

# Mundo Siglo XXI

Revista del Centro de Investigaciones Económicas,  
Administrativas y Sociales del Instituto Politécnico Nacional

**FRANK DEMUESTRA**  
**EL MILAGRO EUROPEO**  
**IMMANUEL WALLERSTEIN**

**LOS GRANDES TEÓRICOS**  
**DEL CAPITALISMO**  
**HÉCTOR GUILLÉN ROMO**

**MÉXICO EN LA COYUNTURA**  
**ENERGÉTICA MUNDIAL**  
**ROLANDO JIMÉNEZ/ELIZABETH JAIMES/  
LUCÍA MORALES**

**EL SECTOR ELÉCTRICO EN MÉXICO**  
**JOSÉ NAVARRO/ZACARIAS TORRES**

**ALTERNATIVAS BIOENERGÉTICAS**  
**Y SUSTENTABILIDAD**  
**MA. DEL PILAR LONGAR/ANA MOLINA/JACOBO MORALES**

**LOS SABERES DEL**  
**ECONOMISTA MEXICANO**  
**GUILLERMO DOMÍNGUEZ**

**LA ÉTICA PROFESIONAL**  
**Y LA EDUCACIÓN**  
**GREGORIO SÁNCHEZ**





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

DIRECTORIO

**José Enrique Villa Rivera**  
Director General

**Efrén Parada Arias**  
Secretario General

**José Madrid Flores**  
Secretario Académico

**Luis Antonio Ríos Cárdenas**  
Secretario Técnico

**Luis Humberto Fabila Castillo**  
Secretario de Investigación y Posgrado

**Manuel Quintero Quintero**  
Secretario de Extensión e Integración Social

**Víctor Manuel López López**  
Secretario de Servicios Educativos

**Mario Alberto Rodríguez Casas**  
Secretario de Administración

**Luis Eduardo Zedillo Ponce de León**  
Secretario Ejecutivo de la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas

**Jesús Ortiz Gutiérrez**  
Secretario Ejecutivo del Patronato de Obras e Instalaciones

**Luis Alberto Cortés Ortiz**  
Encargado del Despacho de la Oficina del Abogado General

**Fernando Fuentes Muñiz**  
Coordinador de Comunicación Social

**Arturo Salcido Beltrán**  
Director de Publicaciones

**Mario Sánchez Silva**  
Director del Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales

# Índice

**Editorial** 1

## Fundamentos y Debate

 **Immanuel Wallerstein**  
*Frank demuestra el milagro europeo* 5

 **Héctor Guillén Romo**  
*Los grandes teóricos del capitalismo* 15

 **Rolando Jiménez/Elizabeth Jaimés/Lucía Morales**  
*México en la coyuntura energética mundial* 25

 **José Navarro/Zacarías Torres**  
*Eficiencia técnica y asignativa del sector eléctrico en México en su fase de distribución: un análisis a través de los modelos de frontera DEA* 35

 **Ma. del Pilar Longar /Ana Molina/Jacobo Morales**  
*Alternativas bioenergéticas y sustentabilidad* 45

## Artículos y Miscelánea

 **J. Guillermo Domínguez**  
*Los saberes del economista mexicano* 53

*Mundo Siglo XXI* es una publicación del Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales del Instituto Politécnico Nacional. Año 2007, número 7, revista trimestral, octubre 2006. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título Número 04-2005-062012204200-102, Certificado de Licitud de Título Número 13222, Certificado de Licitud de Contenido Número 10795, ISSN 1870 - 2872. Impresión: Estampa artes gráficas, privada de Dr. Márquez No. 53. Tiraje: 2,000 ejemplares. Establecimiento de la publicación, suscripción y distribución: Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales, IPN, Lauro Aguirre No. 120, Col. Agricultura, C.P. 11360, México D.F., Tel: 5729-60-00 Ext. 63117; Fax: 5396-95-07. e-mail: ciecas@ipn.mx. Precio del ejemplar en la República mexicana: \$40.00. Las ideas expresadas en los artículos son responsabilidad exclusiva de los autores. Se autoriza la reproducción total o parcial de los materiales, siempre y cuando se mencione la fuente. No se responde por textos no solicitados.

# Mundo Siglo XXI



*Mundo Siglo XXI*

**Luis Arizmendi**  
Director

## CONSEJO EDITORIAL

Jaime Aboites, Víctor Antonio Acevedo, Carlos Aguirre, Francisco Almagro (Cuba), Guillermo Almeyra (Argentina), Elmar Altvater (Alemania), Jesús Arroyo, Guillermo Aullet, Alicia Bazarte, Sergio Berumen, Julio Boltvinik, Joel Bonales, Atilio Borón (Argentina), Roberto Castañeda, Filiberto Castillo, Axel Didrikson, Bolívar Echeverría (Ecuador), Carlos Fazio, Magdalena Galindo, Alejandro Gálvez, Juan González García, Jorge Gasca, Diódoro Guerra, Oscar Guerra, Héctor Guillén (Francia), John Holloway (Irlanda), Michel Husson (Francia), Ramón Jiménez, Argelia Juárez, María del Pilar Longar, Luis Lozano, Irma Manrique, Ramón Martínez, Francis Mestries, Humberto Monteón, Alberto Montoya, David Moreno, Alejandro Mungaray, Abel Ogaz, Enrique Rajchenberg, Federico Reina, Humberto Ríos, Gabriela Riquelme, Luis Arturo Rivas, Blanca Rubio, Américo Saldivar, José Augusto Sánchez, John Saxe-Fernández (Costa Rica), Horacio Sobarzo, José Sobrevilla, Abelino Torres Montes de Oca, Carlos Valdés, Guillermo Velázquez

**David Márquez**  
Diseño Gráfico

**Xóchitl Morales**  
Corrección de Estilo  
y Formación

**Octavio Aguilar**  
Corrección de Estilo

**Raquel Barrón**  
Secretaria

 **Gregorio Sánchez Oropeza**  
*La ética profesional: compromiso social y educativo* 65

 **Joaquín Mercado Yebra**  
*Uniones de crédito* 73

 **Alberto Balderas/Joas Gómez/Héctor Allier**  
*Impacto de la Apertura Comercial y la Inversión Extranjera Directa en el Crecimiento de las Pymes* 83

 **Javier Pérez Corona**  
*La Ciudad: pensamiento crítico y teoría* 89

## Proyección CIECAS

 **Manuel Díaz Mondragón**  
*La tasa de interés de referencia para el año 2007* 93

 **Breve Semblanza del CIECAS** 96

 **Homenaje postumo a la maestra**  
*María de Lourdes Sánchez Gutiérrez* 102

*Mundo Siglo XXI* agradece ampliamente al profesor Sergio Elisea por facilitarnos el acceso a una de sus más recientes pinturas, *Los laberintos de la globalización*, para elaborar con base en ella nuestra portada.

# México en la coyuntura energética mundial

ROLANDO JIMÉNEZ DOMÍNGUEZ\*

ELIZABETH JAIMES LEZAMA\*\*

LUCÍA MORALES MENESES\*\*\*

**RESUMEN:** El presente trabajo examina de manera panorámica la situación actual de los energéticos en México y las opciones para el corto y mediano plazo; todo ello desde el punto de vista técnico, pero sin perder de vista el hecho de que todas las decisiones que se tomen en relación con la energía deberán hacerse en un entorno económico y político de gran complejidad. El escenario mexicano se inscribe dentro del escenario mundial actual. Se destaca la necesidad del desarrollo y uso intensivo de fuentes renovables de energía, la adopción de mejores hábitos de consumo, de aparatos y equipos de mayor eficiencia energética y del cuidado ambiental.

## Introducción

En 1953, el presidente de los Estados Unidos, Dwight Eisenhower pronunció ante las Naciones Unidas un memorable discurso titulado “Átomos para la Paz”. En él anunciaba el programa de su gobierno para la construcción de plantas nucleares generadoras de energía eléctrica, con lo cual “se iniciaba una nueva era de energía barata e ilimitada para la humanidad” (Cunningham *et al.* 2003). La energía nuclear se presentaba entonces como la solución definitiva al problema energético mundial. No más dependencia del petróleo y del gas; del carbón y de los hidrocarburos en general, tan contaminantes y susceptibles de alcanzar precios cada vez más altos.

Escasamente cincuenta años después el panorama dista mucho de ser tan optimista, pues a pesar del enorme progreso de la tecnología en todos los frentes, el problema del abasto de energía es una de las mayores preocupaciones de la actualidad. ¿Qué fue

\* Catedrático e investigador titular del CIECAS; Becario del Sistema de Exclusividad de la COFAA y del Sistema de Becas EDI del IPN-México.

\*\* Alumna de la Maestría en Política y Gestión del Cambio Tecnológico, del CIECAS, y Becaria del Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) 2006 del IPN.

\*\*\* Alumna de la Maestría en Metodología de la Ciencia del CIECAS, y Becaria del Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) 2006 del IPN.

lo que pasó en el *interin* que echó por tierra tan preciadas expectativas? Veamos:

El entusiasmo por la energía nuclear en el mundo continuó hasta inicios de los años setenta. Por estas fechas todavía se estimaba que para fines del siglo habría, sólo en EU, unos 1500 reactores nucleares y que el mundo del año 2000 produciría más de noventa por ciento de su energía mediante instalaciones nucleares (Teller, 1979).

Sin embargo, entre 1970 y 1974 los costos de construcción de las plantas nucleares sufrieron incrementos apreciables, derivados principalmente de los complejos sistemas de seguridad que era necesario incorporar, además de que la disposición de los residuos nucleares era un problema cada vez más preocupante. Otro factor de gran peso fueron los elevados costos del desmantelamiento de una central nuclear una vez cumplido su ciclo de vida útil, que no va más allá de veinticinco o treinta años. Estos costos son equiparables a los de la construcción misma de la planta. Todo ello se suma a los grandes problemas de contaminación implicados por el proceso de producción del uranio enriquecido necesario para la operación de la planta. Los grupos ecologistas significaron también un obstáculo cada vez más difícil de vencer, y pronto la opinión pública mundial se convirtió en un actor sumamente crítico y demandante, sobre todo al aceptarse en las altas esferas del gobierno la posibilidad de ataques terroristas sobre algunas instalaciones nucleares, con las catastróficas consecuencias implicadas.

Como consecuencia de estas circunstancias, casi todos los proyectos de construcción de nuevas plantas nucleares y de reactores se cancelaron en la década de los setenta, y desde entonces el crecimiento de la industria nuclear en el mundo sufrió una notable disminución, se cancelaron muchos proyectos e incluso cerraron algunas instalaciones ya operando. En los últimos años, cerraron plantas japonesas, en parte por la presión de la opinión pública. Los accidentes de la Isla de las Tres Millas en Estados Unidos (1979) y el de Chernobyl en Ucrania (1986) contribuyeron, de manera importante, al deterioro de la situación. Lo que al principio se consideró como una fuente de energía barata, limpia y segura ha resultado con el tiempo no ser ni barata, ni limpia ni segura.

Por lo anterior, y también por complejas situaciones de carácter económico y político, fundamentalmente, y en alguna medida técnicas, casi todo el peso del problema de proveer de energía al mundo ha recaído hasta ahora en los hidrocarburos.

### **Panorama mundial actual**

En 2006, la mayor reserva de petróleo se encuentra en Medio Oriente, el gas está principalmente en Rusia y

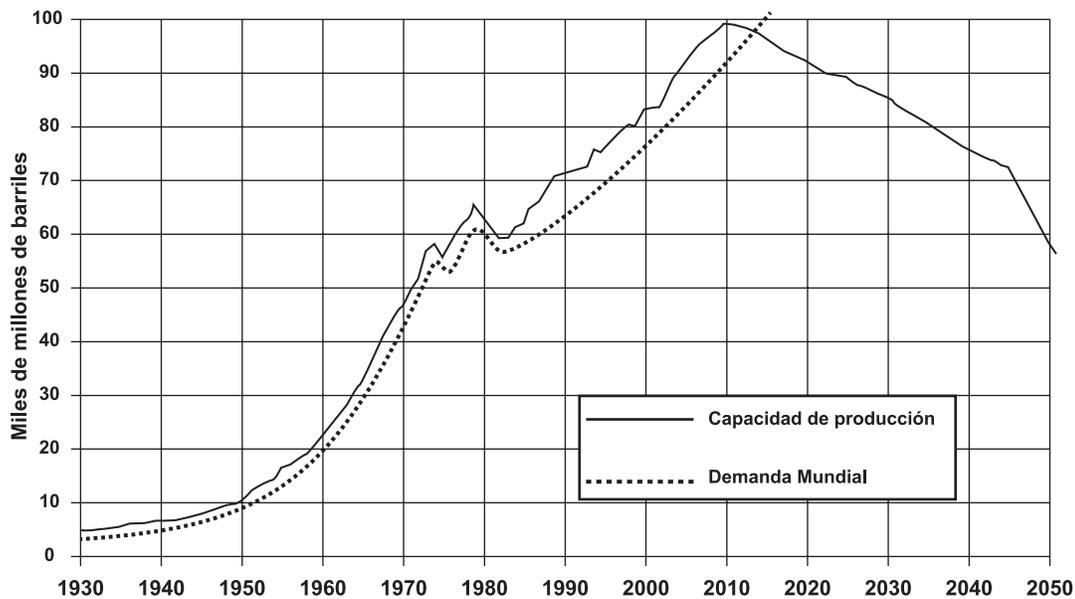
en Canadá; Japón no tiene petróleo; Estados Unidos y Europa consumen más de lo que producen, pues su producción ha entrado en declive; China e India, productores medianos, están demandando cada día más energéticos debido a su acelerado crecimiento económico y a sus grandes poblaciones (Parra, 2003). En estas condiciones, el riesgo de un colapso energético mundial no parece una posibilidad extravagante, a menos que se desarrollen y usen intensivamente fuentes alternas de energía.

Hasta hoy, la capacidad mundial de producción de petróleo ha estado por encima de la demanda (Fig. 1), pero como ésta seguirá creciendo aceleradamente y la capacidad total de producción alcanzará eventualmente su máximo para posteriormente declinar, las dos curvas habrán de encontrarse y a partir de ese momento la demanda mundial ya no se podrá satisfacer. Esto significará el fin de la era del petróleo barato y el inicio de una impredecible guerra de precios y conflictos por el control de los suministros. Estas son las previsiones que hacen los expertos de la Association for the Study of Peak of Oil (ASPO, 2006), basados en el hecho de que las reservas actuales conocidas de petróleo no se han repuesto al ritmo que contrarrestaría su agotamiento en mediano plazo, por el descubrimiento de nuevos yacimientos. Lo anterior no significa que se acabe el petróleo en el mundo; habrá todavía mucho en el subsuelo. Simplemente significa que las reservas no permitirán tener una producción diaria que alcance a cubrir la demanda mundial del energético. Como dijo alguna vez el ministro saudita del petróleo, el jeque Ahmed Zaki Yamani: “Se acabará la era del petróleo, y no porque falte petróleo; así como acabó la edad de piedra y no porque faltara piedra” (Roberts, 2004; Goodstein, 2004).

Este escenario suena catastrófico pero no es inevitable. Si se toman medidas a tiempo, es decir desde ahora mismo, podrá posibilitarse un período de transición con la gradual sustitución del petróleo por gas, carbón, arenas bituminosas, en una primera fase, y posteriormente por fuentes de energía renovables y más limpias como la hidráulica, la eólica, la de los biocombustibles, la solar fotovoltaica y la del hidrógeno. Por supuesto, sin excluir la geotérmica, la de las mareas y la nuclear, a pesar de los riesgos que ya mencionamos en torno a esta última.

La sustitución de los hidrocarburos es obligada no sólo por su escasez sino por la enorme contaminación ambiental que producen. La quema de combustibles fósiles es en la actualidad una de las causas más importantes de las enormes emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, con el correspondiente incremento del “efecto invernadero”, el calentamiento global y el cambio climático.

**Figura 1**  
**Capacidad global de producción y demanda mundial de petróleo**



### ¿Cuál es el panorama nacional mexicano?

Algunas de las principales características del consumo energético en México son:

1. El consumo *per cápita* es aproximadamente de  $15.5 \times 10^6$  Kcal/año (unos 65 gigajoules por año), cifra que resulta pequeña comparada con la correspondiente a países desarrollados, que en promedio consumen cinco veces más (Tabla 1).

2. La tasa de aumento del consumo es relativamente alta, duplicándose cada veinte años, y aunque las políticas de ahorro tiendan a disminuir este consumo, la mejora en condiciones de vida internas y el incremento de la población producirán un aumento de la demanda.

3. La casi totalidad del suministro de energía primaria en México proviene de los hidrocarburos (> 80%) con una participación muy pequeña de otras fuentes alternas como carbón, hidráulica, geotérmica, nuclear, solar fotovoltaica, eólica, biomasa, etcétera (Fig. 2, SENER 2003).

Es necesario racionalizar el consumo de hidrocarburos por varias y poderosas razones, a saber:

a) Por su utilidad como materia prima en la industria petroquímica, donde el valor agregado alcanza un nivel mucho más alto que en el caso de su utilización como energético.

b) Por su alto precio en el mercado internacional, que

los transforma en fuente principal para la obtención de las divisas necesarias para financiar importaciones requeridas por el desarrollo.

c) Por los problemas ecológicos derivados de su alto consumo.

d) Porque se agotan.

Si hacer previsiones hacia el futuro es siempre una tarea riesgosa, lo es más cuando la materia acerca de la cual se pretende pronosticar tiene muchas facetas y depende de tantas variables como la energética. Las previsiones catastróficas que se anticipaban hace 25 años, afortunadamente no se cumplieron. En ello tuvieron mucho que ver el desarrollo de dispositivos más eficientes en el uso de la energía; la educación para su uso adecuado y, desgraciadamente, a que el ritmo de crecimiento de la economía mundial no se mantuvo como el de aquellas fechas.

De cualquier modo, aunque de manera menos dramática, la producción, uso y consumo de la energía sigue siendo un problema pendiente, y las fuentes de energía primaria no renovable (petróleo, gas, carbón) se están agotando; parece lógico estimar que en los próximos 25 años podrían ser escasas y alcanzar precios inasequibles, por lo que es imperativo desde ya investigar, ensayar y desarrollar nuevas fuentes de energía; sobre algunas ya se tiene actualmente bastante información, pero su uso generalizado ofrece dificultades tanto económicas como técnicas que será necesario superar.

**Tabla 1**

**Comparativo del consumo anual de energía per cápita**

	1990	1995	1999	tmca
México	63	61	65	0.1
España	98	110	125	2.7
Reino Unido	155	160	163	0.6
Japón	149	166	171	1.5
Noruega	212	226	245	1.6
Canadá	316	328	329	0.4
Estados Unidos	323	332	340	0.6

(tmca: tasa media de crecimiento anual; GJ = gigajoules).

Fuente: Secretaría de Energía-México.

**Tabla 2**

**Unidades de energía**

1Btu =	1055	Joules (J)
1Kcal =	4187	Joules=4.187KJ
1Kcal =	3.97	Btu
1Btu =	0.252	Kcal
1 Quad =	1015	Btu
1 Petajoule =	1015	Joules
1 Quad =	1055	Petajoules
1Watt =	1	Joule/segundo
1Watt-hora =	3600	J = 3.412 Btu
1 Kw-hora =	3600	KJ = 3412 Btu

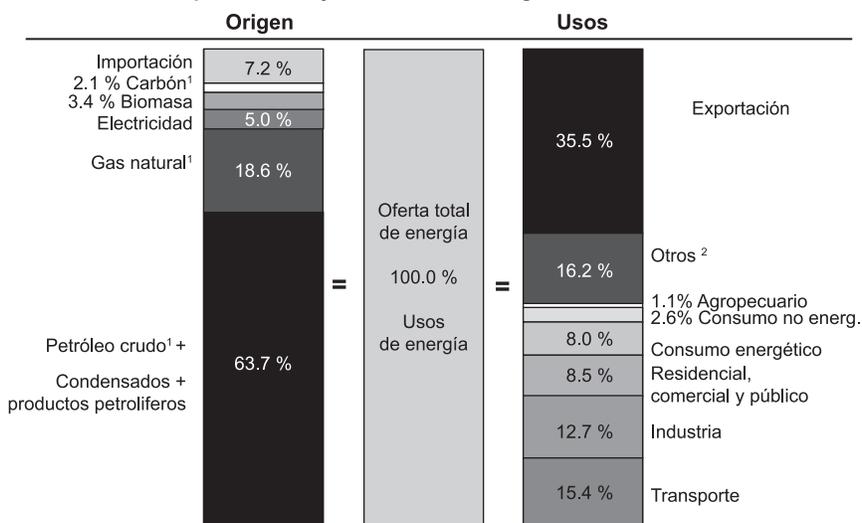
1 Barril de petróleo → 1.46 x 106 Kcal ≈ 5.8 x 106 Btu  
 1 Barril de petróleo → 1700 Kw- hora

Como referencia de utilidad para la lectura de la tabla anterior y el resto del artículo, a continuación se presenta una tabla de equivalencias entre las principales unidades en que suele medirse la energía. **Energía** es la capacidad para realizar trabajo, y **potencia** es la medida de rapidez con que este trabajo se realiza. La unidad básica de energía en el Sistema Internacional de Unidades es el **joule** (energía o trabajo realizado por una fuerza [unitaria] de un **newton** al desplazar aquello sobre lo que se aplica una distancia igual a un **metro**). En esta tabla sólo aparecen las unidades más comunes.

**Figura 2**

**Producción y consumo de energía en México**

**Cómo producimos y consumimos energía en México, 1999**



<sup>1</sup> Incluye variación de inventarios.

<sup>2</sup> Incluye energía no aprovechada, maquila, pérdidas por transformación, transporte, distribución, almacenamiento y diferencias.

Fuente: CFE.

**Los recursos actuales**

Los hidrocarburos (petróleo, gas natural, combustóleo, diesel, carbón mineral, gas LP, y sus derivados) son la principal fuente primaria de energía en México. Se utilizan en el transporte; como combustibles directos para calentar en el hogar y la industria; generan electricidad, que a su vez es una fuente de energía para una enorme gama de aplicaciones. Además de los hidrocarburos, otras fuentes utilizadas actualmente en México para la generación de energía eléctrica son:

a) La energía hidráulica. México cuenta actualmente con importantes desarrollos para el aprovechamiento de la energía hidráulica, almacenada en grandes presas, caídas de agua natural y ríos, pero el porcentaje de energía generada por estas fuentes no sobrepasa 15% del total, o 25% del total de la energía eléctrica. Este porcentaje se incrementará en los próximos veinte años pero no cambiará de manera apreciable el panorama. Aunque es una fuente de energía limpia y renovable, su futuro crecimiento parece muy acotado, tanto por razones naturales como económicas, políticas y sociales. En la actualidad, existen dos grandes

proyectos en desarrollo que ampliarán la capacidad nacional hidroeléctrica: “El Cajón”, en Colima y “La Parota”, en Guerrero, aunque este último está en grave riesgo de ser cancelado (Cardoso, 2006).

**b)** Energía geotérmica. Se aprovecha el vapor de agua acumulado en el subsuelo para generar electricidad. Existen algunas plantas eléctricas de este tipo, como la de Los Azufres, en Michoacán, cuya capacidad se ha ampliado recientemente (VI Informe de Gobierno 2006). Contribuye con 2.3% al total de la energía eléctrica generada en el país. México tiene un gran potencial geotérmico todavía por explotar, y las tecnologías mejoradas harán que esta fuente de energía sea cada vez más compatible con la preservación del medio ambiente.

**c)** Energía nuclear. Los dos reactores nucleares de Laguna Verde tienen una capacidad combinada de generación de electricidad de 1365 Megawatts, lo que representa 3.7% de la producción total de energía eléctrica. En torno al aprovechamiento de la energía nuclear ha habido una gran polémica en el mundo, alimentada sobre todo por los grupos ambientalistas y por los altos costos. Esto ha provocado el cierre de algunas plantas en Europa, Estados Unidos y Japón, y la congelación en algunos países de sus programas en desarrollo nuclear. México parece haber adoptado también esta política y es muy poco probable que en el futuro previsible se autorice la construcción de más plantas nucleares. Sin embargo, en diciembre de 2005 se abordó en el ámbito nacional la posibilidad de ampliar la capacidad nuclear, construyendo nuevas plantas nucleares: otra en Laguna Verde y dos más en Sonora. Esto hace ver la preocupación que existe en nuestro país por la situación energética.

**d)** Energía eólica. Esta es quizá la fuente de energía de más rápido crecimiento en el mundo, pues cada año aumenta 30%. México tiene algunos sitios donde la fuerza del viento constituye una fuente importante de la que se puede depender, como La Ventosa, en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, donde operaba desde hace algunos años una planta eololéctrica y se acaba de poner en operación un segundo complejo (VI Informe de Gobierno). Esta fuente representa para México un gran potencial a futuro, tanto por la geografía y condiciones naturales del país, como por el gran desarrollo tecnológico de los últimos años en relación con el diseño de torres, aspas, turbinas y generadores, que hacen posible que una sola instalación o planta de este tipo pueda proporcionar electricidad para miles de hogares. Una ventaja enorme de este tipo de instalaciones es que son amigables con el ambiente.

**e)** Energía solar fotovoltaica. Son dos los principales factores que limitan actualmente la difusión de este tipo de energía: el costo del watt generado y el hecho de que los

medios para almacenar la energía generada son costosos y poco eficientes. México aprovecha marginalmente la energía fotovoltaica en instalaciones rurales para bombeo de agua, telefonía y otros usos domésticos, pero su impacto en el panorama energético nacional es insignificante. Para el futuro inmediato se vislumbra un crecimiento moderado, que de darse, se concentraría en ciertos usos en lugares aislados o en aplicaciones que no requieren grandes cantidades de electricidad.

**f)** Energía solar térmica. Aunque no hay datos confiables, probablemente es muy limitada la utilización que en México se hace de la energía solar para producir calentamiento en forma directa. Se usa generalmente para calentar agua, pero también en estufas y hornos solares en los que se pueden alcanzar altas temperaturas (algunos cientos de grados Celsius). En países como Francia y Estados Unidos existen instalaciones que permiten fundir metales en hornos solares de reflexión que utilizan grandes espejos parabólicos; en México esta tecnología no se ha aplicado.

**g)** Biomasa. La cantidad de energía que aún se obtiene en México de la quema de productos vegetales (leña y bagazo de caña, principalmente) es tan importante como la que proviene de la Planta de Laguna Verde. Otras formas energéticas de utilización de la biomasa en México son, por ahora, totalmente irrelevantes por su cuantía. En la actualidad se dispone de tecnologías para la producción de *biocombustibles*, es decir, combustibles obtenidos a partir de productos vegetales, y éstos podrían ser una opción interesante para nuestro país. Si la caña de azúcar no resulta redituable para la producción de edulcorantes debido a la gran competencia de la fructosa, y si los precios de los combustibles convencionales siguen a la alza, la producción cañera de México podría encontrar una salida interesante en el campo de los energéticos.

### Alternativas energéticas para el futuro

A pesar de que durante la próxima década las fuentes primarias de energía, no solamente en México sino en todo el mundo, seguirán siendo el petróleo, el gas natural y el carbón; el agotamiento de estos recursos naturales no renovables, y sobre todo el enorme impacto ambiental de su utilización, obligarán al desarrollo de otras fuentes de energía más amigables con el entorno, y de mayor accesibilidad y disponibilidad.

Entre las alternativas energéticas de gran potencial a mediano plazo (quince a veinte años), en cuyo desarrollo se está poniendo mucho interés, se encuentran las que se basan en la conversión fotovoltaica de la energía solar, una de cuyas limitantes es la no disponibilidad de medios eficientes y económicamente competitivos para almacenar

la energía eléctrica que se genera. También se consideran todas las formas de producción de combustibles a partir de la biomasa (alcoholes, gases como el metano, otros combustibles). Las fuentes geotérmicas y las basadas en la acción del viento son aprovechadas en algunos lugares; el movimiento de las olas del mar y las mareas también tienen cierto potencial de aprovechamiento. Se realiza una buena cantidad de investigación y desarrollo en torno a ellas. En particular, las estaciones generadoras de electricidad que utilizan la fuerza del viento han experimentado mejoras considerables en su tecnología y un gran abatimiento de los costos (Fig. 3), aunado a otros beneficios como su compatibilidad con el cuidado ambiental.

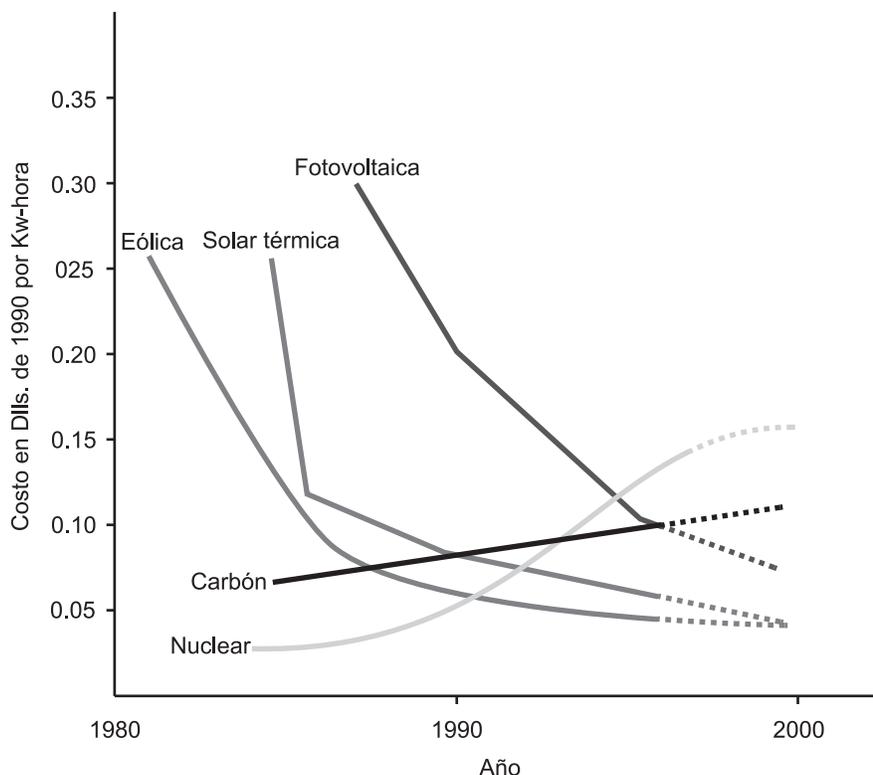
Por supuesto, se sigue considerando a la energía nuclear como uno de los recursos potencialmente más importantes. Sin embargo, en su forma tradicional de plantas nucleoelectricas que utilizan como combustible elementos pesados como el uranio enriquecido, las tendencias actuales no permiten esperar mayores desarrollos a futuro (Jardón, 1995). Esto se debe principalmente a factores de costo (Fig. 3) y seguridad. Más bien el énfasis y las expectativas recaen

sobre la energía nuclear basada en la fusión controlada, es decir, la que proviene del empleo de elementos livianos como el deuterio (isótopo del hidrógeno), cuya fuente principal es el agua, y que además tienen la gran ventaja de ser fuentes limpias y de disponibilidad prácticamente ilimitada.

Se especula también con el aprovechamiento de la energía solar mediante enormes instalaciones espaciales de elementos fotovoltaicos que pueden recabar hasta ocho veces más energía que instalaciones de las mismas dimensiones en la tierra, o bien la captación de la energía solar mediante grandes reflectores en el espacio o en la Luna. En uno u otro caso, la energía se transmitiría a la tierra mediante potentes rayos láser o haces de microondas. Por supuesto, esta tecnología espacial no es viable en el corto plazo sino a plazos más largos; se estima que para mediados del siglo XXI alcance su pleno desarrollo.

También se consideran formas mejoradas, más eficientes y menos contaminantes, de la utilización de la enorme reserva de carbón mineral que existe en diversos países, entre ellos México.

**Figura 3**  
**Los costos de las energías renovables han bajado notablemente en los últimos 20 años**



Fuente: Cunningham, 2003.

A partir de los años ochenta, se ha dado mucha importancia al desarrollo de la tecnología basada en el hidrógeno, mediante el empleo de las llamadas **celdas de combustible** (Hoffmann, 2001; Rifkin, 2002). Por ser ésta una de las tecnologías actualmente en desarrollo más controvertidas, a la que sin embargo se destinan sumas importantes por empresas de todo el mundo que no arriesgan fácilmente su dinero, la consideraremos a continuación con cierto detalle.

### ¿Qué es una celda de combustible?

Es un dispositivo electroquímico en el que el hidrógeno gaseoso proveniente de un reservorio, se combina con el oxígeno del aire en presencia de catalizadores para producir electricidad. Como subproductos se generan calor y agua. Ésta es una de las tecnologías para producción de energía más limpias de que puede disponerse, lo que constituye uno de sus grandes atractivos. Otro factor de mucho peso a su favor es que utiliza esencialmente dos elementos que son prácticamente inagotables: hidrógeno y oxígeno. Veremos, sin embargo, que esto es sólo la parte optimista del asunto, pues detrás de esta aparente simplicidad existen dificultades reales que se antojan formidables y que han originado serias dudas acerca de su utilización para ayudar a resolver el problema energético.

Una de las aplicaciones de las celdas de combustible más investigadas hasta la fecha es para el transporte. Se han desarrollado diferentes prototipos de automóviles y autobuses de pasajeros movidos por celdas de combustible que, desde ciertos puntos de vista, resultan sumamente convenientes: no contaminan, no hacen ruido, generan poco calor, no tienen tantas partes móviles sujetas a desgaste como el automóvil convencional de gasolina, tienen una buena autonomía de recorrido y eficiencia de uso de la energía. Sin embargo, no todo son ventajas. En la actualidad estos vehículos son de tres a cinco veces más costosos que los tradicionales; existen factores importantes de seguridad que no han sido todavía convenientemente resueltos; la carga o aprovisionamiento del hidrógeno para la celda sigue constituyendo un problema, pues no existe una red de estaciones de recarga (en ninguna ciudad del mundo); tampoco existe la legislación requerida por este nuevo tipo de transporte y la industria que necesariamente crecerá asociada a él. Las expectativas más optimistas prevén que todas estas dificultades queden resueltas en los próximos diez o doce años, pero hay argumentos contradictorios. A pesar de este panorama de incertidumbre, casi todas las grandes empresas automovilísticas del mundo están destinando enormes recursos para el desarrollo de modelos basados en la tecnología de la celda de combustible.

### El ciclo del hidrógeno solar

Se le llama así al proceso de generación de energía eléctrica que utiliza el hidrógeno obtenido mediante la electrólisis del agua, que a su vez se realiza mediante la electricidad proveniente de una fuente activada por energía solar. Este ciclo funciona así: la electricidad producida por los módulos o paneles fotovoltaicos (Fig. 4) opera un equipo de electrólisis que divide el agua ( $H_2O$ ) en sus componentes elementales, hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O$ ). El oxígeno se libera al aire y el hidrógeno se almacena en grandes depósitos de donde se obtiene para accionar las celdas de combustible que nuevamente producen electricidad. Vemos en este ciclo que el hidrógeno es solamente un portador de energía, pero no es él mismo un combustible. Para producirlo, se consume energía, la cual se recupera en parte al reaccionar el hidrógeno con el oxígeno del aire en una celda de combustible, en la cual se vuelve a producir agua. Este ciclo se antoja ocioso: ¿por qué no utilizar directamente la electricidad generada por los módulos fotovoltaicos? La respuesta se basa en consideraciones prácticas: a) el Sol no brilla en todos los lugares donde se necesita electricidad; b) no brilla constantemente, sólo durante algunas horas del día. Por estas razones es necesario almacenar la energía obtenida de él, para transportarla adonde se necesite y tenerla disponible cuando se requiera. Por supuesto, se podrían utilizar baterías convencionales de las que almacenan energía eléctrica, pero éstas tienen otros inconvenientes: son pesadas y voluminosas (lo que dificulta su transportación), tienen tiempos de recarga largos (varias horas) y una vida útil muy limitada; su fabricación y la disposición de los desechos contaminan y consumen energía. El ciclo del hidrógeno solar, por otra parte, constituye una fuente limpia y prácticamente inagotable de energía. El hidrógeno puede transportarse en forma gaseosa (mediante ductos) o en forma líquida, pero esto también plantea serias dificultades técnicas. Veamos por qué:

El hidrógeno, descubierto en 1766 por Henry Cavendish en Londres, es el elemento más liviano que existe. En condiciones normales de presión y temperatura es un gas incoloro, inodoro e insípido, poco soluble en agua. Difunde, en cambio, con gran facilidad en la mayor parte de los metales, el vidrio y el cuarzo. Es, por tanto, muy bien absorbido por los metales; el paladio, por ejemplo, puede absorber hasta 850 veces su volumen de hidrógeno. Estas características hacen que el hidrógeno pueda atravesar con facilidad las paredes del recipiente que lo contiene en forma gaseosa, y escapar. Es relativamente inerte, pero con un ligero aporte energético la molécula diatómica del gas normal se disocia y el gas de hidrógeno monoatómico

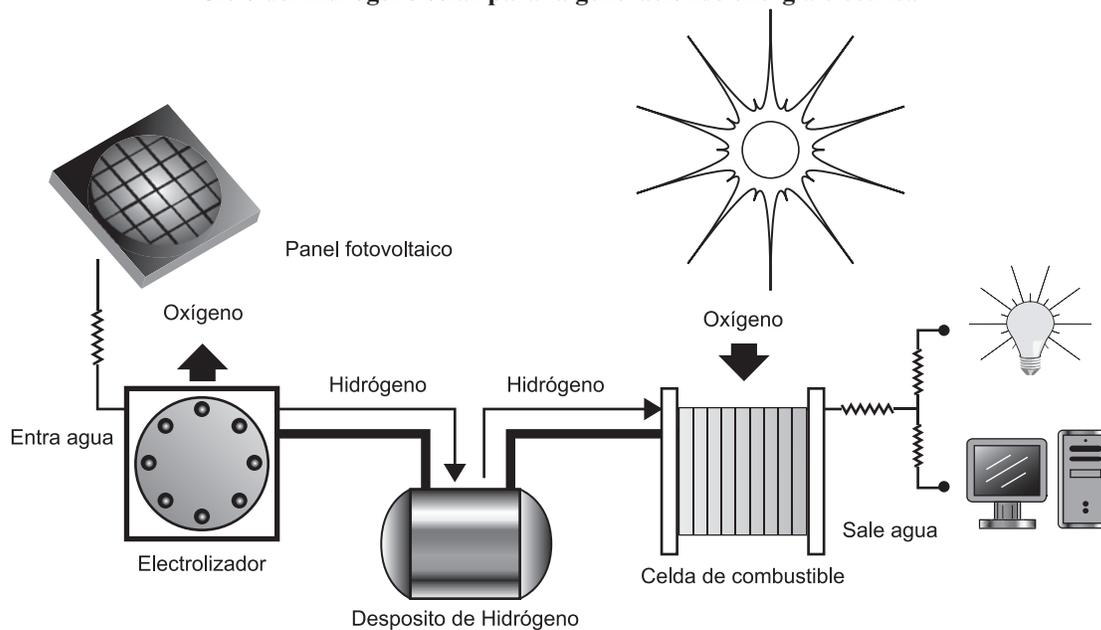
resultante es muy reactivo; su reacción con el oxígeno es explosiva. De ahí su alta peligrosidad en ciertas condiciones de manejo y operación.

El hidrógeno es uno de los elementos más abundantes en el universo; se encuentra en el Sol y las estrellas; es la fuente principal de su energía radiante. En la Tierra constituye las dos terceras partes de toda el agua existente; forma parte del petróleo, del carbón, del gas natural y de muchas otras sustancias. Por ser tan liviana, la molécula de  $H_2$  no se encuentra en la atmósfera (salvo bajísimas concentraciones; menos de una ppm en volumen), de modo que cualquier cantidad que escapa a la atmósfera se pierde finalmente en el espacio exterior.

Cuando el gas de  $H_2$  se somete a bajas temperaturas y/o altas presiones se puede condensar en forma líquida

y aun sólida. A presión atmosférica la temperatura de licuefacción del hidrógeno es de - 253 grados Celsius, aproximadamente, que es una temperatura bastante difícil de alcanzar y mantener fuera de un laboratorio. Sin embargo, en forma líquida el hidrógeno es más fácil de contener, transportar y manejar; además de que la cantidad contenida en un volumen dado de líquido es mucho mayor que si se encontrara en estado gaseoso. Todos estos son factores de gran importancia tecnológica en relación a su almacenamiento, transporte y manejo para las diversas aplicaciones, entre las cuales y desde mucho tiempo atrás se encuentran la síntesis del amoníaco, la producción de compuestos nitrogenados, la síntesis de sustancias como el metanol, el ácido clorhídrico y muchas otras.

**Figura 4**  
**Ciclo del hidrógeno solar para la generación de energía eléctrica**



**La controversia actual: pros y contras de la energía basada en el hidrógeno**

Entre las principales ventajas del uso de celdas de combustible alimentadas por hidrógeno se encuentra las siguientes (Hoffmann, 2001):

- a) No producen contaminación ni consumen recursos naturales una vez de que ya se dispone del hidrógeno. No es posible contaminar el medio ambiente con “derrames” de hidrógeno.
- b) No se utilizan ni producen sustancias tóxicas. Si el hidrógeno se fuga, se disipa rápidamente en la atmósfera

- y no es tóxico en absoluto.
- c) Las celdas de combustible convierten la energía química directamente en electricidad con mayor eficiencia que ningún otro sistema.
- d) Son de funcionamiento silencioso, de larga vida y requieren poco mantenimiento. Al no tener partes móviles, no están sujetas al desgaste, aunque sí al envejecimiento y degradación de los materiales, pero se estima que una celda puede operar hasta veinte años en forma continua.
- e) Versatilidad. Pueden construirse arreglos modulares de celdas de combustible para prácticamente cualquier aplicación, fija o móvil.

Algunos expertos (Jancovici, 2002) han señalado que la producción de hidrógeno a partir del gas natural, que es como se obtiene principalmente en la actualidad, es bastante más contaminante que la combustión directa de gasolina en los automóviles. Otro factor es el económico: producir hidrógeno es costoso; como también lo es la fabricación de las celdas de combustible, pues al no existir todavía un mercado importante de las mismas, la fabricación se realiza en pequeña escala, casi de manera artesanal. Hay también aspectos importantes de seguridad en el manejo y transporte del hidrógeno; no existen redes de distribución y la producción mundial es todavía restringida. Por estas y otras desventajas, parece razonable aceptar la conclusión a la que llega Hoffmann (2001) en su libro dedicado al tema del hidrógeno y las celdas de combustible: la conversión energética que nos llevará de los combustibles fósiles a la “descarbonización” de la energía mediante el empleo generalizado del hidrógeno alcanzará un pleno desarrollo a mediados del presente siglo XXI, no antes. La misma previsión se presenta en el Reporte de la Academia Nacional de Ingeniería de Estados Unidos (National Academy of Engineering, 2004).

### ¿Qué se hace en México?

En México existen grupos de investigación que trabajan sobre diversos aspectos de la generación, almacenamiento y aplicación del hidrógeno como fuente de energía (Solorza, 2003).

Entre estos grupos podemos mencionar los siguientes: el Departamento de Química del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN); la Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Atzacapotzalco (UAM-A); la Escuela Superior de Ingeniería, Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del IPN; el Centro de Investigación en Energía (CIE) y el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM), ambos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); la Universidad de Guanajuato (UG) en Salamanca, Guanajuato; el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) en Salazar, estado de México; el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP); el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV)-Chihuahua; el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en Cuernavaca, Morelos, y el Centro de Estudios en Hidrógeno, S. C.

Sobre los aspectos del transporte basado en el empleo de celdas de combustible y la generación de electricidad para usos domésticos e industriales, existe un grupo de investigación en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del IPN, que ha presentado un proyecto al Gobierno del Distrito Federal para la introducción de autobuses prototipo de transporte público movidos por hidrógeno, como existen en algunas ciudades de Europa.

### Otras opciones para México

Lo mismo que para el mundo, la solución de la energía en México no puede ser única, es decir, no se podrá depender de una sola fuente de energía, por múltiples razones. Se deberán aprovechar todas las fuentes de que se dispone, procurando privilegiar aquéllas que además de ser renovables provocan el menor daño ambiental.

En la solución deberán considerarse otras opciones, como el uso eficiente y el ahorro de la energía mediante mejores hábitos de consumo; esto puede significar hasta 10% menos en el consumo total (Teller, 1979).

Es importante la utilización de: a) automóviles, dispositivos, instalaciones y equipos más eficientes: los refrigeradores, televisores y sistemas de iluminación modernos son más eficientes que los de la generación pasada; b) mejores diseños arquitectónicos y mejores materiales aislantes para construcción, a fin de aprovechar en beneficio del confort las condiciones climáticas de cada región; c) mejores regulaciones y leyes para alentar el uso del transporte público en vez del automóvil particular en el que con frecuencia viaja una sola persona, y d) condominios en vez de casas aisladas. Todo esto podría representar otro 10% menos de energía requerida.

Finalmente, otro 10% en la reducción de la demanda de combustibles podría venir de la generación misma de electricidad. Por ejemplo, mediante la cogeneración: una planta de electricidad típica convierte en electricidad sólo un tercio de la energía de entrada; los otros dos tercios se van en calor de desperdicio (Sonntag y Borgnakke, 2006). Este calor puede utilizarse en otro ciclo de generación, o bien para calefacción doméstica o de agua. Otra posibilidad la constituyen las plantas de ciclo combinado, que ya operan en México desde hace algunos años; son más eficientes que las termoeléctricas convencionales y menos contaminantes, aunque siguen dependiendo de los hidrocarburos. La “generación distribuida” podría también aportar beneficios: una legislación adecuada permitiría a los particulares generar parte de la electricidad que consumen y aportar a la red pública la energía no utilizada. Por ejemplo, en lugares de gran incidencia solar un “prosumidor” (productor-consumidor) podría en ciertas horas del día generar electricidad mediante módulos solares para su consumo, y aportar los excedentes para uso de la red pública; en días nublados dependería del abasto general. Aunque esto es técnicamente posible, no existen en la actualidad otras condiciones (regulaciones) que permitan su aplicación en México.

De cualquier forma, con una legislación adecuada que le garantice al Estado el control de la industria energética, se podrían incorporar nuevas tecnologías compatibles con el cuidado del ambiente y mucho más eficientes energéticamente. Ello permitiría el ahorro y uso eficiente de la

energía, pues no debe olvidarse que “es más barato ahorrar un kilowat-hora de energía que producirlo”. El cuidado del ambiente es un aspecto que cada vez resulta para México más obligado en la política energética de cualquier país.

A pesar de todas las aristas que presenta el problema de la energía, encontrar las soluciones adecuadas a nuestra realidad político-social, idiosincrasia y recursos naturales es tarea que no podemos dejar en otras manos, ni postergar.

### Bibliografía

- ◆ Association for the Study of Peak of Oil (2006), Newsletter No. 66, Junio 2006.
- ◆ Bazúa Rueda, E. (2003), Conferencia: *Potencial del Hidrógeno en el Desarrollo Energético Nacional*, IMP, México.
- ◆ Cardoso, V. (2006), Periódico *La Jornada*, 19 de abril de 2006, México.
- ◆ Comisión Federal de Electricidad (2002), Documento: *Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2002-2011*, México.
- ◆ Cunningham, W. P., Cunningham, M. A. y Saigo, B. W. (2003), *Environmental Science: A Global Concern*, McGraw-Hill, New York.
- ◆ Goodstein, D. (2004), *Out of Gas*, W. W. Norton and Co. Inc., New York.
- ◆ Hoffmann, P. (2001), *Tomorrow's Energy*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- ◆ Jancovici, J. M. (2002), *L'avenir climatique*, Seuil, Paris.
- ◆ Jardón, J. J. (Coordinador); (1995), *Energía y Medio Ambiente*, Plaza y Valdés, México.
- ◆ National Academy of Engineering, (2004), *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*, The National Academies Press, Washington, D. C.
- ◆ Parra Iglesias, E. (2003), *Petróleo y Gas Natural: Industria, Mercados y Precios*, Ediciones Akal, Madrid, España.
- ◆ Rifkin, J. (2002), *La Economía del Hidrógeno*, Ed. Paidós, México.
- ◆ Roberts, P. (2004), *The End of Oil*, Houghton and Mifflin Co. New York.
- ◆ Secretaría de Energía (2003), Documento: *Prospectiva del Sector Eléctrico 2002-2011*, México. ([www.energia.gob.mx](http://www.energia.gob.mx)).
- ◆ Solorza Fera, O. (2003), *Potencial del Hidrógeno en el Desarrollo Energético Nacional: Capacidad Técnica-Sector Académico*; Sociedad Mexicana del Hidrógeno, A. C., México.
- ◆ Sonntag, R. E. y Borgnakke, C. (2006), *Introducción a la Termodinámica para Ingeniería*, Editorial Limusa-Wiley, México.
- ◆ Teller, E. (1979), *Energy: from Heaven and Earth*, Freeman and Co., San Francisco, USA.