriente que se observa se debe a procesos de óxido-reducción de las especies en solución, o bien a procesos de los propios electrodos.

Sería una sorpresa desagradable encontrar que después de algunas horas de experimentación, nuestros electrodos se hubieran disuelto.

## LA TRANSFERENCIA DE CARGA EN AMBOS SENTIDOS

Si no se rebasa su potencial característico de oxidación, en general un metal puede ser utilizado ya sea como cátodo o como ánodo. Esto es, la estructura electrónica del metal permite tanto el flujo de carga del electrodo al electrólito (reducción) como del electrólito hacia el electrodo (oxidación de las especies en solución). La transferencia de carga se obtiene igualmente en ambos sentidos. Esto no ocurre cuando se sustituye el electrodo metálico por un semiconductor.

Debe recordarse que en la unión semiconductor-electrólito, se produce el doblamiento de bandas en el semiconductor que representa la barrera de potencial de Schottky. Al igual que en las uniones p-n descritas en el capítulo anterior, esta barrera permite el flujo de carga de un sentido, pero lo impide en el otro. Por ejemplo, un material tipo n al cual se aplica un potencial negativo puede suministrar electrones a especies oxidadas, reduciéndolas y, por lo tanto, actuando como cátodo. Sin embargo, si a este material se aplica un potencial positivo con la idea de utilizarlo como ánodo, la barrera de potencial impide el flujo de carga.

De esta manera, en una celda electroquímica que contiene un electrodo semiconductor se observará un proceso de rectificación semejante al de las uniones p-n. Si el semiconductor es tipo n, los procesos de reducción serán posibles, mientras que los de oxidación se verán obstaculizados. Si el semiconductor es tipo p, se facilitarán las reacciones de oxidación, pero las de reducción se dificultarán.

En la descripción anterior se ha considerado que el electrodo semiconductor se encuentra en condiciones de oscuridad. ¿Qué sucederá si se ilumina el electrodo?

## FOTOELECTROQUÍMICA

Al iluminarse el electrodo semiconductor; si la energía de los fotones es suficiente para generar pares electrón-hueco, surge la posibilidad de observar reacciones fotoelectroquímicas.

Se estableció anteriormente que la unión semiconductor-electrólito suele generar una región de carga espacial *empobrecida* de portadores mayoritarios. Esto significa que, en un material tipo n, los portadores cercanos a la interfase resultan ser los huecos, mientras que para el tipo p son los electrones.

Al formarse los pares electrón-hueco en un semiconductor tipo n, el doblamiento de las bandas ocasiona que los electrones se alejen de las especies en solución, lo cual impide reacciones de reducción. Por otra parte, los huecos cercanos a la interfase pueden reaccionar con las especies iónicas y generar así procesos de oxidación. Se concluye algo muy interesante: un semiconductor tipo n, que en condiciones de oscuridad actúa prioritariamente como cátodo, bajo una iluminación adecuada favorecerá procesos de oxidación, o sea, actuará como *fotoánodo*. Por las mismas razones, un semiconductor tipo p actuará como *fotocátodo*, ya que serán los huecos los que se alejen de la interfase, mientras que los electrones quedarán disponibles

para reacciones de reducción. Puede verse que en fotoelectroquímica son, curiosamente, los portadores minoritarios los que juegan el papel principal.

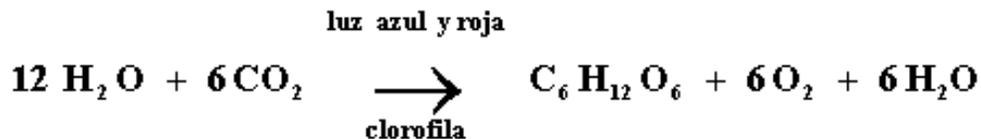
En las *celdas electrolíticas* convencionales descritas anteriormente, las reacciones químicas se obtienen al aplicar un potencial eléctrico externamente. Así, la energía suministrada como trabajo eléctrico se transforma en energía química acumulada en los productos de reacción.

En una celda fotoelectroquímica, es la energía proporcionada en forma de luz la que genera las reacciones químicas. Una celda fotoelectroquímica resulta, así, una especie de "hoja artificial" que, como las hojas de las plantas, utiliza la luz para promover reacciones químicas.

## LA FOTOSÍNTESIS ARTIFICIAL

Como se vio en el capítulo II, la fotosíntesis ocurre en las plantas verdes -específicamente en los cloroplastos- y puede resumirse por la ecuación:

luz azul y roja



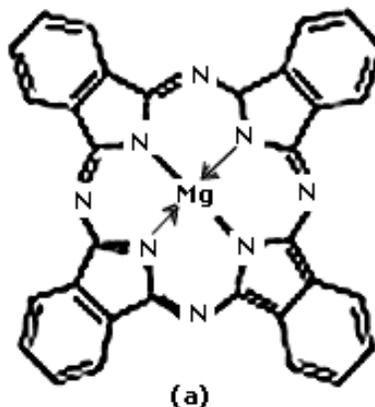
Uno de los puntos más importantes de recordar es que el oxígeno generado proviene de la descomposición del  $\text{H}_2\text{O}$  y no del  $\text{CO}_2$  como se creía originalmente.

En el capítulo III, como antecedente al estudio de las bandas de energía, se presentó el modelo de excitación electrónica que origina el color de los objetos. Así, la clorofila resulta ser de color verde porque absorbe selectivamente las radiaciones característica, del azul y del rojo en el espectro visible. De esta manera, puede establecerse que el comportamiento de la clorofila es análogo al de un material semiconductor que absorbe determinadas energías en función de la magnitud de la banda prohibida.

Hasta hace algunos años, la gran mayoría de los estudios en semiconductores se realizaban con materiales inorgánicos puros, como el silicio o el germanio y, más recientemente, con compuestos como el  $\text{TiO}_2$  o el CdTe. Sin embargo, la investigación de muchos pigmentos o colorantes, ente ellos la clorofila, ha demostrado que suelen poseer propiedades semiconductoras. De esta manera se ha incrementado en gran forma el estudio de los semiconductores orgánicos. En la figura 38 se muestran:

(a) Molécula de ftalocianina de magnesio

(b) Molécula de clorofila



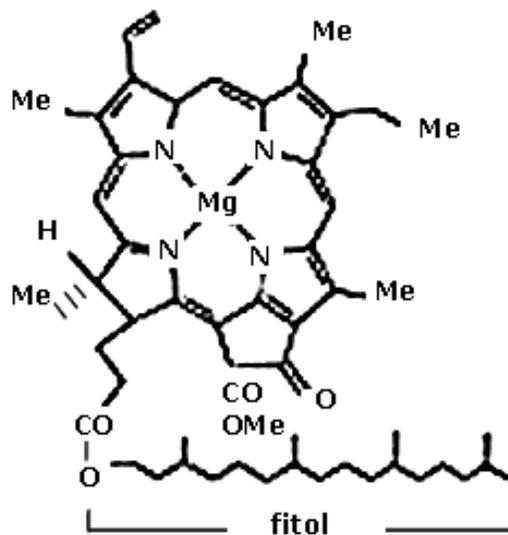


Figura 38.

Con base en los conceptos anteriores, desde la década de los setenta, y dentro del marco de la búsqueda de nuevas fuentes de energía, muchos científicos se han dedicado a la construcción de sistemas artificiales de fotosíntesis, donde generalmente se substituye el pigmento natural por otros colorantes de estructura semejante pero más fáciles de obtener en el laboratorio, o bien, por semiconductores inorgánicos. Uno de los objetivos principales es lograr una fotosíntesis "abiótica", o sea, no asociada a un ser vivo y, por lo tanto, menos limitada en condiciones de presión, temperatura o concentración.

Tratar de simular en el laboratorio todas las reacciones que ocurren naturalmente en las plantas durante la fotosíntesis es evidentemente, una tarea muy difícil, sobre todo si se recuerda que no todos los pasos químicos de esta reacción han sido claramente establecidos. Hasta ahora, lo único que ha sido posible construir es un sistema que al iluminarse genera la fotodescomposición del agua para obtener hidrógeno y oxígeno:



En 1981 se fabricó un "cloroplasto artificial" donde ocurre esta reacción al iluminarse una solución acuosa de compuestos orgánicos — muy similares a la clorofila natural— que contienen magnesio. Por supuesto, este dispositivo es miles de veces más grande que el prodigioso cloroplasto natural y, con seguridad, mucho más costoso. Sin embargo, representa el afán del hombre por desentrañar los secretos de la naturaleza en una primera alternativa que suele ser la imitación.

Al igual que en los últimos años las gigantescas calculadoras se han reducido al tamaño de una tarjeta de presentación gracias al uso de los circuitos impresos a base de microcomponentes, se piensa que es posible obtener "micro-cloroplastos". Para esto, al igual que en la electrónica, es necesario recurrir a los materiales semiconductores

Los "micro-cloroplastos artificiales" de que tenemos noticia hasta la fecha son en realidad pequeñísimas partículas de un material semiconductor dispersadas en un medio acuoso. Estas partículas son previamente recubiertas en forma parcial con platino, de forma que en la superficie de la partícula ocurren tanto la reacción de oxidación como la de reducción (ver capítulo II). Esto equivale a tener una microcelda electrolítica donde cátodo y ánodo están contenidos en la misma partícula semiconductor.

El recubrimiento parcial de partículas semiconductoras con elementos metálicos es, por sí mismo, un proceso de gran importancia tecnológica, ya que se utiliza en la preparación de *catalizadores*, sustancias que ayudan a acelerar muchas reacciones químicas tanto en el laboratorio como en la industria. También

las reacciones que intervienen en la impresión y revelado de rollos fotográficos guardan estrecha relación con los procesos fotoquímicos en partículas semiconductoras. Sin embargo, el área de mayor futuro es la posible síntesis de sustancias químicas útiles como el hidrógeno y el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a partir de materiales baratos y abundantes como el agua o el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Hasta la fecha, los sistemas fabricados funcionan con muy baja eficiencia de conversión de energía luminosa a energía química. Esto ha hecho pensar a los científicos que, para algunas reacciones como la descomposición del agua, tal vez resulte conveniente diseñar procesos que, en lugar de buscar una transformación directa de fotón por cada electrón, se asemejen más a los mecanismos utilizados por las plantas verdes, los que involucran la absorción de dos fotones de menor energía por cada electrón generado.

Existe una teoría muy interesante que propone que fotorreacciones en partículas semiconductoras -óxido de zinc, por ejemplo- pudieron ser de gran importancia en la evolución de la vida sobre la Tierra. Se ha demostrado que la irradiación con luz solar de una mezcla que contiene amoníaco, metano ( $\text{CH}_4$ ), agua y polvo de  $\text{TiO}_2$  platinizado y dispersado, genera aminoácidos, que son los componentes básicos de las proteínas. Las condiciones del experimento simulan en gran medida las existentes en nuestro planeta hace cientos de miles de años.

## SISTEMAS FOTOELECTROQUÍMICOS

La diferencia básica entre un sistema *fotoelectroquímico* y uno fotoquímico como los descritos en la sección anterior es, precisamente, la presencia de un flujo de carga eléctrica a través de un conductor externo que une las zonas anódica y catódica, separadas físicamente. Este es el mismo criterio que permite distinguir un proceso *químico* de uno *electroquímico*, ya que este último siempre conlleva una transferencia de carga eléctrica a través de una interfase electrodo-electrolito. Si en el diseño de una celda electroquímica convencional se sustituye uno o los dos electrodos metálicos por electrodos semiconductores, se pueden obtener celdas fotoelectroquímicas, ya sean de tipo galvánico o de tipo electrolítico:

a) Una celda fotoelectroquímica de tipo galvánico es aquella diseñada para transformar directamente la energía luminosa en energía eléctrica. A diferencia de una pila galvánica normal en la que los reactivos se consumen, en estos sistemas se busca que las reacciones que suceden en el cátodo y en el ánodo sean iguales pero en sentido contrario. Esto es, una sustancia O que se reduce en el cátodo, transformándose en una especie reducida R, se regenera en el ánodo, donde se lleva a cabo la oxidación de R para dar O. Dado que no hay cambio químico neto de las especies presentes, esta celda permite que la energía luminosa absorbida por el semiconductor sea utilizada directamente como trabajo eléctrico. Por este motivo, estas celdas son llamadas *autorregeneradas*. También, por su clara semejanza con una celda fotovoltaica tradicional, son conocidas como "fotovoltaicas de unión líquida". En general, el término "unión líquida" identifica la presencia de interfases electrolito/electrolito, lo que identifica a los sistemas fotoelectroquímicos y los distingue de los sistemas en estado sólido, como los construidos a base de silicio.

¿Será posible construir una pila galvánica común que sea autorregenerada? No, ya que esto implicaría la obtención ilimitada de energía eléctrica a partir de un sistema químico invariante: una fuente inagotable que desafortunadamente es solo un sueño, una violación al principio de conservación de la energía.

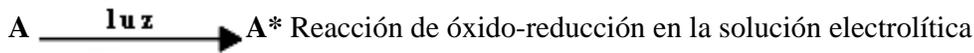
En teoría, una celda fotoelectroquímica autorregenerada parece ser el medio ideal de aprovechar la energía solar. Desafortunadamente esta idea, al llevarse a la práctica, ha puesto en evidencia una gran serie de obstáculos que hasta el momento han impedido una fabricación a gran escala. Estas dificultades serán comentadas en detalle más adelante.

Otro tipo de sistemas llamados *fotogalvánicos*, en vez de utilizar electrodos semiconductores como contadores de la energía solar, emplean sustancias coloridas disueltas en el electrolito. En general, se requieren dos pares redox -A/B y Y/Z por ejemplo- donde A es un colorante que puede absorber la radiación solar (¡Por esta razón tiene color!) y pasar a un estado excitado  $A^*$

Las reacciones en una celda fotogalvánica típica son:

Absorción de energía luminosa:

luz



donde A\* se oxida para formar B, mientras que Z se reduce para formar el compuesto Y

En los electrodos las reacciones son:

Regeneración de la sustancia A en el cátodo:



Regeneración de la sustancia Z en el ánodo: s



Cátodo y ánodo están unidos externamente por un conducto, de tal forma que es posible obtener un flujo de carga y, por tanto, un trabajo eléctrico.

Si la reacción:



ocurriera espontáneamente en condiciones de oscuridad, se tendría una celda galvánica común. El fundamento de la celda fotogalvánica es que se requiere la energía luminosa para promover la excitación:



y es esta especie A\* la que puede reaccionar con Z. Ya que, finalmente, los compuestos se regeneran, se tiene una transformación directa de energía solar a energía eléctrica sin cambio neto. Estos sistemas también presentan dificultades, especialmente por una lenta degradación de las especies químicas y por reacciones secundarias que son difíciles de evitar.

b) En las celdas fotoelectroquímicas de tipo electrolítico, el objetivo principal no es obtener corriente eléctrica sin cambio químico sino, al contrario, utilizar la energía solar para precisamente promover reacciones químicas.

Es una tendencia natural que compuestos con gran contenido energético reaccionen entre sí para generar especies de menor energía, y por esto más estables. La diferencia de energía es liberada hacia los alrededores, generalmente en forma de calor; por lo que estos procesos se denominan *exotérmicos*. En cambio, los procesos *endotérmicos* son aquellos que requieren un suministro de energía para llevarse a cabo. La energía queda entonces contenida como *energía química* en las sustancias producidas. Si la energía proporcionada al sistema es de origen solar se tiene que:

Sustancias de bajo contenido energético (reactivos) + energía solar = sustancias de alto contenido energético

Así, la ventaja de un sistema de este tipo es que no sólo se logra la transformación de la energía solar sino que también queda almacenada en los productos obtenidos.

Uno de los procesos más estudiados, como ya se mencionó anteriormente, es la descomposición de un material abundante como el agua para obtener combustibles como el hidrógeno, de gran utilidad. Esta reacción puede obtenerse utilizando únicamente energía solar o también mediante una combinación de iluminación con potencial aplicado externamente. Este último tipo de procesos se denomina *fotoasistido*, ya que la energía luminosa sólo contribuye parcialmente a la generación de productos.

Las primeras celdas fotoelectroquímicas diseñadas para la reacción:



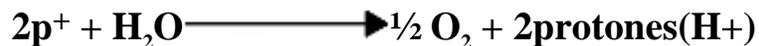
están constituidas por un electrodo semiconductor de  $\text{TiO}_2$  (dióxido de titanio) tipo n, un electrodo de platino (Pt) y una solución acuosa de sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Las semiceldas se unen por un vidrio poroso que hace las mismas funciones que un puente salino.

Al ser iluminado, el semiconductor tipo n actúa como *fotoánodo* y se llevan a cabo dos reacciones:

1) Formación de dos pares electrón-hueco



2) Oxidación del agua:



En el electrodo de platino ocurre la reducción de los protones, liberándose hidrógeno:



El sulfato de sodio presente en la solución no interviene en la reacción y sirve tan sólo para disminuir la resistencia de la celda al paso de cargas.

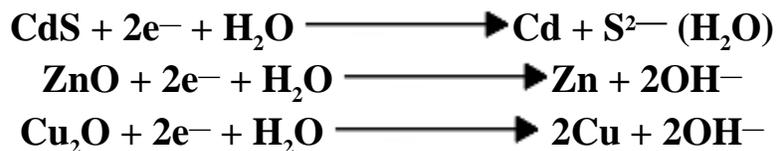
El siguiente paso en el diseño de estas celdas fue sustituir el cátodo de platino por un semiconductor tipo p que actúe como *fotocátodo* y aproveche también la energía luminosa proporcionada al sistema. El material elegido fue el fósforo de galio (**p-GaP**). Al iluminar ambos electrodos, en el **n-TiO<sub>2</sub>** se desprende oxígeno y en el **p-GaP** se genera hidrógeno. El funcionamiento de esta celda depende de que la solución acuosa contenga un ácido o un álcali. Esto se debe a que la concentración de protones (**H<sup>+</sup>**), mucho mayor cuando se utiliza un ácido, influye sobre los potenciales a los que se produce la reducción del protón para formar hidrógeno. Por otra parte, la eficiencia de conversión y el tiempo de vida útil de la celda dependen del tipo de electrolito utilizado. Por ejemplo, el comportamiento del **p-GaP** se deteriora con el tiempo de funcionamiento si se emplean electrolitos de ácido sulfúrico (**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**) mientras que, por el contrario, las soluciones de ácido clorhídrico (**HCl**) mejoran paulatinamente la fotorrespuesta del material. Esto es indicio de posibles reacciones en la superficie del semiconductor, donde éste participa activamente. Estas reacciones suelen ser perjudiciales, pues alteran la constitución química de los electrodos haciéndolos -en muchas ocasiones- inservibles.

## ESTABILIDAD DE LAS CELDAS FOTOELECTROQUÍMICAS

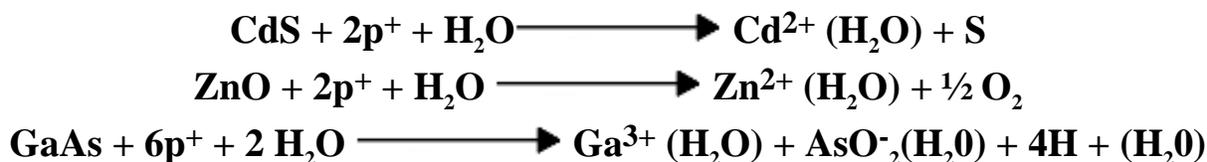
Como se ha mencionado anteriormente, suele suceder que al tratar de pasar de un diseño teórico a una construcción real de la celda fotoelectroquímica surjan diversos obstáculos.

Uno de los principales es la marcada tendencia de muchos materiales semiconductores a reaccionar con el electrólito, especialmente en condiciones de iluminación en las que se generan los pares electrón-hueco ( $e^-/p^+$ ). Algunos ejemplos de estas reacciones son:

Reacciones de reducción por electrones



Reacciones de oxidación por huecos



donde el símbolo ( $\text{H}_2\text{O}$ ) indica que las especies están disueltas en agua. Al igual que para las reacciones de óxidoreducción que se estudiaron anteriormente, a estas reacciones se puede asignar un valor de potencial estándar. Esto permite hacer predicción de reacciones en forma semejante a la utilizada en celdas electroquímicas convencionales.

## ESCALA ABSOLUTA Y ESCALA CONVENCIONAL

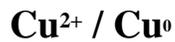
Para estudiar las posibles reacciones entre un electrodo semiconductor y un cierto electrólito, se requiere poder ubicar ambos sistemas dentro de un marco único de referencia. En este caso, resulta necesario contar con una sola escala de energías.

Dentro de la física del estado sólido, el cero de potencial se asigna para el electrón libre en el vacío. Por otra parte, ya se ha mencionado que en electroquímica el cero de potencial corresponde al par redox  $\text{H}^+/\text{H}_2$ . Para relacionar la escala *absoluta* de la física con la convencional referida al electrodo de hidrógeno, se utiliza la siguiente regla:

$$\text{Potencial en escala absoluta} = \text{---} \quad (\text{Potencial en escala convencional} + 4.5 \text{ V})$$

Los potenciales de algunos pares redox, en la escala absoluta seran:





-4.846V

Si se recuerda que la tendencia natural de los electrones es "bajar" hacia niveles de menor energía, se deduce que los pares con menor potencial en escala absoluta son los que más fácilmente se reducen. Un electrón en el nivel del  $\text{Mg}^0$  tendrá una fuerte tendencia a pasar al nivel del  $\text{Cu}^0$ , por lo que, si estos materiales se utilizan en una celda electroquímica, la reacción esperada será que el magnesio actúe como ánodo y el cobre como cátodo.

¿Concuerda esta afirmación con lo establecido con base en los potenciales de electrodo estándar?

La relación entre escalas es también de gran utilidad para la electroquímica con materiales semiconductores, ya que permite establecer la posición de las bandas de energía respecto a los diferentes pares redox.

La energía asociada al proceso en que un electrón se trae del vacío (energía = cero) y se incorpora a un átomo A



es, por definición, la *afinidad electrónica* ( $\chi$ ) del elemento A. En el caso de semiconductores se considera que este electrón se incorpora a la banda de conducción. Por esto, el nivel inferior de esta banda ( $E_c$ ) se coloca por debajo del cero absoluto, una cantidad igual a  $\chi$ . Si se conoce el intervalo o "ancho" de la banda prohibida ( $E_g$ ), resulta entonces sencillo situar el nivel superior de la banda de valencia ( $E_v$ ) ya que

$$E_c = E_v = E_g$$

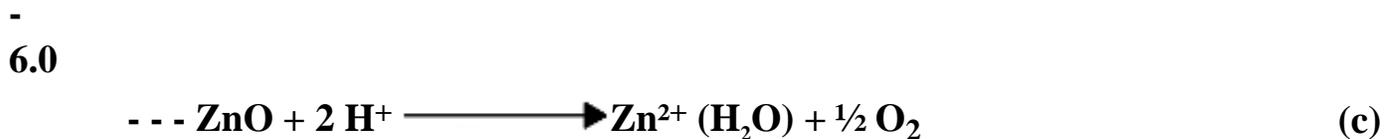
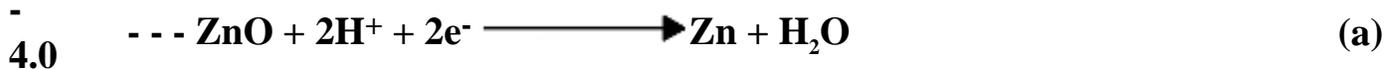
Por ejemplo, para el óxido de zinc (ZnO) la *afinidad electrónica* es 3.9 eV y el ancho de banda prohibida es 3.2 eV. Por lo tanto,  $E_c$  y  $E_v$  están, en la escala absoluta, a -3.9 eV y -7.1 eV respectivamente.

Con estos datos y la transformación a esta escala de los potenciales "redox" de varios sistemas, se puede construir un diagrama como el siguiente:

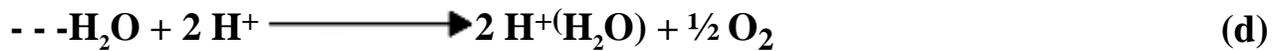
0.0 nivel de vacío

-  
3.0  $E_c$

(ZnO) Potencial de reacción



7.0 Ev (ZnO)



8.0

Se establece, así, una relación directa entre los niveles de energía del semiconductor, los potenciales de reacciones del semiconductor con el electrólito y los de reacciones del propio electrólito. Recuérdese que los huecos ( $\text{h}^+$ ) tienden a "subir" y los electrones ( $\text{e}^-$ ) a "bajar".

Del diagrama anterior se pueden extraer varios datos: El potencial de descomposición por huecos del **ZnO** (reacción c) es más positivo que el potencial asociado a la oxidación del agua (reacción d). Esto significa que la reacción de descomposición está más favorecida y, por tanto, el material será inestable en estas condiciones. Recuérdese que los huecos ( $\text{h}^+$ ) tienden a ocupar el nivel alto posible.

Por otra parte, el potencial de reducción del  $\text{H}^+$  es más negativo que el potencial asociado a la reducción del **ZnO** (reacción a). Esto indica que el proceso de reducción más favorecido es el de obtención de hidrógeno y difícilmente se observará un deterioro en el semiconductor.

Se concluye, por tanto, que el **ZnO** podrá ser utilizado sin problemas para reacciones de reducción, pero será inestable para procesos de oxidación cuando el electrólito sea acuoso y no contenga otros pares redox. Experimentalmente se ha comprobado que en **ZnO**, tipo n, debido a defectos estequiométricos, al ser iluminado y actuar como *fotoánodo*, genera muy poco oxígeno y se deteriora rápidamente. A este fenómeno se le llama *fotocorrosión*.

En el párrafo anterior se indicó que las conclusiones serían válidas, en principio, si el electrólito no contenía otros pares redox. ¿A qué se debe esto?. Se debe a que la presencia de un par redox, cuyo potencial estándar quedara por encima del potencial de descomposición anódica del **ZnO** (reacción c), se convertiría automáticamente en el sistema favorecido para la oxidación. De hecho, esta idea ha sido utilizada ampliamente para buscar sustancias que "protejan" al semiconductor. Ya se ha mencionado que la predicción de posibles reacciones con base en un análisis comparativo de los potenciales, es únicamente una primera guía. En muchos casos, si bien una determinada reacción parece ser la más favorecida de acuerdo con los potenciales, resulta que se lleva a cabo en forma muy lenta y no es, por lo tanto, observable experimentalmente. Uno de los ejemplos más conocidos de esta situación es la reducción del ión  $\text{Cr}^{3+}$ , cuando se utiliza un electrodo de mercurio inmerso en una solución acuosa acidulada que contiene los iones  $\text{Cr}^{3+}$ . El potencial redox para la reacción:



tiene un valor de -0.41 V respecto al par de referencia  $\text{H}_+/\text{H}_2$ . Ya que la solución es acidulada se tiene la posibilidad reacción de reducción de los protones:



Esta última reacción debe ser la más favorecida en un proceso de reducción, ya que su potencial (0.0) es más positivo que el potencial del par  $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{2+}$ . No obstante, experimentalmente no se observa la formación de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y lo que se obtiene es el ión  $\text{Cr}^{2+}$ . Esto se debe a que la reducción de los protones es un proceso muy lento en la superficie de un electrodo de mercurio. Dicha lentitud hace posible la aparición de otras reacciones menos "favorecidas" desde el punto de vista energético, como es el caso de la reducción el  $\text{Cr}^{3+}$ .

Este fenómeno también se observa en algunas reacciones que no son electroquímicas. Por ejemplo, la reacción de formación de agua a partir de hidrógeno y oxígeno:



es un proceso en el que se libera energía y que, por este motivo, debería ocurrir espontáneamente en la naturaleza. En realidad, esta reacción es tan extremadamente lenta en condiciones naturales que para todo fin práctico es como si no ocurriera. Se requiere proporcionar al sistema una gran cantidad de energía inicial (llamada energía de activación) para que la formación de agua ocurra a una velocidad apreciable.

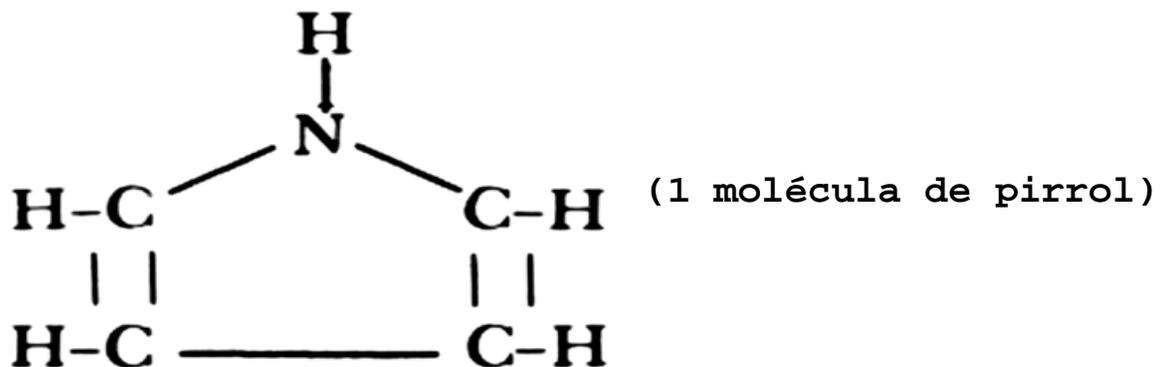
En el caso de los semiconductores, afortunadamente muchos procesos de descomposición también son muy lentos. Esto permite el uso de estos materiales, aun en situaciones en que el análisis de potenciales indica inestabilidad.

Cuando no se cuenta con un par de redox que se oxide fácilmente, existen otras alternativas para evitar la fotocorrosión de los electrodos.

### MODIFICACIÓN DE ELECTRODOS

Así como en ocasiones se evita la corrosión de los metales cubriéndolos con pinturas anticorrosivas, la fotocorrosión se puede disminuir depositando una capa polimérica sobre la superficie del electrodo. Los polímeros son materiales constituidos por largas cadenas de moléculas. Algunos ejemplos muy conocidos son los plásticos, el poliuretano y el polietileno.

El silicio, de tanta utilidad en las celdas fotovoltaicas de estado sólido, no puede ser empleado en una celda fotoelectroquímica. Al contacto con el electrólito acuoso, el silicio reacciona formando un óxido aislante y esa capa de óxido impide la transferencia de electrones e inutiliza el sistema. El problema se presenta aun cuando en vez de agua se utiliza algún otro disolvente orgánico, ya que las pequeñas trazas de agua presentes como impurezas son suficientes para oxidar el semiconductor. Si se recubre el electrodo de Si con una película polimérica, ésta funciona como un impermeabilizante que evita el paso del agua hacia la superficie, y la corrosión disminuye notablemente. Sin embargo, esta película protectora debe ser también conductora, pues de otra forma impedirá el flujo de electrones y el electrodo será inútil. Generalmente, los polímeros tienen baja conductividad, por lo que ha sido necesario buscar otros materiales con buenas características de conducción. Uno de los más utilizados es el polipirrol. Esta sustancia resulta de la oxidación de muchas moléculas de pirrol:



las cuales se unen entre sí para formar cadenas de gran longitud. La oxidación se puede hacer electroquímicamente de tal forma que el silicio, actuando como ánodo, se recubre del polímero. La cantidad de polipirrol formada y, por lo tanto, el espesor de la película, se pueden controlar fácilmente mediante el tiempo de aplicación del potencial.

De acuerdo a la energía asociada a la radiación solar, el máximo aprovechamiento se logra con semiconductores cuya banda prohibida sea aproximadamente 1.6 eV. Desafortunadamente, los materiales con bandas prohibidas menores a 2 eV presentan problemas de estabilidad. Este hecho ha motivado que muchos estudios se realicen con semiconductores como el **ZnO** ( $E_g = 3.2 \text{ eV}$ ) o el **TiO<sub>2</sub>** ( $E_g = 3.2 \text{ eV}$ ). Sin embargo, la fuerte desventaja de estos materiales es que la formación de los pares electrón-hueco requiere fotones de alta energía, cuya longitud de onda se localiza más en la región ultravioleta del espectro que en la visible. La eficiencia de conversión resulta así muy baja, ya que gran parte de la radiación ultravioleta es retenida en las capas superiores de la atmósfera. Una estrategia para superar estas dificultades consiste en recubrir el semiconductor con una película delgada de algún colorante. Esta sustancia, que obviamente absorbe radiación del espectro visible, funciona como un escalón de energía. Los electrones suministrados a la banda de conducción provendrán de la excitación del colorante y no de la formación de un par electrón-hueco en la banda de valencia. El proceso es análogo al que ocurre en los semiconductores impurificados con especies donadoras.

La obtención de una celda fotoelectroquímica de alta eficiencia, bajo costo y larga vida útil es todavía la meta por alcanzar de muchos investigadores, tanto en industrias como en instituciones de educación superior. En el siguiente capítulo se incluye una revisión de los últimos adelantos logrados en fotoelectroquímica, se presenta el desarrollo de esta ciencia y se analiza su participación dentro de las alternativas de búsqueda de nuevas fuentes de energía.

## NOTAS

1 Interfase: frontera entre regiones homogéneas llamadas fases.



## V. FRENTE A UNA NUEVA ERA CON EL SOL COMO ALIADO

EL PAPEL de la energía solar; como respuesta alternativa, a la demanda mundial de energéticos, ha de revisarse en el contexto de las otras opciones existentes.

En el cuadro V.1 se presentan datos comparativos de las fuentes de energía: el porcentaje de su contribución al consumo de energía en el año 1983 y su prospectiva para el año 2000.

Aunque el valor de 0.3 para la electricidad solar puede parecer pequeño, representa el mayor incremento relativo en la contribución de las distintas fuentes. Le siguen los combustibles sintéticos y la electricidad nuclear.

El consumo comparado de energía en el mundo, por tipo de fuente, calculado en mil in Toe, (toneladas equivalentes de carbón), entre los años 1973 y 1983 se presenta en el cuadro V.2.

### Cuadro V.1. Fuentes de energía

(Porcentajes de contribución en el mundo occidental)

	1983	2000
<b>Petróleo crudo</b>	<b>49.0</b>	<b>40.0</b>
<b>Gas natural</b>	<b>17.0</b>	<b>18.0</b>
<b>Carbón</b>	<b>20.0</b>	<b>23.0</b>
<b>Hidroelectricidad</b>	<b>10.0</b>	<b>10.0</b>
<b>Electricidad nuclear</b>	<b>4.0</b>	<b>8.0</b>
<b>Combustibles sintéticos</b>	<b>0.4</b>	<b>0.9</b>
<b>Electricidad solar</b>	<b>0.0</b>	<b>0.3</b>

FUENTE: CICH,  
UNAM. 1985.

### Cuadro V.2. Consumo mundial

de energía por tipo de fuente (mil in Toe)

	1973	1983
<b>Petróleo</b>	<b>2835</b>	<b>2810</b>
<b>Carbón</b>	<b>1 480</b>	<b>1 820</b>
<b>Gas natural</b>	<b>1 015</b>	<b>1290</b>
<b>Hidroelectricidad</b>	<b>330</b>	<b>470</b>
<b>Energía nuclear</b>	<b>50</b>	<b>240</b>
<b>Otras</b>	<b>55</b>	<b>70</b>
<b>TOTAL</b>	<b>5765</b>	<b>6700</b>

FUENTE: CICH, UNAM.  
1985.

En este cuadro se observa un crecimiento en el consumo de carbón, gas natural y sobre todo de energía nuclear, a costa de la disminución del consumo de petróleo, justificada por la crisis del año 1972. Debe notarse

que, a pesar de la llamada "crisis energética", el consumo total de energía aumentó en estos 10 años, si bien disminuyó el consumo del petróleo.

### **Cuadro V.3. Consumo mundial de energía**

**(Porcentaje del consumo total por país o región. Datos 1996)**

<b>América del Norte</b>	<b>29.76</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>25.6</b>
<b>Asia y Australia</b>	<b>25.70</b>	<b>China</b>	<b>9.45</b>
<b>Europa Occidental</b>	<b>18.0</b>	<b>Rusia</b>	<b>8.39</b>
<b>Europa Oriental</b>	<b>16.0</b>	<b>Japón</b>	<b>6.04</b>
<b>América central y América del Sur</b>	<b>3.86</b>	<b>Francia</b>	<b>2.93</b>
<b>Medio Oriente</b>	<b>3.75</b>	<b>Reino Unido</b>	<b>2.75</b>
<b>África</b>	<b>2.86</b>	<b>MÉXICO</b>	<b>1.35</b>
		<b>Brasil</b>	<b>1.29</b>
		<b>Venezuela</b>	<b>0.62</b>
		<b>Argentina</b>	<b>0.58</b>

Los países más industrializados consumen una gran parte de la energía que se produce a nivel mundial:

<i>País</i>	<i>% del consumo mundial (1989) de combustibles fósiles</i>
<b>Canadá</b>	<b>2.5</b>
<b>Estado Unidos de América</b>	<b>24.8</b>
<b>Francia</b>	<b>1.9</b>
<b>Alemania</b>	<b>4.5</b>
<b>Italia</b>	<b>2.2</b>
<b>Inglaterra</b>	<b>2.9</b>
<b>Japón</b>	<b>4.8</b>
<b>Total</b>	<b>43.6</b>

En la siguiente década, de 1990, en países como Australia, Suecia y Canadá, hasta un 5% de su consumo de energía proviene de "otras" (geotérmica, solar; biomasa, vientos).

También es interesante comparar los porcentajes de consumo y generación de energía respecto al porcentaje de población en 1984.

<i>Región</i>	<i>Consumo</i>	<i>Producción</i>	<i>Población</i>
	%	%	%
<b>Europa Oriental, URSS y China</b>	<b>32</b>	<b>35</b>	<b>30</b>
<b>América del Norte</b>	<b>30</b>	<b>26</b>	<b>5</b>
<b>Europa Occidental</b>	<b>17</b>	<b>9</b>	<b>8</b>
<b>Asia (excepto China), Australia y Oceanía</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>34</b>
<b>América del Sur</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>9</b>
<b>Africa</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>11</b>
<b>Medio Oriente</b>	<b>3</b>	<b>11</b>	<b>2</b>

**FUENTE:**  
**CICH,**  
**UNAM,**  
**1985.**

Es importante notar que América del Norte, con sólo un 5% de la población mundial, consume el 30% de la energía total y genera el 26% de la misma. La prospectiva - para el año 2000 en el consumo porcentual, por regiones, resulta muy semejante al calculado en 1984.

La energía solar como alternativa viable en la demanda mundial de energéticos se presentará destacando las siguientes posibilidades:

1. Fotoquímica y fotobiológica
2. Conversión directa en electricidad
3. Celdas fotoelectroquímicas (PEC)

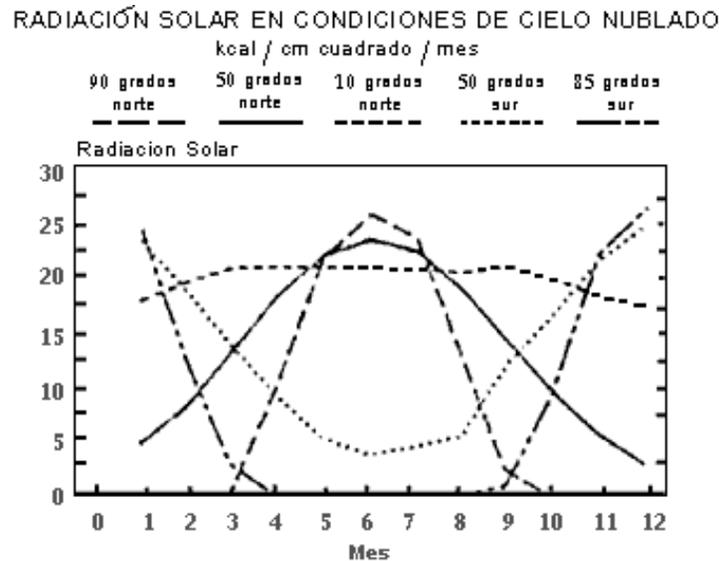
Las otras opciones fundamentales para el abastecimiento de energía a largo plazo -la energía nuclear y la energía obtenida mediante el uso de combustibles sintéticos- no serán descritas en este libro.

### **POSIBILIDADES FOTOQUÍMICAS Y FOTOBIOLOGICAS**

La aportación de la energía solar a la demanda global de energía puede hacerse tan generalizada como la de los sistemas de energía nuclear; si se logra ampliar el intervalo utilizable de radiación electromagnética.

Los métodos para la utilización de la energía solar-aunque actualmente la investigación continúa- tienen la ventaja, en relación con los procesos de fusión, de proveer un uso controlado de la energía solar, como se ha demostrado a lo largo de la historia de la naturaleza en las reacciones fotobiológicas y fotoquímicas. A pesar de que aún estén lejanas las aplicaciones técnicas de dichas posibilidades, las decisiones al respecto dependerán de las políticas de investigación al inicio del próximo siglo, como también serán importantes las

implicaciones sociales, económicas y políticas, en la elección de las opciones energéticas más viables. El factor dominante para el consumo futuro de energía está en razón de la velocidad de crecimiento de la población.



**Figura 39. Según W Palz, Electricidad Solar, UNESCO, 1980**

El curso de la historia, a partir de la crisis del petróleo, ha demostrado las oscilaciones en el interés de los gobiernos por apoyar los proyectos de fuentes alternas de energía y hasta qué punto dependen esos mismos gobiernos de las variaciones del precio y del uso del petróleo, que se han convertido en factores de presión política entre los países con reservas y los importadores. Sin embargo, es bien sabido que las fuentes de energía no renovables, como el petróleo, deben sustituirse a mediano o largo plazo.

Bajo la perspectiva de que el desarrollo de la investigación básica en los campos de la fotobiología y la fotoquímica es de gran interés para el futuro, éste sigue siendo un tema central en las discusiones sobre energéticos. Dentro de este tema es de gran trascendencia la obtención de hidrógeno mediante la fotólisis del agua:



El uso de la energía solar para la producción de hidrógeno consta de tres grupos de procesos técnicos:

- 1) Procesos para la producción de hidrógeno a partir del agua y la luz solar. Abarcan la biofotólisis, la fotocatalisis, fotoelectrólisis, reacciones termoquímicas y la descomposición térmica directa del agua.
- 2) El segundo grupo incluye las técnicas fotovoltaica, termoiónica solar y procesos solares térmicos.
- 3) Este grupo incluye procesos para la producción de hidrógeno usando formas indirectas de energía solar: conversión de la energía térmica de los océanos, conversión de la energía eólica, conversión de la energía de las olas de los océanos, hidropotencia, energía de la biomasa y desperdicios.

La fotólisis del agua, fuera de las células vivas, ocurre utilizando sólo las radiaciones por debajo de 400 nm, lo cual implica un uso de sólo el 10% de la luz que irradia el Sol. Las radiaciones que pueden ser absorbidas directamente por el agua son de longitud de onda menores de 200 nm, lo cual corresponde a una fracción casi despreciable de las radiaciones que llegan a la Tierra: el espectro visible (400 - 700 nm) abarca aproximadamente el 45% de los rayos que inciden sobre la superficie terrestre. Para la fotólisis del agua se requiere un proceso en el cual intervengan varios fotones en la generación de electrones excitables, como es el caso de las plantas, como "sistemas fotosintéticos de transporte de electrones" (pigmento + aceptor de electrones). Esto corresponde a la *posibilidad fotobiológica*. Otro sistema fotosintético de transporte de electrones son los electrodos semiconductores (*posibilidad fotoquímica*). La transferencia de electrones entre el electrodo semiconductor y el electrolito (en este caso el agua) es posible sólo en dos intervalos: en la banda

de conducción (donde ocurre la reducción del agua) o en la banda de valencia (oxidación del agua). Como ya se vio anteriormente, la situación energética de las bandas es típica para cada material semiconductor. Para que tenga lugar una transferencia de electrones, el potencial de la banda de conducción debe estar por arriba del potencial normal  $E_0(\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2)$  o el potencial de la banda de valencia por debajo del potencial  $E_0(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O})$ . Por razones termodinámicas, la banda prohibida debe ser por lo menos de 1.23 eV.

Por iluminación de semiconductores idóneos pueden pasar electrones de la banda de valencia a la de conducción; el semiconductor en el cual ocurre el proceso favorece una rápida separación de cargas (electrones y huecos). La reacción del agua en el semiconductor ocurre sin que sea necesario aplicar un voltaje externo. Uno de los semiconductores más usados para este proceso es el  $\text{TiO}_2$  (óxido de titanio). El óxido de titanio tiene una banda prohibida de 3.0 eV, por lo cual el proceso fotoinducido sólo tiene lugar en un intervalo de longitudes de onda menores de 415 nm; la eficiencia cuántica es menor de 1%. Un electrodo, energéticamente más adecuado que el anterior, es de CdS (sulfuro de cadmio), en el que sin embargo no puede descomponerse el agua. Para ello, se deja ocurrir una reacción redox (como productora de corriente) como, por ejemplo, ferro/ferri cianuro de potasio, con lo cual se alcanza una eficiencia cuántica de 5%, que conlleva una menor estabilidad del electrodo (descomposición anódica del CdS). Por esta razón, se ha intensificado la búsqueda de otros materiales más estables, que tengan mejor comportamiento en nula y baja iluminación, como, por ejemplo, los calcogenuros de metales, de transición ( $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ,  $\text{WSe}_2$ ,  $\text{TeS}_2$ ,  $\text{TeSe}_2$ ).

Recientemente se ha demostrado que un diodo p/n, que consiste en un monocristal de p-Gap y n- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  policristalino, puede descomponer el agua con bajo rendimiento cuántico, cuando se expone a la radiación visible del ultravioleta cercano, en ausencia de potenciales externos.

Así también, dentro de la fotosíntesis, se estudian procesos que se realicen fuera de las células vivas; al mismo tiempo, se intenta optimizar la producción de hidrógeno en microalgas.

¿Por qué es importante la obtención de hidrógeno a partir del agua? Ya hemos visto que el progreso técnico ha estado fuertemente unido al uso de combustibles no renovables, principalmente el petróleo. También sabemos que las reservas que se acumularon durante 70 millones de años se agotarán en una o dos generaciones. Este hecho, unido a la necesidad de conservar el petróleo como materia prima vital para la industria química orgánica -en la producción de productos de plástico, fibras sintéticas, fármacos, colorantes, detergentes y aun, en un futuro, de comestibles- y la creciente contaminación del aire causada por los transportes terrestres y aéreos han creado la necesidad de concertar esfuerzos en la búsqueda de opciones para sustituir el petróleo como combustible.

Del Sol hemos aprendido que es un "reactor de fusión". Provee hidrógeno para la combustión en tales cantidades que la entrada de energía a la superficie de la Tierra está asegurada durante millones de años.

Las ventajas del uso del hidrógeno como combustible sobre otros como los combustibles sintéticos, el metanol, etcétera, son:

Desde el punto de vista técnico y económico, el hidrógeno es la alternativa más adecuada como sustituto del petróleo, ya que -como constituyente del agua- es el elemento más abundante de la naturaleza. Los combustibles sintéticos tienen al respecto la desventaja de que son manufacturados a partir del carbón, en cuyas reservas hay una tendencia decreciente y se espera que para el año 2050 sea escaso y caro

El  $\text{H}_2$  como combustible para máquinas es perfectamente compatible con las de combustión interna, las de Otto y Diesel y las turbinas de gas.

Como combustible para automóviles tiene las siguientes ventajas:

Alta relación masa-energía (aproximadamente 110000 BTU/kg)

Mayor temperatura de auto-ignición ( $585^\circ\text{C}$ ), lo cual permite un grado de compresión más alto.

Promueve una mayor eficiencia de la máquina.

Menor energía de ignición.

Se aproxima más a la "combustión instantánea a volumen constante" ideal del ciclo de Otto.

Amplio intervalo de los límites de inflamabilidad (4 a 75%), lo cual le da una mayor flexibilidad en la selección de las relaciones combustible-aire.

No es contaminante. Elimina el óxido nítrico -único posible contaminante- por reducción.

Ausencia de problemas de condensación de vapor en climas fríos.

## PROBLEMAS DE SEGURIDAD

Es natural que cause preocupación el hecho de que el hidrógeno sea inflamable y explosivo, para efectos de su transporte y uso. Sin embargo, se ha examinado a fondo este aspecto y el resultado ha sido la afirmación de que es posible proveer las precauciones adecuadas. No debe olvidarse que tanto la gasolina como el gas natural y el gas licuado son también peligrosos y, sin embargo, su manipulación es común. Es más, el H<sub>2</sub> presenta al respecto la ventaja de que sus límites inferiores de inflamabilidad y detonabilidad son mayores. Debido a su ligereza y mayor difusibilidad, se facilita su rápida dispersión en la atmósfera, reduciendo así las posibilidades de que su concentración alcance dichos límites en el aire. Su mayor rapidez de combustión, combinada con su baja densidad, hace que las llamas provocadas por el H<sub>2</sub> se eleven en el aire en dos o tres minutos, por lo que son menos destructivas que las de otros combustibles. Las muertes por sofocación causadas por los gases tóxicos producidos en las llamas de los combustibles son imposibles en el caso del hidrógeno, ya que el producto de su combustión es solamente el agua.

Sus grandes desventajas con respecto a la seguridad son la facilidad con que puede escapar y el hecho de que su flama es invisible. Para evitar lo anterior se han desarrollado métodos adecuados de detección.

## PROBLEMAS EN EL TRANSPORTE DEL HIDRÓGENO

Las razones por las cuales no se ha extendido el uso del hidrógeno como una alternativa comercial práctica son:

- 1) No ser condensable debido a su ligereza. Esto causa que sus tanques de transporte deban ser muy voluminosos.
- 2) Es más difícil diseñar las redes de distribución.
- 3) Su costo es más elevado.

## Consumo comparativo de electricidad respecto al total de energía consumida. Datos 1996.

<i>País</i>	<i>Porcentaje de consumo de electricidad (hidroeléctrica) respecto al consumo total de energía</i>	<i>Porcentaje de consumo de electricidad (nuclear) respecto al consumo total de energía</i>	<i>Porcentaje de consumo de electricidad respecto al consumo total de energía</i>
<b>Noruega</b>	<b>48.3</b>	<b>-</b>	<b>48.3</b>
<b>Francia</b>	<b>2.3</b>	<b>40</b>	<b>42.3</b>
<b>Canadá</b>	<b>12.0</b>	<b>12.5</b>	<b>24.5</b>
<b>Brasil</b>	<b>20.7</b>	<b>-</b>	<b>20.7</b>

<b>España</b>	<b>2.5</b>	<b>15.24</b>	<b>17.74</b>
<b>Alemania</b>	<b>0.48</b>	<b>11.7</b>	<b>17.74</b>
<b>Reino Unido</b>	<b>0.27</b>	<b>10.5</b>	<b>10.77</b>
<b>Estados Unidos</b>	<b>1.05</b>	<b>8.55</b>	<b>9.60</b>
<b>Venezuela</b>	<b>9.12</b>	<b>-</b>	<b>9.12</b>
<b>Argentina</b>	<b>4.30</b>	<b>4.53</b>	<b>8.83</b>
<b>Rusia</b>	<b>2.3</b>	<b>3.8</b>	<b>6.1</b>
<b>India</b>	<b>2.8</b>	<b>0.6</b>	<b>3.4</b>
<b>MEXICO</b>	<b>2.14</b>	<b>1.03</b>	<b>3.17</b>
<b>China</b>	<b>1.94</b>	<b>0.4</b>	<b>2.34</b>

Estas desventajas deben dejar de ser relevantes dentro de unos 30 años comparadas con la inevitable elevación de los precios del petróleo. Existen tres posibilidades para hacer más compacto su almacenamiento.

1) Comprensión a altas presiones en cilindros de acero de paredes muy gruesas.

2) Licuefacción.

3) Almacenamiento dentro de compuestos químicos como los hidruros metálicos.

## **CONVERSIÓN DIRECTA DE LA ENERGÍA SOLAR EN ELECTRICIDAD**

La energía proveniente de cualquier sistema es -en principio- convertible a electricidad. Sin embargo, todos los procesos que tienen lugar en esta transformación están sujetos a pérdidas de energía: Los generadores de electricidad como los motores diesel o de gasolina, las turbinas de gas, las centrales de energía geotérmica, los diodos termoiónicos y los generadores termoeléctricos, entre otros, están limitados por el llamado rendimiento de Carnot (no son 100% eficientes). Otros generadores tienen otro tipo de limitaciones. Por ejemplo, los hidroeléctricos tienen pérdidas por fricción, o por la evaporación del agua de los depósitos; los molinos de viento dependen de la constancia de la velocidad del viento; las celdas solares están limitadas por el porcentaje de radiación que pueden absorber y las lógicas fluctuaciones de la misma.

## **CELDA SOLARES DE ESTADO SÓLIDO**

La celda solar fotovoltaica es un dispositivo semiconductor en estado sólido, que produce electricidad útil en forma de un voltaje directo, y un flujo de corriente a partir de la conversión directa de la radiación luminosa del Sol, por medio del llamado efecto fotovoltaico. Este efecto implica la formación de pares electrón-hueco, la separación de los portadores de carga en una zona no homogénea (como un contacto metal-semiconductor o una unión p-n) y la movilidad de las cargas que deberán permanecer separadas por un tiempo considerable antes de recombinarse. La separación de las cargas es el origen del voltaje. La formación, movilidad y lenta recombinación de los pares electrón-hueco, generados por la absorción de los fotones, dan lugar al flujo de corriente.

Ya en la década de 1940 se conocían los aspectos fundamentales del comportamiento de materiales semiconductores, especialmente los aplicados a dispositivos electrónicos, pero hasta mediados de la década de 1950 no se concretó el uso de estos materiales en el aprovechamiento de la energía solar. En 1954, Chapin, Fuller y Pearson fabricaron un sistema de unión p-n utilizando silicio monocristalino con una eficiencia de conversión del 6%. Comercializado al año siguiente, este dispositivo continúa siendo el más conocido y difundido.

Es conveniente clasificar las celdas fotovoltaicas de acuerdo con la macro y microestructura del material con el que están constituidas. Se tienen tres tipos:

*Monocristalinas:* Básicamente son las constituidas por silicio monocristalino. Son las de mayor eficiencia debido a su estructura cristalina, pero también son las más costosas. Se utilizan en arreglos con o sin concentradores de luz.

Los elevados costos de preparación y purificación del silicio, con características adecuadas para ser utilizado como semiconductor en las celdas solares (esto es, unas 0.2 ppb de impurezas), así como las pérdidas de material en los procesos de corte y pulido, constituyen grandes obstáculos que hasta el momento han impedido el uso generalizado de estas celdas.

A la fecha no se ha establecido con certeza cuál es la pureza mínima requerida para el Si en celdas solares (Si "grado solar") en comparación con el silicio grado "metalúrgico" -que es la materia prima en la mayor parte de los procesos de purificación- o con el silicio empleado en circuitos: Si grado "electrónico".

*Policristalinas:* Se presentan en general en forma de películas delgadas fabricadas por diversas técnicas o por fusión y sintetización de algunos materiales. Su producción es menos costosa pero tienen problemas de estabilidad y baja eficiencia debido a una alta concentración de defectos cristalinos que favorecen la recombinación de los electrones y huecos.

*Amorfas:* Son las constituidas por materiales amorfos. Su preparación se realiza en forma de películas delgadas utilizando como materia prima compuestos orgánicos que contienen silicio. En la actualidad se han intensificado los estudios sobre estos sistemas, con la esperanza de poder fabricar celdas solares de bajo costo, aunque aún quedan muchos detalles y problemas por resolver.

Otro punto a considerar en el desarrollo de celdas de silicio de estado sólido es el llamado "periodo de retorno energético", que es el tiempo que tiene que transcurrir antes de que la energía invertida en la fabricación de la celda pueda recuperarse en forma útil. Actualmente se consume tanta energía en la producción de las celdas que dicho periodo es de casi 20 años en celdas monocristalinas, de 5 a 10 años en celdas con Si policristalino y de menos de un año con Si amorfo. Esto indica que no basta con obtener un dispositivo de alta eficiencia de conversión, sino que se requiere que su vida útil sea apreciablemente mayor que el periodo de retorno energético. Esta situación sugiere que las únicas celdas con un futuro prometedor sean las de silicio amorfo y las fotoelectroquímicas. Estas últimas, con mejores perspectivas si se aplican en procesos fotosintéticos y fotocatalíticos que en la conversión directa a electricidad.

De la misma manera que en las celdas de estado sólido, los materiales amorfos constituyen una magnífica posibilidad de obtener celdas de uso generalizado, en las celdas fotoelectroquímicas se están investigando diversas opciones que incrementen la eficiencia de conversión y abatan los costos de operación.

*Modificación:* La estructura superficial de los electrodos puede alterarse en forma controlada. Esto se logra mediante la absorción de diferentes materiales que quedan fuertemente unidos al sustrato. De esta manera, se cambia la naturaleza química del electrodo, se aumenta el área de contacto con la solución electrolítica o se evita la corrosión y fotocorrosión del material.

*Sensibilización:* El empleo de sustancias coloridas, ya sea disueltas en el electrolito o unidas superficialmente al electrodo, contribuye a incrementar el intervalo de radiación luminosa absorbida. Esta técnica se conoce como "sensibilización por colorante" y se utiliza principalmente con materiales semiconductores cuya banda prohibida es demasiado grande (mayor de 2.5 eV).

*Dispersión:* La obtención de partículas semiconductoras de tamaño muy pequeño permite la preparación de dispersiones. Ya que cada partícula puede contener una región metalizada, se tiene un sistema equivalente a miles de pequeñas celdas fotoelectroquímicas, donde cátodo y ánodo se encuentran en la misma partícula.

La investigación en dispersiones de semiconductores ha contribuido al desarrollo de nuevas teorías de la evolución de la vida de nuestro planeta. Ya se vio en un capítulo anterior cómo el óxido de hierro policristalino, impurificado con silicio o con magnesio, cataliza la producción de hidrógeno bajo la irradiación solar. La abundancia de Fe, Mg y Si en el manto terrestre asegura que el hidrógeno pueda ser fotoproducido en grandes cantidades a partir del agua. Una vez producido el hidrógeno, es posible que se realicen las

subsecuentes reacciones catalizadas, con  $\text{CO}_2$  y  $\text{N}_2$  para la producción de hidrocarburos y amoniac. Así, la serie de reacciones que empiezan en la fotodescomposición del agua puede producir moléculas orgánicas y oxígeno, configurando una fotosíntesis preclorofilica.

Por otra parte se ha demostrado que la irradiación con luz solar de una mezcla que contiene amoniac, metano ( $\text{CH}_4$ ), agua y dióxido de titanio platinizado y dispersado, promueve la formación de compuestos orgánicos llamados aminoácidos, que son los componentes básicos de las proteínas. Dado que las condiciones del experimento intentan simular las que existían en nuestro planeta hace miles de años, se puede pensar que ciertos mecanismos fotoelectroquímicos fueron decisivos en la evolución de los seres vivos. El intento del hombre por conquistar la energía solar resulta, así, una gran empresa para el futuro que puede ayudarle a desentrañar los misterios de su pasado.



## VI. EL CONSUMO DE ENERGÍA EN EL SIGLO XXI

EL AVANCE de la ciencia y la tecnología no necesariamente tiene un efecto positivo en la calidad de vida de los seres que habitamos en este planeta: a diario recibimos noticias sobre el efecto invernadero, la lluvia ácida, la contaminación causada por los motores de combustión interna, el retraso mental ocasionado en muchos niños por los altos niveles de plomo en su sangre y la destrucción de miles de vidas jóvenes a causa de las drogas, cada vez más poderosas y al mismo tiempo más accesibles porque su producción en gran escala ha ocasionado que su precio disminuya.

Al acercarnos al inicio del siglo XXI, el desarrollo científico y tecnológico ha tomado un ritmo tan vertiginoso que, en ocasiones, parece amenazar el futuro de la misma sociedad que lo ha impulsado.

Por lo anterior, cuando estamos a punto de iniciar un nuevo siglo, se considera que la ciencia debe enfocarse a alcanzar un mayor beneficio para la humanidad y para lograrlo deberían darse más recursos para impulsar la investigación en las siguientes áreas:

Desarrollo industrial y tecnológico que no cause el deterioro del medio ambiente.

Divulgación de la ciencia para que los ciudadanos tengan un mejor nivel de conocimientos y puedan tomar mejores decisiones.

Mecanismos para regular el aumento de la población y lograr que todos los seres humanos cuenten con una alimentación balanceada y tengan acceso a los servicios de atención médica, educación, etcétera.

Uso racional y eficiente de la energía.

Respecto a este último punto, en los capítulos anteriores hemos visto cómo la electroquímica, la fotoelectroquímica, la energía solar y el uso del hidrógeno, representan oportunidades para que la humanidad cuente con una gran cantidad de energía "limpia", esto es, con muy bajo impacto en el medio ambiente.

Por desgracia, el costo para crear nuevas tecnologías y mantener centros de investigación, así como la inercia de muchos años de consumir otros combustibles, han impedido que las fuentes limpias de energía se vuelvan de uso cotidiano. Todavía, la mayor parte de la humanidad obtiene la energía quemando recursos no renovables como el petróleo, o materiales como la leña, un recurso difícilmente recuperable, ya que la destrucción de los bosques es un proceso mucho más rápido que la reforestación.

Como se mencionó en la introducción de este libro, la crisis de energéticos de la década de 1970 originó un gran auge en la investigación y desarrollo de nuevas fuentes de energía, sin embargo, este entusiasmo ha disminuido debido a que el precio de los combustibles fósiles sigue siendo relativamente bajo. No obstante, muchos expertos aseguran que si la humanidad no toma las precauciones necesarias, a principios del siglo XXI sufriremos una nueva crisis energética que será de mayor magnitud que la vivida hace 25 años.

En el cuadro VI.1, que contiene datos obtenidos en 1996, observamos que en muchos países la combustión

del petróleo, carbón y gas natural sigue contribuyendo en gran medida a la obtención de energía.

Para reducir el consumo de combustibles será necesario incrementar el uso de energías renovables, como la biomasa, el viento y la energía solar. También será útil generar electricidad con base en plantas hidroeléctricas o geotérmicas. Respecto al uso de la energía nuclear; todavía no existe un acuerdo que permita establecer si los beneficios de usar esta energía justifican los riesgos que implica.

En el cuadro VI.2 podemos observar que los pronósticos para el futuro cercano todavía indican que, a nivel mundial, continuará en gran escala el quemado de combustibles fósiles, y el uso de otras fuentes de energía aumentará en forma muy lenta:

**Cuadro VI.2. Pronósticos del porcentaje de la energía total que provendrá de cada una de las fuentes indicadas a nivel mundial.**

	<i>2000</i>	<i>2010</i>
	<i>(porcentaje)</i>	<i>(porcentaje)</i>
<b>Combustibles sólidos</b>	<b>30.3</b>	<b>30</b>
<b>Petróleo</b>	<b>41.2</b>	<b>40.1</b>
<b>Gas</b>	<b>23</b>	<b>24.7</b>
<b>Energía Nuclear</b>	<b>2.52</b>	<b>2.13</b>
<b>Hidroelectricidad</b>	<b>2.86</b>	<b>2.85</b>
<b>Solar,</b>		
<b>Geotérmica,</b>		
<b>Biomasa, etc.</b>	<b>0.081</b>	<b>0.13</b>

FUENTE: Departamento de Energía del Reino Unido, a través de su página electrónica cuya dirección es <http://www.energyinfo.co.uk>

**Cuadro VI.1 Porcentaje de la energía total consumida en cada país, que proviene del quemado de los combustibles indicados.**

**País Petróleo Gas Natural Carbón TOTAL**

<i>País</i>	<i>petróleo</i>	<i>Gas natural</i>	<i>Carbón</i>	<i>Total</i>
<b>Alemania</b>	<b>40</b>	<b>18</b>	<b>29</b>	<b>87</b>
<b>Argentina</b>	<b>42</b>	<b>47</b>	<b>1.7</b>	<b>90.7</b>
<b>Brasil</b>	<b>65</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>79</b>
<b>Canadá</b>	<b>36</b>	<b>28.5</b>	<b>11</b>	<b>75.5</b>
<b>China</b>	<b>19</b>	<b>2</b>	<b>76</b>	<b>97</b>
<b>Dinamarca</b>	<b>49</b>	<b>12</b>	<b>39</b>	<b>100</b>
<b>España</b>	<b>56</b>	<b>7</b>	<b>19</b>	<b>82</b>
<b>Estados Unidos</b>	<b>40</b>	<b>26</b>	<b>24</b>	<b>90</b>
<b>Francia</b>	<b>39</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>57</b>
<b>India</b>	<b>32</b>	<b>7.4</b>	<b>57</b>	<b>96.4</b>

<b>MEXICO</b>	<b>71</b>	<b>22</b>	<b>3.7</b>	<b>96.7</b>
<b>Reino Unido</b>	<b>38</b>	<b>28</b>	<b>23</b>	<b>89</b>
<b>Rusia</b>	<b>24.5</b>	<b>50.5</b>	<b>4</b>	<b>79</b>
<b>Venezuela</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>0.6</b>	<b>90.6</b>

FUENTE: Departamento de energía del Reino Unido, a través de su página electrónica cuya dirección es <http://www.energyinfo.co.uk>

De acuerdo con los datos mostrados, todo parece indicar que de no existir un mayor nivel de conciencia en nuestra sociedad, no se dará la importancia debida al desarrollo de fuentes limpias de energía. Por esta razón, las sociedades científicas están muy preocupadas por aumentar el conocimiento científico entre la población en general. Sólo con base en una mejor educación y con la participación de todos nosotros, podremos lograr que la próxima crisis energética no nos tome por sorpresa.

Para poner nuestro granito de arena en la lucha por un mundo mejor debemos preguntarnos:

¿Qué hago yo para reducir el consumo de energía?

Un buen consejo es seguir lo que se conoce como la regla de las tres letras "R":

Reducir Reutilizar Reciclar



# BIBLIOGRAFÍA

Alonso Concheiro, Antonio Luis Rodriguez Viqueira *Alternativas energéticas*, México, FCE, 1985, Colección Ciencia y Tecnología.

Brescia, E, S. Mehlman, E C. Pellegrini, S. Stambler, *Química*, México, Nueva Editorial Interamericana, 1977.

García-Colín S., Leopoldo, *De la máquina de vapor al cero absoluto (Calor y entropía)*, México, FCE, 1986, Colección La Ciencia desde México.

Chang, Raymond, *Química*, México, McGraw-Hill, 4a edición, 1992.

Hernández Lerma, Onésimo, *Elementos de probabilidad*. México, FCE.

Palz, Wolfgang, *Electricidad solar*, Barcelona Editorial Blume, UNESCO, 1980.

Walker; David, *Energy, plants and man. Readers in Plant Productivity*, Inglaterra, Packard Publishing Ltd. 1979.

*World Resources 1992-1993*, Nueva York, Oxford University Press, 1992.



**SUSANA CHOW PANGTAY**

*Petroquímica y sociedad*

La doctora Susana Chow Pangtay formula en *Petroquímica y sociedad* una interrogante muy seria: "¿Qué pensarían los seres humanos si se les propusiera talar todos los bosques del mundo para transformar sólo el 7% de la madera en muebles y papel y el resto convertirlo en leña y carbón?" La cuestión es muy pertinente puesto que es lo que se está haciendo en la actualidad con el petróleo y el gas natural. Así, el alto consumo de gasolinas y de gas licuado afecta el precio y la disponibilidad de los derivados del petróleo cuyos usos, gracias a la petroquímica, se han extendido a tal grado que prácticamente no hay rama de la actividad humana en la que no intervenga algún derivado del petróleo. En su Presentación a este libro, el doctor Francisco Barnés de Castro invita en broma al lector a desprenderse de cualquier prenda de vestir en la que no intervenga una alta proporción de materiales sintéticos derivados de la petroquímica; recomienda al que haga la prueba refugiarse en la intimidad del hogar, ya que incluso el material elástico que sostiene la ropa interior incluye derivados del petróleo.

No extraña así que la parte central de esta obra se encuentre enfocada al uso extenso de los petroquímicos en nuestra vida diaria. Simultáneamente, se explica también el grado de complejidad que acompaña a cada uno de los procesos utilizados en la industria petroquímica.

LA CIENCIA PARA TODOS #39

coedición de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

el CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

y el FONDO DE CULTURA ECONÓMICA.

1a. edición, 1987; 4ta. reimp., 1995; 192 pp.

ISBN 968-16-2669-9

**JOSÉ LUIS CÓRDOVA FRUNZ**

*La química y la cocina*

La química y la cocina son actividades que emplean intuición, imaginación y capacidad creadora. Ambas se apoyan en el trabajo y los hallazgos de gran cantidad de personas que han sabido disfrutar y compartir el gozo de su actividad. Si bien el diario disfrute de la cocina es incuestionable, cabe preguntarse por qué la química, como ciencia y como profesión, ha sido una actividad que ha despertado poco interés y entusiasmo entre los jóvenes. Entre las posibles respuestas, el autor cree que el enfoque disciplinario y la falta de ejemplos cotidianos llevan a una pérdida de curiosidad y de capacidad de asombro. Terreno particularmente fértil para ilustrar los principios de la química es la cocina, pues una bien equipada tiene más de 200 reactivos químicos y emplea procedimientos semejantes a los de un laboratorio. Muchas de las reacciones químicas que ocurren en la cocina (como añadir tequesquite a los nopales) tienen una explicación científica que ilustra y respalda a la inobjetable experiencia culinaria. Una de las formas en que se puede lograr el interés por la química es mostrando que tiene que ver con la vida de todos los días. Como la cocina.

LA CIENCIA PARA TODOS #93

coedición de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

el CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA y el FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

1a. edición, 1990; 4ta. reimp., 1996; 160 pp.

ISBN 968-16-3568-X

## **ALFONSO ROMO**

*Química, Universo, Tierra y vida*

Astrónomos y físicos postulan que el Universo tuvo su origen en una gran explosión que, a partir de un gas denso, formó las innumerables galaxias dentro de una de las cuales, la Vía Láctea, vive el hombre. Cuando la temperatura del mundo creado por la gran explosión era de alrededor de mil millones de grados, se formaron los elementos más simples, el hidrógeno y el helio; mucho más tarde, en el interior de las estrellas, se desarrollaron otros elementos hasta llegar a un número cercano a cien. Puede verse así que, en cierta forma, la historia de nuestro Universo puede definirse, de una manera muy general, como una reacción o serie de reacciones químicas de magnitud infinita cuyos pasos define el título de este libro: Química, Universo, Tierra y vida.

Hasta donde se sabe, las reacciones químicas se producen en forma espontánea en el cosmos, donde se forman de manera lenta sustancias sencillas. Mas en nuestro pequeño planeta las reacciones químicas ocurren de manera más rápida y dan lugar a moléculas mucho más complicadas, debido sobre todo a la presencia de oxígeno en el aire y en el agua en todas las formas en que se presenta. Así, el hierro dejado a la intemperie se cubre de herrumbre a causa de una oxidación espontánea; una oxidación más vigorosa y de violencia explosiva es, también a causa de una oxidación súbita, la combustión de la dinamita.

### LA CIENCIA PARA TODOS #5 1

coedición de la SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA el CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

y el FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

1a. edición, 1988; 5ta. reimp., 1996; 168 Pp.

ISBN 968-16-2705-9



En el segundo tercio de nuestro siglo se iniciaron en serio los estudios para el aprovechamiento de la energía solar como una alternativa a la que el hombre obtiene mediante el consumo de combustibles, como el petróleo y el carbón por citar los más conocidos. Se han probado así automóviles, satélites, sistemas de riego y baterías que funcionan captando la energía solar mediante celdas que transforman la energía asociada a la radiación en energía eléctrica.

Se sabe también que las plantas aprovechan la luz solar para almacenar energía en los productos químicos que sus raíces obtienen de la tierra, en el proceso llamado fotosíntesis. Los sistemas de aprovechamiento de la energía solar creados por el hombre presentan cierta analogía con los de las plantas, pero la diferencia principal es que las celdas de silicio que el hombre emplea para esta finalidad generan un potencial eléctrico y una corriente que alimenta un circuito externo.

El presente libro está pensado por sus autores como una explicación detallada y amena, de cómo la química puede conquistar la energía solar, campo de la ciencia de extensión increíble y en cuyos umbrales apenas nos encontramos, pese a que el hombre lo ha intuido desde sus comienzos, lo que explica por qué nuestros más remotos antepasados entronizaron al Sol como un dios, posición que ocupó a lo largo de milenios.

Se aborda un tema aún no resuelto: cómo se transforma un fotón en un electrón capaz de producir una reacción química. La hipótesis se expone con mayores visos de certeza y se describen los materiales capaces de hacerlo posible.

Se analiza la estructura de los semiconductores y las características que les permiten intervenir en los procesos fotoeléctricos.

Magdalena Rius se recibió de química farmacéutica bióloga en la Universidad Femenina de México. Posteriormente se doctoró en fisicoquímica en la UNAM y realizó estudios de especialización en el Instituto de Fisicoquímica de Gotinga, Alemania. Se ha dedicado a la docencia y a la investigación en la UNAM. Carlos Mauricio Castro-Acuña se doctoró en fisicoquímica en la UNAM y se ha dedicado a la docencia y a la investigación científica. Considera que disciplinas como la química debieran ser enseñadas prescindiendo de la memorización y el lenguaje abstracto y en forma más ligada a nuestra realidad. Por eso cita a Einstein: "La mayoría de las ideas científicas son esencialmente simples y pueden expresarse en un lenguaje comprensible para cualquiera."



# COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F

Este libro se termino de imprimir y encuadernar el mes de agosto de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso S.A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 Mexico D.F.

Se tiraron 3000 ejemplares.

## **La Ciencia para Todos**

es una colección coordinada editorialmente

por Marco Antonio Puido

y María del Carmen Farias.

Indice

