



Tecnologías de uso final de la energía para el siglo XXI

Informe del Consejo Mundial de la Energía

Julio 2004

Traducción al español de
Energy End-Use Technologies for the 21st Century
COMITÉ ARGENTINO
CONSEJO MUNDIAL DE LA ENERGÍA

Auspiciantes y Autores

El estudio fue financiado por la Asociación de Energía del Japón, la Agencia de Energía de Suecia, la Asociación de Energía de los Estados Unidos, y el Consejo Mundial de la Energía.

Las siguientes personas hicieron aportes especialmente valiosos durante el transcurso del estudio: Saleh Al-Ajlan, Lucien Bronicki, Latsoucabe Fall, William Fulkerson, Hirohiko Hoshi, Hisham Khatib, Takamori Shiina, Peter Snowdon, y Yoshitaka Sugiyama.

Los siguientes miembros del Grupo de Estudios fueron los autores y responsables de estas secciones del informe:

Parte I	Robert Schock
Parte II	Nebojsa Nakicenovic
Parte III.A	Harald Haegermark y Stephen Gehl
Parte III.B	Hans Larsen
Parte III.C	Reginald Modlin y Robert Schock
Parte III.D	Masao Morishita, Tuomo Suntola, y Stephen Gehl
Parte IV	Robert Schock

La asistencia brindada por Carol deBruin, Pui-Yee El-Gharras, Marion Friepess, y Yoshihiro Hatano en la oficina de Londres del CME ha sido esencial para la realización de este informe.

Directivos del Consejo Mundial de la Energía

Antonio del Rosario <i>Presidente del Consejo Mundial de la Energía</i>	Norberto de Franco Medeiros <i>Presidente del Comité de Programa</i>
Philip Aiken <i>Vicepresidente Sydney 2004</i>	Shige-etsu Miyahara <i>Vicepresidente Asia</i>
François Ailleret <i>Presidente del Comité de Estudios</i>	Kieran O'Brien <i>Vicepresidente Europa</i>
Asger Bundgaard-Jensen <i>Vicepresidente de Finanzas</i>	Fred Phaswana <i>Vicepresidente África</i>
John Derrick <i>Vicepresidente América del Norte</i>	Carlos Pierro <i>Vicepresidente América Latina y Caribe</i>
Alioune Fall <i>Vicepresidente Iniciativa GEIS</i>	Gerald Doucet <i>Secretario General</i>

Comités Miembros del Consejo Mundial de la Energía

Alemania	Filipinas	Níger
Angola	Finlandia	Nigeria
Arabia Saudita	Francia	Noruega
Argelia	Gabón	Nueva Zelanda
Argentina	Georgia	Países Bajos
Australia	Ghana	Pakistán
Austria	Grecia	Paraguay
Bangladesh	Hong Kong, China	Perú
Bélgica	Hungría	Polonia
Bielorrusia	India	Portugal
Bolivia	Indonesia	Reino Unido
Botswana	Irán (Rep. Islámica)	República Checa
Brasil	Irlanda	Rumania
Bulgaria	Islandia	Senegal
Camerún	Israel	Serbia & Montenegro
Canadá	Italia	Singapur
China (RP)	Japón	Siria (Rep. Árabe.)
Congo (Rep. Dem.)	Jordania	Sri Lanka
Corea (Rep.)	Kenya	Sudáfrica
Costa de Marfil	Latvia	Suecia
Croacia	Líbano	Suiza
Dinamarca	Libia/GSPLAJ	Swazilandia
Ecuador	Lituania	Tailandia
Egipto (Rep. Árabe)	Luxemburgo	Taiwán, China
El Salvador	Macedonia (Rep)	Tanzania
Eslovaquia	Malí	Trinidad & Tobago
Eslovenia	Marruecos	Túnez
España	México	Turquía
Estados Unidos	Mónaco	Ucrania
Estonia	Mongolia	Uruguay
Etiopía	Namibia	Venezuela
Federación Rusa	Nepal	Yemen

Índice

Auspiciantes y autores	2
Prefacio	5
Resumen ejecutivo	6
Áreas de impacto a corto plazo	7
Áreas de impacto a más largo plazo	8
Parte I. Introducción	9
Referencias	14
Parte II. Escenarios Futuros	15
A. Fuerzas detrás de los escenarios	16
B. Cambio tecnológico	18
C. Fuentes de energía	18
D. Implicancias tecnológicas	22
Referencias	29
Parte III. Tecnologías de uso final	30
A. Industria	30
1. Papel y pulpa	31
2. Hierro y acero	39
3. Fundición y fabricación de aluminio	45
4. Cemento	50
5. Substancias químicas	54
6. Industrias de servicios	58
7. Resumen	61
Referencias	62
B. Edificios	64
1. Revestimientos	67
2. Equipos y electrodomésticos	72
3. Sistemas inteligentes	78
Referencias	80
C. Transporte	82
1. Sistemas avanzados de motores de combustión interna	85
2. Sistemas alternativos de motores de combustible	87
3. Sistemas energéticos eléctricos híbridos	89
4. Sistemas energéticos con celdas de combustible	90
5. Otros sistemas energéticos	93
6. Resumen	95
Referencias	95
D. Tecnologías interdisciplinarias	97
1. Celdas de combustible	97
2. Transmisión y distribución	98
3. Almacenamiento de energía	103
4. Nanotecnología y materiales avanzados	107
5. Biotecnología	111
6. Electrónica y semiconductores	117
7. Automatización industrial	119
8. Tecnología de medición y control	120
9. Modelado y simulaciones	120
Referencias	121
IV. Inversiones en ID+D	123
Referencias	123
Anexo A: Miembros del Grupo de Estudio y Expertos Invitados	125
Anexo B: Abreviaturas, siglas y definiciones	128

Prefacio

Las nuevas tecnologías se encuentran en el centro de los tres objetivos del Consejo Mundial de la Energía:

Accesibilidad (de ahí la necesidad de prestar especial atención a las tecnologías que pueden utilizarse en los países en desarrollo para proveer energía comercial a aquellos que no tienen acceso a ella), Disponibilidad (tecnología vista como un medio para crear un suministro energético más diverso y más seguro), y Aceptabilidad (para usos de la energía más compatibles con el medio ambiente).

Este Informe va más allá de los recientes trabajos del CME sobre tecnologías de conversión y fuente de energía para concentrarse en las tecnologías de uso final y en la energía distribuida, que no se contemplaba en el trabajo anterior. El Informe se centra en procesos industriales, edificios, transporte y tecnologías transversales. También aborda los requisitos esperados para las inversiones en investigación, desarrollo y demostración (ID+D) en estas tecnologías.

Al igual que en los trabajos anteriores, el enfoque de este estudio consistió en basarse en recientes trabajos sobre tendencias de ID+D, características relevantes de los escenarios energéticos mundiales (enriquecidos en cuanto al uso final por el banco de datos de tecnologías y la experiencia del Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA). Los escenarios del IIASA se utilizaron para obtener alguna idea de los rangos altos y bajos para el uso final de la energía y el mercado potencial para las nuevas tecnologías. El modelo justifica los costos de inversión, coordinación y aprendizaje de la tecnología como respuesta a las circunstancias descritas en los escenarios seleccionados. Debería destacarse que el enfoque no ha desarrollado nuevos escenarios sino que ha complementado trabajos anteriores realizados por el CME y el IIASA.

Las tecnologías no pueden estudiarse independientemente de las estrategias del sector privado y del marco institucional en el cual funciona el sector energético. El Informe toma en cuenta el centro de interés de compañías específicas, incluyendo por primera vez las empresas automotrices, en su trabajo de desarrollo tecnológico relacionado con el uso de la energía. Un beneficio de este enfoque es incrementar la conciencia sobre cuáles son los asuntos críticos para la tecnología desde un punto de vista del mercado: desarrollo de nuevos conceptos, disponibilidad de incentivos financieros, la necesidad de superar barreras institucionales.

Estoy seguro de que este Informe será una gran contribución a nuestra mejor comprensión del papel que pueden tener las nuevas tecnologías de uso final en la escena energética. Estoy particularmente satisfecho de que la Asociación de Energía del Japón, la Asociación de Energía de los Estados Unidos, y la Agencia de Energía de Suecia por medio del Comité Miembro Sueco del CME se hayan unido para ayudar a financiar este trabajo y para asignar expertos acreditados de todo el mundo para que lideren los equipos que realizaron el análisis. Además de los líderes de los equipos, Stephen Gehl, Harald Haegermark, Hans Larsen, Masao Morishita, Nebojsa Nakicenovic, y Tuomo Suntola, debemos agradecer al Grupo de Estudio y especialmente a su presidente, Dr. Robert Schock, por la alta calidad de los hallazgos y conclusiones de este Informe.

François Ailleret
Presidente, Comité de Estudios CME
Julio 2004

Resumen Ejecutivo

Este estudio examinó el potencial de las tecnologías de uso final de la energía y de la investigación, desarrollo y demostración (ID+D) de estas tecnologías a escala mundial. Los objetivos del estudio fueron tres: identificar tecnologías importantes para los próximos 20-50 años que puedan incrementar los beneficios de la energía; ayudar a definir los roles que jugarían la industria y el gobierno en su desarrollo; y determinar las inversiones requeridas para llevar estas tecnologías a la fase en que el mercado puede decidir si son útiles o no. Este es el primer intento de examinar el futuro de las tecnologías de uso final de la energía a escala mundial, tanto geográficamente como en relación a todo el espectro energético. En el año 2001 se realizó un informe sobre las tecnologías de fuente y de conversión. Aunque es un estudio preliminar, sin embargo debería alentar a la industria y a los gobiernos a emprender investigaciones más detalladas.

Aunque puede haber sorpresas, los desarrollos de la investigación actual ofrecen un panorama de lo que podría suceder en el futuro a medida que las nuevas tecnologías enfrenten la competencia del mercado. Dada la vasta amplitud de las tecnologías de uso final de la energía, las diferencias entre las regiones y las condiciones económicas, y el limitado tiempo disponible, el Grupo de Estudio eligió centrarse solamente en aquellas tecnologías que parecen ser más importantes desde la posición estratégica actual.

Hay varias conclusiones generales que son evidentes a partir de este estudio:

- Mundialmente, una fuerte investigación y desarrollo seguida por demostraciones de nuevas tecnologías de uso final potencialmente puede ahorrar al menos 110 EJ/año para el 2020 y más de 300 EJ/año para el 2050. Si se lo logra, esto se traduce en ahorros energéticos mundiales del orden del 25% para el 2020 y más del 40% para el 2050, por encima de lo que se requeriría sin estas tecnologías.
- El éxito de las nuevas tecnologías de uso final – y por lo tanto su capacidad de afectar el mercado del futuro y lograr los objetivos del Consejo Mundial de la Energía (CME) de *Accesibilidad, Disponibilidad, y Aceptabilidad* de las tecnologías energéticas – depende de las inversiones en ID+D y de las decisiones de políticas hechas en la actualidad. Las tecnologías claves estarán disponibles más temprano y tendrán un mayor impacto sobre diversos sectores de la población mundial con una inversión temprana y sostenida.
- Es casi seguro que ninguna tecnología aislada, o incluso un pequeño grupo de tecnologías, dominará la satisfacción de todas las necesidades del planeta en cualquier marco temporal previsible. Se requiere una cartera diversa de ID+D y medidas de políticas relacionadas, con objetivos de rendimiento tecnológico e incentivos de mercado específicos.
- Los gobiernos y la industria deberían fomentar estudios más profundos que aquellos realizados para este informe del CME al igual que estudios de todas las tecnologías potenciales. Dichos estudios deberían realizarse *conjuntamente* y desde una *perspectiva global*. En particular, debería estudiarse en detalle la utilización temporal y geográfica de las principales tecnologías a escala mundial.
- Los gobiernos, en estrecha cooperación con la industria, deberían considerar cuidadosamente los incentivos y políticas de ID+D que ayuden a llevar las tecnologías de uso final del laboratorio o ámbito de prueba al mercado. Esto incluirá un cuidadoso

examen de las regulaciones e incentivos para las tecnologías mismas y los mercados de capitales que ayudarán a su desarrollo.

- Si no hubiera un significativo esfuerzo conjunto del gobierno y la industria sobre ID+D de tecnologías de uso final de la energía (calculándose en forma conservadora que su costo estaría en al menos US\$4.000 millones por año), las tecnologías necesarias no estarían listas para el mercado en los marcos temporales requeridos por los escenarios del desarrollo económico mundial aún más pesimistas.

Áreas de impacto a corto plazo

Una serie de áreas de impacto a corto plazo posiblemente se beneficien de ID+D centrada y tendrán mayor impacto sobre los objetivos del CME. Generalmente es la industria la que realiza la ID+D a corto plazo, y el gobierno juega un papel de soporte. Como mínimo, la industria lidera la fase de demostración. Las siguientes áreas de ID+D requieren urgente atención:

- Distribución y uso de la electricidad más eficiente y menos costoso dado que la electricidad es un vector energético clave utilizado en todos los sectores con una amplia gama de tecnologías.
- Producción de electricidad eficiente y económica para asegurar al menos 500 kWh por persona por año para las poblaciones rurales del mundo para el año 2020, y 1.000 kWh para el 2050, según la Declaración del Milenio, del año 2000, del CME.
- Los combustibles y medios de transporte alternativos satisfarán la creciente preocupación – señalada también en el estudio del CME del año 2003 *Actuadores en la escena energética*—acerca de la capacidad del petróleo de satisfacer las crecientes necesidades de transporte global a precios económicamente accesibles.
- Sistemas energéticos más eficientes para automóviles y camiones que también reduzcan las emisiones.
- Mejor uso de la materia prima forestal para producir energía en forma más eficiente en la industria del papel y la pulpa.
- Reducción del consumo de materias primas y disminución de las emisiones en la producción de hierro y acero.
- Mejor eficiencia energética del proceso de producción de aluminio para reducir las emisiones de CO₂.
- Nuevas tecnologías para la industria del cemento para aumentar en gran medida la eficiencia energética y reducir los contaminantes y las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Sistemas inteligentes para optimizar el uso de la energía en los edificios.
- Mejor eficiencia de la producción de cemento y reducción de la cantidad de CO₂ producida por el proceso.
- Mejores tecnologías de proceso y de separación para la producción química.
- Tecnologías de información y comunicación integradas en los servicios de uso final de la energía, especialmente en los países en desarrollo.

- Métodos de cocción simples y baratos en áreas pobres del mundo.
- Tecnologías de desalinización eficientes y económicas que pondrán agua pura a disposición de la gente y las industrias en todo el mundo.

Áreas de impacto a más largo plazo

Para el impacto a más largo plazo, se destacan varias áreas de tecnología para la ID+D que comienza ahora. Estas requieren más de los gobiernos en cuanto a financiamiento sostenido y políticas que aseguren que la investigación promisoría supere la fase de demostración. Las tecnologías que permiten a la economía del hidrógeno competir en el mercado pueden jugar un rol crucial. Los beneficios incluyen una oferta energética más diversa y menos impactos ambientales. Estas áreas incluyen:

- Celdas de combustible eficientes y de bajo costo.
- Producción, distribución y almacenamiento de combustible de hidrógeno de bajo costo.
- Tecnologías de hidrógeno que fomentan sinergias del sistema (por ejemplo, almacenamiento energético de hidrógeno para ser convertido ya sea en electricidad o en fuerza motriz según lo dictado por la demanda).
- Sobre todo, las tecnologías que apuntan a los mercados nicho potenciales para el hidrógeno porque este combustible es inicialmente muy caro (por ejemplo un área que tiene energía eléctrica barata y abundante producción de electricidad en horas valle).
- Lo que es más importante, sistemas energéticos integrados de funciones múltiples donde se consiguen múltiples usos finales a partir de un combustible o vector energético. Los ejemplos podrían incluir la producción integrada de hidrógeno, almacenamiento, generación de electricidad pico y fuerza motriz, o cocción solar diurna integrada con iluminación y combustible de biomasa para la cocción nocturna, o energía eléctrica rural, purificación del agua y telecomunicaciones.

Al comienzo del estudio, la dicotomía entre los países desarrollados y en desarrollo se hizo evidente. Las regiones en desarrollo requieren tecnologías más fundamentales para lograr los objetivos del CME de *Accesibilidad, Disponibilidad y Aceptabilidad*. Una serie de preguntas no respondidas específicas del mundo en desarrollo justifican la realización de más estudios:

- ¿Las regiones en desarrollo pueden saltar por encima del actual mundo industrializado, o simplemente tratan de igualarlo? Correspondientemente, ¿cuánto obstaculizará la adopción de las tecnologías más modernas la infraestructura arraigada y no amortizada de las naciones industriales? ¿Qué rol pueden jugar las reformas del mercado?
- Los mercados de capitales mayormente han marchado al mismo ritmo que la innovación tecnológica en el mundo industrializado, y la falta de capital de inversión ha retrasado al mundo en desarrollo. ¿Será cierto esto en el futuro o las fuerzas tales como la globalización cambiarán la dinámica? ¿La tercerización es el comienzo de un cambio en la dinámica? ¿Qué cambios institucionales se requieren?

Parte I. Introducción

El estudio del Consejo Mundial de la Energía (CME) del año 2001, *Tecnologías energéticas para el siglo XXI*, tenía como objetivo comprender el rol que las nuevas tecnologías energéticas pueden jugar en la aceleración de las mejoras energéticas en todo el mundo – para satisfacer los estándares ambientales cada vez más estrictos, y para ampliar la disponibilidad comercial de la energía y de los servicios energéticos.¹ Ese informe se centraba en los gastos de investigación, desarrollo y demostración (ID+D) en los sectores público y privado y en la identificación de las tecnologías y sus costos de inversión asociados para una serie de áreas de fuente de energía y generación que podrían ser importantes en el siglo venidero y donde la ID+D es crucial para conducir las a su realización. Se incluía la generación de electricidad, la producción de combustibles sintéticos, y combustibles de transporte. Se omitían las tecnologías energéticas asociadas con los usos finales de la energía, tales como transporte, manufactura y edificios.

Un objetivo de este informe es proveer una base más sólida para evaluar los requisitos de energía y de políticas de las tecnologías de uso final y disminuir la intensidad energética mediante la introducción de nuevas tecnologías energéticas para los consumidores. Sin embargo, una evaluación completa de todas las tecnologías está más allá del alcance de este informe. De todos modos, los ejemplos de los sectores, sus tecnologías más importantes, y cómo podrían evolucionar en los próximos 20 a 50 años son ilustrativos. Un segundo objetivo es calcular las inversiones en ID+D necesarias para asegurar que estas tecnologías estén disponibles si son necesarias. Un cálculo conservador sugiere que las necesidades de inversión mundiales solo para la investigación y desarrollo de las tecnologías de uso final se acercan a los US\$4000 millones por año para un marco temporal de 10 a 20 años, impulsadas por las consideraciones ambientales, de costo y de conservación de la energía. Los recursos de ID+D de esta magnitud requerirán consorcios públicos o privados para proveer financiación, al igual que liderazgo de la industria y el gobierno para implementar la organización que lleve a cabo el trabajo requerido.

Más recientemente, el Consejo de Energía de Canadá defendió con firmeza el rol esencial de la innovación en la producción, entrega y uso de la energía, al explayarse sobre el rol crucial de los gobiernos y las compañías en el ciclo de innovación.² Finalmente, este informe trata de evaluar el impacto de cada tecnología en relación con los objetivos de *Accesibilidad, Disponibilidad y Aceptabilidad*, tal como se lo presentaba en la Declaración del Milenio del CME, en el año 2000.³ Así, el presente informe debe considerar las necesidades especiales de los países en desarrollo y del mundo desarrollado.

Una serie de asuntos pertinentes abarcan la totalidad del sector de uso final y requieren consideración en cualquier discusión acerca de las tecnologías de uso final. Primero, las tecnologías de uso final no pueden ser consideradas excluyendo las fuentes de energía primaria. El costo y la disponibilidad de la energía primaria es un importante factor en la determinación de la opción de la tecnología de uso final. Las futuras tecnologías energéticas estarán tan sujetas a este hecho básico como lo están las de hoy en día. Por otra parte, la tecnología de uso final puede crear suficiente demanda para impulsar el desarrollo de las fuentes de energía. Por ejemplo, el motor de combustión interna ha sido el principal impulsor, aunque no el único, para el mantenimiento del predominio del petróleo como fuente de energía.

Un vector energético más a menudo transmite energía desde una fuente hacia la tecnología de uso final. La electricidad, el vector energético más ubicuo de la actualidad, se produce por la conversión de una serie de fuentes de energía,

basándose la elección local de cualquier vector en factores económicos, ambientales, de confiabilidad y de conveniencia. La gasolina lleva energía del petróleo (también se la puede obtener del carbón, aunque en forma más costosa). El gas natural es una fuente de energía que también es un efectivo vector energético y a menudo se lo utiliza directamente con una tecnología de uso final (es decir, conversión para calefacción de edificios, electricidad de red, o energía de transporte). En la actualidad es más frecuente convertir el carbón en electricidad de red, aunque durante la Segunda Guerra Mundial se lo convertía en combustible líquido a gran escala para transporte. La radiación solar puede ser convertida directamente en calor de baja energía. El hidrógeno, que figura prominentemente en muchos escenarios para el futuro tanto por sus beneficios ambientales como por la eficiencia en la que se lo utiliza, transporta energía de fuentes fósiles (petróleo, carbón o gas), de fuentes renovables (biomasa) o por conversión de cualquier fuente de electricidad. Cada paso de conversión incluye costo (pérdidas de energía y costos de capital para el equipo) y por lo tanto afecta la economía. El cálculo final de costo/beneficio determina en última instancia la penetración en el mercado de un vector energético y su tecnología de uso final asociada. De este modo, el uso de un vector energético con buena relación entre costo y eficacia y de un vector energético eficiente puede promover las tecnologías de uso final. La **Figura I-1** es una representación simplificada de la interacción dinámica entre las fuentes de energía, los vectores energéticos y el uso final

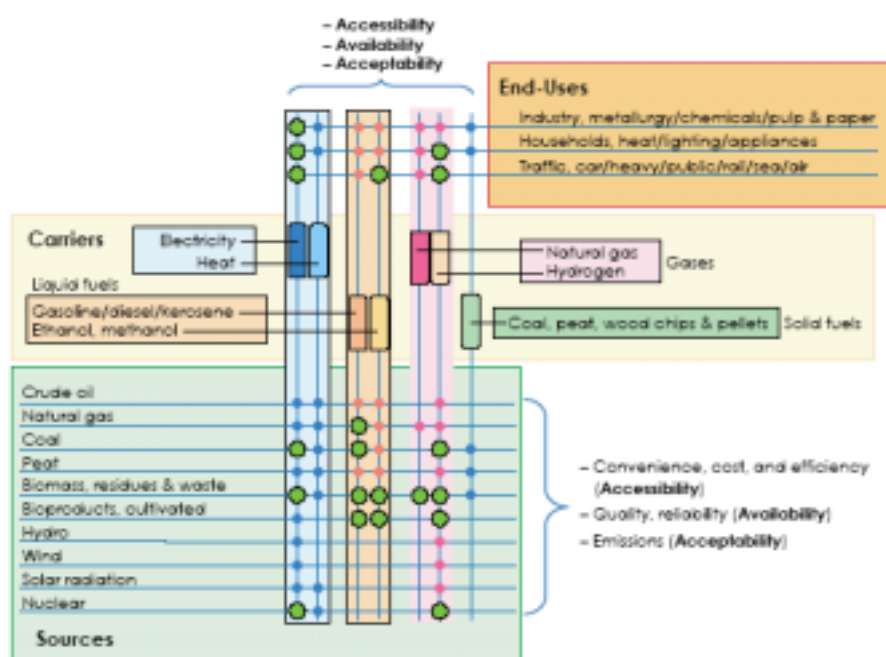


Figura I-1. Conversión de fuentes de energía, mediante vectores de energía y tecnologías de uso final, a usos finales. Los puntos verdes representan las intersecciones donde las potenciales ganancias provenientes de la ID+D pueden tener el mayor impacto sobre el mercado para las tecnologías de uso final, tal como se trata en la Parte III (adaptado de Tuomo Suntola, Fortum Corporation, Espoo, Finlandia, 2003).

La elección del consumidor sigue los criterios del mercado acerca del costo y rendimiento incorporados en la declaración del CME: *Accesibilidad, Disponibilidad y Aceptabilidad*. Además, los elementos intangibles de la elección del consumidor, tales como la conveniencia, la cultura, la confiabilidad de la marca, y la moda, pueden llevar a la adopción de tecnologías que no son necesariamente el uso de energía más favorable o el de mejor relación costo/beneficio. Para las compañías de energía, los criterios del CME son acentuados por la economía y la disponibilidad de materias primas energéticas (fuentes de energía primaria). La aceptabilidad ambiental está

cubierta principalmente mediante las regulaciones y su impacto indirecto sobre la economía.

Este estudio se centra en el desarrollo de tecnologías energéticas para el futuro. Más allá de la tecnología, la comercialización en el mercado usualmente depende de las políticas de gobierno que – como mínimo – no obstaculizan su introducción, y – como máximo – pueden fomentar una introducción más rápida y exitosa. Los gobiernos pueden influir sobre la introducción de tecnologías con medidas tales como incentivos bien dirigidos, subsidios fiscales, incentivos conjuntos con la industria, comercio de emisiones, estándares legislados, contrataciones públicas e ID+D, entre otras. Todas ellas tienen un impacto sobre los precios tal como lo muestra el reciente informe del CME, *Actuadores en la escena energética* (CME, Londres, diciembre 2003). Pero finalmente, las tecnologías serán adoptadas en forma exitosa porque al mismo tiempo que satisfacen las necesidades del público, suman valor económico. Para que funcionen las políticas del gobierno, es imprescindible que la industria y los gobiernos se pongan de acuerdo sobre los objetivos y los declaren claramente a fin de que los actores puedan tomar decisiones informadas y desarrollar estrategias conjuntas para la implementación y la utilización. También es crucial que estas estrategias se basen en ciencia e ingeniería sólidas.

Quizás el tema más ubicuo que atraviesa todas las tecnologías de uso final es la eficiencia. Las mejoras en la eficiencia energética con buena relación costo/beneficio a menudo son pasadas por alto, pero son vitales para el uso continuo de toda la tecnología energética y en ningún lugar son tan importantes como en las tecnologías de uso final. Por lo tanto, todas las tecnologías de uso final compiten sobre la base del uso eficiente de la energía y, dado que esto puede ser un determinante principal del costo total, es crucial para la penetración en el mercado de las nuevas tecnologías.

Uno de los asuntos más importantes para las tecnologías de uso final es su impacto en y sobre los países en desarrollo. A pesar de los progresos en la ciencia y la tecnología, la absoluta brecha económica entre los países desarrollados y en desarrollo va en aumento.* Resolver esta discrepancia, donde un tercio de la población mundial vive sin acceso a los servicios energéticos tales como la electricidad, es un requisito previo para un desarrollo continuo y un tema de seguridad de dimensiones internacionales. Sin acceso a la electricidad, a los servicios relacionados con la energía, y a tecnologías más modernas, estas condiciones no pueden mejorarse. Puesto que probablemente habrá cuatro a cinco veces la cantidad de personas en el mundo en desarrollo que las que habrá en el mundo desarrollado,⁴ una situación sin cambios es inestable, siendo la migración sin control a través de las fronteras el resultado menos perjudicial y quizás el peor sea la producción de terroristas internacionales. Ninguna otra área representa mejor que África (en particular África Subsahariana), a la parte del mundo menos desarrollada. África contiene aproximadamente el 13% de la población mundial, aunque casi la mitad vive en extrema pobreza con menos de US\$350 por año. El uso de energía primaria de África es de 0,336 tpe (14 GJ) por persona por año, en contraste con 8,1 tpe (340 GJ) en los Estados Unidos. El consumo anual de electricidad es de 482 kWh por persona, en comparación con 13.000 kWh en los Estados Unidos.

¿Qué puede hacerse con las tecnologías de uso final de la energía para reducir esta brecha? ¿Cómo pueden beneficiarse con estas nuevas tecnologías, en un sentido

* Nótese que sobre una base per capita, de hecho la brecha puede estar disminuyendo, a medida que los dos países con mayor cantidad de población, China e India, desarrollan su base industrial. Ver *The Economist*, 13–19 marzo 2004.

práctico, los pobres en los países en desarrollo? ¿Qué puede hacerse para facilitar la utilización de tecnologías adecuadas para estas personas? Entre las acciones generales que se han sugerido se encuentran los acuerdos financieros innovadores negociados entre la industria y el gobierno para instalar infraestructuras apropiadas para entregar energía, especialmente electricidad, y aumentar la prioridad que el gobierno adjudica a las mejoras energéticas. Al mismo tiempo, la intensidad energética en el mundo desarrollado debe seguir disminuyendo.

Algunos asuntos relacionados con la tecnología de uso final de la energía específicos de los países en desarrollo* son—

- El mundo en desarrollo puede no tener que seguir el camino que ya siguieron los países de la OCDE. Más bien, la tecnología más moderna podría ser implementada inmediatamente en algunas áreas, lo que se conoce como “salto de rana” (*leapfrogging*). Sin embargo, siguen existiendo los obstáculos fundamentales de la capitalización y competencias técnicas de la mano de obra. Es necesario definir los roles respectivos de la industria y el gobierno en el desarrollo e intensificación de las nuevas tecnologías energéticas.
- La generación de energía eléctrica estacionaria remota (Generación Distribuida, o GD) ha sido propuesta como una necesidad primaria en los países en desarrollo. Aunque no es una tecnología de uso final, sin embargo es de vital importancia para la utilización de las tecnologías de uso final (ver Figura I-1) y ofrece importantes beneficios a los países en desarrollo, especialmente en áreas rurales, más allá del valor de la electricidad en sí misma (por ejemplo, bombeo y purificación del agua, clínicas de cirugía, etc.). La GD sostenible y económicamente accesible podría proveer mejor calidad de energía y confiabilidad que la generación y transmisión de energía centralizada, y posiblemente a un precio más bajo. Queda por verse cuál será la alternativa dominante, si es que se trata de alguna de ellas, y en cuáles regiones.
- Las necesidades del sector de la construcción en los países en desarrollo son más fundamentales que en el mundo desarrollado y los estándares de construcción son menos complicados. ¿Los gobiernos están preparados para tomar las medidas necesarias para implementar estándares adecuados?
- El concepto de mini molinos (chatarra – en base a la electricidad) para fabricar acero ha sido propuesto para los países en desarrollo. Sin embargo, no está claro si los países en desarrollo están preparados para aprovechar esta tecnología básica de uso final de la energía para apoyar a su crecimiento económico.
- Los países desarrollados proveen la mayor parte del papel utilizado en los países en desarrollo. Dado que el acceso al papel generalmente es un requisito previo para el desarrollo social, probablemente en los países en desarrollo haya una futura tasa de incremento más elevada en los mercados para el papel. Sin embargo, no queda claro si esto sucederá ciertamente o si los gobiernos de los países en desarrollo reconocerán y estarán preparados para enfrentar esta parte de la brecha.
- Un enfoque promisorio a las fuentes de energía, vectores energéticos, y tecnologías de uso final en los países en desarrollo es el de los servicios basados en la comunidad,

* Se encuentran cuidadosos desarrollos sobre el tema de la energía en las naciones en desarrollo en T.B. Johansson y J. Goldemberg, *Energía para el desarrollo sostenible: Agenda de políticas*, Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas, Nueva York, 2002, y J. Goldemberg, *Energía rural en los países en desarrollo*, (Capítulo 10), en *Energía y el desafío de la sustentabilidad*, Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas, Nueva York, 2000.

tales como energía eléctrica, purificación del agua, tratamiento de las aguas servidas, suministro de agua, y telecomunicaciones para clínicas médicas y escuelas – reunidos y financiados en un sistema integrado. ¿Este es un modelo para el futuro de los países en desarrollo?

- Las industrias de servicio parecen jugar un rol cada vez más importante en los países en desarrollo en cuanto a economía y empleo. Obsérvese el fuerte aumento de una industria de servicios basada en el conocimiento en China e India. ¿Otras naciones seguirán este ejemplo? Si es así, ¿cuáles son las consecuencias para el desarrollo de industrias esenciales como las de metales y productos químicos?

Como es obvio a partir de cualquier estudio de países en desarrollo, el agua pura y abundante es esencial para la salud y el bienestar de la población y para una economía en ebullición. La energía es un requisito previo. Se necesita electricidad para hacer funcionar las bombas y purificar el agua, ya sea para purificar suministro de agua ya existente o desalinizar agua de mar. Por lo tanto, un grupo importante de tecnologías de uso final de la energía son aquellas asociadas con el uso del agua. En este informe, simplemente mencionamos este importante asunto. Las tecnologías de uso final están disponibles para estos objetivos, es necesario desarrollar otras más eficientes, y es necesario que el gobierno y la industria tomen en cuenta estas consideraciones. La importancia del agua dulce puede ilustrarse con la disminución del agua dulce disponible mundialmente por persona de 20.000 m³ por persona en 1950 a menos de 8.000 m³ en la actualidad, debido principalmente al crecimiento de la población.⁵

Un área de uso final que también es importante es la agricultura, especialmente para los países en desarrollo. Típicamente la agricultura representa 6–7% del PBI mundial (ver Referencia 4), y en los países en desarrollo está alcanzando el 15% en África Subsahariana y 24% en Asia Meridional. Aunque las importantes tecnologías de uso final incluyen la energía en el sector agrícola, aparte de la producción de fertilizante en la industria química, aquí simplemente señalamos su existencia. Sin embargo, se las debe tomar en cuenta en cualquier estrategia considerara por la industria y los gobiernos. Las tecnologías tales como aquellas de la fabricación de fertilizantes, bombeo y acondicionamiento de agua, y mejora de la biomasa son muy importantes.

Por ultimo, las tecnologías de información y comunicación (I&CT) adquieren una importancia crítica en todas las áreas de la vida humana, incluyendo tecnologías energéticas, pero no son más importantes que las tecnologías de uso final. Esa importancia es obvia en el mundo desarrollado, pero las I&CT son un primer paso necesario para darle a la gente y a las instituciones de los países en desarrollo el conocimiento para identificar y proveer servicios energéticos.*

* Se puede hallar información útil sobre I&CT en el sitio Web del Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas, <http://www.choices.undp.org>.

Referencias

1. *Energy Technologies for the 21st Century*, World Energy Council, London, 2001, <http://www.worldenergy.org>.
2. A.J. Birchenough and J.G. Hollins, *Ongoing Innovation in Energy, Essential for Canada*, Position Paper of the Energy Council of Canada, Ottawa, September 2002.
3. *Energy for Tomorrow's World—Acting Now*, World Energy Council, London, 2000, <http://www.worldenergy.org>.
4. N. Nakicenovic, A. Grübler, and A. McDonald, *Global Energy Perspectives*, International Institute for Applied Systems Analysis and World Energy Council, Cambridge University Press, 1998.
5. *Electricity Technology Roadmap*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, U.S., 2003.

Parte II. Escenarios Futuros

Para ubicar la evaluación de las tecnologías energéticas en contexto, la representación del sector en el Grupo de Estudios y los revisores fomentaron el examen de la gama de posibles escenarios energéticos. Si bien no se puede predecir el futuro, y los adelantos tecnológicos al igual que las sorpresas siempre son una realidad, utilizando aquellas tecnologías que actualmente imaginamos es posible observar el desarrollo histórico de la tecnología energética y los momentos bien documentados para el aprendizaje tecnológico – junto con las consideraciones económicas, y las limitaciones ambientales y de inversión entre otras – para entender mejor los potenciales caminos del desarrollo. Estos tipos de estudios han sido llevados a cabo anteriormente por el CME.^{1,2} Estos estudios anteriores, y el informe del 2001 sobre tecnologías de fuente y de generación, fueron actualizados para esta evaluación de las tecnologías de uso final. Elegimos 34 escenarios que abarcan una serie de condiciones económicas y ambientales. Incluyen los 6 escenarios desarrollados en *Perspectivas Energéticas Mundiales (Global Energy Perspectives - GEP)* y 28 desarrollados independientemente para el *Informe especial sobre los escenarios de emisiones*.³ Los escenarios no predicen el futuro. Son la base sobre la cual se examinan las suposiciones y se evalúan las estrategias, especialmente para los negocios.

El estudio actual se centra en dos marcos temporales: 2020 y 2050. El Grupo de Estudio consideró que el 2020 era lo suficientemente cercano como para poder realizar extrapolaciones confiables desde el presente, y a la inversa, que el 2050 estaba lo suficientemente alejado en el futuro como para no estar restringido por el presente. Se consideraron tres escenarios extremos para comprender cuál sería la demanda alta y baja (llamados aquí los tres escenarios de referencia). Dos de los escenarios pueden caracterizarse como futuros de alto crecimiento económico y energético como resultado de exitosos esfuerzos de globalización (A en GEP, y específicamente ambos A1 y A3 de alto fósil/bajo fósil), y el otro como impulsado ecológicamente con reducido consumo de energía debido a una mayor eficiencia y conservación de la energía (C en GEP), específicamente C2, que contiene energía nuclear significativa. Los tres—A1, A3, y C2—describen transiciones fundamentales— aunque alternativas— de los actuales sistemas energéticos y modelos de uso final hacia futuros caracterizados por nuevas tecnologías energéticas y actividades humanas. Los escenarios A y C representan el rango efectivo de futuros posibles.

Los tres escenarios generalmente se describen de la siguiente manera:

- **A1—Escenario de alto crecimiento que va más allá de la sabiduría convencional sobre la disponibilidad de petróleo y gas.** Ningún desarrollo destacable que favorezca el carbón o la energía nuclear. Como resultado, el cambio tecnológico se centra en aprovechar el vasto potencial del petróleo y gas convencional y no convencional. En este escenario el petróleo y el gas podrían ser reemplazados por el carbón, y por esto se remite a los lectores a otro escenario (ver Referencia 2). Sin embargo, los montos brutos de energía utilizada en los sectores de uso final no son tan diferentes, aunque los usos finales específicos pueden verse afectados (por ejemplo, líquidos provenientes del carbón que reemplazan al petróleo).

- **A3—Escenario de alto crecimiento con transición a una era de energía post-fósil.** El uso de renovables a gran escala con intensa biomasa y una nueva generación de tecnología nuclear lideran este escenario. La transición no se completa hasta el 2100, cuando hay una dependencia casi igual de la energía nuclear, el gas

natural, la biomasa, y una nueva clase de energía renovable compuesta por la solar y eólica.

• **C2—Consumo reducido de energía.** Este escenario es tecnológicamente muy desafiante. Supone una cooperación internacional progresiva sin precedentes centrada explícitamente en la protección del medio ambiente y la igualdad internacional y cambios radicales en los estilos de vida tendientes a la conservación y el no materialismo. Se supone que se desarrollará una nueva generación de reactores nucleares que sean intrínsecamente seguros con capacidad instalada de pequeña escala de 100 a 300 MWe. Hasta el punto en que la energía nuclear no puede proveer la energía necesaria, los renovables compensan la diferencia. La energía fósil se convierte en un combustible de transición.

En la **Tabla II-1** se da un resumen de las características de los escenarios.

Tabla II-1 – Resumen de los escenarios A y C de *Energía para el Mundo del Mañana*, Consejo Mundial de la Energía, 2000. (La tabla ha sido actualizada según el año 2000 como base, de acuerdo a la Referencia 3).

Escenario	A	C
Población (miles de millones)		
2000	6,2	6,2
2050	10,1	10,1
GWP (billones de US\$ del año 2000)		
2000	30	30
2050	110	84
Energía primaria (EJ)		
2000	420	420
2050	1040	600
Disponibilidad de recursos		
Fósiles	Alta	Baja
No fósiles	Alta	Alta
Intensidad tecnológica		
Fósiles	Alta	Media
No fósiles	Alta	Alta
Emisiones netas de carbono, Gtoneladas de carbono		
2000	6,4	6,4
2050	9-15	5

A. Fuerzas detrás de los escenarios

Numerosos factores, a veces llamados fuerzas motrices, influyen sobre los patrones de suministro de energía y sobre la provisión de servicios energéticos. Tanto los patrones energéticos del futuro como la evolución de sus fuerzas subyacentes (por ejemplo tasa de cambio tecnológico, precios) son altamente inciertos. Los escenarios alternativos describen cómo podría desarrollarse el futuro, basándose en un conjunto internamente coherente de suposiciones acerca de relaciones clave, fuerzas motrices y resultados de las emisiones. Los escenarios energéticos en la literatura abarcan una amplia gama de desarrollos futuros que podrían influir sobre la evolución de los sistemas y servicios energéticos. A menudo describen transiciones hacia modelos de suministro y uso final de la energía más sostenibles o simplemente diferentes. Claramente, los desarrollos demográficos y económicos juegan un rol crucial en la determinación de las futuras necesidades energéticas. Otra fuerza fundamental es el cambio tecnológico. Otros factores son diversos, y no es posible idear un esquema simple que represente todos los factores considerados y su ponderación en los escenarios. Abarcan desde los recursos

humanos tales como la educación, los marcos institucionales, y los estilos de vida hasta las dotaciones de recursos naturales, estructuras del capital óptimo, y modelos de negocio internacionales.⁴

Los escenarios utilizados en esta evaluación abarcan una amplia gama de futuros desarrollos de la población de la literatura subyacente. La población mundial aumenta de 6200 millones en el 2000 a entre 11300 millones como máximo y 8700 millones como mínimo de la distribución para el 2050. Los tres escenarios comparten el mismo desarrollo medio de la población. Las percepciones acerca del futuro crecimiento de la población han cambiado substancialmente desde mediados de la década de 1990. En esa época, las proyecciones de la población media superaban ampliamente los 10000 millones para el 2050,⁵ mientras que en la actualidad han descendido hasta menos de los 9000 millones para el 2050.⁶ La totalidad del rango de las llamadas proyecciones “probabilísticas” también ha declinado a lo largo del mismo período, desde entre 8000 y 12000 millones para el 2050 a mediados de la década de 1990 hasta entre menos de 7000 y 11500 millones para las proyecciones más recientes. El rango total de proyecciones probabilísticas es el grado de incertidumbre asociada con el futuro desarrollo demográfico. Las principales razones de la disminución tanto en las proyecciones de la mediana como en los rangos de incertidumbre asociados se relacionan con las tasas de fertilidad constantemente en disminución en el mundo que ya han alcanzado niveles bien por debajo del reemplazo en la mayor parte de Europa, los Estados Unidos y Japón. La extensión y estructura de las futuras poblaciones son esenciales para la evolución de los sistemas y tecnologías energéticas en los tres casos de referencia que comparten el mismo desarrollo de la población.

El crecimiento económico está íntimamente ligado a los desarrollos energéticos y tecnológicos, y las tecnologías energéticas pueden ser consideradas un factor mediador esencial para un mayor desarrollo económico y social en el mundo. Todos los escenarios utilizados aquí consideran un futuro donde los ingresos por persona aumentan en el mundo, pero a ritmos diferentes según las diversas regiones del mundo y los escenarios mundiales. En todos ellos, hay algún grado de “igualación” condicional entre los países en desarrollo y los ya industrializados. Esta limitación se refiere a rangos relativos de crecimiento y no a disparidades de ingreso absolutas por persona que continúan creciendo incluso en escenarios con un grado más alto de “convergencia” (ver Referencia 3).

La tasa de crecimiento histórica del producto mundial bruto (GWP) ha sido de alrededor de 4% por año desde la década de 1950. En los escenarios examinados aquí, las tasas de crecimiento promedio hasta el 2100 van de 1,1% a 3,2% por año, siendo el valor medio 2,3% por año. Esto se traduce en un GWP en el 2100 que varía de 3,5 a más de 32 veces el GWP en 1990. El GWP de 1990 y del 2000 estaban en alrededor de US\$20 billones y US\$35 billones, respectivamente. Esto se traduce en un rango de alrededor de US\$70 billones hasta más de US\$640 billones (en dólares del año 1990) para el 2100. El rango total del desarrollo del GWP en la literatura de los escenarios incluye unas pocas desviaciones, mientras que el resto de los escenarios se agrupan mucho más estrechamente, comprimiendo el rango a un incremento proporcional de alrededor de 7 a 17 veces en comparación con 1990.

Un “factor estilizado” incorporado en muchos de los escenarios es que las tasas de desarrollo económico más elevadas generalmente están asociadas con tasas de crecimiento de la población más bajas y tasas de rotación del capital más elevadas y en consecuencia menores intensidades energéticas. Esto se basa en evidencia histórica y escenarios en la literatura subyacente. La principal implicancia es que las grandes reducciones de intensidades energéticas y las tasas más elevadas de desarrollo económico requieren una difusión más rápida y dominante de tecnologías energéticas nuevas y avanzadas, y especialmente tecnologías de uso final.

B. Cambio tecnológico

En los escenarios energéticos se insertan dos formas básicas de cambio tecnológico. Primero, las tecnologías cambian incrementalmente a lo largo del tiempo. Es decir, las características tecnológicas mejoran gradualmente. Ejemplos de dichas mejoras son las reducciones de costo, mejoras en eficiencia, y reducciones de emisión por actividad unitaria. La segunda forma, más radical, representa una introducción de tecnologías completamente nuevas en algún punto en el futuro. Los ejemplos son la energía de fusión o la separación y almacenamiento del carbono de fuentes de energía fósil. Schumpeter fue el primero en distinguir entre estos dos tipos básicos de cambio.⁷ La principal diferencia del enfoque de Schumpeter con respecto a los escenarios energéticos es que el cambio tecnológico generalmente se lo trata en forma determinista en cualquier escenario dado. Simplemente se supone que la tecnología se hará disponible en un cierto período de tiempo a un costo y rendimiento dados, mientras que en realidad es un proceso evolutivo incierto. Algunas tecnologías son exitosas, mientras que otras fallan, y sus costos y rendimiento son funciones de muchos factores interrelacionados. Esta es la razón por la cual se toman una serie de escenarios de la literatura y se evalúan las consecuencias de las diferentes direcciones del cambio tecnológico en los mismos. La suposición básica es que el rango abarcará gran parte de la incertidumbre inherente a través de la riqueza de los futuros alternativos. Los tipos de cambio tecnológico graduales y más radicales llevan hacia las transiciones descritas por los escenarios alternativos.

Otra característica importante del cambio tecnológico es que es acumulativa. Los pequeños cambios se amplifican en otros más fundamentales a medida que se adoptan nuevas tecnologías exitosas y reemplazan a alternativas más antiguas. Por ejemplo, las nuevas tecnologías a menudo son más costosas e inferiores en comparación con las alternativas más antiguas y más maduras que dominan el mercado. Sin embargo, las nuevas tecnologías a menudo mejoran a medida que tanto los productores como los consumidores ganan experiencia (los productores aprenden haciendo; los consumidores aprenden usando). Los costos y los impactos ambientales se reducen mientras que también mejoran generalmente otros aspectos del rendimiento tecnológico. Dichas mejoras graduales y persistentes a veces están correlacionadas con la experiencia acumulada y se las llama en forma colectiva “ganancias crecientes”. Las relaciones empíricas entre las mejoras del rendimiento o las reducciones de costos con creciente producción o capacidad acumulada son llamadas curvas de “experiencia” o “aprendizaje” en la literatura. La **Figura II-1** muestra una curva de aprendizaje de reducción de costo para la producción de etanol a partir de biomasa en Brasil. La naturaleza acumulativa del cambio tecnológico es uno de los actuadores fundamentales de las transiciones de la energía alternativa en los escenarios aquí utilizados.

C. Fuentes de energía

Por las razones señaladas en la Parte I, las fuentes de energía primaria—aunque no son el centro de interés de este informe—son importantes para la tecnología de uso final y se las describe aquí brevemente. Los escenarios analizados en esta evaluación abarcan una amplia gama de futuro uso de la energía en el mundo y por lo tanto evalúan el posible rol de las futuras tecnologías energéticas bajo circunstancias diferentes. De un lado de este rango se encuentran los escenarios con muy alta utilización de energía (hasta seis veces los niveles actuales), y por el otro escenarios con un alto grado de ahorros de energía y conservación que ponen el límite de las futuras necesidades energéticas en menos del doble del actual uso de la energía. Claramente, los escenarios con un alto uso de energía implican diferentes carteras de

tecnología energética en comparación con los escenarios que ponen el énfasis en los ahorros de energía de uso final y mejor rendimiento de los servicios energéticos.

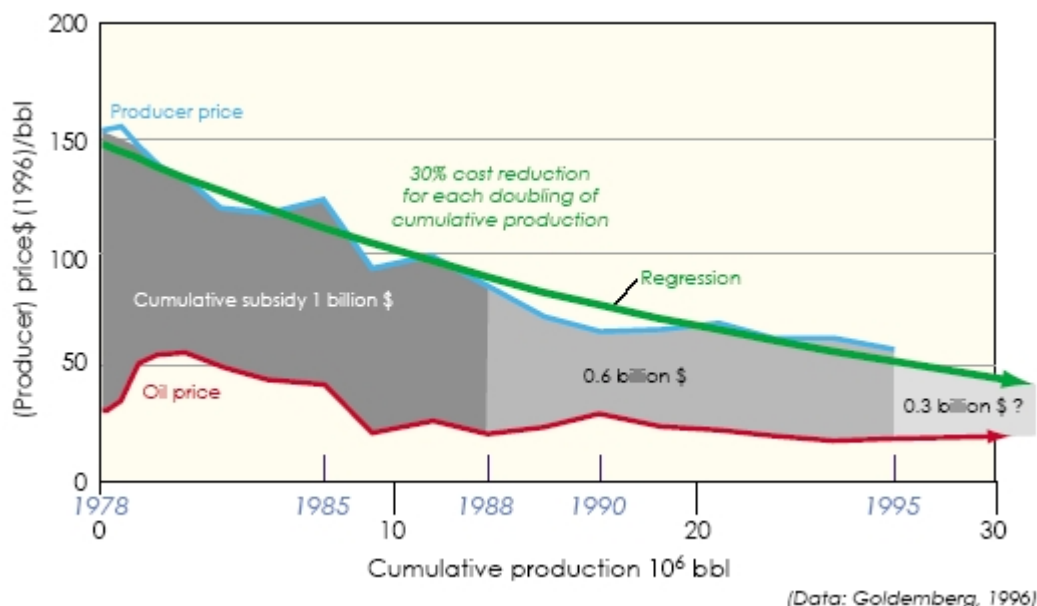


Figura II-1. Curva de aprendizaje para la producción de etanol en Brasil comparando con los precios mundiales del petróleo. [Fuentes: Grübler, comunicación personal, basada sobre datos de J. Goldemberg, "Evolución de los costos del etanol en Brasil," *Política energética*, Vol. 24 (12), págs. 1127–28, 1996 y vuelto a imprimir en N. Nakicenovic y K. Riahi, "Evaluación del cambio tecnológico en escenarios energéticos seleccionados," *Tecnologías energéticas para el siglo XXI*, Consejo Mundial de la Energía, Londres, 2001.]

La **Figura II-2** muestra el rango de uso futuro de energía primaria en los diferentes escenarios. El uso más elevado de energía se acerca a los niveles de energía primaria de 3,000 EJ por año mientras que el más bajo está por debajo de 800 EJ para el 2100. Aunque este informe se centra en el 2020 y 2050, en esta sección se muestran escenarios hasta el 2100 para otorgarles a los lectores una mejor comprensión de la dinámica y poner énfasis en las tecnologías que pueden resultar importantes más allá del 2050. Los seis escenarios de GEP comparten tres niveles de uso de energía primaria. Los otros 28 se superponen con los seis GEP en el rango más bajo, pero extienden considerablemente la parte superior de la distribución. Esto se debe principalmente a las altas tasas de desarrollo económico en algunos de ellos. Es interesante notar que los escenarios en el rango más bajo representan futuros sustentables con una transición hacia un uso de la energía muy eficiente y altos grados de conservación. En su mayor parte también son los escenarios en los cuales las fuentes de energía con baja intensidad de carbono juegan un rol importante.

La **Figura II-3** ilustra estructuras de sistemas energéticos alternativos en los 28 escenarios y el desarrollo histórico desde 1850. Las participaciones relativas de las diferentes fuentes de energía, en porcentaje, muestran la evolución histórica de la oferta energética mundial desde la década de 1850. La primera transición del sistema energético comenzó con la introducción del carbón que reemplazó las fuentes tradicionales de leña y animales de trabajo. Esta transición duró alrededor de 70 años, hasta la década de 1920. Durante ese período de tiempo, la participación del carbón aumentó de 20% en 1850 a más del 60% para 1920. Esta fase de desarrollo se caracterizó por la introducción del vapor, el acero y los ferrocarriles. La siguiente transición duró otros 70 años y se caracterizó por el reemplazo del carbón por el

petróleo y por el gas natural. Se puede caracterizar aún más por la rápida expansión de la combustión interna, la electricidad, los productos petroquímicos y el automóvil. Para la década de 1990, más del 80% de la energía mundial era provista por fuentes de hidrocarburos, es decir, carbón, petróleo y gas natural. Las fuentes con cero carbono tales como la energía hidroeléctrica y nuclear juegan un rol muy limitado actualmente, mientras que las renovables tradicionales satisfacen el resto de las necesidades energéticas, especialmente en los países en desarrollo.

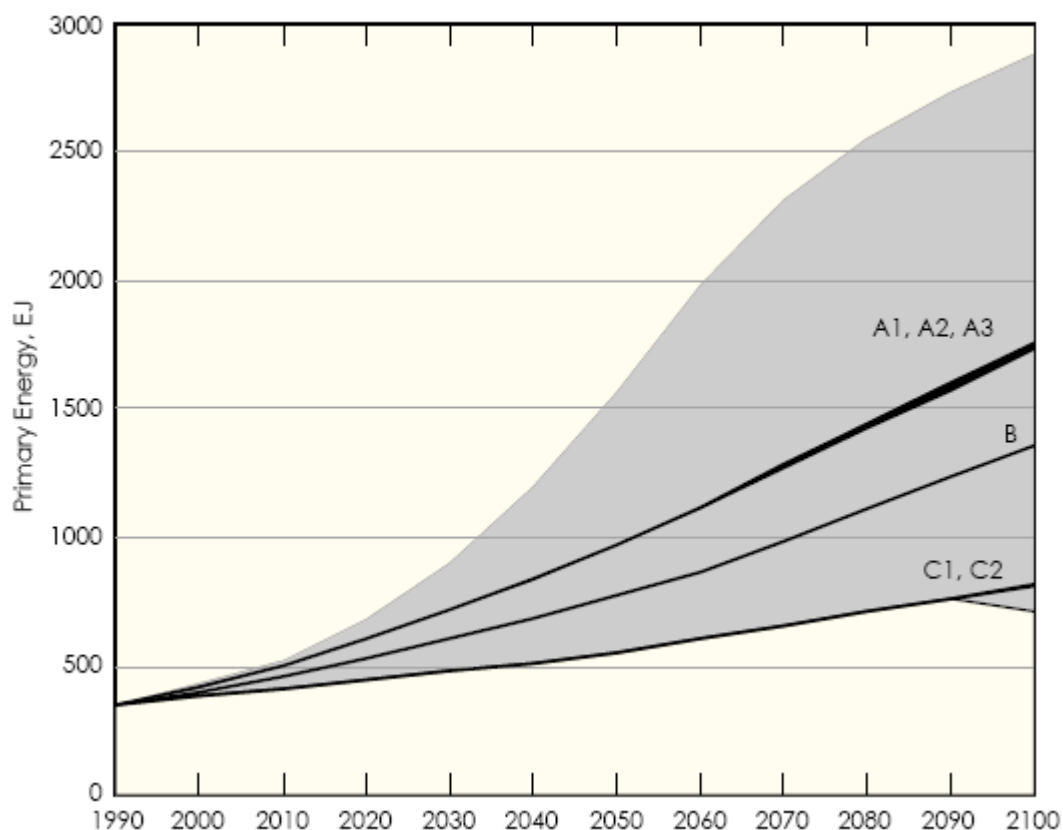


Figura II-2. Uso mundial de la energía primaria. Los tres casos de uso de la energía se señalan para los 6 escenarios de GEP (marcados en negro) y el rango para los restantes 28 escenarios.

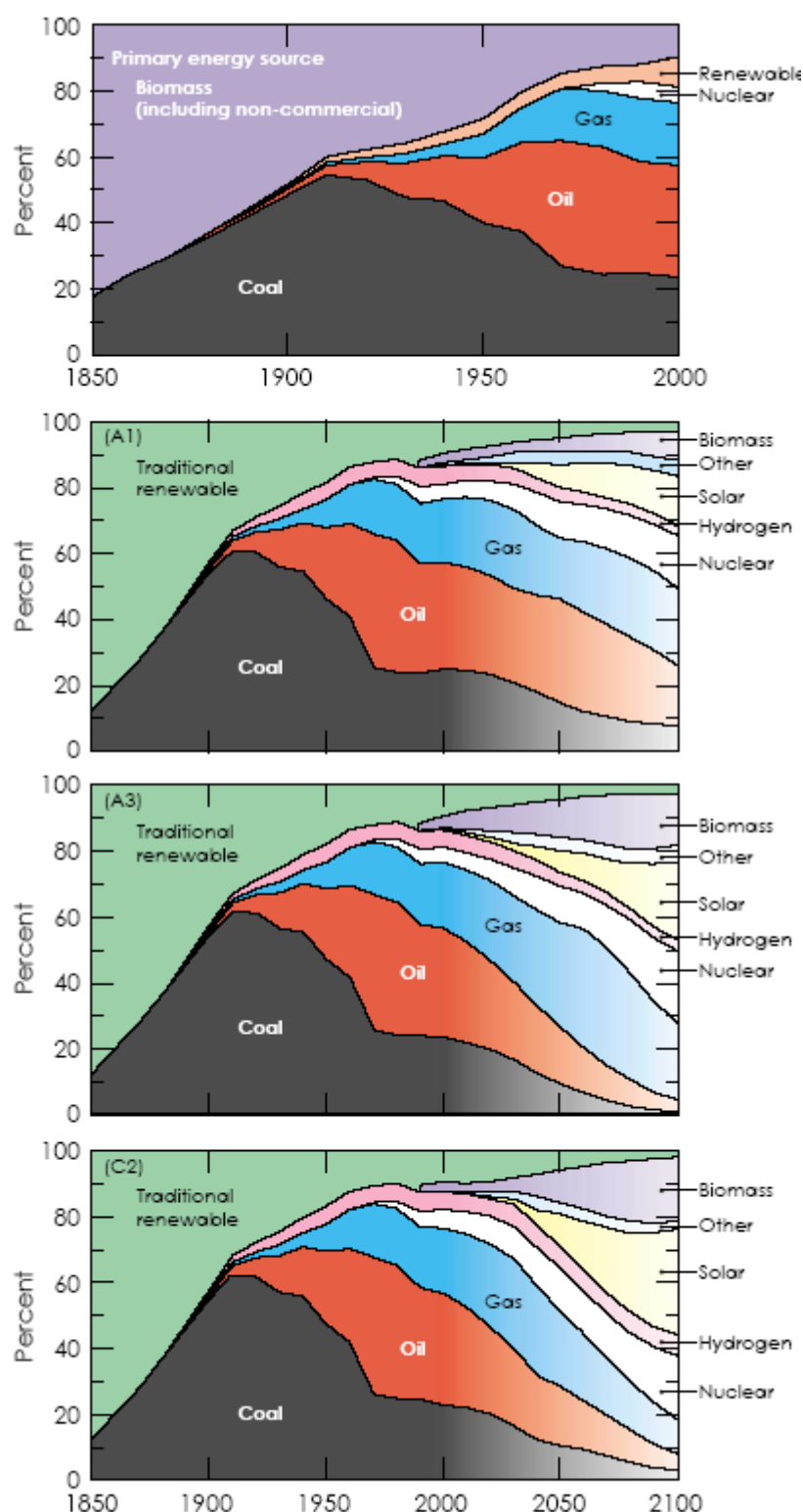


Figura II-3. Evolución histórica de las estructuras de los sistemas energéticos, como participaciones de diferentes fuentes de energía primaria de 1850 a 2000 (superior). Futuros desarrollos para los escenarios utilizados aquí: A1, A3, y C2 (Fuentes: Nakicenovic, y otros, 1998 y 2000).

Mirando hacia el futuro, se exponen diferentes posibilidades en los distintos escenarios. Algunos de los escenarios representados en la Figura II-3 prevén un regreso al carbón. Esto es especialmente importante para aquellas regiones del mundo que tienen amplios recursos de carbón (India y China). Otros escenarios ponen el énfasis en una

mayor dependencia del petróleo y el gas, mientras que algunos otros prevén una transición hacia fuentes con cero carbono, en los cuales la energía nuclear, la energía solar, la biomasa moderna, y otras fuentes de energía renovables juegan un rol mucho más importante. El escenario de la Figura II-3d llevaría hacia un predominio de las fuentes de energía que no producen emisiones de carbono, para fines del siglo XXI. Esta transición hacia una “descarbonización” del sistema energético mundial al mismo tiempo logra muchos objetivos de desarrollo sustentable. Estos son algunos de los beneficios auxiliares destacados de la descarbonización y de los profundos cambios estructurales en el sistema energético.

A pesar de las enormes diferencias en los diversos escenarios, tienen características en común. Por ejemplo, comparten los mismos supuestos acerca de la disponibilidad de recursos energéticos fósiles y nucleares y potenciales de energía renovable. Pero sus utilidades son diferentes, dependiendo de los supuestos acerca de las tasas de aprendizaje tecnológico, desarrollo económico y otras fuerzas (por ejemplo, diferentes niveles y direcciones de supuestos gastos en ID+D en los diferentes escenarios conducen a una mayor inversión en algunas tecnologías nuevas y menor en otras, promoviendo reducciones de costos y mejoras en el rendimiento en algunos y creando obstáculos en otros. De este modo las estructuras de los sistemas energéticos alternativos evolucionan en los diferentes escenarios. Otro ejemplo es la inversión en la transferencia de recursos hacia reservas económicamente viables, nuevamente una función de inversiones intermedias. Finalmente, las infraestructuras energéticas tienen a tener un efecto de bloqueo.) Estas diferencias tienden a amplificarse después del 2020. Dadas las prolongadas vidas de la infraestructura, las centrales energéticas, las refinerías, y otras inversiones energéticas, no habrá un movimiento de dichas instalaciones lo suficientemente amplio como para que revele grandes diferencias en los escenarios antes del 2020.

Estas profundas diferencias estructurales entre los escenarios indican que los futuros de la energía mundial a largo plazo no están predeterminados. La inminente escasez de recursos pronosticada en la década de 1970 para fines del siglo no se ha materializado. Con continuos esfuerzos de exploración y progreso tecnológico, las reservas físicas y económicamente accesibles han aumentado (conversión de recursos en reservas), aunque a menudo a un costo más elevado. Después del 2020, todos los escenarios describen transiciones alejándose de la dependencia actual del petróleo y el gas convencional, pero en grados diferentes. De hecho, los recursos de petróleo y gas convencional calculados actualmente no avanzan mucho en los períodos posteriores al 2020 en cualquiera de los escenarios. La mayor parte de la divergencia entre los escenarios después del 2020 dependerá de los desarrollos tecnológicos implementados entre el presente y ese momento en el futuro (ver Referencia 2).

D. Implicancias tecnológicas

En contraste con la rica diversidad de los futuros suministros energéticos en los diferentes escenarios existe un sorprendente grado de convergencia en la estructura de los usos finales de la energía. Esta convergencia se relaciona con un creciente impulso hacia formas más flexibles, más limpias y más convenientes de energía final y de servicios energéticos. En general, la calidad de los servicios energéticos mejora en todos los escenarios hasta un grado independiente de transiciones de energía primaria alternativa.

La **Figura II-4** muestra la evolución de las formas de energía final en el mundo para los tres escenarios de referencia de las GEP. Actualmente, alrededor de un tercio de la energía final alcanza a los consumidores en forma sólida, por ejemplo como carbón

y biomasa. Esta es la causa principal de muchos problemas locales, regionales y de contaminación ambiental en espacios cerrados asociados con usos de energía tradicional. Un tercio llega a los consumidores en forma líquida, consistiendo principalmente en productos de petróleo tales como productos del petróleo utilizados en el transporte. El último tercio llega a los consumidores por la red, formado por electricidad y gases de energía (mayormente gas natural). Las participaciones de los vectores energéticos orientados a la red aumentan en todos los escenarios a alrededor de la mitad de toda la energía final para fines del siglo.

La electricidad y el gas natural siguen creciendo dentro de esta transición total hacia un rol más importante de las redes, y los nuevos vectores energéticos tales como el hidrógeno se tornan aún más corrientes recién hacia fines del siglo. El rol de los líquidos sigue siendo casi el mismo con una transición gradual hacia los combustibles sintéticos, tales como el metanol del carbón y el etanol de la biomasa. La transición más llamativa de todas es la caída radical de los sólidos. Esto lleva a una importante reducción de los impactos sobre la salud y el medio ambiente. Los sólidos se convierten cada vez más en electricidad, gases de energía y líquidos.

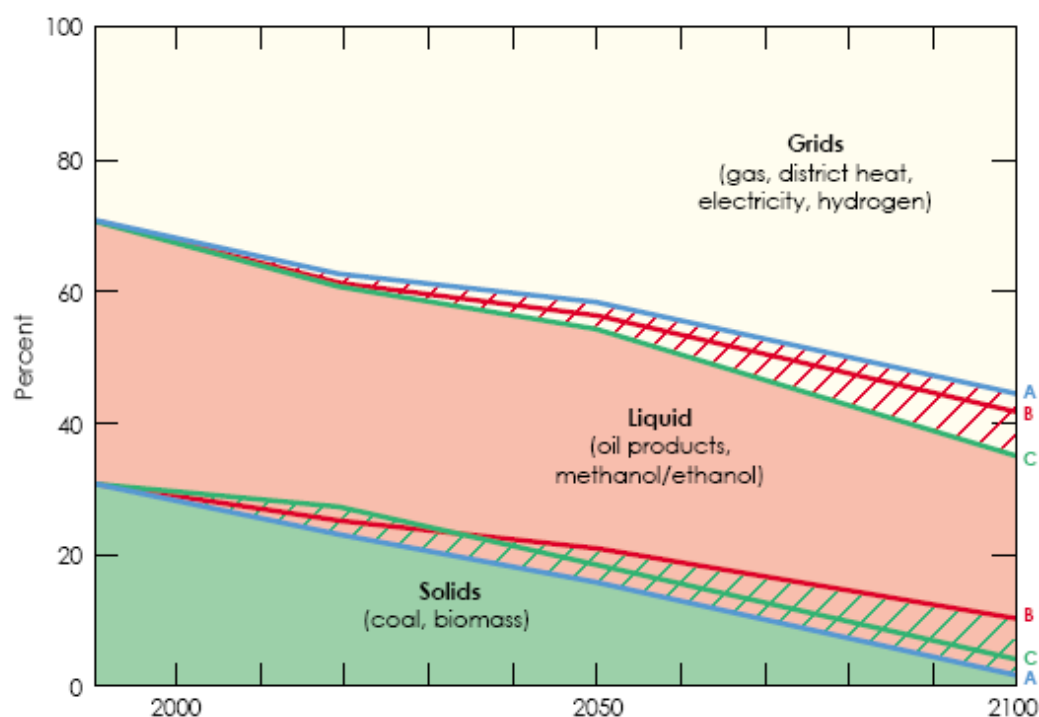


Figura II-4. Energía final en los escenarios señalando un cambio gradual hacia vectores energéticos orientados hacia la red y alejándose del uso directo de los sólidos, que en su lugar son convertidos en combustibles sintéticos, electricidad y gases de energía (Fuente: *Perspectivas Energéticas Mundiales*, Nakicenovic, et al., Cambridge University Press, Reino Unido, 1998.)

Las Figuras II-5, II-6, y II-7 describen cambios equivalentes en la estructura de la energía primaria para los tres escenarios de referencia y los tres principales sectores económicos: industrial, residencial (hogares) y comercial, y transporte. Esto ilustra variaciones de la tendencia total de convergencia en las transformaciones energéticas hacia una calidad, flexibilidad y compatibilidad ambiental aún mayor de los vectores energéticos finales. También ilustran la cambiante naturaleza de los servicios energéticos y las tecnologías que los proveen.

La Figura II-5 compara los cambios mundiales en la energía final en todos los escenarios con aquellos del sector industrial para los tres escenarios de referencia. Confirma la tendencia generalizada hacia menores participaciones del uso directo de la biomasa y el carbón en procesos industriales y hacia una mayor contribución de los vectores energéticos modernos.

En contraste, la Figura II-6 muestra un dramático alejamiento de los sólidos en el sector residencial y comercial. Estas son las formas de energía predominantes en la mayoría de las regiones en desarrollo en la actualidad, que representan casi el 40% de todos los suministros de energía en este sector. El crecimiento de la electricidad como el vector energético de preferencia es predominante en los tres escenarios, estando en un segundo lugar muy cercano los líquidos y los gases sintéticos.

Finalmente, la Figura II-7 muestra un dramático alejamiento de los productos de petróleo hacia combustibles sintéticos en el sector de transporte. El hidrógeno se convierte en un vector energético más importante pero recién hacia fines del siglo. Al igual que en la industria, esta transformación se basa en el cambio subyacente en las tecnologías de uso final pasando de la actual dependencia de los motores de combustión interna para el transporte por carretera y las turbinas de gas para el transporte aéreo. La excepción es el transporte por ferrocarril, que depende mayormente de la propulsión eléctrica. La importancia de la electricidad crece en los diferentes escenarios, mientras que los combustibles sintéticos, tanto líquidos como gases, se tornan más importantes en el futuro. Esto está en relación con un cambio hacia vehículos de celda de combustible y/o otras alternativas provisionales, tales como los vehículos híbridos.

Todos estos cambios implican un reemplazo profundo y fundamental de las actuales tecnologías de uso final por una y en algunos casos dos generaciones de tecnologías nuevas e innovadoras para finales del siglo. Los cambios son menos dramáticos para el 2050, pero de todos modos son muy profundos en comparación con la actual estructura de las tecnologías de uso final. Esto implica un monto significativo de ID+D sobre estas tecnologías antes del 2050. Los escenarios sirven aquí para resumir algunos desarrollos abarcadores y dominantes. En particular, ayudan a identificar posibles rangos de utilización de las nuevas tecnologías y el grado de substitución de la actual generación de tecnologías. Estas breves descripciones de las tecnologías de uso final demuestran hasta qué punto algunas de las tecnologías nuevas y avanzadas se utilizan en los escenarios hacia el año 2050.

Como ejemplo de las transformaciones fundamentales de la tecnología de uso final, la **Figura II-8** muestra los rangos de vectores energéticos finales utilizados en todos los escenarios hacia el 2050. Actualmente, los productos del petróleo son la forma de energía dominante en el transporte, representando el 90% de todas las necesidades energéticas. Este es un testimonio de la importancia de los motores de combustión interna y de las turbinas de gas. La Figura II-8 también muestra que los productos de petróleo se extienden entre 50 y 180 EJ hacia el 2050, en comparación con los actuales requisitos totales de energía final en el mundo, de alrededor de 300 EJ. La mediana está por encima de los 100 EJ o un tercio de la actual energía final total. El metanol adquiere mayor importancia en algunos escenarios, como por ejemplo líquidos derivados de la biomasa impulsados por factores ambientales, mientras que no es tan importante en otros. La mediana es significativamente menor que los productos de petróleo. Los rangos de etanol e hidrógeno son comparativamente menores. Sin embargo, algunos de los escenarios implican una transformación radical de los futuros sistemas de transporte, desde la actual dependencia de los productos del petróleo a una mayor participación de los combustibles alternativos y vehículos alternativos.

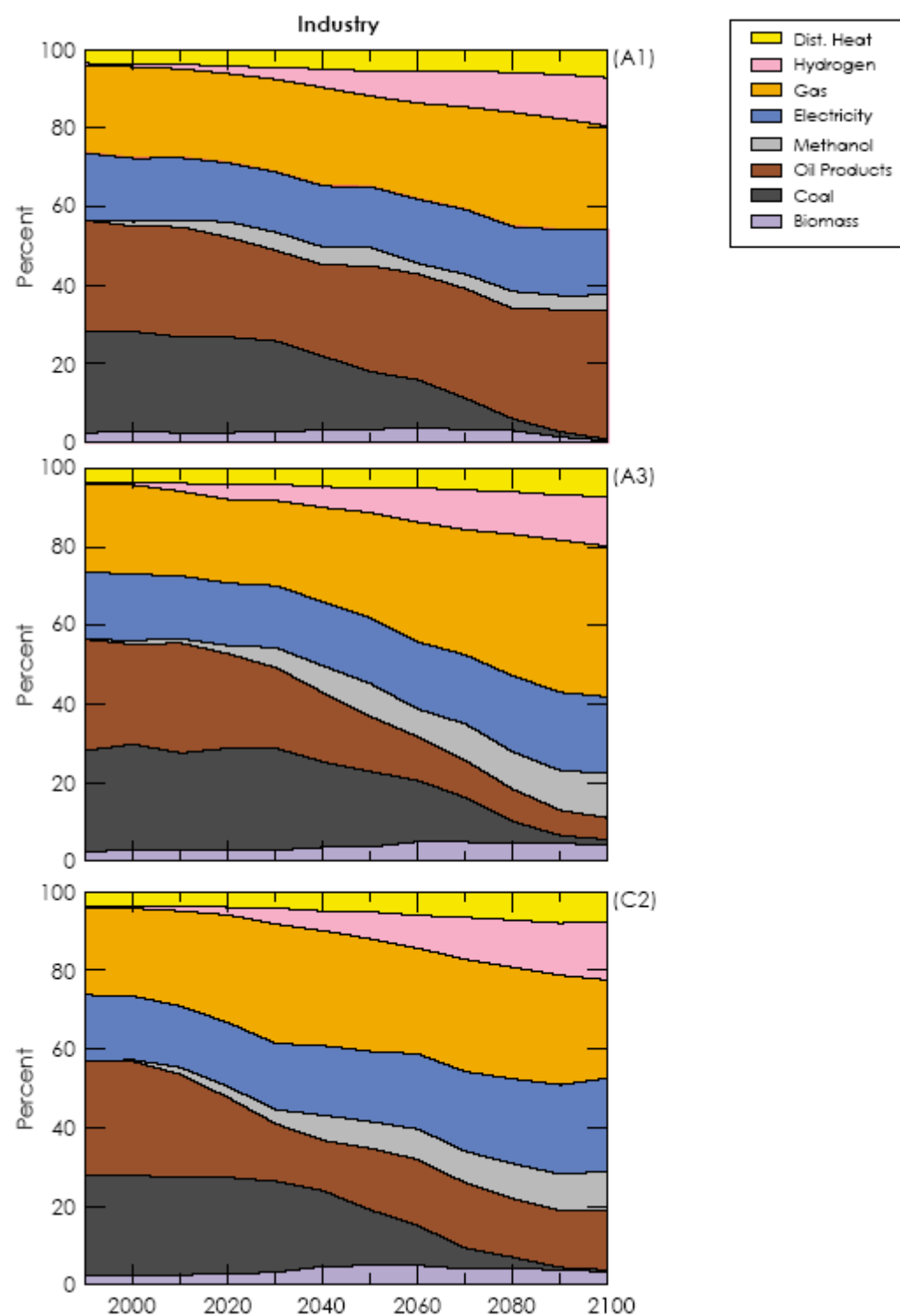


Figura II-5. Cambios globales en energía de uso final industrial para los tres escenarios de referencia.

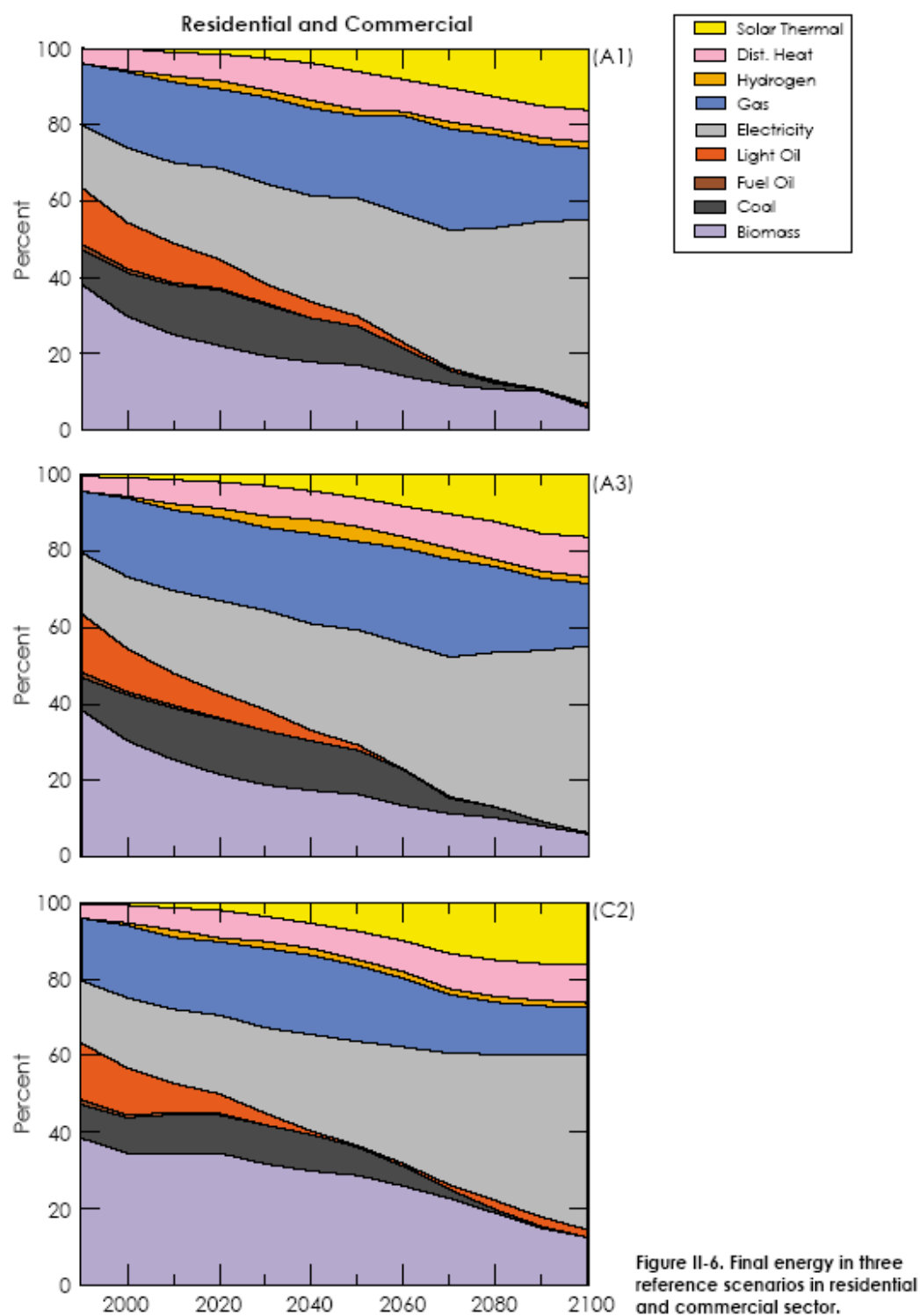


Figura II-6. Energía final en tres escenarios de referencia en el sector residencial y comercial.

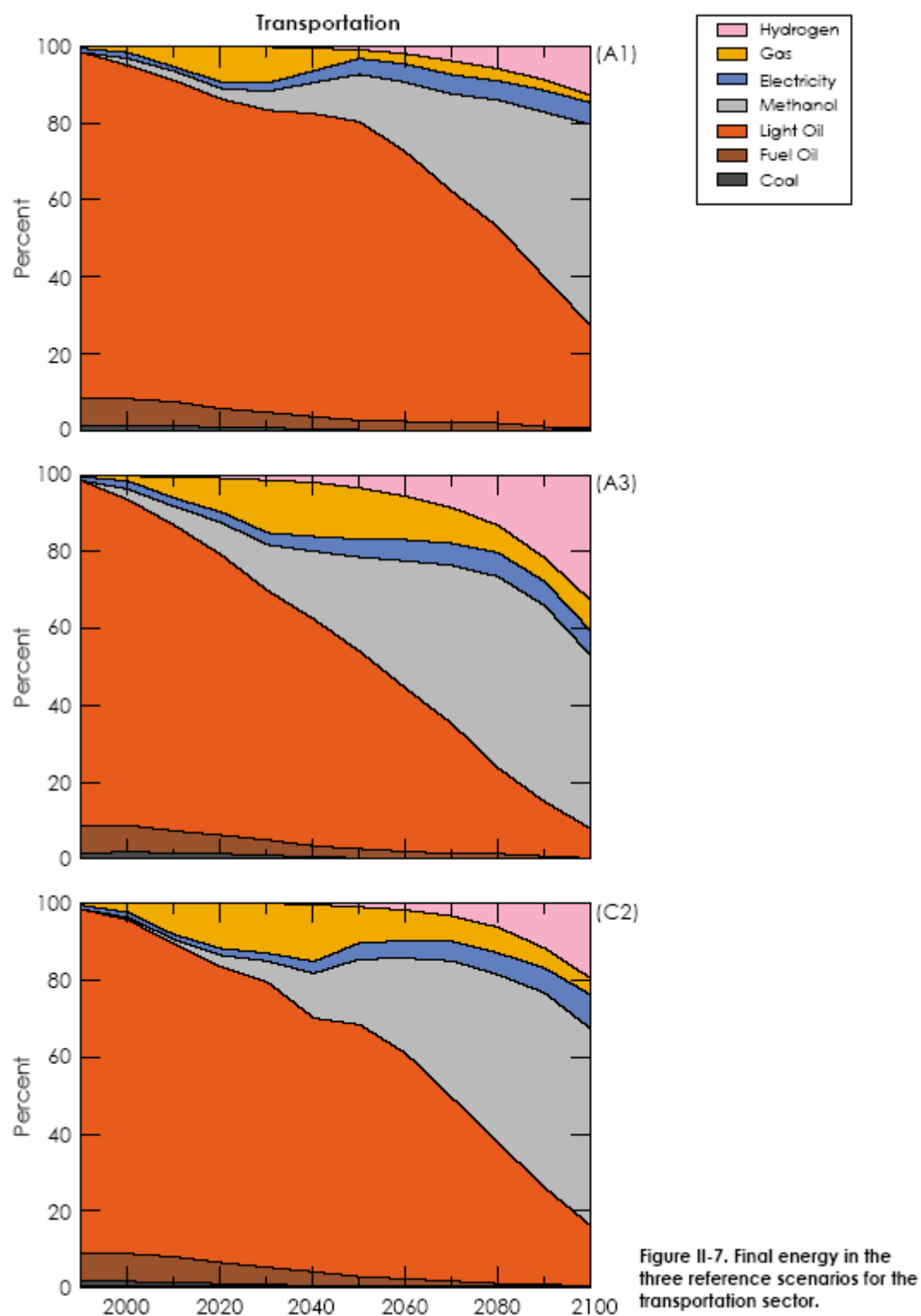


Figure II-7. Final energy in the three reference scenarios for the transportation sector.

Figura II-7. Energía final en los tres escenarios de referencia para el sector de transporte.

En general, un análisis de los escenarios revela las siguientes percepciones:

- La mayoría de los cambios a gran escala en los combustibles del sector de uso final tienen lugar después del 2050, cualquiera sea el escenario. Sin embargo, para que

ocurran estos cambios, anteriormente tienen lugar importantes incursiones en el mercado.

- Las tecnologías claves son aquellas que mejoran la eficiencia energética, la energía renovable, y la siguiente generación de energía fósil y nuclear (fisión).
- La ID+D llevada a cabo actualmente es crucial para la realización de cualquier escenario. La acumulación de experiencia (aprendizaje tecnológico) es esencial y esto lleva tiempo.
- En las primeras etapas de los programas de ID+D, la cooperación (como entre la industria y el gobierno) es importante para asegurar el avance tecnológico libre de interrupciones con mínimas superfluidades.
- Los gases—primero el gas natural y luego el hidrógeno—reemplazan gradualmente a los combustibles sólidos y líquidos. El hidrógeno, aunque tiene significativas incursiones antes del 2050, recién predomina después de esa fecha. Una razón principal es que las tecnologías de conversión y utilización de gas natural ya están muy avanzadas.

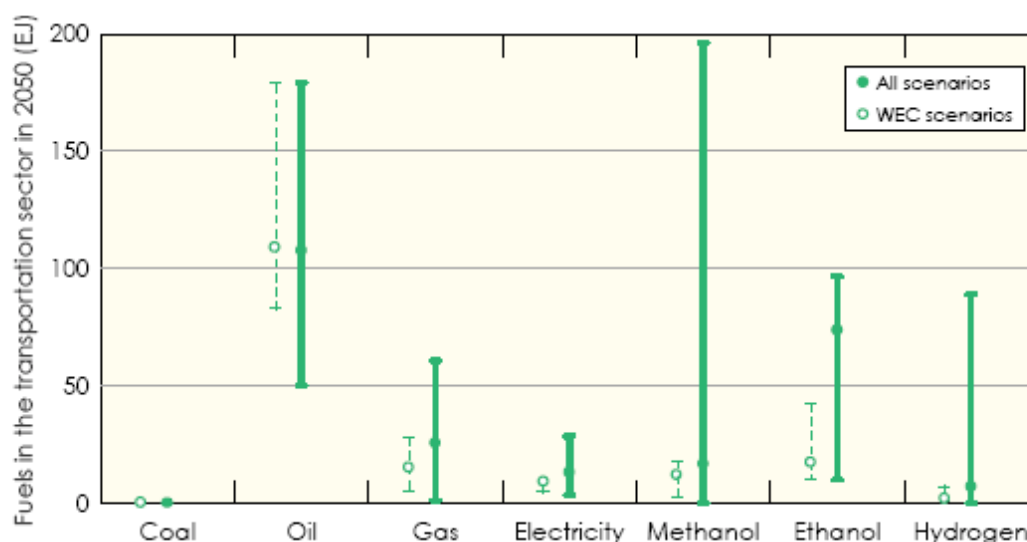


Figura II-8. Utilización de la energía final en el transporte en todos los escenarios para el año 2050.

Referencias

1. *Energy for Tomorrow's World: Acting Now*, World Energy Council, London, 2000.
2. N. Nakicenovic, A. Grübler, y A. McDonald, *Global Energy Perspectives (Perspectivas energéticas mundiales)*, Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados y Consejo Mundial de la Energía, Cambridge University Press, 1998.
3. N. Nakicenovic, et al., *Special Report on Emissions Scenarios (Informe especial sobre escenarios de emisiones)*, Informe especial del Grupo de Trabajo III del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido., 2000.
4. N. Nakicenovic, "Socio-Economic Driving Forces of Emission Scenarios," (Fuerzas motrices socioeconómicas de los escenarios de emisión) *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World (El ciclo mundial del carbono: integración del hombre, el clima y el mundo natural)*, B.C. Field and M.R. Raupach, eds., SCOPE Series, Island Press, pp. 225–239, 2004.
5. W. Lutz, W. Sanderson, y S. Scherbov, "World Population Scenarios in the 21st Century. The Future Population of the World: What Can We Assume Today?"(Escenarios de Población Mundial en el siglo XXI, Población future del mundo: ¿qué podemos suponer en la actualidad?) *EnergyPolicy*, Vol. 27, pp. 85–97, 1996.
6. W. Lutz, W. Sanderson, y S. Scherbov, "The End of World Population Growth," (El fin del crecimiento de la población mundial) *Nature*, Vol. 412, pp. 543–545, 2001.
7. J.A. Schumpeter, *Business Cycles: A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*, (Coyunturas económicas: análisis teórico, histórico y estadístico del proceso capitalista) Vols. I & II, McGraw-Hill, Nueva York, 1935.

Parte III. Tecnologías de uso final

El estudio se dividió en cuatro partes que abarcan las tecnologías en los sectores de industria, edificios y transporte, y tecnologías transversales (aquellas tecnologías que atraviesan todos los sectores de uso final). Varias áreas de ID+D que emanan de las necesidades de varios sectores son comunes a otros sectores.

Un estudio de 1997 sobre tecnologías energéticas para la reducción de emisiones de carbono¹, nos ha guiado y nos ha permitido tener una mejor comprensión del tema. Cada área de tecnología de uso final se aborda en términos de los siguientes puntos claves:

- Conceptos del sistema
- Descripción de la tecnología
- Estado de la tecnología
- ID+D: Objetivos y desafíos
- Comercialización y utilización

Beneficios y costos (beneficios esperados en cuanto a—)

- Accesibilidad
- Costo (¿será económicamente accesible?)
- Eficiencia (¿mejorará?)
- Disponibilidad (¿estará más disponible en el futuro?)
- Confiabilidad (cómo se compara con la competencia actual)
- Calidad de la energía (cómo se compara con la competencia actual)
- Aceptabilidad

Factores de riesgo (escala de 1–10, siendo 10 un riesgo extremadamente elevado)

- Técnicos (probabilidad de comercialización)
- Comerciales (obstáculo para la utilización)
- Ambientales (efectos adversos)
- Regulatorios (obstáculos en la regulación)

A. Industria

En la actualidad, la industria consume 30% de la energía mundial. Los escenarios de la Parte II indican que el sector industrial en todo el mundo utilizará de 130 a 180 EJ por año en el 2020 en comparación con los 115 EJ en el 2000. El rango representa la diferencia entre los escenarios C y A. En el 2050, los escenarios indican 165 EJ para C y 285 EJ para A, un incremento de 143% a 250% sobre la utilización actual. Los ahorros de energía debidos a nuevas tecnologías, calculados tomando la diferencia entre los escenarios A y C (consumo energético reducido) pueden ser tanto como 50 EJ por año para el 2020 y 120 EJ por año hacia el 2050, posiblemente lográndose más del 80% en Asia.

Esta sección evalúa las tecnologías con uso intensivo de energía y las tecnologías intensivas de calidad de potencia. El rol de estas últimas está creciendo, particularmente en el mundo industrializado. Mirando hacia el futuro, la industria tendrá que abordar la necesidad de una mejor infraestructura de suministro de energía para satisfacer las necesidades especiales de las cargas digitales. La tarea básica es evaluar los parámetros de uso final de la energía y las oportunidades para mejorar la eficiencia, la productividad, el entorno de trabajo y la conveniencia general. El Grupo de Estudio se centró en las industrias manufacturera, de transformación y de conocimiento, incluyendo industrias nuevas y emergentes. Estas últimas se abordan

en la Parte III.D (Tecnologías Transversales). El alcance del trabajo también se centró en industrias de servicio, que constituyen hasta 60–70% del PBI en los países desarrollados. Los conceptos tales como “la oficina del futuro,” con su dependencia de la tecnología digital muestran cómo las industrias del servicio evolucionarán para satisfacer las cambiantes necesidades de la economía de los servicios. También se consideró importante realizar una evaluación del potencial del salto tecnológico por parte de los países en desarrollo capaces de evitar algunos de los laboriosos caminos del desarrollo tecnológico que ya siguieron los países actualmente desarrollados. Esto acortaría el tiempo de desarrollo y reduciría la necesidad de reemplazar las infraestructuras arraigadas. También se consideraron los usos finales de la electricidad en lugar de otras formas de energía, y el procesamiento de materiales con gas natural sin utilizar electricidad.

Al examinar la tecnología industrial, esta sección se basa en gran medida en los ejemplos. La industria de los Estados Unidos domina varia de las industrias descritas y provee muchos ejemplos. También se utiliza a Suecia porque es un país industrialmente avanzado y pequeño con grandes industrias de uso final de la energía, con grandes participaciones en la exportación, una industria de servicios en rápido crecimiento, y datos accesibles. Las industrias examinadas en este informe son Papel y Pulpa, Hierro y Acero, Aluminio, Electrónica y Semiconductores, Cemento, Sustancias Químicas y las Industrias de Servicio. Juntas, representan la vasta mayoría del consumo de energía por parte de la industria en el mundo entero.

1. Papel y Pulpa

Los diagramas y los datos en esta parte del informe se basan en cifras y notas adjuntas producidas por la asociación de negocios de Suecia, Skogsindustrierna.^{2,*}

Conceptos del sistema

La producción mundial de papel ha aumentado en forma constante por al menos 50 años y se espera que continúe esta tendencia (**Figura III-1**). La producción anual actual es de alrededor de 300 millones de toneladas en comparación con los 120 millones de toneladas en 1970. La producción mundial de pulpa es de alrededor de 180 millones de toneladas. El acceso al papel es un requisito fundamental para el desarrollo de la sociedad. Se ha calculado que 40 kilogramos de papel por persona por año es la cantidad mínima para satisfacer las necesidades básicas de comunicación y alfabetización. El consumo promedio actual sigue estando por debajo de los 15 kilogramos por persona en muchas partes del mundo.

* Las cifras en algunas instancias se basan en datos provenientes del consultor de la industria del papel de Finlandia, Jaakko Pöyri

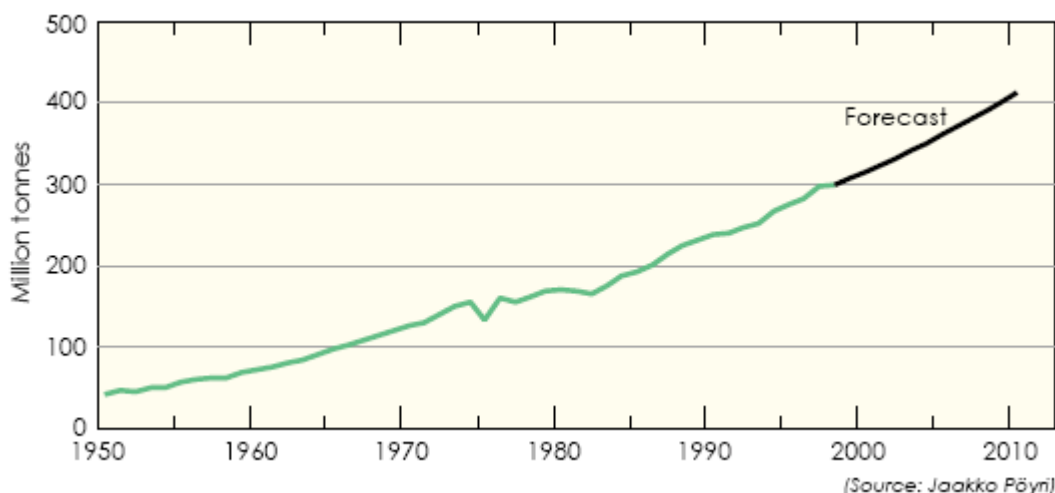
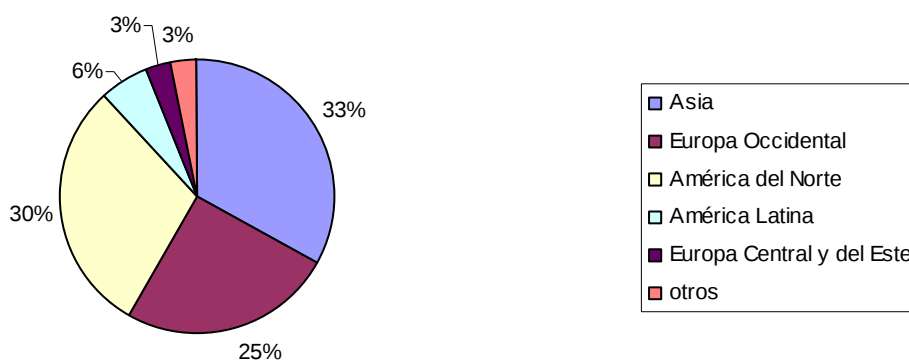


Figura III-1. Producción mundial de papel y proyección.

La industria del papel y la pulpa, parte importante de la economía de los países de mayor producción, requiere mucha intensidad de energía. En los Estados Unidos, ocupa el octavo puesto en manufactura en relación al PBI. Es aún más importante en Canadá, Suecia y Finlandia, tanto en cuanto al PBI como en cuanto a una principal exportación. En los Estados Unidos, es responsable de alrededor del 12% del uso de energía para manufactura.³ En Suecia, es responsable de casi el 50% del consumo energético industrial total y de alrededor del 40% del consumo industrial de electricidad. Los costos para la energía comprada externamente se ubican en el rango de 15–20% de los costos totales de producción. Debería notarse que la industria utiliza mucha más energía de la que surge de estas cifras ya que tanto el calor como la electricidad son generados como una parte integral del proceso de producción.

El consumo de papel per capita no es parejo en las diferentes regiones del mundo. Algunos afirman que es uno de los pocos productos básicos que aún no muestra saturación en la demanda per capita en los países altamente desarrollados, tales como los Estados Unidos. Como ejemplo, el consumo anual de papel para imprimir para computadoras personales ha sido calculado en 115.000 millones de hojas, lo que corresponde aproximadamente a 0,5 millones de toneladas en todo el mundo. Así, el consumo por persona sigue aumentando en el mundo desarrollado, aunque a un ritmo más lento que en el pasado. En los Estados Unidos, aumentó 1,8% por año de 1960 a 1980, 1,6% de 1980 a 1993, y se proyecta que crecerá 0,6% por año hasta el 2040. En la China, el consumo de papel, aunque ahora es bajo, está creciendo rápidamente. La producción de pulpa de la China era de 17 millones de toneladas en el 2001 en comparación con los 38 millones de toneladas para la totalidad de Asia en 1996 (**Figura III-2**). En promedio, se utilizan alrededor de 52 kilogramos de papel por año por persona en todo el mundo (**Figura III-3**).



Consumo total: 318 millones de toneladas

(Fuente: PPI, 2001)

Figura III-2. Distribución mundial del consumo del papel.

Desde 1980, la participación combinada de producción de papel de América del Norte y Europa Occidental ha disminuido de 67% a 62%, mientras que la participación combinada de América Latina y Asia (excluyendo Japón) ha aumentado de 11% a alrededor de 22%. La industria espera que esta tendencia continúe. También espera que la producción se centre más hacia las regiones de más rápido crecimiento del consumo. Asia debería seguir siendo un área de crecimiento principal.

La **Figura III-4** muestra la distribución de la producción mundial de pulpa (179 millones de toneladas en el 2001). Los Estados Unidos, Canadá, China, Finlandia y Suecia son los mayores productores de pulpa. La mayoría de los países exporta una proporción relativamente pequeña de su producción de pulpa. Las exportaciones mundiales ascienden a 36 millones de toneladas o alrededor del 20% de la producción mundial. Normalmente, una gran proporción de la producción de pulpa se convierte en papel en el país de origen. América del Norte y Escandinavia son los principales exportadores mundiales de pulpa y papel (**Figura III-5**).

Sumando estas exportaciones se ve que, en cuanto a la pulpa, se exporta una parte relativamente pequeña del total de la producción de papel.

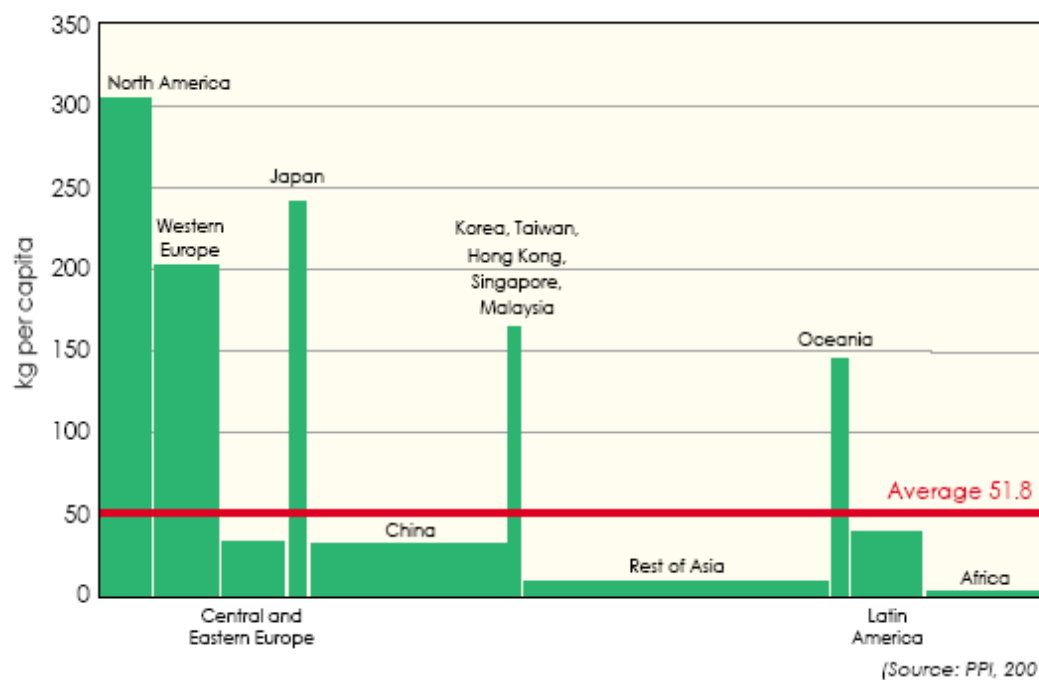


Figura III-3. Consumo mundial de papel por persona en el 2001. El ancho de cada barra es proporcional a la población de cada región o país.

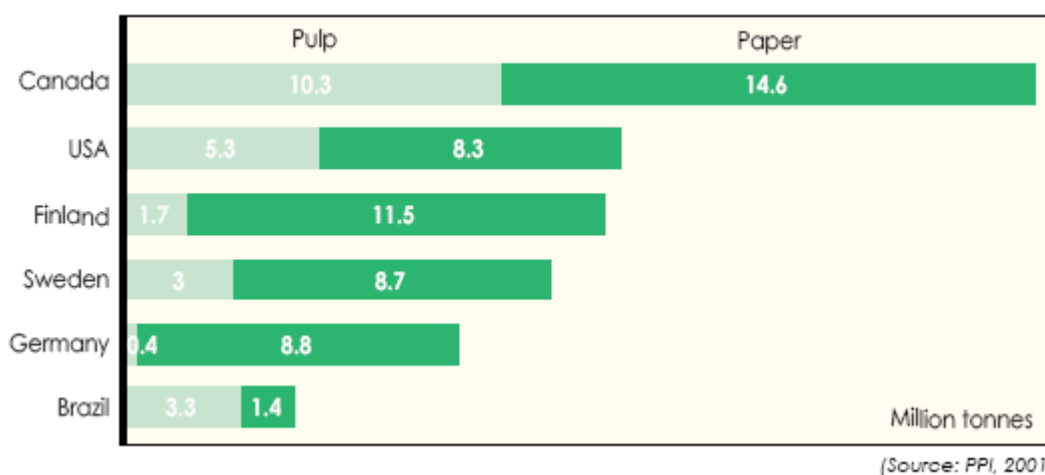


Figura III-4. Exportadores de papel y de pulpa.

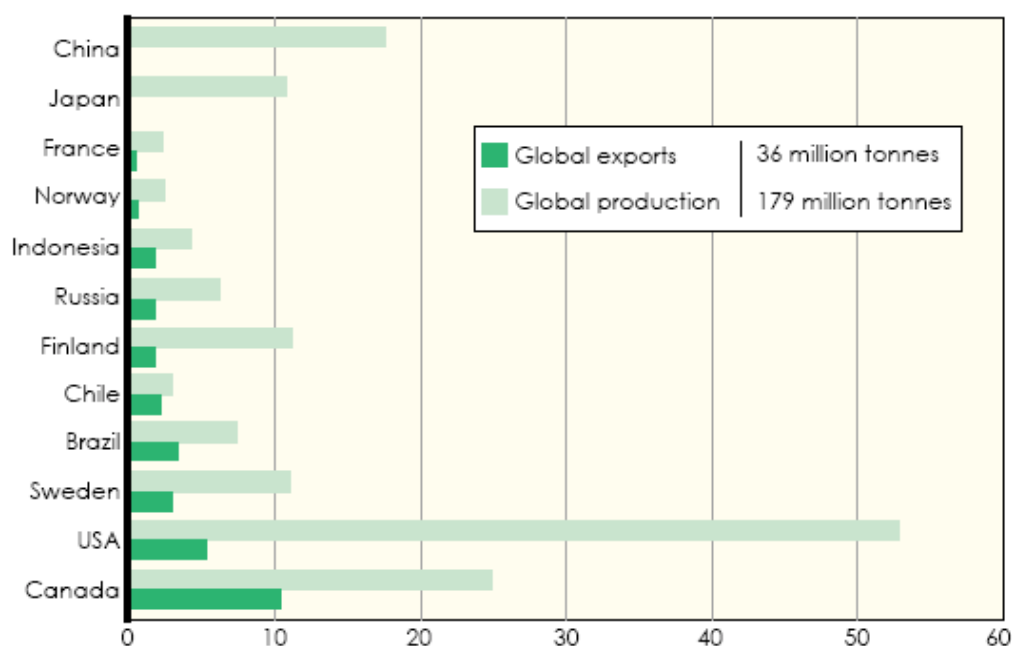


Figura III-5. Producción y exportaciones de pulpa en el 2001.

La **Figura III-6** muestra el comercio neto de papel entre regiones. Una gran parte del comercio tiene lugar dentro de estas regiones o con regiones cercanas. Por ejemplo, Suecia exporta una gran parte de su papel a Europa Occidental.

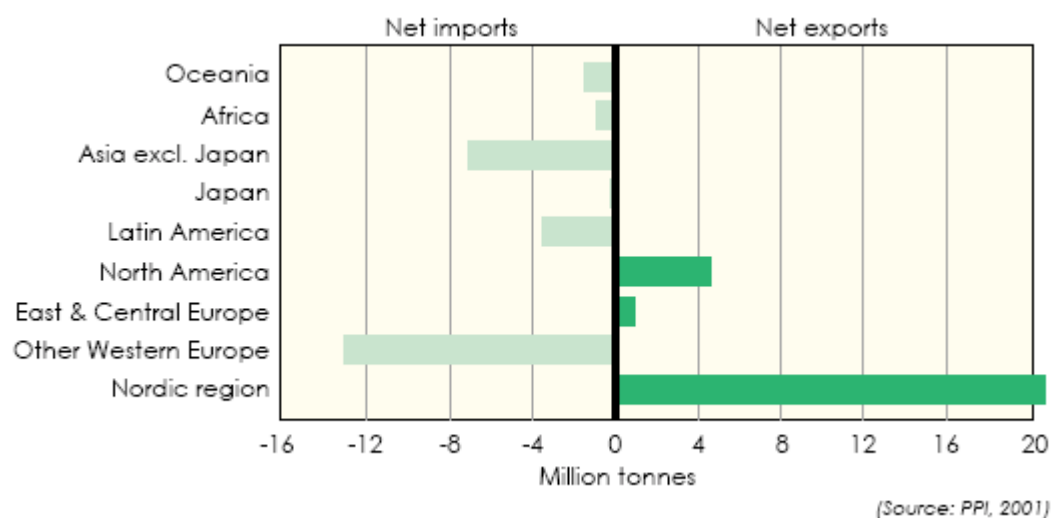


Figura III-6. Comercio neto de papel en el 2001.

Descripción de la tecnología

El reciclado de papel es importante desde el punto de vista de la eficiencia de la material prima y aún más en cuanto a la gestión de residuos. Como ejemplo, Suecia produce alrededor de 11 millones de toneladas de pulpa. En el 2002, su industria del papel consumió 1,86 millones de toneladas de papel de desecho. Los periódicos y el cartón corrugado cumplieron la mayoría de los requisitos del papel de desecho y representaron un total del 85%. También se utilizó el material de embalaje recogido de los hogares, el papel de las oficinas, y los residuos de la producción de la industria gráfica.

Las fábricas de papel de periódico consumían una gran parte del papel de desecho (45%), junto con las fábricas que producen material para cartón corrugado (31%). En el 2002, se recogieron casi 1,5 millones de toneladas de papel de desecho en Suecia, principalmente periódicos y cartón corrugado. Esto da como resultado una tasa de recolección (volumen recogido como porcentaje de consumo de papel) de 69%. Suecia tiene gran demanda de papel de desecho importado, principalmente periódicos y cartón corrugado. En el 2002, las importaciones ascendieron a 602.000 toneladas, correspondientes al 32% de la demanda de papel de desecho del sector. Las exportaciones ascendieron a 190.000 toneladas y consistían principalmente de papel de desecho de alta calidad.

La producción de pulpa se apoya en dos procesos principales, un proceso químico y un proceso termomecánico (TMP), cada uno con variaciones. El proceso químico alcalino al sulfato o proceso "Kraft" fue el estándar de la industria hasta finales de la década de 1960 en que se desarrolló el TMP. La mayor parte de los países desarrollados han volcado una gran parte de su producción de pulpa al TMP porque produce mucha menos contaminación a un costo más bajo por tonelada de pulpa. El TMP también es más eficiente en el uso de material prima y requiere menor intensidad de capital que el proceso químico. La pulpa Kraft a menudo necesita blanqueado, mientras que la pulpa TMP no lo necesita. Sin embargo, el proceso Kraft es más adecuado para el papel de mayor calidad dado que produce fibras más fuertes y puede utilizar la mayoría de los tipos de madera, mientras que la pulpa TMP produce papel más débil, no puede utilizar cualquier materia prima, y requiere mayor intensidad de energía. Actualmente la pulpa TMP asciende al 30% del total de la producción mundial de pulpa.

Aunque la industria requiere gran intensidad de energía, una fábrica de papel y pulpa también es una industria de proceso complejo. En una fábrica existente se utilizarán tecnologías nuevas y con mayor eficiencia energética solamente si se están realizando mejoras por otras razones. Las inversiones en la industria son grandes y el ciclo de inversión está típicamente en el orden de los 30 años. Las mejoras en los procesos técnicamente exitosas tendrán una barrera a su introducción en cuanto tornan obsoletas las presentes inversiones antes de recuperar la inversión.

Estado de la tecnología

La comunidad de ID+D para la industria de la pulpa y del papel consiste en la industria misma, las firmas y consultoras de ingeniería de proceso, los fabricantes de diferentes tipos de equipos, las universidades, y los institutos de investigación especializados (a menudo nacionales), cada uno de ellos con responsabilidad en diferentes áreas de ID+D. Tanto la industria como los gobiernos nacionales normalmente financian los programas de ID+D. También hay una importante cooperación internacional, por ejemplo el programa de la Agencia Internacional de Energía (AIE) y dentro del programa de I+D de la Unión Europea.

El programa de la AIE para tecnologías de uso eficiente de la energía para la industria del papel y de la pulpa en el presente se centra principalmente en dos áreas:

- Integración del proceso, incluyendo herramientas para el manejo del agua y la fabricación de papel a un nivel bajo de consumo de agua y el uso de análisis de estricción térmica:
- Tecnologías de gasificación para licor negro y biomasas.

ID+D: Objetivos y desafíos

Los desafíos para la industria y por lo tanto las fuerzas motrices para su agenda de ID+D son—

- Productos nuevos y rentables
- Uso más eficiente de la materia prima y los productos químicos, incluyendo el reciclado de ambos
- Menor impacto ambiental mediante mejoras de los procesos existentes y nuevos procesos, por ejemplo, el proceso Kraft libre de azufre
- Mayor eficiencia energética

En general la sustentabilidad es una fuerza motriz subyacente pero también lo es la presión de los clientes para reducir el impacto ambiental tanto de la producción como del uso de los productos. Las fuerzas están interrelacionadas porque la materia prima se utiliza tanto para la producción de fibra como para la conversión de energía interna en calor y electricidad. También podría haber opciones para entregas externas de electricidad y calor mediante generación a contrapresión industrial (PCCE) o biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. Los productos químicos también pueden reciclarse. A los importantes campos de I+D se los llama “fábricas cerradas de pulpa y papel”, donde la optimización de los procesos incluye tecnología de modelado y de control.

La Asociación Americana de Bosques y Papel, en colaboración con el Departamento de Energía de los EE.UU. (DOE), publicó un plan de trabajo en 1999 de I+D para la industria de productos forestales hasta el año 2020.⁴ La industria de productos forestales abarca varias otras ramas de la industria, incluyendo la industria del papel y la pulpa, que es nuestra principal preocupación en este trabajo. El estudio identificó cinco áreas principales de I+D importantes para la industria:

- Producción e incremento de combustible
 - Mejores técnicas de reducción de la humedad
 - Tecnologías para residuos y otros materiales reciclables
- Conversión de combustible y producción de electricidad
 - Gasificación de biomasa y de licor negro
 - Mejor comprensión de los fundamentos de las técnicas de conversión de energía, especialmente lecho fluidizado, gasificación y combustión de combustibles y licor negro
 - Desarrollo de tecnologías, por ejemplo celdas de combustible a ser utilizadas en combinación con la gasificación para incrementar la eficiencia energética
 - Desarrollo de modelo para permitir la optimización del tamaño y de la integración de la planta
 - Concepto y tecnologías para la ampliación de la vida útil de los hornos Tomlinson.
- Eficiencia del proceso de fabricación y recuperación del calor
 - Nuevas tecnologías para recuperar el calor de bajo nivel
 - Procesos nuevos o más eficientes de eliminación del agua antes del secado
 - Variabilidad reducida /mejor control de proceso
- Impacto ambiental de la producción y utilización de la energía
 - Opciones de utilización de la ceniza
 - Opciones de utilización del sedimento
 - Mejores tecnologías de combustión
 - Alternativas a la combustión de gases VOC
 - Mayor eficiencia y uso de combustibles de biomasa

- Uso más extendido de recursos renovables
 - Comercialización de biomasa mejorada a tecnologías químicas
 - Alternativas de integración de proceso que tienen en cuenta las alternativas de producción química atractivas
 - Comprensión de la eficiencia energética en la producción de productos de papel en relación a los productos en competencia.

La industria del papel y la pulpa tiene necesidades de investigación similares a las de otras industrias en áreas tales como bombas, ventilación y aire acondicionado, eficiente iluminación y transmisión y distribución de electricidad (para auto generación). La industria es particularmente importante para los países en desarrollo dado que el mercado continuará teniendo su tasa de crecimiento más elevada en aquellos países.

Comercialización y utilización

La tecnología para la industria en el mundo desarrollado está muy desarrollada y las fábricas más modernas tienen alta productividad, eficiencia energética, y bajo impacto ambiental. Se espera que haya más mejoras dado que la ID+D sigue produciendo resultados. Es importantísimo contar con una mejor transferencia de tecnología y esto permitiría dar un “salto de rana” a medida que se construye la industria en nuevas regiones y países. Las características menos pronunciadas pero igualmente importantes de la actual agenda de ID+D abarcan la optimización de los procesos y las mini-fábricas.

Un ejemplo de la dirección de la ID+D en la industria de la pulpa y el papel es el proyecto sueco, el Ecocyclic Pulp Mill (KAM) (fábrica de celulosa ecocíclica) ⁵ financiado conjuntamente por el gobierno y la industria. El objetivo del programa es la producción de papel de alta calidad con uso eficiente de la energía de la biomasa. El proyecto se centra en el proceso Kraft y la pulpa blanqueada. Los asuntos claves de ID+D son—

- Equilibrios minerales
- Reducción al mínimo de los residuos sólidos
- Consumo de energía reducido
- Utilización del exceso de energía
- Alternativas al proceso Kraft.

Las siguientes son importantes áreas de diseño de proceso—

- Deslignificación y blanqueado incluyendo alternativas al proceso Kraft de producción de pulpa
- Substancias inorgánicas fuera del proceso en una fábrica de pulpa extensamente cerrada
- Sistemas de separación para substancias fuera del proceso (lixivación de astillas, diferentes sistemas de purificación para la planta de blanqueo, ej. membranas)
- Recuperación de lignina del licor negro
- Residuos sólidos y equilibrios minerales.

Las partes del programa KAM pertinentes para la energía son los sistemas energéticos y el potencial energético (uso de energía, potencial de una mayor eficiencia energética), nuevos diseños de centrales de evaporación, consecuencias energéticas de la precipitación de la lignina, y el uso del excedente de combustible de biomasa. Las fábricas modelo con lixivación de astillas, eliminación de lignina, generación de electricidad utilizando licor negro, y la producción de combustible de metanol son muy promisorias. Una importante conclusión del programa es que el proceso Kraft no tiene alternativa viable, pero tiene un importante potencial de mayor desarrollo en muchos

aspectos, incluyendo menores emisiones de CO₂. Los cálculos de los marcos temporales para la primera implementación total de las técnicas relacionadas con la energía son los siguientes:

- Corto plazo (1–5 años)
 - Condensación de la potencia del excedente de energía
 - Integración del calor particularmente en la evaporación del licor negro
- Mediano plazo (5–10 años)
 - Venta de lignina precipitada
 - Posiblemente gasificación del licor negro con producción de energía o de metanol (incierto)
- Largo plazo (>10 años)
 - Gasificación del licor negro con producción de energía o de metanol
 - Recuperación química mediante gasificación para cocción de sulfato alcalino.

Factores de riesgo

- Técnicos—2: Los riesgos técnicos son bajos, a excepción del personal de operación capacitado y experimentado en los países en desarrollo.
- Comerciales—3: La competencia puede dar como resultado un riesgo considerable para la industria en el mundo en desarrollo. Por otra parte, la globalización puede traer importantes beneficios.
- Ambientales—1: El potencial de un impacto ambiental mucho menor y el uso del reciclado tiene importantes beneficios para el medio ambiente.
- Regulatorios—4: No se sabe qué regulaciones requerirán los gobiernos en los diferentes países, ni cuál será su impacto. La industria está muy regulada los países desarrollados en cuanto a las emisiones al agua y al aire y al uso de productos químicos. Algunas naciones también regulan la proporción de papel reciclado en la producción de pulpa.

2. Hierro y acero

La producción mundial de acero para el 2002 fue de 900 millones de toneladas métricas.⁶ Después de una ralentización a comienzos de la década de 1990, el crecimiento anual se ha recuperado y fue de 2,4% para el período 1995–2000 y de 3,2% para los años 2000–2002 (**Figura III-7**).

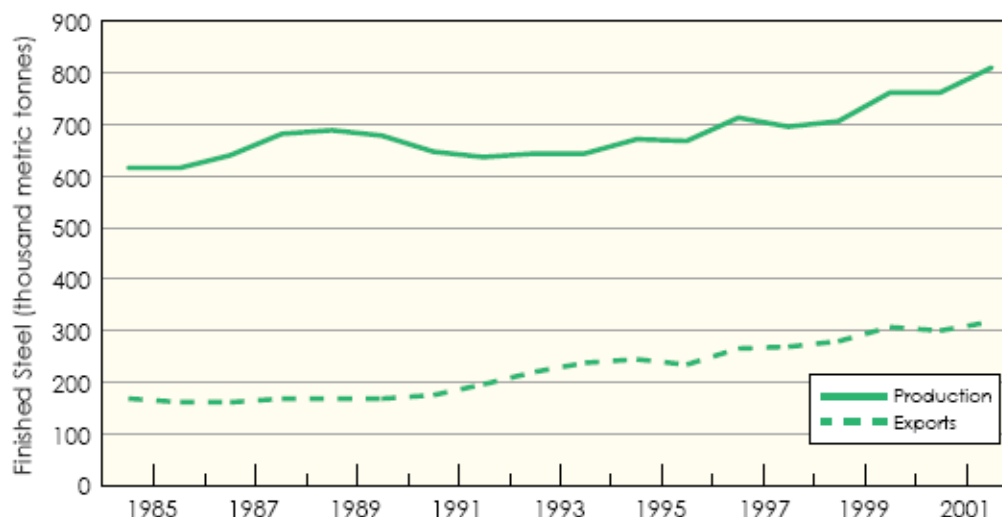


Figura III-7. Producción y comercio mundial de acero terminado (International Iron and Steel Institute, 2003).

Conceptos del sistema

Los principales países productores de acero (**Figura III-8**) son China, Japón, los Estados Unidos y Rusia. Juntos representan casi el 50% de la producción mundial, y China sola tiene alrededor del 20%. De 1992 al 2002, la participación de la producción mundial en Asia aumentó de 35% a 43%, mientras que la participación de Rusia disminuyó de 16,3% a 11,2%. La participación de la Unión Europea (15 países) ha disminuido de 19,9% a 17,7%. China sola ha aumentado su participación de 11,9% a 25,8% (y obviamente mucho más marcadamente en términos absolutos). Japón sigue siendo el principal país exportador, y Rusia se encuentra en el segundo lugar. Japón también es el mayor exportador neto (exportaciones menos importaciones). Irán, Turquía y México han aumentado rápidamente su producción de acero en los últimos 10 años. La **Tabla III-1** muestra el consumo por región.

Tabla III-1. Consumo del 2002 (equivalente de acero bruto) por porcentaje del total mundial.

China	25,8
Japón	8,8
Resto de Asia	15,9
Unión Europea (15)	16,8
Resto de Europa	4,4
Ex URSS	3,7
NAFTA	16,0
Otros	8,6

Descripción tecnológica

La productividad en la industria del acero ha aumentado en los países industrializados. Actualmente, la producción de acero bruto en la Unión Europea, los Estados Unidos, Canadá y Japón es de alrededor de 600 toneladas métricas por empleado, en comparación con las aproximadamente 200–250 toneladas en 1980 y 350–400 toneladas en 1990. Suecia, con una larga tradición en extracción de mineral de hierro y en fabricación de hierro y acero, ha atravesado un importante cambio estructural, pasando de entregas al por mayor a productos de nicho de alto precio. El mineral de hierro de alta calidad es uno de los recursos naturales básicos de Suecia. La industria del acero representa el 2% del PBI y el 5% de las exportaciones (2001). La totalidad de la minería y la industria metalúrgica representa alrededor del 8% de las

exportaciones netas. El acero es un componente en alrededor del 70% de los bienes de exportación de todas las ramas de la industria manufacturera. Suecia tiene solo alrededor del 0,5% de la producción mundial de acero pero es un líder del mercado en productos de especialidad. Suecia exporta alrededor del 80% de su producción de acero. Japón, que es el mayor exportador neto (en toneladas) en el mundo, exporta 10% de su producción de acero.

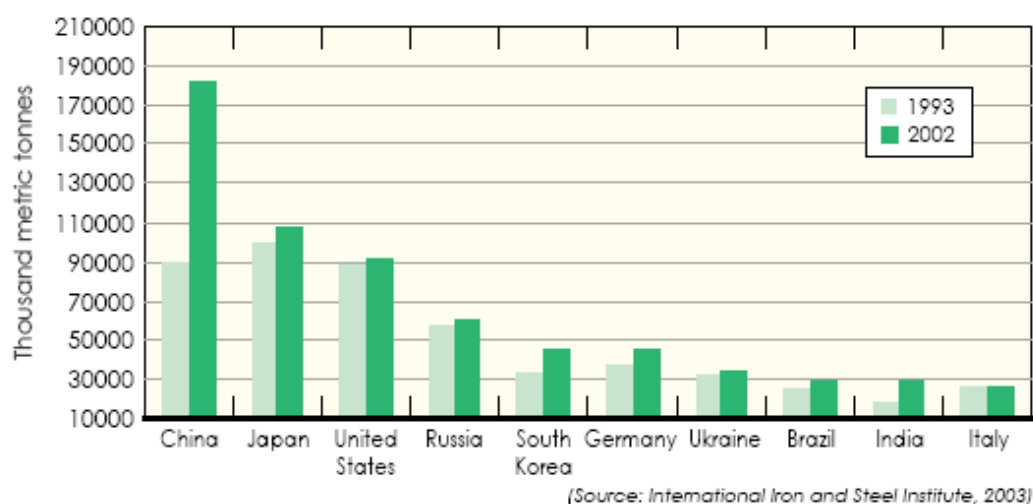


Figura III-8. Productores de acero bruto.

La fabricación de acero es una industria que requiere gran intensidad de energía. Los costos de la energía en la industria del acero en Suecia son de alrededor del 8% de las ventas. Las crisis del petróleo en la década de 1970 afectaron seriamente a Suecia porque no tiene recursos autóctonos de petróleo y gas natural y sus recursos de carbón son muy pequeños. Sin embargo, Suecia tiene grandes recursos de energía hidroeléctrica, que han sido explotados desde comienzos del siglo XX. Suecia llevó a cabo un gran programa de construcción nuclear durante el período 1970–1986. Actualmente, la energía hidroeléctrica y nuclear abarcan alrededor del 50% cada una de la generación de electricidad sueca. Los precios de la electricidad han estado entre los más bajos del mundo, y el consumo de electricidad por persona se encuentra entre los más altos del mundo.

Los saltos en los precios del petróleo desde la década de 1970, junto con otros desarrollos del mercado del acero en el mundo, hicieron que la industria sueca del acero llevara a cabo un importante proceso de reestructuración. También ha realizado un gran esfuerzo de ID+D en nuevas tecnologías, algunas de las cuales muy relacionadas con la energía. Esto significa que actualmente una gran proporción de las ventas de Suecia provienen de aceros aleados y varios productos siderúrgicos avanzados. La producción de acero bruto de Suecia, casi 50%, es bajo la forma de aceros aleados en comparación con el 10–12% en la Unión Europea (excepto Suecia), Japón, y los Estados Unidos. Las compañías suecas son líderes en las siguientes áreas:

- Tubos de acero inoxidable sin soldadura (Sandvik)
- Cables y cintas para generación de calor (Kanthal)
- Chapas gruesas inoxidables (Outokumpu Stainless AB)
- Aceros para herramientas (Uddeholm y Ereseel Kloster)
- Acero para templar en aceite (Ovako)
- Polvo de hierro (Höganäs).

Algunos de estos productos cuestan casi 100 veces el precio de mercado por tonelada del acero a granel. Por lo tanto, los aceros de especialidad son responsables de tres cuartos del producto económico de la industria.

La producción de acero de Suecia se basa en dos procesos: el proceso de alto horno de mineral de hierro y el de chatarra (procesos de acero al horno eléctrico). El consumo de energía por tonelada es considerablemente menor para la chatarra, alrededor de 800 kWh equivalentes por tonelada en comparación con alrededor de 4.300 kWh por tonelada para el proceso de alto horno. Las proporciones entre los dos varían con el ciclo de negocios. Cuando la oferta de chatarra es alta, las proporciones son casi iguales; cuando hay escasez de chatarra, la proporción del proceso de chatarra desciende a 40% o menos.

Una reciente evaluación de la I+D sobre acero orientado a la energía en Suecia muestra que se puede avanzar mucho en la disminución del consumo de energía específica para varios procesos y considerables mejoras ambientales, en particular para las emisiones de CO₂.⁷ Si el consumo de energía específica en varias etapas del proceso hubiera permanecido al nivel de 1987, el consumo de energía habría aumentado 2,8 TWh de 1987 a 1997. En realidad, el consumo de energía disminuyó 16,8 TWh para el período 1987–1997. La **Tabla III-2** muestra un detalle de los ahorros de energía en diferentes procesos.

Tabla III-2. Consumo de energía en 1997 comparado con 1987 (kwh equivalentes por tonelada)

	1987	1997	Cambio
Altos hornos	4577	4279	-298
Fábrica de aglomeración	186	68	-118
Coquería	1210	1253	+43
Acería al oxígeno	221	211	-10
Hornos eléctricos	831	741	-90
Centrales de laminación en caliente	890	729	-161
Ventas de energía (gases de proceso)	290	366	+76

La I+D ha contribuido enormemente a esta mejora mediante—

- Uso de pellets de olivino (silicato de hierro-magnesio) y sínteres de alto contenido de hierro en altos hornos
- Nuevos sistemas de control para hornos de arco y hornos de calentamiento
- Acondicionamiento de la superficie de materiales calientes.

Observando los diferentes procesos en su conjunto, el consumo de energía en 1997, comparado con 1987, disminuyó 93% para los altos hornos, 95% para las acerías al oxígeno, 89% para los hornos eléctricos, y 82% para las centrales de laminación en caliente. La oferta total de energía en 1997 para la producción de acero fue de 22,3 TWh divididos entre coque y carbón a 12,4 TWh, gas de horno a coque a 2,3 TWh, productos del petróleo a 1,7 TWh, GLP a 1,8 TWh, y electricidad a 4,1 TWh. El impacto ambiental de la producción de acero ha disminuido considerablemente desde 1970. Según una reciente publicación de la asociación comercial de hierro y fabricación de acero de Suecia (Jernkontoret⁸), las emisiones de partículas han disminuido 70% y las emisiones de plomo, cadmio, cobre, zinc más de 90%. La evaluación de los programas de I+D también calcularon la disminución de las emisiones de CO₂. Esto depende en gran parte de la participación del acero de altos hornos con su gran participación de coque y carbón. En el proceso de chatarra, alrededor de 150 kWh por tonelada proviene de combustibles fósiles y el resto de la electricidad, que es virtualmente libre de CO₂ (en Suecia). La evaluación calcula que las emisiones reales de CO₂ disminuyeron un 23% en comparación con lo que habría

sucedido si el consumo de energía específica hubiese permanecido en el nivel de 1987.

Estado de la tecnología

Un estudio realizado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) en los Estados Unidos sobre los principales países productores de acero mostró una tendencia general descendente en la intensidad energética entre 1971 y 1994.⁹ La producción de hierro y acero requiere menor intensidad de energía en Corea del Sur, Alemania, Japón y Francia, y más intensidad de energía en China. La intensidad energética de la fabricación de acero en los Estados Unidos cayó más del 20% entre 1971 y 1994. Japón, Polonia y Francia actualmente muestran un leve incremento en la intensidad energética en los últimos años. Las menores intensidades energéticas están en el rango que va de 20 a 25 GJ/tonelada. La intensidad energética en China es más elevada, pero también ha disminuido de 60 GJ/tonelada en 1990 a menos de 40 GJ/tonelada a mediados de la década de 1990. El estudio llega a la conclusión de que las acerías de los EE.UU. son relativamente antiguas y su producción ha fluctuado dramáticamente en los últimos años. El carbón metalúrgico sigue siendo el combustible primario pero el uso del gas y la electricidad han ido en aumento. Aunque la intensidad energética y las emisiones específicas de carbono han disminuido, los EE.UU. aún tienden a tener intensidades energéticas más elevadas que otros grandes productores de acero. Las mejores prácticas de la industria que se encuentran en Francia, Alemania, Japón, Corea del Sur y los Estados Unidos son de alrededor de 15 GJ/tonelada.

Los autores investigaron más de 45 tecnologías específicas de eficiencia energética aplicables a los altos hornos y a las acerías. La evaluación calculó ahorros de energía, ahorros de CO₂, costos de inversión, y costos de funcionamiento y mantenimiento para cada medida. El resultado es una reducción total favorable para el hierro y la fabricación de acero de los EE.UU., de 3,8 GJ/tonelada, equivalente a lograr ahorros de energía del 18% del uso de energía para hierro y acero de 1994 y 19% de las emisiones de CO₂ provenientes del hierro y el carbón en 1994. Se cree que este cálculo es conservador, ya que no incluye todas las posibles medidas de eficiencia o las sinergias de los menores costos al invertir en múltiples mejoras tecnológicas.

El estudio del LBNL llegó a la conclusión de que se podría ahorrar al menos 19% del uso de la energía en la fabricación de hierro y acero de los EE.UU. mediante la introducción de tecnología actualmente disponible. Sería de esperar que las nuevas capacidades instaladas utilicen estas tecnologías, por ejemplo, en los países en desarrollo. En las próximas décadas, se introducirán tecnologías aún más nuevas para ahorrar aún más.

I+D: Objetivos y desafíos

Las fuerzas motrices de gran alcance para la industria son aprovechar el máximo de cada kilogramo de materia prima, utilizar energía en forma más eficiente, y desarrollar las herramientas requeridas para evaluar estos aspectos. Los gastos en I+D como una proporción de la operación de la industria sueca del acero son más elevados que en las regiones de la competencia, ubicados en el 2% de la productividad, en comparación con el promedio de la UE de 1%, de los Estados Unidos de 0,5%, y de Japón de 1,8%. Los productos nuevos son desarrollados en gran parte en colaboración con los clientes.

El programa de I+D de la industria sueca del acero se centra en—

- Aceros de alto rendimiento que utilizan menos materia prima y aceros de alta resistencia que tienen como resultado menor peso en la construcción
- Aceros de alto rendimiento con mayor vida útil para el producto final, reduciendo así el consumo de materia prima y los ataques de la corrosión
- Aceros de alto rendimiento, que posibilitan disminuir la maquinaria y utilizar procesos con mayor eficiencia energética.

Los objetivos están de acuerdo con el menor impacto ambiental y la mayor eficiencia energética porque—

- Los aceros de alto rendimiento requieren menos consumo de material
- Los aceros de alto rendimiento prolongan la vida útil de las construcciones de acero
- Los aceros de alto rendimiento tienen una mejor eficiencia energética tanto durante el proceso de producción como en la construcción de máquinas.

Algunas de las herramientas científicas y técnicas para lograr esto son los procesos de modelado y simulación (ver Parte III.D.9) y las tecnologías de control de proceso (ver Parte II.D.8) basados en una mejor comprensión de la física básica y el uso de inteligencia artificial y tecnologías de adaptación en el control de procesos avanzados.

Desde 1994, 30 de las principales compañías mundiales de acero han cooperado para cambiar drásticamente el rol del acero en la fabricación de automóviles (ver Parte III.D.4). Las pruebas demuestran que los aceros de alto rendimiento, junto con las nuevas técnicas de fabricación tales como la soldadura con láser, pueden hacer que los automóviles sean 25% más livianos sin disminuir el rendimiento, la seguridad o la economía total. Las compañías esperan que surja un nuevo concepto de automóvil a partir del 2004, basado en el Acero Avanzado de Alta Resistencia (AHSS).

Hardox y Weldox son nuevos aceros de alto rendimiento hechos mediante templeado. Como ejemplo, hace 30 años la mayor grúa móvil con brazo telescópico podía levantar 50 toneladas. Actualmente, el mismo tipo de grúa, utilizando el acero de construcción más fuerte del mundo, Weldox 1100, puede levantar 500 toneladas.

Otros asuntos en la agenda de I+D incluyen—

- Desarrollo de principios para métodos de construcción en acero para edificios.
- Uso de productos de desecho tales como las cenizas de los altos hornos en el cemento.

Comercialización y utilización

El DOE de los EE.UU. ha otorgado una subvención a un consorcio de compañías de acero, metal y microondas para desarrollar un nuevo proceso para la fabricación de acero.¹⁰ La fabricación directa de acero mediante la combinación de microondas, arco eléctrico y calentamiento exotérmico produce acero fundido directamente desde un conglomerado transportable que consiste en óxido de hierro finamente molido, carbón pulverizado, y fluidificantes tales como piedra caliza molida. Se proyecta que esta tecnología eliminará muchos de los actuales pasos en la fabricación de acero tales como la coquización, la sinterización, la fabricación de hierro en altos hornos, y la fabricación de acero en horno de oxígeno básico. Se espera que la tecnología—

- Ahorre hasta 25% de la energía consumida en la fabricación convencional de acero, reemplazando los altos hornos y los hornos de oxígeno básico por tecnologías más eficientes
- Reduzca las emisiones de SOx y NOx

- Reduzca substancialmente los costos de control de los desechos y las emisiones
- Disminuya en gran parte el costo de capital
- Reduzca considerablemente los costos de producción.

Se espera que la tecnología satisfaga las demandas de acero fundido tanto de las acerías integradas (desde mineral de hierro a acero terminado en un solo sitio) como de las llamadas *mini-acerías* (generalmente alimentación de chatarra con hornos eléctricos también en sitios únicos). El proyecto se basa en la capacidad de las microondas de calentar el conglomerado hasta temperaturas lo suficientemente elevadas como para reducir rápidamente el componente de óxido de hierro (conformado por mineral de hierro triturado y molido) por el carbón. Los productos son luego calentados hasta temperaturas de fabricación de acero por el arco eléctrico, asistido por la reacción exotérmica del carbón con el oxígeno. El objetivo del proyecto es evaluar la utilización de esta nueva tecnología directa de fabricación de acero. Entre los objetivos se encuentran—

- Generar una base de datos técnicos, de comercialización, económicos y de políticas
- Desarrollar objetivos energéticos, ambientales y económicos
- Evaluar en forma más definitiva las oportunidades y las limitaciones
- Definir las direcciones para futuros desarrollos
- Capacitar a los estudiantes.

La fabricación de acero basada en nuevas electrotecnologías ha sido estudiada bajo nombres de proceso tales como ELRED y PLASMARED, pero estos procesos aún no han alcanzado la condición comercial. Una barrera para la introducción de nueva tecnología en una acería existente son las inversiones ya realizadas en los altos hornos y los hornos de oxígeno básico que siguen siendo competitivos. El mismo tipo de limitación no sería tan importante al construir nuevas fábricas siempre que el desarrollo técnico del proceso sea exitoso. Desde la perspectiva de los países en desarrollo, un aspecto son las economías de escala conectadas con la nueva tecnología que tienen sentido para las mini-acerías.

Factores de riesgo

- Técnicos—1: Que las tecnologías probadas estén disponibles.
- Comerciales—1: Que las nuevas tecnologías tengan buena relación entre costo y beneficio.
- Ambientales—3: Que estas nuevas tecnologías de eficiencia energética tengan beneficios concomitantes en las menores emisiones regionales y mundiales.
- Regulatorios—4: Que los organismos del gobierno promuevan y permitan la introducción de nuevas tecnologías.

3. Fundición y fabricación de aluminio

Conceptos del sistema

La producción mundial de aluminio en el 2002 fue de alrededor de 23 millones de toneladas. La participación de los EE.UU. fue del 16%. En los Estados Unidos, alrededor del 32% de la producción anual es para el sector de transporte (terrestre y aéreo). Los mercados de contenedores y embalaje consumen alrededor del 21% de la producción, y las industrias de la construcción el 16%. La fundición y fabricación de aluminio requieren un suministro de electricidad confiable. Dado que los requisitos de energía son elevados, la industria del aluminio ha tenido desde hace mucho tiempo una fuerte motivación para reducir los costos totales de producción mediante la

reducción de la cantidad de electricidad necesaria, y hacer mejores y más fuertes aleaciones utilizando menores cantidades de materia prima. La **Figura III-9** muestra las principales aplicaciones del aluminio en todo el mundo.

Principales aplicaciones del aluminio

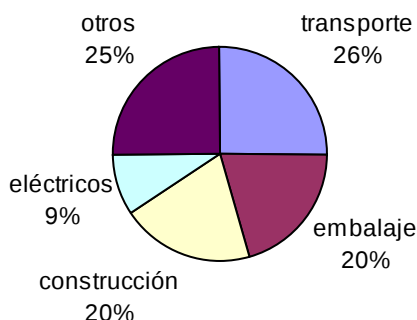


Figura III-9. Aplicaciones de uso final del aluminio

América del Norte es el principal productor de aluminio primario (**Figura III-10**). Este informe se basa en el Plan de Trabajo de la Tecnología de la Industria del Aluminio.¹¹ Como líder entre las regiones, América del Norte es capaz de establecer las necesidades de ID+D y una agenda de alcance estratégico que impulsará la totalidad de la industria del aluminio hacia un nivel mundial.

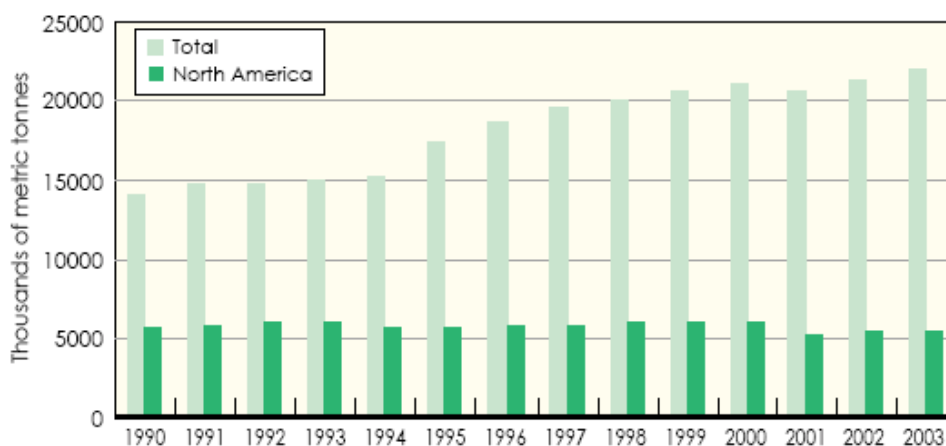


Figura III-10. Producción primaria de aluminio como una función del tiempo.

Descripción tecnológica

La factura anual de electricidad para la producción de aluminio de los EE.UU. es de alrededor de US\$2.000 millones, o alrededor del 1% de las ventas totales de electricidad doméstica. El gran consumo es el resultado del uso del proceso Hall para la reducción electroquímica de alúmina hidratada. El proceso Hall utiliza una “celda” con recubrimiento de carbono (el cátodo) que contiene un electrolito de criolita fundida (Na_3AlF_6), en la cual se disuelve el óxido de aluminio. Los electrodos de carbono (el ánodo) se insertan en el electrolito fundido (baño electrolítico). La alúmina se reduce a metal de aluminio líquido en el cátodo, y el aluminio sale de la celda por un sifón. En

el ánodo, el oxígeno se combina con el carbono del ánodo para producir dióxido de carbono. Se consume aproximadamente medio kilogramo de carbono por cada kilogramo de aluminio producido. Basada en el voltaje teórico de la descomposición del Al_2O_3 , la energía requerida para la producción de Al es menos que 11 kWh/kg. Sin embargo el promedio de requisito de energía de la industria es de alrededor de 15 kWh/kg, y las celdas más avanzadas funcionan con 13 kWh/kg.

El alto costo de producir aluminio a partir del mineral hace muy atractivo el reciclaje. El requisito de energía para reciclar latas de bebidas, por ejemplo, es solo de alrededor del 5% de la cantidad necesaria para producir una cantidad equivalente de metal a partir del mineral. La energía ahorrada al reciclar una tonelada de aluminio es suficiente para proveer energía a una casa de tamaño promedio durante 10 años. En el 2002, se reciclaron alrededor de 53.000 millones de latas de bebidas en los Estados Unidos.¹² La **Figura III-11** muestra la producción mundial de aluminio, el creciente rol de la chatarra y el uso total.

Estado de la tecnología

La *Iniciativa mundial de desarrollo sostenible del aluminio*, publicada por el Instituto Internacional del Aluminio¹³ aborda los asuntos de sustentabilidad de la industria del aluminio en una escala internacional. El informe destaca los objetivos comunes que la industria del aluminio aspira alcanzar:

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los compuestos perfluorcarbonados (PFC) por tonelada de aluminio producido en 80% para la industria en su conjunto para el 2010 en relación con 1990.
- Reducción de las emisiones de fluoruro por tonelada de aluminio producido para la totalidad de la industria en al menos 33% para el 2010 en comparación con las cifras de 1990. La cifra a lograr se revisará después de 3 años.
- Reducción del 10% del consumo de la energía de fundición de la industria para el 2010 en relación con 1990.
- Implementación de Sistemas de Gestión para el Medio Ambiente (incluyendo normas ISO 14000 o certificaciones equivalentes) y para la Salud y la Seguridad en 95% de las fábricas miembros para el 2010.
- Control del rendimiento global del reciclado y uso de los datos para establecer objetivos voluntarios. Se desarrollará un programa de acción global para alentar un incremento en el volumen de metal de aluminio recuperado de la chatarra.
- Supervisión de los cargamentos anuales de aluminio para uso en el sector de transporte para rastrear la contribución del aluminio a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero del transporte carretero, ferroviario y marítimo mediante su peso liviano.

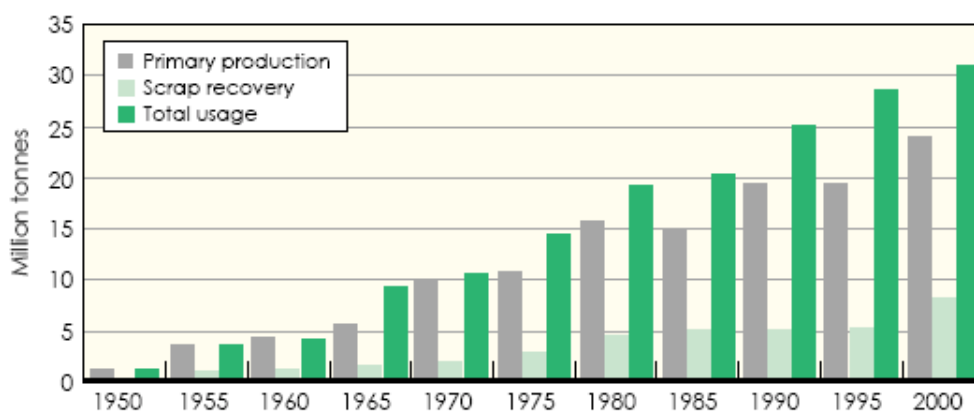


Figura III-11. Uso mundial del aluminio desde 1950–1999.

I+D: Objetivos y desafíos

Los asuntos ambientales asociados con la producción de aluminio entran en dos categorías principales. La primera es la necesidad de abordar los requisitos de alta energía del proceso Hall (y del proceso Bayer, que calcina los minerales de aluminio para producir la alúmina de alta pureza requerida por el proceso Hall). La mayor parte de la energía eléctrica en el procesamiento de aluminio proviene de generadores hidroeléctricos, de modo que los costos y las emisiones son relativamente bajos. Sin embargo, hay una presión continua para reducir los costos y mejorar la eficiencia de la producción. Estos esfuerzos reducirán el impacto ambiental de la producción. El segundo asunto es la emisión de gases de efecto invernadero. El oxígeno extraído de la alúmina en el proceso Hall oxida y consume el ánodo de carbono. El mejoramiento de la eficiencia de la producción de aluminio puede reducir substancialmente la emisión de CO₂. Los compuestos perfluorcarbonados, un potente gas de efecto invernadero, también se liberan en el ánodo.

La Asociación del Aluminio y el DOE de los EE.UU. han desarrollado un plan de trabajo tecnológico para la industria del aluminio, actualizado en el 2003. Entre los objetivos claves se encuentran los siguientes:

- Superar la tasa de reciclado de todos los otros materiales y establecer a la industria como líder en sustentabilidad. Los objetivos incluyen un 100% de reciclado de aluminio para el 2020, y cerrar la brecha de valor entre los materiales vírgenes y reciclados.
- Producir un impacto neto positivo sobre el medio ambiente a lo largo del ciclo de vida de los productos de aluminio.
- Producir emisiones cero de gases de efecto invernadero en base al ciclo de vida.
- Cumplir o superar un objetivo de 11 kWh/kg para fundición y lograr otros objetivos de eficiencia energética establecidos por la industria. Este objetivo incluye la definición de la siguiente generación de procesos (no Bayer y no Hall-Heroult) de eficiencia energética.
- Generar una nueva ventaja energética a lo largo del ciclo de vida de los productos de aluminio. Los objetivos específicos son reducir el costo de la producción y productos de metal en un 25% para el 2020, y reducir el uso de la energía en la fundición en un 25% para el 2020, y reducir el consumo de carbono a 0,4 kg por kg de aluminio.

El plan de trabajo también incluye un resumen de las necesidades de desarrollo tecnológico con más prioridad:

- Los ánodos inertes o refractarios para ocupar el lugar de los electrodos de carbono consumibles descritos anteriormente pueden producir beneficios en muchas áreas. Se pueden reducir los costos, mejorar la productividad, reducir el uso de energía y eliminar los gases de efecto invernadero (tanto el CO₂ como los compuestos perfluorcarbonados). El plan de trabajo define un conjunto de características de rendimiento que debe tener un ánodo inerte, incluyendo el comportamiento electroquímico, la conductividad eléctrica, la tasa de erosión, las propiedades mecánicas, la resistencia a la oxidación y los beneficios económicos. Actualmente, no hay disponibles materiales que satisfagan todos o incluso la mayoría de estos requisitos. Sin embargo, el plan de trabajo define los pasos críticos en el proceso de desarrollo tecnológico, desde la definición de los apuntalamientos químico y termodinámico de un proceso exitoso hasta los estudios teóricos de tecnologías candidatas, hasta demostraciones piloto y totales.
- Las brechas de conocimiento en el procesamiento de aluminio van desde la necesidad de información fundamental sobre solidificación, hasta predicciones de primer principio sobre las relaciones entre la calidad del metal y la economía, hasta la

optimización de los procesos de fabricación de aleaciones tolerantes de chatarra. Las oportunidades de investigación incluyen el desarrollo de modelos con capacidad de predicción para todos los aspectos del procesamiento del aluminio, incluyendo fundición, solidificación y reciclado. Un segundo asunto de investigación de elevado nivel de prioridad es el desarrollo de tecnologías de colada de cintas y planchones para producir un producto más uniforme con un mejor acabado de la superficie y una reducida segregación. Un tercer tema de investigación es la integración de una variedad de conceptos para definir la planta de colada y fundición del futuro.

Entre las prioridades se encuentran dos asuntos críticos. El primero es la creciente importancia del modelado como herramienta para evaluar las nuevas tecnologías. El segundo es la necesidad de mejores sensores como parte de un esfuerzo integral para mejorar el control y la verificación de los procesos de producción y fabricación de aluminio.

Comercialización y utilización

El Plan de Trabajo de Tecnología de la Industria del Aluminio para el 2003 se centra principalmente en tres áreas:

Productos y mercados, sustentabilidad, y energía y recursos. Define los objetivos de rendimiento en la totalidad de la industria para rastrear los avances y lograr los objetivos estratégicos que involucran las soluciones técnicas en estas áreas. El plan de trabajo presenta objetivos detallados específicos de cada sector, barreras tecnológicas, y prioridades de I+D. También se proveen líneas de tiempo. El plan de trabajo clasifica las necesidades de I+D basándose en diferentes procesos:

- Producción primaria
- Fundición, solidificación y reciclado
- Fabricación
- Desarrollo de aleaciones y productos terminados.

Los objetivos estratégicos se alinean con los objetivos de rendimiento de la totalidad de la industria para asegurar el oportuno cumplimiento de los objetivos. Los objetivos estratégicos son previstos a fin de establecer a la industria del aluminio como líder en la economía mundial. El objetivo de sustentabilidad es superar la tasa de reciclado de todos los otros materiales y establecerse como líder en sustentabilidad. La industria del aluminio apunta a generar un impacto positivo sobre el medio ambiente a lo largo del ciclo de vida de los productos. También desea producir cero emisiones de gases de efecto invernadero sobre una base del ciclo de vida. Para alcanzar los objetivos de sustentabilidad, la industria ha definido ciertos objetivos de rendimiento:

- Reciclado del 100% del aluminio para el 2020
- Cierre de la brecha de valor entre los materiales nuevos y los reciclados a fin de optimizar el valor de los productos reciclados
- Uso del sistema establecido de registro de resultados en el ciclo de vida en todas las industrias para evaluar los avances
- Producción de cero emisiones peligrosas para el 2020.

El costo de la electricidad es un factor tan dominante en la fundición de aluminio que supera los costos de transporte tanto del mineral como del producto terminado. Este punto queda ilustrado por el proyecto de Alcoa de construir una planta de fundición de aluminio en Islandia, a miles de kilómetros de los yacimientos en América del Sur y Australia. El gobierno de Islandia ha ratificado la propuesta de Alcoa en Islandia oriental y la construcción se está llevando a cabo. Se espera que Fjardaal, traducido como "aluminio de los fiordos," cueste US\$1.100 millones en cuatro años. Se

proyecta que la planta de fundición de aluminio quedará finalizada en el 2007, y tendrá una capacidad anual de 322.000 toneladas métricas.

La instalación primaria de producción de aluminio estará apoyada por la construcción de la Central Energética Karahnjukar de 500 MW por parte de la compañía nacional de energía. El Fjardabyggd Harbor Fund construirá un puerto en Mjoeyri para recibir los cargamentos de bauxita. La central es un diseño hidroeléctrico, que consiste de una represa principal de 190 metros de alto por 730 metros de ancho, dos presas de collado más pequeñas, y túneles de toma a ser pagados por Landsvikjun, la compañía nacional de energía. Una vez finalizado, el proyecto Fjardaal representará una de las mayores inversiones privadas en Islandia.

Sin embargo el proyecto tiene sus detractores. Grupos ambientalistas y otros grupos han criticado el proyecto por razones económicas, ambientales y de sustentabilidad a largo plazo.¹⁴ Entre las preocupaciones se encuentran—

- Emisiones de gases de efecto invernadero, aunque se informa que el proyecto es uno de los más limpios del mundo;
- Emisiones de SO₂, subproducto de los procesos de fundición de aluminio;
- Asuntos ambientales locales, tales como la turbidez del agua en el depósito y los ríos y lagos afectados;
- Soplado de polvo del cieno que queda al descubierto cuando el depósito está bajo;
- Eventual llenado del depósito con cieno.

Estos asuntos son típicos de lo que puede esperarse en la provisión de licencias a todos los nuevos proyectos, cualquiera sea el diseño de la central y la elección de combustible. El sector energético, los reguladores, otros organismos del gobierno, y todos los actores tienen que abordar las preocupaciones del público en general al igual que los grupos e interventores medioambientales, acerca de los costos totales del ciclo de vida del sistema energético y los usos finales de la electricidad.

Los beneficios de la I+D en este sector de uso final son el mucho menor uso de energía en lo que era una industria que requería gran intensidad de energía. El costo de la I+D en el futuro, aunque es difícil de cuantificar, en su mayor parte parecería que fuera a ser recompensado por una mayor sustentabilidad del recurso básico mediante un mayor uso de la chatarra de aluminio y una menor intensidad energética.

Factores de riesgo

- Técnicos—2: Muchas de las tecnologías requeridas ya están en funcionamiento o muy avanzadas en el camino del desarrollo.
- Comerciales—4: La competencia de otros productos podría tener un impacto sobre el éxito comercial
- Ambientales—1: Los beneficios del uso eficiente de los materiales y la energía parecen valer mucho más que los riesgos.
- Regulatorios—3: Siempre difíciles de averiguar pero la industria parece estar dedicándose simultáneamente a los mercados y a las regulaciones.

4. Cemento

En 1999, la industria norteamericana del cemento consumió 560 PJ (531 TBTU) de energía final, que fue alrededor del 2% del total del uso de energía para manufactura de los EE.UU. y emitió 22,6 millones de toneladas de carbono (incluyendo las emisiones de la generación de energía), o alrededor del 5% del total de las emisiones de carbono de la manufactura norteamericana. El consumo específico de energía fue

en promedio de 5,6 GJ/tonelada desde el punto de vista de la energía primaria. Actualmente, los combustibles para la producción de cemento en los Estados Unidos son principalmente carbón y coque, mientras que en la década de 1970, el principal combustible era el gas natural. Los combustibles de desechos han aumentado desde la década de 1980 y su participación en la energía primaria era de alrededor del 11% en 1999. La electricidad se consume principalmente en preparación de materias primas.¹⁵

Conceptos del sistema

Entre 1970 y 1997, la intensidad de la energía física primaria para la producción de cemento en los EE.UU. cayó de 7,9 GJ/tonelada a 5,6 GJ/tonelada y las emisiones de carbono cayeron un 25% de 0,16 a 0,12 toneladas por tonelada de cemento producido. Los informes citados investigan alrededor de 40 tecnologías y medidas para ahorros de energía y de CO₂, inversión, costos de funcionamiento y de mantenimiento. Los autores de la Referencia 13 han construido una curva de aportación de conservación de energía para la industria del cemento de los EE.UU. y hallan una reducción total favorable de 0,6 GJ/tonelada de cemento que consiste en medidas con un tiempo de recuperación de 3 años o menos. Esto es equivalente al 11% del uso de energía de 1994 para la fabricación de cemento en los Estados Unidos y a ahorros de 5% de las emisiones totales de CO₂.

El Instituto Asiático de Tecnología ha llevado a cabo un estudio sobre asuntos de medio ambiente energético y cambio climático en las Filipinas, financiado por la Agencia de Desarrollo Internacional de Suecia (SIDA), utilizando datos de 1994. Los comentarios acerca de la industria del cemento son bastante severos. "Hay tres tipos de procesos utilizados por la industria, húmedo, semi-seco y seco. Las tecnologías empleadas en Filipinas son obsoletas, lo cual da como resultado un elevado consumo de combustible y de electricidad. Los principales combustibles utilizados son el carbón, el coque y el fuel oil. Hay enormes posibilidades de mejorar la eficiencia del uso de la energía en la industria del cemento para aliviar la carga del costo energético y contribuir significativamente a la reducción de los costos de producción y a la competitividad. Es necesario instalar colectores de polvo de alta eficiencia para eliminar la gran cantidad de partículas liberadas a la atmósfera."

La economía de Filipinas ahora se está acercando a una tasa de crecimiento del 6% por año con un crecimiento industrial de alrededor del 5%. Hay una serie de limitaciones para la industria. Ya no hay escasez de electricidad, pero el suministro de energía no es confiable. El equipo de fabricación de cemento, sensible al voltaje, tales como los precipitadores, tiene dificultades para funcionar en la red nacional. Los combustibles fósiles inconsistentes y de calidad inferior que contienen un alto porcentaje de azufre también han causado problemas en las calderas y hornos. Las perspectivas para las mejoras en la eficiencia energética en la industria del cemento en Filipinas son importantes no solo dada su gran participación en el consumo de energía del país sino también porque el sector consiste de una cantidad manejable de instalaciones de consumo de energía de tamaño destacado en comparación con otros sectores. Las tecnologías para mejorar la eficiencia al nivel de usuario final han sido identificadas y hasta cierto punto ya están siendo adoptadas por la industria.

Descripción tecnológica

La industria del cemento de los EE.UU. se compone de plantas de escoria y de fábricas de producción de cemento. La escoria (óxidos de los ingredientes brutos) se produce mediante una quema en horno controlada, a alta temperatura, con un proceso húmedo o seco. Las fábricas de cemento muelen la escoria y le agregan una variedad

de aditivos para producir cemento. La producción de escoria en los Estados Unidos aumentó de 67 millones de toneladas en 1970 a 74 millones de toneladas en 1997, con un crecimiento promedio del 0,4% anualmente con caídas temporales a fines de la década de 1970 y comienzos de la década de 1980. La producción de escoria con el proceso seco ha aumentado más rápidamente que con el proceso húmedo. El proceso seco ahora representa el 72% de la producción de escoria y el proceso húmedo el 26%. Entre 1970 y 1997, la producción de cemento de los EE.UU. aumentó un 0,7% anualmente. El consumo de materiales aumentó un promedio de 0,5% por año entre 1970 y 1997 (de 115 millones de toneladas a 133 millones de toneladas). La diferencia en la tasa de crecimiento para la producción de escoria, la producción de cemento, y el consumo de materiales puede deberse a un mayor uso de aditivos y aumentos en las importaciones de escoria. La cantidad de fábricas norteamericanas disminuyó entre 1970 y 1997, pero ha aumentado el tamaño promedio de las fábricas.

Estado de la tecnología

A continuación hay algunos ejemplos de las 40 tecnologías investigadas en los informes de los EE.UU.:

- Preparaciones de materia prima
 - Eficientes sistemas de transporte
 - Sistemas de mezclado de mineral molido no tratado
 - Conversión a cilindro de lavado de circuito cerrado
 - Mezcladores de cilindro de alta eficiencia (cemento seco)
 - Clasificadores de alta eficiencia
- Producción de escoria
 - Mejoras en el sistema de combustión
 - Reducción de la pérdida de calor de la carcasa del horno
 - Uso de combustibles de desecho
 - Proceso seco
 - Recuperación del calor para generación de electricidad
 - Ciclones de baja pérdida de carga para precalentadores de suspensión
- Rectificado de acabado
 - Mejores medios de molienda (molinos de bolas)
 - Prensa de cilindros de alta presión
- Medidas generales
 - Mantenimiento preventivo
 - Gestión de la energía y control de proceso. Sistemas de lógica borrosa.
 - Reducción de los residuos de polvo del horno
 - Motores de alta eficiencia
 - Ventiladores eficientes con cambiador de velocidad
- Cambios en los productos
 - Cementos combinados
 - Reducción de la concentración de C_3S en los cementos
- Tecnologías de avanzada
 - Horno de lecho fluidizado
 - Tecnologías de molienda avanzadas, basadas en ultrasonido, láser, choque térmico, choque eléctrico, o criogenia.
 - Polímeros minerales

ID+D: Objetivos y desafíos

Se pueden lograr más mejoras mediante cambios en la mezcla de productos. Si la producción de cemento combinado aumenta en los Estados Unidos, como es común en muchas otras partes del mundo, el potencial de ahorro de energía aumentaría a 1,1 GJ/tonelada de cemento o 18% del total del uso de energía y las emisiones de dióxido de carbono se reducirían un 16%. De este modo, la producción de cemento combinado sería una clave para una estrategia exitosa para la mejora de la eficiencia energética y la reducción del dióxido de carbono en la industria norteamericana del cemento. En el informe de 1999 de LBNL, se clasificaron 30 tecnologías en cuanto a su eficiencia en relación al costo. Doce o trece de ellas eran económicas con un tiempo de retorno del beneficio de la inversión simple de tres años o menos. Los ahorros acumulados para estas medidas fueron de alrededor de 0,7 GJ/tonelada u 11% del uso de la energía primaria en la industria del cemento para 1994. Observando las tecnologías basadas en la electricidad, el tiempo de retorno del beneficio calculado para motores de alta eficiencia es de 0,9 años y para los cambiadores de velocidad 2,4 años. Además de eso, las medidas relacionadas con la preparación de la materia prima, donde se consume la mayor parte de la electricidad, generalmente tenía tiempos de retorno del beneficio muy prolongados. El potencial técnico para los ahorros para la totalidad de las 30 tecnologías era de alrededor de 180 PJ o 40% del uso de la energía en la industria primaria del cemento en 1994.

Comercialización y utilización

En la mayoría de los casos, el mundo en desarrollo adopta las tecnologías de producción de cemento más modernas y con mayor eficiencia energética para las nuevas fábricas, tales como los hornos de lecho fluidizado, molienda optimizada incluyendo recuperación del calor residual, y el uso de polímeros minerales para inmovilizar residuos. En el mundo desarrollado, un análisis económico cuidadoso determinará cuándo se realizan cambios hacia tecnologías más modernas. Estos análisis, al igual que aquellos que se realizan en el mundo en desarrollo para los nuevos sistemas, deben ser cuidadosos para evaluar las proyecciones de la vida útil en cuanto a consumo de energía para los sistemas al igual que para la finalización esperada del ciclo de ID+D para nuevas tecnologías.

Los beneficios de las nuevas tecnologías en la industria del cemento para la sociedad y las economías son enormes, tanto desde el punto de vista de la eficiencia energética y el dióxido de carbono como de la reducción de otros contaminantes. Gran parte de la tecnología para lograr estas ganancias ya existe, de modo que los costos de ID+D son mínimos. La adopción de la tecnología avanzada actual sin la necesidad de una exhaustiva ID+D puede tener altas ganancias.

Factores de riesgo

- Técnicos—3: Ver los comentarios anteriores sobre el estado de la tecnología.
- Comerciales—2: La mayoría de las tecnologías están probadas y el costo de implementación es bajo y deberían ayudar a comercializar el producto en forma exitosa.
- Ambientales—2: Los beneficios de la reducción de la contaminación del aire regional y mundial superan ampliamente los costos.
- Regulatorios—1: Aunque siempre hay problemas imprevistos en relación a la regulación del gobierno al cambiar el modo establecido de hacer las cosas, debería haber un amplio incentivo para introducir estas nuevas tecnologías.

5. Substancias químicas

Conceptos del sistema

La industria química representa aproximadamente el 7% del GWP (producto mundial bruto) y 9% del comercio mundial.¹⁶ Consta de muchas ramas, y los países a menudo no agrupan todas las mismas ramas en sus estadísticas industriales nacionales. Las ramas más importantes son Substancias Químicas Básicas, Fertilizantes y Plásticos Básicos, Pinturas y Explosivos. Algunos países también clasifican Productos Farmacéuticos, Caucho, Plásticos y Refinerías de Petróleo dentro de la industria química. El Consejo Europeo de la Industria Química provee un panorama de la producción y comercio mundial y la distribución regional del comercio en el 2002 (**Figuras III-12 y III-13**).¹⁷ Los Estados Unidos son el país de mayor producción y están poco después del total de la Unión Europea.

Descripción tecnológica

La industria química se encuentra entre las industrias que requieren mayor intensidad de energía, y hay muchas oportunidades para aplicar nuevas tecnologías para reducir los costos de capital y los costos operativos de la energía para mejorar el rendimiento económico y ambiental. Muchas de las tecnologías emergentes consisten en procesos mejorados que funcionan a menores temperaturas para reducir los requisitos de energía, o hacer un uso más efectivo de los catalizadores. Un ejemplo de los catalizadores mejorados es el desarrollo de sustratos a nanoescala basados en carburos de molibdeno y carburos de tungsteno.

Estos catalizadores se basan en un sustrato de nanotubos y nanovarillas de carbono. Ellos mantienen la estabilidad térmica y alta superficie total, incluso bajo condiciones de funcionamiento severas. Estos nuevos catalizadores ofrecen el rendimiento del platino sin su elevado costo.¹⁸ Los ahorros de energía proyectados en los Estados Unidos son de 45 PJ por año hacia el 2020.

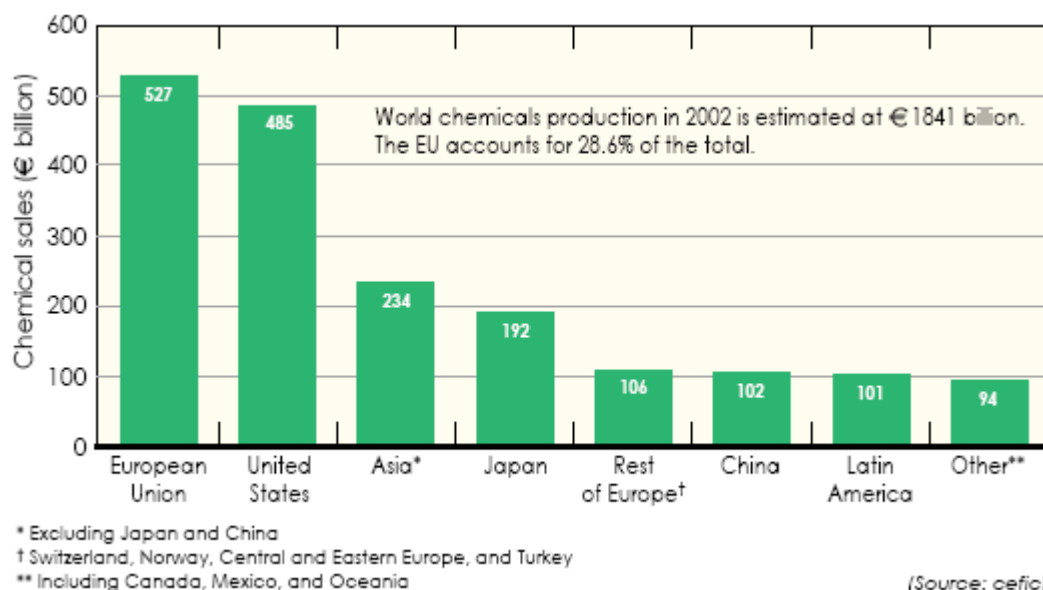


Figura III-12. Distribución geográfica de las ventas mundiales de substancias químicas.

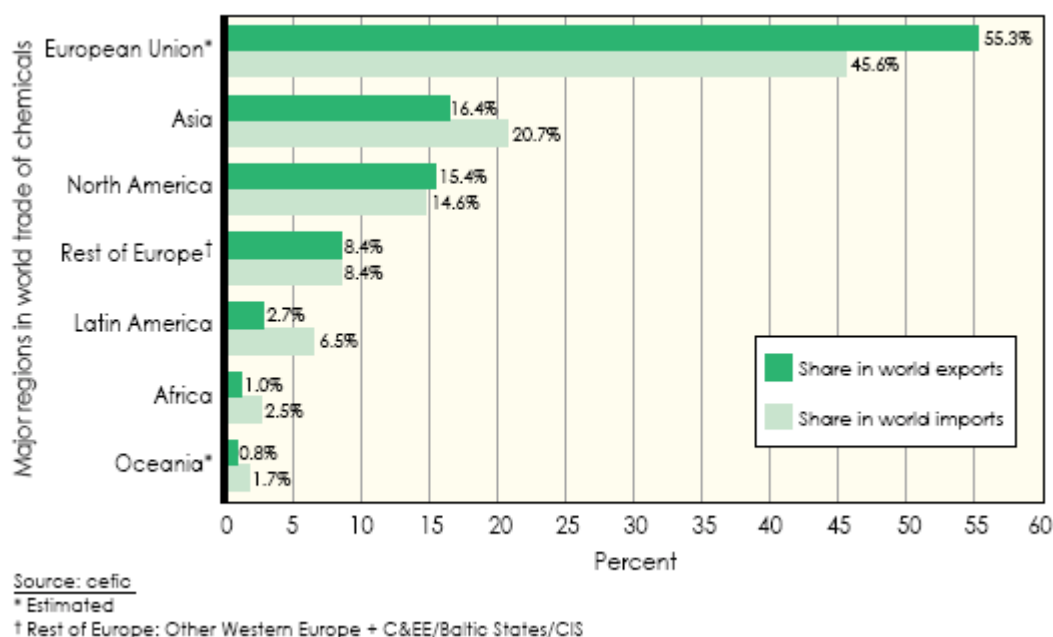


Figura III-13. Participación regional del comercio mundial de sustancias químicas.

Estado de la tecnología

Según el informe de LBNL sobre la Industria Química de los EE.UU. (ver Referencia 16), la industria química de los EE.UU. es responsable de alrededor del 11% de la producción industrial con valor agregado de los EE.UU., consume alrededor del 20% de la energía industrial (1994), y contribuye en proporciones similares a las emisiones de gases de efecto invernadero de los EE.UU. Es el principal consumidor de electricidad del sector manufacturero de los EE.UU. Según la Asociación Americana de Equipos Electrónicos, el consumo anual en 1999 fue de 157 TWh seguido por la fabricación de metal primario con 130 TWh, la fabricación de papel con 70 TWh, y la industria alimenticia con 61 TWh.¹⁹ El consumo total de electricidad para manufactura en 1999 fue de 829 TWh.

El estudio del LBNL (ver Referencia 16) cita los principales consumidores de energía en relación al combustible en la industria química de los EE.UU. como—

- Producción de etileno (520 PJ anualmente en combustibles).
- Fertilizantes nitrogenados (268 PJ de combustibles excluyendo materias primas) y 368 PJ de gas natural como material prima.
- Cloro y soda cáustica. El cloro se produce mediante electrólisis. El uso total anual de electricidad es de 173 PJ (48 TWh o alrededor de un tercio del uso total de electricidad en la industria). El uso total de energía primaria se calcula en 526 PJ excluyendo créditos para exportaciones de hidrógeno.

Producción de etileno. Los Estados Unidos son el principal productor mundial de etileno, con 28% de la capacidad mundial instalada. Entre 1974 y 1994, la producción de etileno creció un 3% anual. El proceso que requiere mayor intensidad de energía en la industria petroquímica es el craqueo a vapor de los hidrocarburos para producir etileno, propileno, butadieno, y aromáticos. En 1990 el consumo mundial fue de 1 EJ excluyendo el consumo de materias primas energéticas, y la producción mundial de etileno fue de 50 millones de toneladas. En 1997, la producción mundial había aumentado a 70 millones de toneladas. En los últimos años, la capacidad mundial para la producción de etileno ha crecido más que la demanda de etileno. A pesar de este

exceso de capacidad, se espera que la capacidad mundial de producción de etileno crezca de 89 millones de toneladas en 1997 a 103 millones de toneladas en el 2020. Los mayores incrementos se esperan en el este de Asia, seguido por los EE.UU. (alrededor de 7 millones de toneladas). Los cálculos de las edades de las centrales de producción de etileno de los EE.UU. son variados, pero una gran proporción tiene más de 10 o 20 años de edad. Algunas de las centrales más viejas, considerablemente menos eficientes, han sido modernizadas. Se calcula que la diferencia en eficiencia energética entre centrales construidas a comienzos de la década de 1970 y comienzos de la década de 1990 es en promedio de un 40% en el mundo entero (ver Referencia 16).

El EPRI ha informado sobre promisorias tecnologías para la producción de etileno en el largo plazo (ver Referencia 18). Un ejemplo es el craqueo oxidativo del etano para producir etileno. La producción de etileno requiere una intensidad energética considerable y ahora se la genera del etano en un craqueador a vapor a altas temperaturas. La nueva tecnología elimina la formación de NO_x , reduce la producción de CO_2 en un factor de 10, y en los Estados Unidos, ella sola tiene el potencial de lograr ahorros de energía de 10–15 PJ por año hacia el 2020. Este enfoque puede tener competencia de la síntesis mediante microondas, que quiebra en forma selectiva las uniones químicas claves en el etano. Esta tecnología ofrece una gran mejora en el rendimiento en comparación con la tecnología convencional, y casi elimina el flujo de derivados tóxicos. Si bien esta tecnología ofrece una importante mejora en el rendimiento, se espera que el craqueo oxidativo sea más familiar para los trabajadores en las plantas químicas y que por lo tanto sea el proceso elegido.

Fertilizantes nitrogenados y amoníaco. La industria de los fertilizantes nitrogenados es un gran consumidor de energía. La capacidad de producción mundial es de alrededor de 100 millones de toneladas de nitrógeno con un consumo de energía estimado del 1% del uso mundial de energía primaria. La producción de amoníaco es el paso de la producción que consume mayor intensidad de energía en la fabricación de fertilizantes. En los Estados Unidos, la producción de amoníaco es de 16,3 millones de toneladas y alrededor del 80% se destina a la producción de fertilizantes. El mercado mundial de fertilizantes crece lentamente, y el crecimiento surge principalmente en los países en desarrollo.

Los principales procesos de producción de amoníaco en los Estados Unidos son la reforma a vapor del gas natural y la oxidación parcial de los residuos del petróleo con producción de hidrógeno como paso intermedio en la producción. La producción de amoníaco requiere típicamente entre 28 y 40 GJ/tonelada (el LHV –poder calorífico inferior- incluye materia prima). El consumo energético específico para las unidades modernas de oxidación parcial es de 30 GJ/tonelada, según LURGI en 1986.²⁰ El consumo energético mínimo teórico para la fabricación de amoníaco mediante la reforma a vapor es de aproximadamente 21,6 GJ/tonelada (HHV – poder calorífico superior) de amoníaco. El amoníaco se utiliza directamente como fertilizante, pero la mayor parte se convierte en otros productos antes del uso tales como urea, nitrato amónico, y sulfato de amonio.

Fabricación de cloro. Los Estados Unidos también son el principal fabricante de cloro. La industria mundial de cloro está en crecimiento, aunque a un ritmo más lento, una razón son las preocupaciones ambientales acerca del uso y transporte de cloro en los procesos industriales. El cloro se produce mediante electrólisis de salmuera, requiriendo 25–40 GJ/tonelada, dependiendo del estado del equipo. Al mismo tiempo se produce hidróxido de sodio. Alrededor de la mitad de la energía se utiliza para quebrar uniones químicas y se dirige al producto, mientras que la otra mitad va al calor que a menudo puede reciclarse. La Oficina Europea de Prevención y Control

Integrados de la Contaminación publica información acerca de las mejores tecnologías disponibles.²¹ La tecnología más eficiente para la producción de cloro es la celda electrolítica de membrana. Esta tecnología está en su tercera generación y sigue en desarrollo.

En Suecia, el 70% de la producción en la industria química se destina a exportación y contribuyó al 11% de las exportaciones totales en el 2002.²² El mayor crecimiento de la producción en los últimos años ha sido en la industria farmacéutica, que por sí sola es responsable del 5,5% del total de las exportaciones. El empleo ascendió al 8,6% del total de la mano de obra sueca. Las fusiones de especialización y la globalización han sido rápidas en la industria tanto en Suecia como en otros países. En principio, hay solo un proveedor en Suecia para cada sustancia química base producida en grandes cantidades. Las plantas químicas están altamente automatizadas y diseñadas para la producción de una o unas pocas sustancias químicas al por mayor.

Históricamente, ha habido un estrecho lazo entre las industrias químicas y de pulpa y papel en Suecia. A menudo hay grupos industriales en que el sector químico del negocio provee sustancias químicas al sector de la pulpa y del papel. Los residuos del sector de la pulpa y el papel a su vez proveen materia prima para el sector químico. Un producto principal era el cloro para el blanqueado. Por razones ambientales, la industria de la pulpa y el papel posteriormente cambiaron a óxido de cloro, peróxido de hidrógeno, oxígeno, ozono y ácido peroxiacético en varias combinaciones, según el tipo de madera y el tipo de proceso, para el blanqueado. El óxido de cloro se produce a partir del clorato de sodio. Los lazos entre las dos industrias han disminuido, y en 1990 por ejemplo, la principal industria de pulpa y papel en Suecia, Stora Enso, vendió su división química. Sin embargo, el cloro sigue siendo un importante material de síntesis en la industria farmacéutica.

La industria en general y la industria farmacéutica en particular tienen gran intensidad de ID+D. Ninguna otra rama de la industria en Suecia emplea tantos científicos universitarios. El personal de ID+D constituye alrededor del 17% del total del empleo en la industria. Los gastos en ID+D ascienden al 19% del total de los gastos de ID+D de Suecia. Nuevamente, la industria farmacéutica se destaca, siendo responsable de alrededor del 80% del total de los gastos de ID+D en la industria química. Sus gastos de ID+D ascendieron a alrededor del 20% de sus ventas en comparación con un promedio de 4,7% para el total de la industria sueca. La industria química es una rama clave para ayudar a mejorar el medio ambiente. Está buscando soluciones a sus propias emisiones ambientales, y provee medios para que otras ramas de la industria hagan lo suyo. Por ejemplo, entre 1995 y el 2000, la industria química sueca redujo sus emisiones de óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre en 30–35%. Más del 90% de las compañías tienen sistemas de gestión ambiental en funcionamiento (ISO 14001 y/o EMAS). Más del 75% ofrecen capacitación a sus clientes para el manejo seguro de sus productos. Ejemplos de productos químicos que brindan asistencia a otras industrias en la solución de sus problemas ambientales incluyen las sustancias químicas para el tratamiento de las aguas, catalizadores para escapes de automóviles, y materiales adsorbentes (zeolitas) para el tratamiento de la contaminación del aire.

En las refinerías suecas, la intensidad energética ha disminuido a alrededor de la mitad de 1976 a 2001. Además, parte del calor residual se usa como calefacción urbana. Estas ganancias han disminuido hasta cierto punto por la energía adicional requerida para producir combustibles líquidos más livianos y más especializados.

ID+D: Objetivos y desafíos

El programa del DOE de los EE.UU., Industrias del Futuro, tiene como objetivo aumentar las eficiencias energéticas de las industrias que requieren gran intensidad de energía.²³ Algunos ejemplos de áreas para ID+D en la industria química son—

- Tecnología de separación para separar y refinar sustancias químicas en forma más eficiente.
- Técnicas de procesos para mejorar significativamente las reacciones químicas y el rendimiento de los productos a fin de aumentar la eficiencia energética en productos químicos claves en más del 30%.
- Nuevas aleaciones para producción de etileno.
- Un proyecto de la industria química (Vision 2020) para desarrollar sistemas innovadores de provisión de energía para ahorrar 200 PJ (alrededor de 5 Mtpce) por año para el 2020.

Comercialización y utilización

Muchas de las tecnologías descritas ya han tenido un impacto en el mercado. Los procesos catalíticos son responsables de alrededor del 75% de los productos químicos y del petróleo en cuanto al valor (ver Referencia 1). Estas y otras tecnologías son aceptadas de buena gana por las industrias, deseosas de ser lo más competitivas posible. Los gastos de capital son el principal impedimento para una rápida aceptación de estas tecnologías por parte de las industrias.

Factores de riesgo

- Técnicos—4: Sigue habiendo muchos progresos pendientes, especialmente en la aplicación en estas industrias de nuevas tecnologías radicales.
- Comerciales—5: La principal cuestión es el grado en que pueden emprenderse inversiones de capital en cambios en las plantas.
- Ambientales—3: Debería haber un impacto sostenible total debido a un uso más eficiente de la energía y de otros recursos.
- Regulatorios—4: Al igual que sucede en la industria del cemento, es difícil calcular el rol que juegan los reguladores del gobierno.

6. Industrias de servicios

Las industrias de servicios son amplias y diversas y son el mayor componente de la actividad económica en muchos países desarrollados. Podría esperarse un desarrollo similar en las economías emergentes del mundo en desarrollo. Las industrias de servicios se componen de negocios tan variados como bancos, finanzas, bienes raíces y seguros, educación, cuidado de la salud y servicios sociales, comercio mayorista y minorista, restaurantes y hoteles, transporte y comunicaciones, consultoría y servicios personales en diferentes campos. La defensa nacional también es considerada una industria de servicios. La energía no es uno de los gastos principales en la mayoría de las industrias de servicios. Sin embargo, dado que el nivel total de actividad es tan grande, un equipo más eficiente puede hacer una gran contribución a los niveles totales de beneficio y a un menor uso de energía.

En los países desarrollados, las industrias de servicios constituyen una gran parte del PBI. Por ejemplo, en Suecia el servicio es responsable de alrededor del 70% del PBI, mientras que las industrias no relacionadas con el servicio son responsables de alrededor del 25% y la agricultura y la silvicultura de alrededor del 3%. El rol del servicio es aún mayor en cuanto al porcentaje de empleo total. En Suecia, en el 2001,

los servicios públicos y privados fueron responsables de casi el 80% del total del empleo, mientras que la industria convencional fue responsable del 18% y la agricultura y la silvicultura del 2%. (Debería tenerse en cuenta que la industria estatal tales como la industria energética en muchos países sigue siendo considerada en la "Industria" en muchas estadísticas nacionales). Este desarrollo ha sido muy rápido. En 1965, la industria convencional era responsable del 30% del empleo en Suecia en comparación con el 58% en los servicios públicos y privados y el 12% en agricultura y silvicultura.

Detrás de los incrementos del sector de servicios subyace una multitud de factores tales como—

- El volumen de los servicios existentes ha aumentado en sectores tales como cuidado de la salud y de los niños y cuidado de los ancianos. (A la fecha el envejecimiento de la población afecta principalmente a los países desarrollados.)
- Han surgido nuevas áreas de servicios que juegan roles cada vez más importantes. Las comidas rápidas son un ejemplo obvio de una industria realmente mundial. Se pueden encontrar otros ejemplos en la industria del entretenimiento (y especialmente en la industria de la música, que para algunos países es un exportador bastante importante).
- Los servicios de consultoría han aumentado en alcance y volumen, por ejemplo en la informática.
- Ha aumentado la tercerización. Las compañías industriales están comprando servicios para cosas tales como la economía, la contabilidad, y la selección de personal, donde anteriormente solían tener esas funciones internamente.

La industria convencional está manteniendo su participación en el PBI pero está disminuyendo su participación en el empleo, debido a que el desarrollo de la productividad es más rápido en la industria que en los servicios. En Suecia, el sector de servicios típicamente está dividido en—

- Servicios basados en el conocimiento (comunicaciones, finanzas, seguros, consultoría en computación, etc.)
- Servicios con gran intensidad de capital (transporte, administración de bienes raíces)
- Servicios con gran intensidad de mano de obra (comercio mayorista y minorista, hoteles y restaurantes, servicios personales).

El mayor incremento en la producción de servicios en Suecia en los últimos 20 años ha sido en las industrias que requieren gran intensidad de conocimientos.

La mayor participación del trabajo en las industrias de servicio consiste en trabajo de oficina con uso de computadoras, copiadoras, equipos de comunicaciones, y otros aparatos. También hay necesidades de energía para iluminación, climatización (calefacción refrigeración etc.) del mismo tipo que en el sector de los Edificios (ver Parte III.B). El manejo de los alimentos en negocios y restaurantes tiene requisitos de energía bastante grandes para el almacenamiento. Los requisitos de energía del sector de servicios no son fácilmente accesibles desde las estadísticas energéticas (si es que puede accederse a ellos), aunque se debería poder elaborar cálculos razonables comenzando por las necesidades específicas por trabajador en la oficina. La **Figura III-14** ilustra la relación entre desarrollo y eficiencia energética de las computadoras y el equipo de oficinas.

El LBNL ha analizado la demanda energética de la alta tecnología y ha llegado a la conclusión de que—

- El equipo de oficinas y de red abarca solo 2% de la electricidad de los EE.UU.
- Al incluir los equipos de telecomunicaciones y la energía para producir equipamiento de oficinas, la participación de la demanda aumenta a solo 3%.

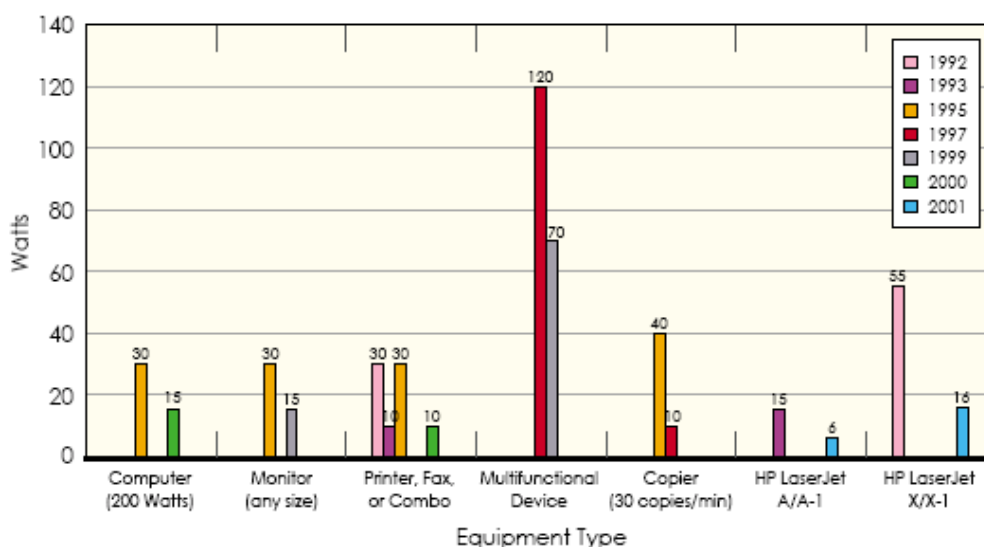


Figura III-14. Eficiencia como función del desarrollo de producto [Fuente: American Electronics Association, Electronic Industries Alliance (EIA), and Information Technology Industry Council (ITI), 2002].

La tecnología de información y de control (ver Parte III.D.7 y D.8) para el manejo de la energía debería tener un gran impacto potencial en la mayoría de las industrias de servicio, como tendría en el sector de Edificios en general. Podría haber otros tipos de efectos de la informática sobre los requisitos energéticos porque puede influir el modo en que se organiza la logística y la distribución del almacenamiento a lo largo de la cadena de distribución en cadenas de negocios alimenticios, para mencionar un ejemplo. Actualmente, muchos trabajadores en el área de servicios comparten sus horas de trabajo mientras están viajando entre la oficina, el hogar, los aeropuertos, y los trenes y ómnibus, lo cual significa que su consumo de energía no es fácilmente representado en las estadísticas. El consumo total de energía seguirá siendo virtualmente el mismo, pero variará en su distribución en el tiempo y en la geografía. Esto podría tener algún efecto sobre la distribución de la carga con el tiempo, y también aumentará los requisitos de calidad de energía en los hogares privados.

ID+D: Objetivos y desafíos

La economía del futuro basada en el conocimiento requerirá un sistema de distribución de “energía inteligente” que una la informática con la distribución de energía. El concepto de una distribución de energía inteligente incluye capacidades automatizadas para reconocer problemas, hallar soluciones y optimizar el rendimiento en el sistema de distribución de energía. Las herramientas básicas incluyen sensores avanzados, software de procesamiento de datos y reconocimiento de patrones, y regulador de potencia de estado sólido para reducir la congestión, reaccionar en “tiempo real” ante las alteraciones y redirigir el flujo de energía como sea necesario. Hay tres objetivos primarios

- **Optimizar el rendimiento total y la resiliencia del sistema.** Una variedad de sensores controlarán las características eléctricas del sistema (voltaje, corriente, frecuencia, armónicos, etc.) al igual que la condición de los componentes críticos, tales

como los transformadores, líneas de alimentación, cortocircuitos, etc. Este sistema se ajustará constantemente a sí mismo para funcionar en un estado óptimo, controlando constantemente la presencia de potenciales problemas que podrían perturbar al sistema. Cuando se detecta e identifica un potencial problema, se evalúan su seriedad y las consecuencias resultantes. Luego se identifican varias medidas correctivas, y las simulaciones en computadora estudian la efectividad de cada medida. El operador puede entonces implementar efectivamente la medida correctiva aprovechando las muchas aplicaciones de control automático de la red.

- **Responder instantáneamente a los incidentes para reducir el impacto al mínimo.**

Cuando tiene lugar un incidente imprevisto en el sistema, puede ser detectado e identificado rápidamente. Un plan inteligente de “separación en marcha aislada” o sectorización, por ejemplo, puede ser activado instantáneamente para separar el sistema en partes autoalimentadas para mantener el suministro de electricidad para los consumidores según prioridades específicas, y para impedir que se propaguen los apagones.

- **Restablecer el sistema después de un incidente.** Después de la reacción del sistema a un incidente mayor, se toman medidas para llevar el sistema hacia un régimen estable y operativo. Para llevar a cabo esto, es necesario controlar y evaluar en tiempo real el estado y la topología del sistema, permitiendo identificar medidas correctivas alternativas y la eficacia de cada una de ellas determinada por simulaciones anticipadas por computadora. Luego las medidas más efectivas se implementan automáticamente. Cuando se logra un estado operativo estable, el sistema comienza nuevamente a auto optimizarse.

La Parte III.D.2 provee más información acerca de la red de electricidad inteligente del futuro.

7. Resumen

Esta sección pone el énfasis en las industrias de mayor intensidad de energía porque son responsables de la mayor parte del consumo energético por parte de la industria. La mayoría de las industrias que requieren gran intensidad de energía implementan procesos complejos con prolongados tiempos de vida útil económica y que requieren grandes inversiones de capital. Los cambios en los procesos en dichas industrias rara vez se llevan a cabo únicamente por razones de eficiencia energética. Por lo tanto, aunque los costos de la energía son importantes, las nuevas tecnologías energéticas para estas industrias solo entran en juego ya sea cuando se realiza un cambio de capital importante por razones tales como cambios en el mercado o cuando se construyen nuevas plantas. Una consecuencia es que los países recientemente industrializados a menudo tienen plantas más modernas y con mayor eficiencia energética que los países de producción tradicional. Por ejemplo, la industria del acero en Corea del Sur tiene una intensidad energética mucho menor que la industria del acero en los EE.UU. El énfasis en los países en desarrollo que están dando un “salto de rana” por sobre los países desarrollados se basa en dichas observaciones.

En los países desarrollados, las intensidades energéticas en todas las industrias que hemos estudiado han disminuido en los últimos 20 años, aunque a ritmos diferentes. En algunas instancias, por ejemplo en la producción de amoníaco, la tecnología se está acercando a los límites termodinámicos (es decir que se reduce al mínimo los residuos). Al mismo tiempo, la productividad ha aumentado en menores horas-persona por tonelada de acero producido. En la mayoría de las industrias sobre las que se informa aquí, la producción mundial es considerablemente mayor que el comercio mundial, lo que significa que la mayor parte de la producción se consume en forma local y las condiciones locales determinan el clima de inversiones en ID+D. Un caso pertinente es la industria del cemento. Hay excepciones tales como las industrias

suecas del hierro y el acero o del papel y la pulpa, cuyas exportaciones son mayores que el consumo nacional. En muchos casos, actualmente hay un rápido movimiento en la producción hacia Asia. El gran incremento en la producción y consumo de acero en China durante los últimos 10 años es un caso pertinente. En forma más general, la globalización es una fuerte tendencia en muchas de las industrias que requieren gran intensidad de energía. Las industrias mundiales trasladan geográficamente la capacidad de producción para estar cerca de los mercados pero también para aprovechar las condiciones económicas más favorables para la producción.

Las tecnologías para las industrias descritas abarcan un vasto espectro, algunas específicas de cada industria y otras comunes a casi todas (por ejemplo bombeo, ventilación e iluminación). Algunas fuerzas motrices y áreas importantes para el desarrollo tecnológico son—

- Productos nuevos y rentables;
- Integración de procesos incluyendo recuperación del calor y cogeneración de electricidad;
- Uso eficiente de materia prima incluyendo reciclado, eficiencia energética y menores emisiones que contribuyen al desarrollo sostenible;
- Disminución del impacto ambiental tanto de los procesos de producción como del uso de los productos;
- Se han identificado varias nuevas electrotecnologías que resultan promisorias para el futuro. Los ejemplos son la fabricación de acero con microondas y la producción de etileno.

Hay grandes posibilidades de mejoras en la eficiencia energética en el corto plazo en estas industrias. Los informes del LBNL, por ejemplo, enumeran 30–40 opciones tecnológicas para cada industria, donde alrededor de la mitad de las tecnologías ya son económicas con un corto rendimiento del capital invertido. Muchos otros estudios de eficiencia energética industrial señalan que hay considerables oportunidades para las mejoras incluso con las tecnologías existentes si se observa la eficiencia energética como un factor aislado. Sin embargo, hay muchos obstáculos al cambio, como ya se ha notado. La mayoría de estas tecnologías son coherentes con los objetivos del CME de *Accesibilidad, Disponibilidad, y Aceptabilidad* y a menudo con riesgos técnicos, comerciales, ambientales y regulatorios muy bajos.

Referencias

1. "Technology Opportunities To Reduce U.S. Greenhouse-Gas Emissions," National Laboratory Directors for the U.S. Department of Energy, http://www.ornl.gov/climate_change, 1997
2. <http://www.skogsindustrierna.org>.
3. N. Martin, N. Anglani, D. Einstein, M. Khrushch, E. Worrell, and L. Price, *Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse-Gas Emissions in the U.S. Pulp and Paper Industry*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, LBNL-46141, July 2000.
4. *Agenda 2020: The Path Toward and Implementation Plan*, The American Forest and Paper Association, 1999.
5. Peter Axegård, STFI Stockholm Sweden, "Sustainable Development in Pulping—Recent Progress and Future Trends," *28th EUCEPA Conference on Sustainable Development for the Paper and Pulp Industry*, Lisbon, 2–4 April 2003.
6. "World Steel," International Iron and Steel Institute, 2003.
7. John Olof Edström, *Government-supported, Energy-Related Research in the Swedish Steel Industry—Programs and Results*, Jernkontoret, Stockholm, 1999.
8. Steel R&D Program for 2003–2007, Jernkontoret, Stockholm, October 2002.

9. E. Worrell, N. Martin, and L. Price, *Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, LBNL-41724, 1999.
10. "Steelmaking Fact Sheet," Office of Industrial Technologies, Energy Efficiency, and Renewable Energy, US Department of Energy, June 2002.
11. http://www.oit.doe.gov/aluminum/pdfs/al_roadmap.pdf.
12. Aluminum Association Press Release, April 2003.
13. International Aluminium Institute, <http://www.world-aluminium.org/iai>, 2003.
14. *The Guardian*, November 29, 2003.
15. N. Martin, E. Worrell, and L. Price, *Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reductions Opportunities in the U.S. Cement Industry*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, LBNL-44182, September 1999; Worrell and Galitsky, *Energy Efficiency Improvement Opportunities for Cement Making, an ENERGY STAR guide for Energy and Plant Managers*, Berkeley, CA, LBNL-54036, January 2004.
16. E. Worrell, D. Phylipson, D. Einstein, and N. Martin, *Energy End Use and Energy Intensity in the U.S. Chemical Industry*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, LBNL-44314, April 2000.
17. <http://www.cefic.be>.
18. *Electricity Technology Roadmap, 2003 Summary and Synthesis*, The Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Product No. 1010929, 2003.
19. American Electronics Association, Electronic Industries Alliance, and the Information Technology Industry Council, 2002.
20. *The LURGI Route to Ammonia*, LURGI GmbH, Frankfurt/Main, Germany, March 1987; also E. Worrell, D. Phylipson, D. Einstein, and N. Martin, *Energy Use and Energy Intensity of the U.S. Chemical Industry*, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, LBNL-44314, April 2000.
21. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best Available Techniques in the Chlor-Alkali Manufacturing Industry, 2001.
22. Chemical and Plastic Industry in Sweden: Facts and Figures, The Swedish Plastics & Chemicals Federation, September 2003.
23. DOE FY 2003 Congressional Budget Request, Energy Efficiency and Renewable Energy, Energy Conservation, 2003.

B. Edificios

Actualmente, los edificios consumen poco más del 30% de la energía mundial. Los escenarios A y C en la Parte II indican que el sector de edificios en todo el mundo puede estar utilizando entre 137 y 164 EJ por año en el 2020, en comparación con los 120 EJ en el 2000. Si bien el uso actual de energía en edificios es levemente superior que el de la industria, es interesante notar que el nivel más alto en el 2020 está significativamente por debajo del de la industria, lo que indica una conservación significativamente mayor y el uso de tecnologías con eficiencia energética. En el 2050, los escenarios indican 138 EJ para C y 229 EJ para A, un aumento del 115% y del 190% en comparación con la actualidad. Nuevamente, esto puede compararse con los valores anteriores dados para la industria, de 143% y 250% para los escenarios C y A respectivamente. Los ahorros de energía debidos a nuevas tecnologías pueden calcularse para el sector de edificios tomando la diferencia entre los escenarios A y C. Así, los ahorros mundiales de energía pueden ascender hasta 20 EJ/año en el 2020 y 90 EJ/año en el 2050, teniendo Asia, Europa y América del Norte, que son actualmente los mayores usuarios, los mayores ahorros potenciales dados por la introducción de nuevas tecnologías.

Esta parte abarca los edificios en sí mismos, los revestimientos y aparatos eléctricos utilizados dentro de los edificios (tales como equipos de cocina y celdas de combustible), al igual que sistemas de gestión y comunicaciones avanzados. Además, se refiere a la interacción del sistema de suministro. Se evalúa el consumo de energía en el sector de los edificios en las diferentes regiones, al igual que las posibilidades de mejoras de eficiencia y ahorros en relación a los escenarios elegidos como referencia (A1, A3, y C2). Se presta especial atención a las diferentes condiciones en varias regiones del mundo, incluyendo necesidades especiales de los países de Europa del Este en su transición hacia economías de libre mercado al igual que a los países en desarrollo en general. Muchas de las tecnologías (**Tabla III-3**) son comunes a los cuatro sectores abarcados en este informe (Industria, Transporte, Tecnologías Transversales, y Edificios). A su vez, muchas de las tecnologías transversales (ver Parte III.D) son importantes para el sector de los edificios.

Los edificios residenciales y comerciales generalmente duran muchos años —30 a 50 años y algunos mucho más, al menos en el mundo desarrollado. De ahí que muchos de los edificios actuales muy probablemente sigan en pie en el 2020 y 2050. Partes de los edificios pueden cambiar mediante modificaciones y mejoras en los sistemas de seguridad—mejor aislamiento, nuevas puertas y ventanas—quizás tan a menudo como cada 10 o 20 años. Sin embargo, los aparatos eléctricos dentro de los edificios serán reemplazados con mucha mayor frecuencia.

En la actualidad, el consumo de energía de la Unión Europea para hogares y servicios representa alrededor del 25% del total (**Figura III-15**),¹ y es típico de gran parte del mundo desarrollado. En cuanto a Europa del Este y Rusia y los países en desarrollo, hay grandes diferencias. Por razones climáticas y debido a diferencias en las normas de construcción, hay grandes variaciones entre regiones y países.² Las expectativas hacia el 2030 también son muy diferentes según la región (**Figura III-16**).

Todas las regiones del planeta tienen en común un importante potencial de mejoras de eficiencia mediante el uso de nuevos materiales, sistemas inteligentes y tecnologías generadoras. En cuanto a los equipos y los aparatos eléctricos, se observan tendencias similares. Los escenarios tienen en común un desarrollo económico esperado para el 2020 y 2050 que señalan un nivel de vida mucho mejor en el mundo en general —aunque en diversos grados— y en particular en los países en desarrollo. El crecimiento en todas las regiones tendrá lugar casi en su totalidad en las áreas

urbanas, principalmente en las grandes ciudades. Este desarrollo requerirá más servicios energéticos para los edificios. Por lo tanto, un objetivo global del sector de edificios es evaluar la demanda de mejores servicios energéticos y las posibilidades de mejoras en la eficiencia. Los países en desarrollo en todo el mundo requerirán las mismas mejoras en la eficiencia energética que el mundo desarrollado en sus edificios de servicio e industriales. Obviamente, por razones climáticas, la demanda de un eficiente aire acondicionado es mayor en las latitudes más bajas donde se encuentran muchos de los países en desarrollo. Para los hogares privados, en particular en las regiones pobres, la demanda de soluciones económicas y eficientes para mejores revestimientos al igual que para electrodomésticos es elevada.

Tabla III-3. Sistemas de edificios abarcados en esta sección

Revestimiento	Aislamiento
	Ventanas
	Edificios prefabricados con sistemas de revestimientos y equipamiento integrados
	Materiales de construcción utilizando materiales reciclables
	Materiales de almacenamiento térmico
Equipamiento y electrodomésticos	Bombas de calor
	Equipos de cocina
	Celdas de combustible, fotovoltaicas solares, y microturbinas
	Lámparas de bajo consumo
	Refrigeración por medios alternativos
	Iluminación centralizada de alta eficiencia
	Calentamiento del agua
Sistemas inteligentes	Diagnósticos automatizados
	Sensores avanzados
	Redes de control integradas
	Posición de espera
Tecnologías generadoras	Materiales avanzados
	Mediciones y control
	Modelos y simulación

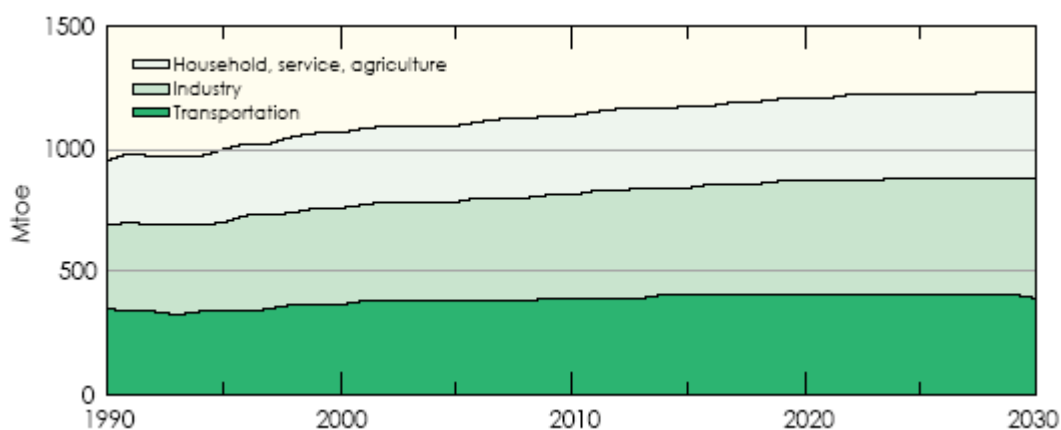


Figura III-15. Escenarios de consumo de energía en la Unión Europea por sector (Fuente: *World Energy, Technology and Climate Policy Outlook, WETO 2030*, EUR 20366, Bruselas 2003).

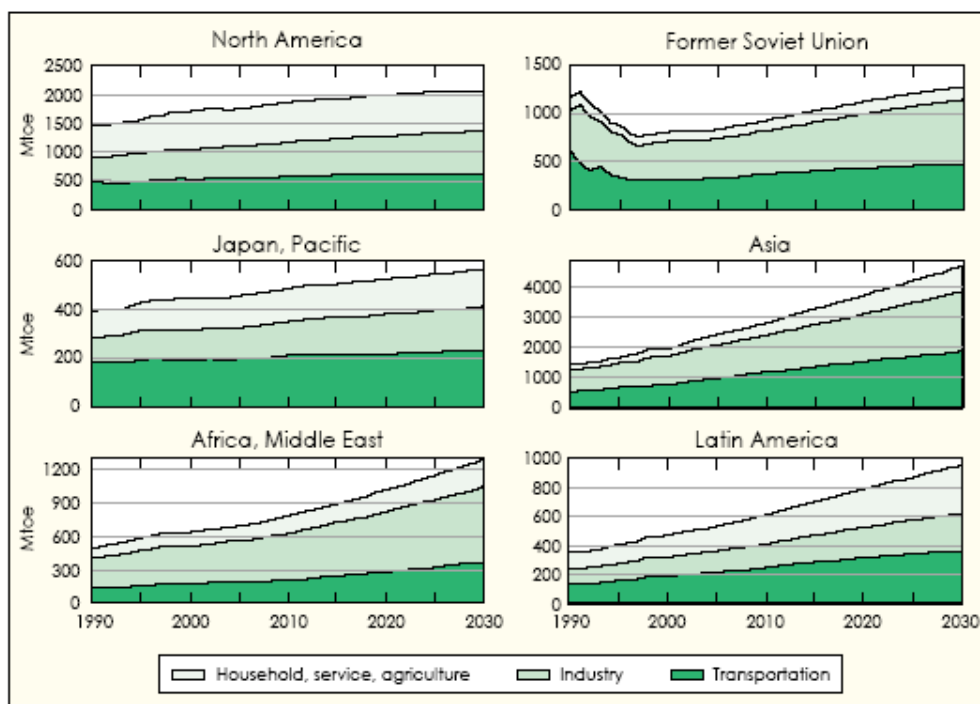


Figura III-16. Escenarios de consumo de energía fuera de la Unión Europea (Fuente: *World Energy, Technology and Climate Policy Outlook, WETO 2030, EUR 20366, Bruselas 2003*).

Es difícil llegar a conclusiones generales acerca de la demanda de energía de los países en desarrollo y el potencial de ahorros en sus edificios residenciales debido a la gran variedad de condiciones climáticas, geográficas y socio-económicas. Sin embargo, la mayoría de los habitantes son pobres y probablemente sigan siéndolo, al menos en términos relativos, por algún tiempo en el futuro a pesar de los mejores esfuerzos para aliviar su pobreza. Esto significa que las opciones de bajo costo o de costo cero para ahorrar energía y mejorar el uso de energía residencial y los niveles de confort son de una importancia clave—similar a mejorar el acceso a fuentes de energía económicamente accesibles y no contaminantes. Eso tiene que ver directamente con los objetivos de *Disponibilidad* y *Accesibilidad* de la energía que se encuentran en la declaración del milenio del CME, del año 2000.³ Si bien a menudo se supone que la conservación de energía no es inmediatamente importante para los países en desarrollo — deberían aumentar su consumo de energía para mejorar su nivel de vida—hay pruebas convincentes de que en comparación con los ricos, los pobres gastan un porcentaje significativamente mayor de sus ingresos en servicios energéticos debido a menores niveles de vivienda, falta de acceso a fuentes modernas de energía, ineficientes aparatos de conversión de energía, y otros factores.

Para las viviendas privadas, en particular en las regiones pobres, hay una gran demanda de soluciones baratas y eficientes de mejores revestimientos de edificios y de electrodomésticos. Para la mayoría de los hogares de bajos ingresos en los países en desarrollo, la opción de energía para cocina, iluminación y calefacción a menudo no es para nada una elección — se utiliza cualquier combustible que esté disponible y que sea económicamente accesible. En la actualidad, la refrigeración (aire acondicionado), que requiere una enorme intensidad energética, rara vez es un uso final importante en el sector residencial en la mayoría de los países en desarrollo, quedando limitada a la minoría pudiente que puede pagarla.

En comparación con otros sectores, la industria de la construcción en general está fragmentada y realiza poca de su propia I+D, y como tal, depende en gran medida de

las innovaciones y de los incentivos del gobierno. La industria es activa en demostraciones de tecnología desarrollada por los gobiernos (laboratorios y universidades nacionales). Además, solo las organizaciones internacionales (no gubernamentales) y solo una pequeña proporción de la industria privada estudian las perspectivas futuras de este sector en las diferentes regiones del mundo. (En las Referencias 4 a 9 puede encontrarse información general de soporte sobre el uso de la energía en los edificios)

1. Revestimientos

Desde la primera crisis del petróleo en 1973, ha habido importantes mejoras en el uso eficiente de la energía en muchos países, en particular en los países de la OCDE con gran demanda de calefacción durante los fríos inviernos. Las casas nuevas en los países nórdicos requieren menos de la mitad de la cantidad anual de energía para calefacción que las casas más antiguas.¹⁰ El desarrollo de nuevos y mejores materiales de aislamiento y el uso de doble o triple acristalamiento avanzado en las ventanas logró esta reducción. Además, muchas casas antiguas ya han utilizado significativas mejoras en los sistemas de seguridad, que se han hecho mucho más rentables debido a los precios más altos de la energía (**Figura III-17**). Un importante factor en este desarrollo ha sido la introducción de nuevas normas de construcción con estrictas disposiciones obligatorias sobre espesor del aislamiento, estanqueidad, ventilación, etc. Otro factor ha sido la introducción de impuestos a la energía, haciendo rentables estas mejoras para los hogares privados.

Según la Asociación Europea de Fabricantes de Aislamiento,¹¹ el consumo de energía para calefacción varía mucho según los países y es mucho más elevado en algunos países de baja latitud debido a los estándares de aislamiento muy bajos (**Figura III-18** y **Figura III-19**). Además, hay grandes diferencias de costo entre los edificios comerciales y los residenciales. Sin embargo, aún hay mucho por hacer.

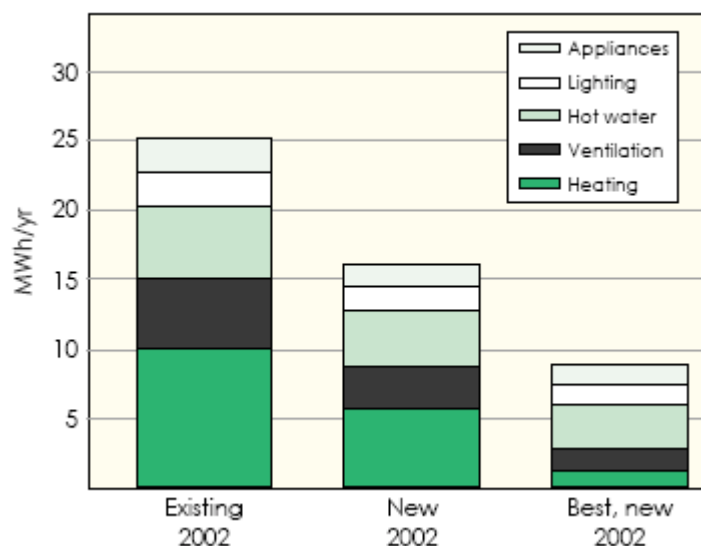


Figura III-17. Consumo de energía en viviendas de una sola familia en Suecia (Fuente: Swedish Academy Foresight for Sweden study, "Energy Foresight—Sweden in Europe," Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, IVA, Estocolmo, 2003).

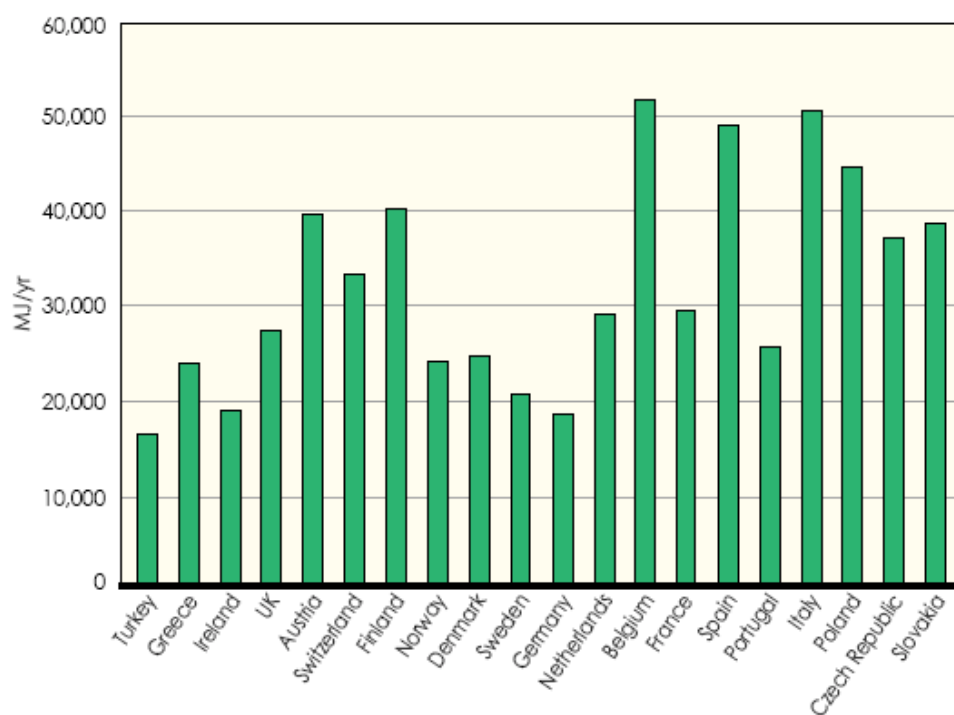


Figura III-18. Pérdida anual de energía en los hogares en Europa (Fuente: *The Contribution of Mineral Wool and other Thermal Insulation Materials to Energy Saving and Climate Protection in Europe*, ECOFYS for EURima [European Insulation Manufacturers Association], Diciembre 2002).

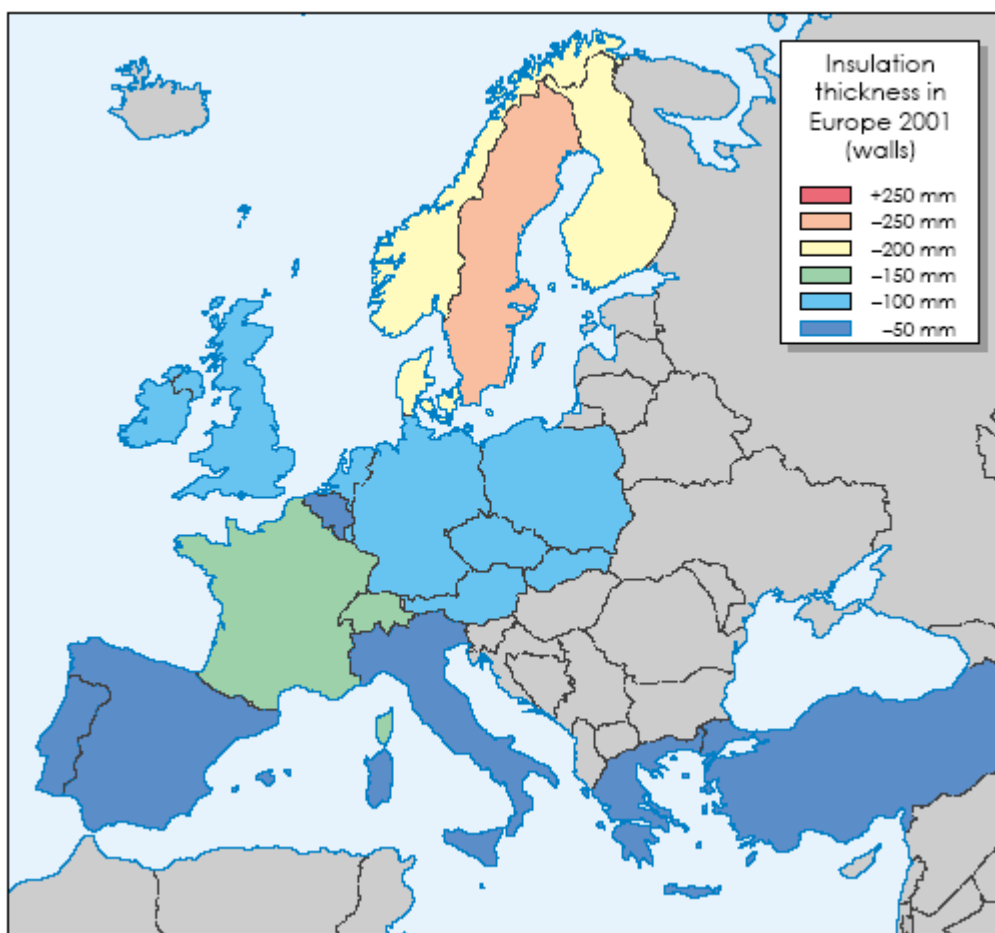


Figura III-19. Requisitos de espesor del aislamiento de las paredes (nuevas construcciones en Europa) [Fuente: *The Contribution of Mineral Wool and other Thermal Insulation Materials to Energy Saving and Climate Protection in Europe*, ECOFYS for EURima (European Insulation Manufacturers Association), Diciembre 2002].

Una cuestión relacionada con el desarrollo de revestimientos de edificios es si es posible el concepto de casas con “energía cero”. La respuesta desde un punto de vista técnico es sí, siempre que definamos a la energía cero como energía cero para calefacción y refrigeración. Con un fuerte aislamiento, la recirculación del aire interior, el uso del calor residual de los electrodomésticos, la calefacción solar pasiva, etc, esto ciertamente es posible en las latitudes más altas y más pobladas. Lo que no se puede afirmar para el futuro a largo plazo es (1) cuáles son los costos de conversión a dicho concepto, (2) si el clima interior sería aceptable (temperatura del aire), y (3) si ese tipo de casa sellada satisface las preferencias del futuro cliente y cumple con las regulaciones ambientales (calidad del aire). No es muy probable que las fuerzas del mercado por sí solas provoquen dicha mejora en la eficiencia, y la investigación y las políticas del estado son necesarias.

En gran parte las tecnologías ya están disponibles para construir casas con “energía muy baja”. Aparte de construir casas altamente aisladas, es posible diseñar casas con calefacción (y refrigeración) solar pasiva e incluir el almacenamiento de energía o depósitos en las paredes, techo y piso. Al combinar esto con sensores y sistemas inteligentes, es posible almacenar o eliminar calor cuando está disponible y utilizarlo cuando y si es necesario. Las ventanas pueden ser diseñadas con un recubrimiento que permita la transmisión selectiva de la luz solar. Es necesario investigar más sobre

esos sistemas y los costos reducidos si es que se va a desarrollar la demanda de dichas viviendas. Debería ser posible hacer avanzar las tecnologías en la curva de aprendizaje para hacerlas competitivas en el mercado.

Como se mencionara anteriormente, la industria de la construcción está bastante fragmentada y realiza poca de su I+D, y depende del gobierno y de las universidades para las innovaciones e incentivos. Por esa razón, es difícil predecir la posibilidad de grandes adelantos antes del 2010, 2020, 2030, etc. con respecto a la construcción de los revestimientos. Existen posibilidades de grandes mejoras en la eficiencia en cuanto a viviendas prefabricadas y ventajas tecnológicas inesperadas provenientes de otros sectores industriales, dando como resultado materiales de aislamiento más baratos y menos voluminosos. (En las Referencias 12 y 13 se puede encontrar información general de soporte sobre el uso de la energía en los edificios.)

En cuanto a los edificios existentes, se puede lograr mucho para ahorrar energía mediante las mejoras en los sistemas de seguridad tanto de las viviendas privadas como de los edificios comerciales. Tal como se señala tanto en la Referencia 14 como 15, es económicamente mucho más posible agregar mejoras en los sistemas de seguridad relacionados con la energía cuando los edificios están siendo mejorados en su seguridad por otras razones. La alternativa es hacer esto obligatorio mediante códigos de edificación más estrictos tanto para los edificios y residencias nuevos como para los existentes.¹⁶ Realizar mejoras en los viejos edificios residenciales con medidas de conservación de energía provee un consumo y demanda de energía reducidos. También puede llevar a una demanda pico más baja. En el caso de Kuwait, con un clima cálido y árido, el plazo de recuperación de las mejoras es muy prolongado¹⁷ debido a los precios de la energía altamente subsidiados. Es de suma importancia que los precios de la energía reflejen los costos reales. Esto requiere introducir costos ambientales para hacer atractivas las mejoras en la seguridad desde el punto de vista del inversor.

Los estándares para el acervo arquitectónico existente varían considerablemente según las regiones y países. Estas diferencias hasta cierto punto se deben a razones climáticas y a la necesidad de calefacción y/o refrigeración. Sin embargo, los factores socioeconómicos, los precios al consumidor, y los incentivos también tienen un rol importante. En Europa del Este y Rusia, el acervo arquitectónico existente está en muy malas condiciones, especialmente en cuanto al consumo de energía. Una de las razones es que en gran medida el suministro de energía ha estado basado en la calefacción urbana y el gas natural con precios al consumidor extremadamente bajos, incentivando poco o nada a los consumidores a que reduzcan el consumo. De ahí que haya posibilidades de muchas mejoras, especialmente en cuanto al aislamiento y a los termostatos al igual que cambios en la estructura de precios. Obviamente, por razones climáticas, la demanda de aire acondicionado eficiente es mayor en las latitudes menores.

Las bajas temperaturas invernales, alrededor o por debajo de 0°C, son habituales en muchas áreas de gran altitud y áreas interiores del mundo en desarrollo, tales como Sudáfrica (tres cuartos de la superficie de la región), América del Sur, y China. En estas áreas, caracterizadas por inviernos fríos y veranos cálidos, se puede aprovechar muy bien las consideraciones de diseño tales como la orientación de la vivienda (en el hemisferio sur con ventanas que miren al norte), el tamaño, diseño y posición de las ventanas, y la instalación del cielorraso. Todos estos elementos considerados en la etapa de la construcción pueden reducir significativamente la demanda de energía sin costo adicional o con un pequeño costo adicional. Por ejemplo, la instalación de un simple cielorraso en una casa con un techo de chapa acanalada puede reducir la

demanda de calefacción hasta un 74%, y aún más si se incluye material aislante (Figura III-20).¹⁸

Estas y otras intervenciones de bajo costo, que apuntan principalmente a los hogares de bajos ingresos, pueden ser fomentadas mejor mediante los programas de información y demostración de la industria y el gobierno, persuadiendo a dichos hogares acerca de las ganancias económicas y de confort a obtener. Aunque las normas formales de construcción están a menudo presentes en los países en desarrollo e incorporan dichos asuntos, no siempre se las cumple o se las pone en vigor. Un análisis apunta hacia la necesidad de mecanismos de financiamiento nuevos e innovadores para brindar asistencia a las comunidades pobres (por ejemplo en Sudáfrica) para aprovechar los beneficios de la eficiencia energética.¹⁹ Las **Tablas III-4** y **III-5** describen el estado de las tecnologías de aislamiento y de ventanas, respectivamente. Nótese que la discusión sobre los factores de riesgo involucrados queda en el texto en esta parte.

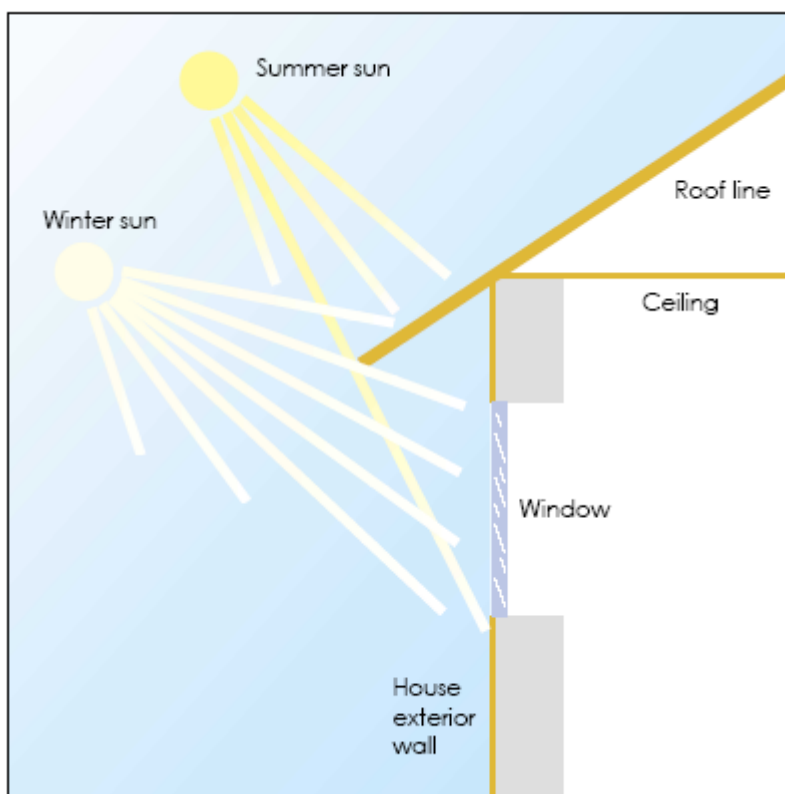


Figura III-20. Ilustración de los potenciales efectos de calefacción y refrigeración ganados por el simple diseño del edificio. (Nótese que los costos ocultos pueden actuar como una barrera, por ejemplo, la necesidad de sellar la casa protegiéndose de animales que “colonizan” la zona del entretecho, utilizando el material aislante para los nidos).

Tabla III-4. Tecnologías avanzadas de aislamiento

	Aislamiento avanzado	Comentarios
Concepto del sistema	Mejorar el aislamiento en el techo, las paredes y el piso con bajos coeficientes K	
Descripción	Aislamiento térmico, ej lana mineral	
Estado de la tecnología	En avance, nuevos materiales en desarrollo con menor conductividad térmica	
ID+D: Objetivos y desafíos	Casa con energía cero – nuevas casas Mejoras de seguridad en las casas existentes	
Beneficios y costos	- Costo: - Eficiencia: - Confiabilidad: - Calidad de la energía: - Impacto ambiental: - Impacto económico: - Preferencia de los clientes:	Moderado Sí Alta Aceptable Bajo Aceptable Depende del costo y del tiempo de recuperación
Factores de riesgo	- Técnicos: - Comerciales: - Ambientales: - Regulatorios:	Bajos (2-3) Bajos (2-3) Bajos (2-3) Bajos (2-3)

Tabla III-5. Tecnologías avanzadas para ventanas

	Aislamiento avanzado	Comentarios
Concepto del sistema	Nuevos tipos de ventanas basados en materiales avanzados	
Descripción	- Ventanas nuevas utilizando materiales avanzados con baja conductividad térmica - Ventanas nuevas con células solares incorporadas	
Estado de la tecnología	En avance – constantes mejoras	
ID+D: Objetivos y desafíos	Pérdida neta por las ventanas cercana a cero	
Beneficios y costos	- Costo: - Eficiencia: - Confiabilidad: - Calidad de la energía: - Impacto ambiental: - Impacto económico: - Preferencia de los clientes:	Tal vez Sí Aceptable Alta Bajo Moderado Depende del costo
Factores de riesgo	- Técnicos: - Comerciales: - Ambientales: - Regulatorios:	Bajos (2-3) Bajos (2-3) Bajos (2-3) Bajos (2-3)

2. Equipos y electrodomésticos

Esta sección trata de las tecnologías de provisión y conversión de la energía utilizadas localmente en los edificios mismos para calefacción de locales, calentamiento de agua y producción de electricidad (ej, pequeñas celdas de combustible). Esta sección también trata acerca de electrodomésticos de uso final para cocina, iluminación y

refrigeración. Los electrodomésticos son los usuarios finales de energía de crecimiento más rápido, después de los automóviles (**Figura III-21**).²⁰

Celdas de combustible

Dentro de 10 a 15 años las celdas de combustible podrían reemplazar los sistemas de calefacción existentes alimentados a petróleo, gas natural, o electricidad, en los hogares y en los edificios comerciales. Las celdas de combustible producen tanto calor como electricidad. Las celdas de combustible de Membrana de Intercambio de Protones (PEM) y las Celdas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC) son promisorias e interesantes para los edificios (**Figura III-22**).^{21,22}

Las aplicaciones previsibles para las celdas de combustible (con tipos típicos de celda de combustible y clasificación de potencia entre paréntesis) son—

- Electrónica portátil (DMFC) (1–200 W)
- Calefacción y energía doméstica (PEM, SOFC) (5–200 kW)
- Vehículos de carretera eléctricos, incluyendo camiones (PEM) (50–200 kW)
- Barcos (>MW)
- Centrales energéticas (SOFC) (>>MW).

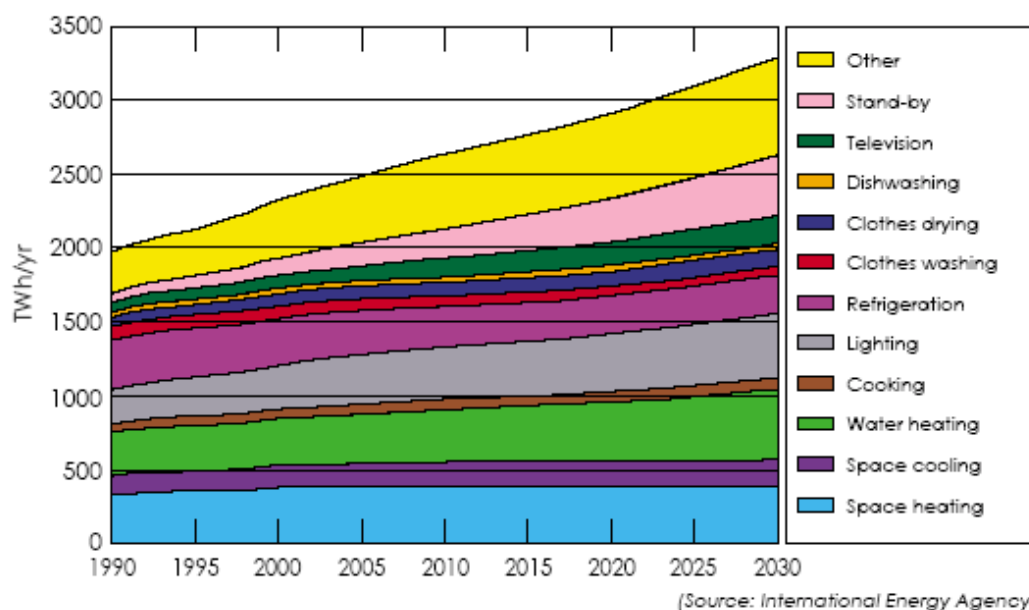


Figura III-21. Demanda real y proyectada de electricidad para electrodomésticos (Fuente: Policy Strategies for Energy Efficient Homes, IEA, Abril 2003).

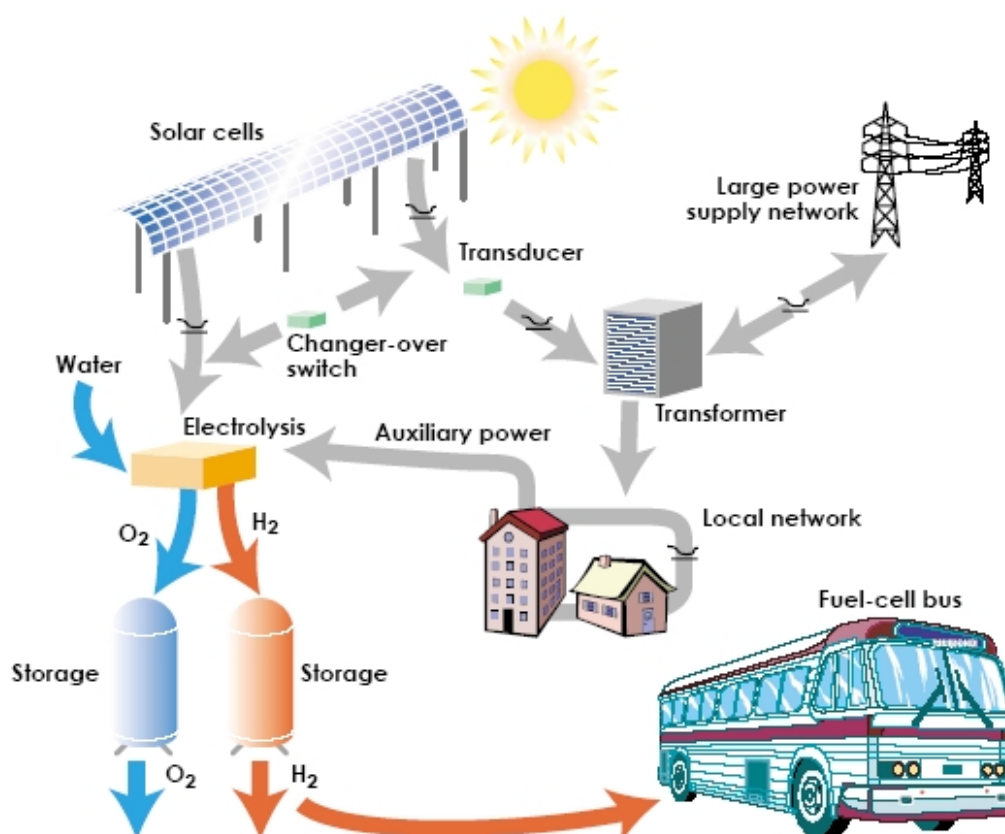


Figura III-22. Sistema integrado de uso final de la energía (Fuente: Swedish Academy foresight for Sweden study, "Energy Foresight—Sweden in Europe," Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, IVA, Estocolmo, 2003).

Las últimas cuatro de estas aplicaciones tienen impactos económicos y ambientales masivos, incluyendo la creación de nuevas industrias de alta tecnología (ver Parte III.D.1).

Una posibilidad en hogares para una sola familia son los generadores Micro-Combinados de Calor y Energía (micro PCCE) basados en celdas de combustible o pequeños grupos generadores. Un micro PCCE se diseña para funcionar en paralelo con la red energética existente. Las celdas de combustible se basan en pilas y por lo tanto son flexibles en cuanto al tamaño y pueden utilizarse tanto en unidades pequeñas como grandes. Las celdas de combustible tienen una elevada eficiencia potencial (por ejemplo, 45% eléctrico y 70% electricidad total más calor). Las celdas pueden estar alimentadas directamente con hidrógeno o gas natural en combinación con un reformador.

Bombas de calor

Las bombas de calor ya están en uso en algunas partes del mundo, en particular en países con una amplia oferta de electricidad barata proveniente de recursos nacionales (por ejemplo, energía hidroeléctrica). Las bombas de calor pueden llegar a ser más generalmente competitivas mediante la I+D. Se las puede utilizar para simple calefacción, incluyendo calentamiento de agua en hogares individuales, utilizando el

calor residual en hogares altamente aislados. Las microturbinas también pueden convertirse en una alternativa atractiva para la calefacción.

Solares fotovoltaicas

Las células solares fotovoltaicas (FV) convierten la energía del sol directamente en electricidad. La energía de las células solares actualmente es mucho más cara (alrededor de 10 veces) que las fuentes convencionales de electricidad. Sin embargo, la curva de aprendizaje para el costo de los módulos FV muestran que el costo está bajando rápidamente, indicando una reducción del 20% en el costo para cada duplicación de la producción acumulada, aunque ese porcentaje disminuirá a medida que se acerque al mercado comercial.²³ El *Plan de Trabajo de la Industria Fotovoltaica* de los EE.UU. predice que los envíos mundiales se acercarán a 18 GW por año para el 2020.²⁴ La generación descentralizada es posible con los sistemas FV porque requieren pocos o ningún operador del sistema, no contaminan, y no producen ruido. Dado que el costo por kilowatt-hora de electricidad FV puede ser relativamente indiferente a la escala de la instalación (ver Referencia 21), los sistemas FV se adaptan bien para ser integrados en edificios individuales. Las celdas pueden fabricarse como una parte integral del techo, las paredes o incluso las ventanas. Sin embargo, vale la pena recordar que la energía promedio proveniente de las unidades FV solares es generalmente del 10 al 20% de la capacidad energética debido a condiciones locales y ciclos diurnos.

Refrigeración

Como puede verse en la Figura III-21, no se espera que la demanda de energía para refrigeración crezca mucho en las próximas dos décadas. Probablemente esto se deba al hecho de que este mercado está casi saturado, al menos en los países de la OCDE. La competencia en esta área ya está manejada hasta cierto punto por el consumo de energía por parte de cada unidad. Los clientes están muy centrados en el uso de la energía en esta área. Obviamente, hay posibilidades de efectuar mejoras en la eficiencia, pero están bien avanzadas. Puede haber posibilidades de avances tecnológicos en cuanto a los medios y métodos alternativos de refrigeración que darían como resultado significativas mejoras en la eficiencia energética. Estos incluyen los ciclos Stirling, los ciclos Brayton, y las tecnologías acústicas, magnéticas y termoeléctricas.

Iluminación

Como se observa también en la Figura III-21, se espera que la demanda de energía para iluminación crezca en las próximas dos décadas. Las posibilidades más obvias de ahorro de energía son los cambios en el estilo de vida, los incentivos de costos, y las mejoras o avances tecnológicos. En las sociedades más ricas del futuro, va a ser difícil lograr simples cambios en el estilo de vida, tales como convencer a la gente de que apague las luces. Esto probablemente solo tenga un impacto si se lo facilita por sistemas inteligentes que apaguen las luces cuando no se las está usando. El desarrollo de estas tecnologías (ver Parte III.D.7) puede estimularse por incentivos de costos, tales como los precios variables de la electricidad. Incluso en una situación futura en la cual un hogar individual produzca una parte o la totalidad de su electricidad internamente, el incentivo en el costo sería válido como alternativa al uso de electricidad internamente y en su lugar vender la electricidad a la red. Las posibilidades de ahorros mediante nuevos desarrollos tecnológicos son muchas. Las bombillas eléctricas actuales de bajo consumo podrían ser desarrolladas aún más, dando origen a grandes ahorros. Las lámparas de baja potencia pueden seguir

desarrollándose junto con los sistemas híbridos de iluminación que utilizan fuentes de luz centralizada de alta eficiencia y aplicación controlada de iluminación natural.

Electrodomésticos

Los edificios residenciales se están equipando rápidamente con numerosos electrodomésticos nuevos tales como computadoras, dispositivos automáticos, y equipos de comunicación, entre otros. Muchos de estos dispositivos están en uso o en posición de espera durante todo el día y toda la noche. En el 2003, la Agencia Danesa de Energía calculó que alrededor del 10% del uso de electricidad en hogares privados se “gastaba” en posición de espera.²⁵

En muchos edificios comerciales nuevos, numerosos dispositivos electrónicos funcionan más tiempo que el día laboral en grandes oficinas subdivididas. En algunos casos, hay áreas que están iluminadas casi 24 horas al día. Del mismo modo, la Agencia Danesa de Energía ha calculado que alrededor del 40% de la electricidad en los edificios comerciales en Dinamarca se utiliza fuera de las horas normales de trabajo, la mayor parte en el modo de espera del equipo electrónico (ver Referencia 25). Esta situación se ve exacerbada por los horarios de trabajo flexibles, con el resultado de que siempre hay presentes al menos algunas personas y todos los equipos están en funcionamiento. Por lo tanto, hay posibilidades de gran optimización en cuanto al uso de la energía.

En esta área, las perspectivas de avances tecnológicos son considerables, aunque difíciles de predecir. Hay una cosa que es segura—la informática y los aparatos electrónicos sofisticados serán mejorados rápidamente, abriendo nuevas posibilidades para tratar este problema, y si se lo maneja en forma inteligente, debería ser posible reducir al mínimo el consumo de energía. Las tecnologías individuales se están tornando rápidamente más eficientes en cuanto a la energía, pero al mismo tiempo el desarrollo siempre creciente de nuevos equipos aumenta el consumo de electricidad.

A la larga, los países en desarrollo en todo el mundo tendrían en principio las mismas necesidades de electrodomésticos que el resto del mundo. Sin embargo, el punto de partida es bastante diferente.

Cocina

La biomasa (por ejemplo leña, carbón, y residuos animales o vegetales) sigue siendo el combustible dominante para cocinar en la mayoría de los países en desarrollo. Hay algunas posibilidades de cocción solar principalmente en el caso especial de instituciones donde se preparan alimentos en el medio del día. Para la mayoría de los hogares del mundo en desarrollo, las alternativas a la biomasa son el querosén, el gas licuado de petróleo (GLP), y la electricidad. Rara vez se prefiere a la electricidad como combustible para cocinar por una serie de razones entre las cuales una de las más importantes es el costo de los aparatos de cocina y el costo de la electricidad para hacerlos funcionar. Además, la electrificación en muchos países en desarrollo sigue siendo solo de alrededor del 10–20% y es poco probable que supere el 30% en el futuro previsible. Se requiere una alternativa limpia para que millones de hogares abandonen la biomasa.

Generalmente se reconoce que el combustible para cocina más promisorio es el GLP, y se están realizando grandes esfuerzos para cumplir el desafío de aumentar el acceso a este combustible limpio y conveniente (por ejemplo, el LP Gas Rural Energy Challenge ²⁶). Aunque debería señalarse que el GLP es un combustible fósil y por lo tanto contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero, la Asociación

Mundial de Gas Licuado de Petróleo (ver Referencia 26) y K. Smith²⁷ han sostenido que aunque 2.000 millones de personas se pasaran al GLP, significaría un aumento de solo 2% en las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de combustibles fósiles. Un desafío principal al aumentar el acceso al GLP es mejorar la red de distribución para el combustible, alentando a los minoristas a establecer depósitos de distribución y puntos de venta en áreas remotas y escasamente pobladas. Claramente, esto requerirá nuevos incentivos, subsidios cruzados, regulación, etc.

En Asia Meridional y África, donde la energía proveniente de biomasa tradicional representa hasta el 90% de la energía consumida por los hogares rurales (y la cocción de alimentos representa alrededor del 90% del consumo de energía), alejarse de la biomasa hacia el GLP no es fácil en algunos países que exportan GLP y otros productos del petróleo. La transición energética tomará mucho tiempo para muchos hogares pobres. Sin embargo, el uso de biomasa sostenible debería ser también una alternativa para la cocción de alimentos, por ejemplo:

- Cocinas de alta eficiencia alimentada con mini briquetas fabricadas con biomasa disponible localmente proveniente de las cosechas y los productos de desecho.
- Fogones de cocina más eficientes utilizando nueva tecnología simple y promisorio.

Estas tecnologías sostenibles basadas en la biomasa – si se mejoraran en el futuro – podrían ser adecuadas para los pobres de las áreas rurales, y ayudarían a reducir las emisiones de CO₂ y tendrían importantes efectos sobre la conservación de los bosques.

La cocción con calor solar es una alternativa promisorio y valioso en las áreas rurales de los países en desarrollo porque se la puede combinar con otras tecnologías de cocción de alimentos, tales como fogones mejorados que utilizan otros combustibles de cocción, y la comida generalmente se prepara en el medio del día, y generalmente esta gente come la misma comida una vez por día. Se espera que la participación de las cocinas solares y de los fogones mejorados en el mercado pueda aumentar en gran medida en Asia y África rural para el 2020 y para el 2050.

Calentamiento solar del agua

Hay un gran potencial para el calentamiento solar del agua, particularmente en los hogares que ya usan grandes cantidades de energía (electricidad o gas) para calentar el agua y en particular en las latitudes más bajas. En muchas partes del mundo en desarrollo, por ejemplo el sur, el este y el oeste de África, esto se limita a los pocos relativamente ricos. Sin embargo, en las regiones del Mediterráneo actualmente hay una demanda muy elevada. En Túnez, por ejemplo, el uso de agua caliente (normalmente utilizando gas natural) está destinado a crecer hacia el 2010 tanto en el sector doméstico como en el terciario, estimándose el mercado potencial para los calentadores solares de agua en 1,5 millones de m² de colectores, habiéndose instalado 32.000 m² hasta el 2003. Para el 2010, el programa solar tiene como objetivo un total de 1 millón de m² de colectores solares, ahorrando así en promedio 100.000 tpe por año y evitando la emisión de 300.000 toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera.²⁸ En otros países del norte de África, como por ejemplo Marruecos, las condiciones son similares.

La mayor limitación para alcanzar estos objetivos es la financiación. Una actividad de colaboración liderada por el PNUMA, MedREP, con apoyo del gobierno italiano, actualmente está investigando planes de financiación nuevos para aumentar la participación de los renovables en estos países.²⁹ La **Tabla III-6** señala el estado de las tecnologías de celdas de combustible para edificios.

Tabla III-6. Tecnologías de celda de combustible para edificios

	Celdas de combustible en hogares individuales	Comentarios
Concepto del sistema	Sistemas de celda de combustible modulares	
Descripción	• Membrana de intercambio de protones (PEM) • Celdas de combustible de óxido sólido (SOFC)	
Estado de la tecnología	• En etapa de investigación y demostración • Buenos avances	Uso comercial calculado para el 2010
ID+D: Objetivos y desafíos	• Unidades modulares competitivas comerciales para reemplazar las unidades de petróleo o gas en hogares individuales	
Beneficios y costos	• Costo: • Eficiencia: • Confiabilidad: • Calidad de la energía: • Impacto ambiental: • Impacto económico: • Preferencia de los clientes:	Esperado Sí No Buena Mejoras Moderado Depende del costo
Factores de riesgo	• Técnicos: • Comerciales: • Ambientales: • Regulatorios:	Moderados (4-5) Moderados (5-6) Bajos (2-3) Ninguno

3. Sistemas inteligentes

En el 2020 y aún más en el 2050, los edificios nuevos probablemente estén equipados con numerosos sensores, sistemas de control, y sistemas inteligentes de manejo de la energía (ver Parte III.D.7 y D.8). Dichos equipos harán posible que los revestimientos del edificio, además de todos los electrodomésticos en el hogar, se adapten automáticamente a las necesidades y condiciones cambiantes en respuesta a condiciones ambientales externas o internas. Los sensores de los edificios y los sistemas de control se encargarán de la puesta en marcha, funcionamiento y mantenimiento y aconsejarán o decidirán sobre trabajos de reparación necesarios. Al mismo tiempo, los edificios serán parte de una gran red de suministro integrada con una combinación de grandes y pequeños productores; el edificio compra y vende energía a este sistema (**Figura III-23**).

Dichos edificios avanzados probablemente estén equipados con comunicación bidireccional entre el uso final y la oferta, particularmente en el caso del suministro de energía renovable, que debería dar origen a grandes mejoras totales de eficiencia. Un ejemplo es un revestimiento de edificio con una capacidad de almacenamiento ajustable y ventanas con transparencia ajustable combinado con electrodomésticos tales como lavarropas, lavavajillas, etc, que podrían encenderse cuando hubiera un exceso de electricidad generada internamente. Si no, la electricidad puede venderse a la red local a un precio favorable, mediante un control del uso de la energía que responda a los precios. Se espera que en los próximos años estos sistemas ingresen primero en nuevos hogares particulares, pero que luego entren gradualmente en los edificios existentes durante las reformas para obtener mayor seguridad. Con los edificios de oficinas, algunos de los equipos de control y de los sistemas de gestión de la energía ya están siendo utilizados en gran medida, y probablemente en este aspecto los edificios de oficinas continúen más avanzados que los hogares privados.

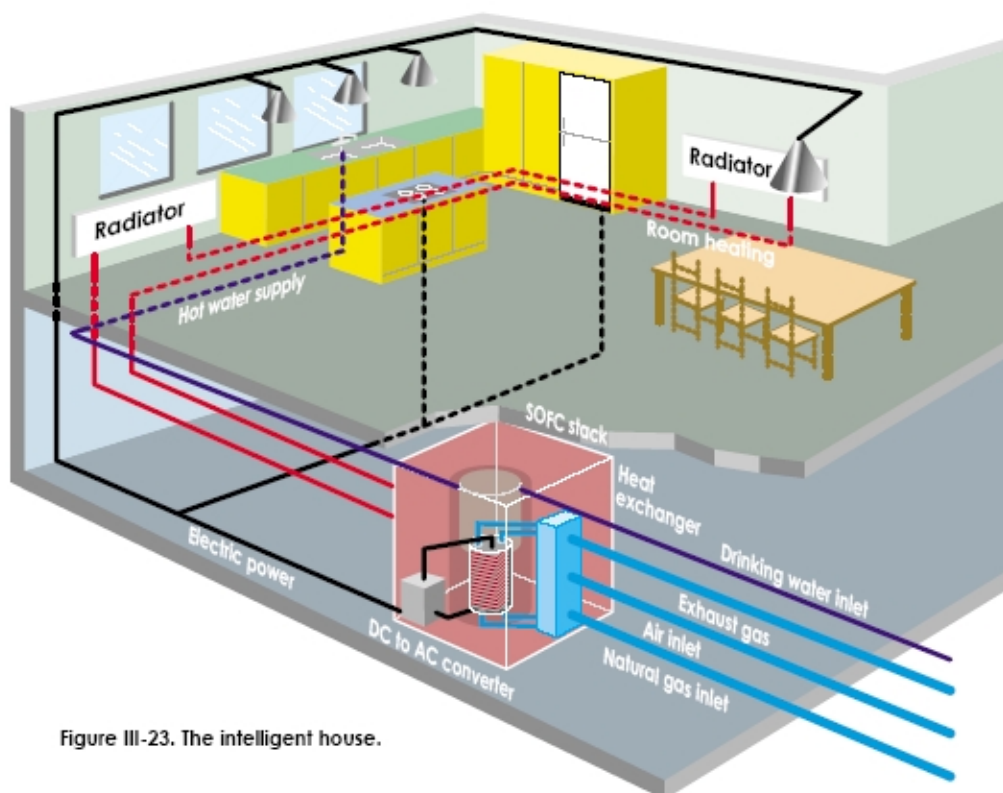


Figure III-23. The intelligent house.

Figura III-23. La casa inteligente

A lo largo del marco temporal que va hasta el 2050, analizado en este informe, el hidrógeno probablemente ingrese en el sector del transporte hasta cierto punto como un combustible en los automóviles privados equipados con celdas de combustible (ver Parte III.C.4). Los automóviles privados son típicamente utilizados solo para manejar a tiempo parcial o incluso unas pocas horas por día. Será natural tratar de utilizar las celdas de combustible en el automóvil estacionado fuera de la casa familiar como fuente de energía para proveer calor y/o electricidad a la casa. Obviamente dicho sistema requiere sistemas de gestión de la energía aún más avanzados, combinados con almacenamiento de energía y fuentes de alimentación de reserva. Se necesita más ID+D antes de que dichas soluciones puedan implementarse en condiciones normales del mercado. Sin embargo, se debería prestar atención a esta atractiva solución.

Posición de espera

Hay considerables posibilidades de ganancias en eficiencia con respecto a todos los tipos de equipos que funcionan muchas más horas que las necesarias para tareas asignadas. El uso de energía de equipos individuales está siendo mejorado continuamente por los fabricantes. Estas mejoras separadas, sin embargo, dejan de lado la combinación de todos los equipos que están en funcionamiento a lo largo de la jornada laboral, actualmente más prolongada debido a las horas de trabajo flexibles en el comercio y el deseo de que el equipo de comunicación y computación esté disponible a lo largo de todo el día en los hogares privados. Los sistemas inteligentes que satisfagan estas demandas y al mismo tiempo eviten gastar energía en el modo de espera van a ser muy útiles. En el futuro habrá edificios inteligentes equipados con sensores avanzados y sistemas de control y monitoreo de la energía. Los cambios en el estilo de vida siempre han implicado un proceso prolongado; sin embargo, en este

caso, la cultura moderna de los jóvenes que crecieron con la comunicación por Internet y los teléfonos móviles disponibles 24 horas al día hace mucho más fácil la toma de decisiones sobre oferta y demanda de energía. Las decisiones sobre la oferta de energía junto con la fijación de precios y demanda en línea podría ajustarse bien con otras medidas tomadas en los hogares particulares, tales como banca electrónica y compra de alimentos en el supermercado local.

Se podría ahorrar mucha energía actualmente si las familias individuales tuvieran como prioridad la eficiencia y el uso de la energía. También debe existir el deseo de dedicar el tiempo necesario a las decisiones de gestión de la energía, por ejemplo, apagar las luces y otros equipos electrónicos en el hogar y bajar la calefacción cuando corresponda. La mayoría de los consumidores están más centrados en el confort y en la conveniencia, y por esa razón, en general únicamente se logran ahorros de energía limitados. En el futuro, es probable que se le de más prioridad a la conveniencia que en la actualidad. Por lo tanto, el camino a seguir es introducir sistemas inteligentes que manejen la energía de los hogares sin reducir el confort y la conveniencia de la familia.

Referencias

1. *World Energy, Technology and Climate Policy Outlook*, WETO 2030, EUR 20366, Brussels, 2003.
2. S.A. Ajlan, A.M. Al-Ibrahim, M. Abdulkhaleq, and F. Alghamdi, *Developing Sustainable Energy Policies for Electric Energy Conservation in Saudi Arabia*, to be published, Ministry of Industry and Electricity, Riyadh, 2004.
3. *Energy for Tomorrow's World—Acting Now*, World Energy Council, London, 2000, <http://www.worldenergy.org>.
4. *Energy Efficiency Improvement, Utilising High Technology*, World Energy Council, London, 1995.
5. The IEA is working on a report "Technology Options for Achieving Significant Greenhouse Gas Emission Reductions from Energy over the Long Term."
6. IPCC 3. Assessment Report.
7. Technology Opportunities To Reduce U.S. Greenhouse Gas Emissions, www.ornl.gov/climate_change, October 1997.
8. Rockwool International A/S, Environmental webpages, <http://www.rockwool.com>.
9. Swiss Academy of Engineering Sciences, "CH50%—Halving Switzerland's fossil fuel consumption," 2002.
10. Swedish Academy Foresight for Sweden Study, "Energy Foresight—Sweden in Europe," Royal Swedish Academy of Engineering Sciences, IVA, Stockholm, 2003.
11. *The Contribution of Mineral Wool and Other Thermal Insulation Materials to Energy Saving and Climate Protection in Europe*, ECOFYS for EURima (European Insulation Manufacturers Association), December 2002.
12. World Energy Assessment, UNDP/WEA 2001.
13. *Energy Efficiency Policies and Indicators*, World Energy Council, London October 2001.
14. Anne Grete Hestnes and Niels Ulrik Koefoed, "Effective retrofitting scenarios for energy efficiency and comfort: results of the design and evaluation activities within the OFFICE project," *Building and Environment*, 37 (2002).
15. *Energy Technologies for the 21st Century*, IEA, Paris, 1997.
16. *Energy Efficiency in Denmark*, Danish Energy Agency, Copenhagen, March 2002.
17. "Retrofitting residential buildings in hot and arid climates," F. Al-Ragom, *Energy Conservation and Management*, 44 (2003).
18. M. Scholand and B.T. Ndzube, "Environmentally Sound Low-Cost Housing," *Domestic Use of Electrical Energy Conference*, Cape Teknikon, Cape Town, 1999, <http://www.ctech.ac.za/conf/duel/documents/Mscholand.doc>.

19. Randall Spalding-Fecher, "Affordability of Energy Efficient Low Cost Housing—Estimating Financing and Grant Requirements," *Domestic Use Of Electrical Energy Conference 2001*, Cape Teknikon, Cape Town, 2001.
20. Policy Strategies for Energy Efficient Homes, IEA, April 2003.
21. Risø Energy Report 1, New and Emerging Technologies—Options for the Future, Risø National Laboratory, Denmark, October 2002.
22. "Energy Technologies for Post Kyoto Targets in the Medium Term," *Proceedings from Risø International Conference*, Risø National Laboratory, 19–21 May 2003, Denmark, pp. 216–233.
23. *Energy Technologies for the 21st Century*, World Energy Council, London, 2001.
24. <http://www.national-hero.com> and <http://www.nrel.gov/ncpv/pdfs/27450.pdf>.
25. Energisparerede gørelse (White paper on Energy Savings), Danish Energy Agency, May 2003.
26. LP Gas Rural Energy Challenge, a public-private partnership between UNDP and the World LP Gas Association,
<http://www.worldlpgas.com/sustdev/mainpages/challenge/index.php>.
27. K. Smith, editorial "In Praise of Petroleum," *Science*, Vol. 298, 6 December 2002,
http://ehs.sph.berkeley.edu/krsmith/publications/02_smith_3.pdf.
28. CITET: Tunis International Center for Environmental Technologies
<http://www.citet.nat.tn/english/energies/sources.html>.
29. UNEP (2003) Renewable Energy Financing in the Mediterranean (MedREP)
<http://uneprisoe.org/MedREP/>, Baseline assessment studies for Egypt, Morocco and Tunisia completed, reports in preparation.

C. Transporte

El transporte es un sector clave en el uso final de la energía. Actualmente utiliza alrededor del 20% de la energía primaria mundial (80 EJ/año), y en los escenarios presentados (ver Parte II), se espera que crezca entre 150 y 280% para el 2050 (120 a 225 EJ/años). Los ahorros de energía gracias a las nuevas tecnologías, calculados como para los dos sectores anteriores (industria y edificios), pueden ser tanto como 40 EJ/año en el 2020 y 105 EJ/año en el 2050. Se calcula que los mayores ahorros por región (20% del total) tendrán lugar en la ex- Unión Soviética, pudiendo alcanzar la mitad de esa cifra para el 2030 (liberando una economía dominada pero de alta tecnología). El transporte provee movilidad a la gente, moviliza bienes y servicios, y dado que gran parte de la energía primaria proviene del petróleo, que a su vez se concentra en áreas localizadas del mundo, es el sector que está en mayor riesgo de ser interrumpido, ya sea por condiciones económicas o situaciones políticas. No hay pruebas de saturación en los mercados de servicios de transporte en los países desarrollados (**Figura III-24**). Esto, junto con el rápido crecimiento en los países en desarrollo, pone el énfasis en el futuro del sector de uso final del transporte. Dicho énfasis supone que el GWP brindará soporte al crecimiento imaginado en el sector del transporte, y que los países con alta cantidad de población como India y China serán dominantes en el desarrollo y uso de nuevas tecnologías de transporte.

Un examen más exhaustivo de los tres escenarios considerados en este estudio produce una nueva percepción de la demanda de uso final para servicios de transporte en todo el mundo y sus perspectivas (**Tabla III-7**). Los datos, en términos de distancias recorridas, se dividen en pasajeros y carga.

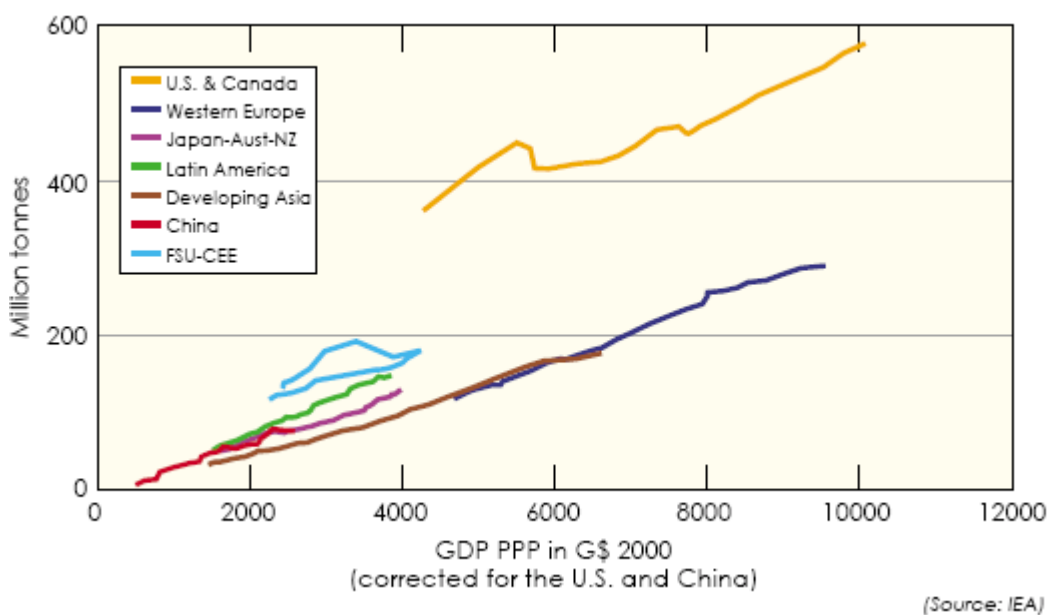


Figura III-24. Tendencias regionales de movilidad (Fuente: *Actuadores de la Escena Energética*, Consejo Mundial de la Energía, diciembre 2003).

Tabla III-7. Distancia recorrida por pasajeros (10^{12} persona-kilómetros/año) y carga (10^{12} toneladas métricas-kilómetros/año) en tres escenarios descritos en la Parte II. Los números entre paréntesis son los aumentos porcentuales después del año 2000. Nótese que todos los números están redondeados y las sumas pueden no ser exactas.

	Escenario	2000	2020	2050
Pasajeros	A1	27	45(63)	83(202)
Aéreo/carretero	A3	27	45(64)	85(212)
	C2	22	33(53)	55(151)
Pasajeros	A1	4	8(120)	24(535)
Ferroviario/marítimo	A3	4	9(125)	25(549)
y fluvial	C2	3	6(95)	14(358)
Pasajeros	A1	31	53(70)	107(242)
Total	A3	31	53(72)	110(254)
	C2	25	39(58)	69(176)
Carga	A1	7	11(56)	18(154)
Aéreo/carretero	A3	7	11(55)	19(157)
	C2	6	10(60)	16(160)
Carga	A1	15	20(30)	26(70)
Ferroviario/marítimo	A3	15	20(29)	26(70)
y fluvial	C2	12	16(25)	20(59)
Carga	A1	23	31(38)	44(97)
Total	A3	23	31(38)	45(98)
	C2	18	25(36)	36(93)

Los escenarios proyectan un aumento en el tráfico aéreo y carretero de más del 50% en los próximos 20 años y cercano al 200% en los próximos 50 años. Sin embargo, aunque actualmente es mucho menor, el tráfico ferroviario y marítimo y fluvial puede crecer el doble de eso en los próximos 20 a 50 años, posiblemente más del 500% para el 2050. Esto refleja una población mucho mayor y un impulso hacia el tránsito masivo. Sin embargo, una duplicación del tráfico aéreo y carretero de pasajeros en los próximos 20–30 años, con dos tercios de la totalidad del tráfico utilizando estos medios, ejerce gran presión sobre las tecnologías de los automóviles y del transporte aéreo. ¿Cuáles son estas tecnologías y cómo cumplirán con este desafío?

No se debe pasar por alto el tráfico de carga, que ya representa el 30–40% del uso de la energía en el sector de uso final del transporte, y se proyecta que crecerá en un factor de tres en los próximos 50 años.^{1,2} ¿Qué tecnologías facilitarán esta demanda? Sin embargo, se espera que la carga sea un porcentaje decreciente del total del uso de la energía y quizás más probablemente un 30% para el 2050. Esto se debe a la creciente influencia del automóvil en las sociedades con gran cantidad de población, tales como China e India, y una creciente eficiencia en el transporte de carga.

El transporte es una industria muy fuerte e importante, pero su horizonte en general es más corto que el de la industria energética en su conjunto. La rotación de las existencias de nuevos automóviles está en el orden de los 10 años, mientras que la rotación de gran parte de las existencias de la industria de energía fija es de 30 años o más. Por lo tanto, las nuevas tecnologías de uso final en el transporte están limitadas hasta cierto punto por una rotación más lenta en los tipos de combustibles que pueden ser utilizados. Si bien en esta sección nos centramos en tecnologías de uso final específicas, es importante darse cuenta de que la infraestructura relacionada con la

salud de cualquier tecnología es igualmente importante. Por ejemplo, actualmente un motor de combustión interna requiere una red de producción, transporte y distribución de gasolina para su uso eficiente. Otros sectores también requieren infraestructuras similares. Al mirar al futuro, parece lógico que el mercado podría favorecer esas tecnologías de usos finales que utilizan las infraestructuras existentes y también favorecerían a aquellas que utilizan las infraestructuras que proveen soporte a otras tecnologías de uso final y a otros sectores del mercado. Por lo tanto, el uso de los sistemas existentes de distribución de electricidad y gas natural para producir hidrógeno cerca o en el lugar de su uso final, digamos para pequeñas flotas de vehículos, parece favorecer tanto la introducción de la tecnología como el simultáneo uso continuado de esa infraestructura. Otros ejemplos también son posibles.

Esta parte busca unir las tendencias de tecnología de transporte con las necesidades energéticas en general y con otras necesidades de uso final en particular (por ejemplo, celdas de combustible de doble uso). Se pueden obtener más beneficios examinando las acciones específicas que deben realizarse para que una tecnología entre en el mercado. Las incertidumbres claves se centran en el rol que juegan dos importantes tecnologías, las celdas de combustible y el hidrógeno:

- ¿Las celdas de combustible pueden competir con el motor de combustión interna?
- ¿El hidrógeno será el combustible de transporte mayoritario, y si lo es, cuándo?

Hay un fuerte lazo entre las tecnologías de celda de combustible y de hidrógeno, porque el hidrógeno es el combustible primario con el que funcionan las celdas de combustible.

Es comprensible que la industria del transporte esté muy interesada en delinear los roles de la industria y del gobierno, al igual que en demarcar la línea entre la ID+D a corto y largo plazo. Un factor importante en el transporte es la difusión de nuevas tecnologías en la flota de transporte, que a menudo tiene lugar más rápidamente que en otros sectores. El Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD) y la Academia Nacional de Ciencias/Consejo Nacional de Investigación de los EE.UU. recientemente han estudiado el sector del transporte, proporcionando información útil sobre las tecnologías que aquí se examinan y sobre su impacto.^{2,3} El trabajo del Consejo Empresarial Mundial postula que para cambiar el rumbo actual de las emisiones de gases de efecto invernadero, el mundo debe cambiar por combustibles de “carbono neutral” (por ejemplo hidrógeno y biocombustibles). El trabajo del Consejo Nacional de Investigación muestra pruebas persuasivas de la necesidad de hacer esto, utilizando ilustraciones de varias tecnologías, combustibles y combinaciones.

Para el estudio actual, las tecnologías más importantes para el sector de transporte se separan en cinco categorías:

1. Sistemas avanzados de motores de combustión interna
2. Sistemas alternativos de motores de combustible
3. Sistemas energéticos eléctricos híbridos
4. Sistemas energéticos con celdas de combustible
5. Otros sistemas energéticos (turbina, eléctrico).

1. Sistemas avanzados de motores de combustión interna

Conceptos del sistema

Los conceptos avanzados aplicables a los vehículos incluyen reducción del peso, menor resistencia al avance, y mejoras en la eficiencia en la transmisión y en los motores. Los motores de combustión interna (ICE) representan esencialmente todos los vehículos actuales. Las mejoras en los ICE se dividen en dos categorías: motores de encendido por bujías y motores diesel. Además, se esperan mejoras en el tratamiento posterior de los gases de escape y en la transmisión. Además se esperan combustibles nuevos y mejores, dando como resultado vehículos de mayor eficiencia y menores emisiones a la atmósfera. El treinta a cuarenta por ciento de la energía de transporte utilizada mundialmente es para transportar carga, mayormente por motores diesel. Los motores diesel de nueva generación, de eficiencia ultra elevada con tecnología avanzada de control de emisiones y mejor aerodinámica están reduciendo tanto el uso como las emisiones de los combustibles. La eficiencia del funcionamiento aquí es muy importante porque muchos de estos vehículos funcionan en el modo de larga distancia y las formas más aerodinámicas diseñadas utilizando software y neumáticos de baja fricción se encuentran entre las tecnologías utilizadas aparte de las del motor. (Para una descripción más detallada de estas tecnologías, ver el excelente plan de trabajo disponible en la Referencia 4.)

Descripción de la tecnología

Para los motores de encendido por bujías, la reducción del desplazamiento de los cilindros conduce a una mayor eficiencia. Lo mismo se logra con el cebado (sobrealimentación y turbocarga), inyección directa con combustión estratificada con tratamiento posterior avanzado, inyección directa con combustión homogénea conjuntamente con tratamiento posterior convencional, trenes de válvulas variables que permiten un par motor optimizado, tasas de compresión variables (eficiencia optimizada) y detonación automática controlada. Para motores diesel de poca potencia, la reducción del tamaño junto con sobrealimentación y refrigeración intermedia, sistemas avanzados de inyección con canales de inyección y modelos de inyección de tamaño variable, y motores diesel de alta velocidad también llevan a motores más eficientes. Para los motores diesel de gran potencia involucrados en transporte de carga, las tecnologías incluyen motores diesel de cuatro tiempos, de inyección directa, y materiales livianos.

La tecnología de tratamiento posterior es importante para controlar las emisiones, ya se trate de los contaminantes locales como globales. Las tecnologías aplicables incluyen catalizadores de tres vías, catalizadores avanzados de absorción de NO_x , catalizadores con cantidades reducidas de metales preciosos (que por lo tanto son menos costosos), inyección avanzada de alta presión, reducción catalítica selectiva, catalizadores de oxidación, filtros de partículas diesel, sensores avanzados, tecnologías de conversión de NO_x , y recubrimientos para catalizadores avanzados.

También se están desarrollando nuevos combustibles diesel y gasolinas. Se necesitan técnicas para eliminar el azufre, para crear combustibles diesel formulados con menos NO_x y menos partículas, mejor volatilidad y octanaje, nuevas bases y combustibles dedicados a tecnologías de motores específicas. Las mejoras en la transmisión asociadas con avances en el motor incluyen transmisiones automáticas, transmisiones continuamente variables, transmisiones manuales automáticas, y transmisiones de doble embrague.

Estado de la tecnología

Todas estas tecnologías están siendo desarrolladas activamente en la actualidad, principalmente en Japón, América del Norte y Europa. Generalmente se acepta en la industria que los ICE con combustibles convencionales seguirán dominando durante los próximos 10-15 años, principalmente debido al estado avanzado de la tecnología. Se espera que crezca el uso del diesel (en Europa ya es del 40%). Virtualmente todos los camiones de gran potencia están alimentados a diesel y cada vez más también los camiones de mediana potencia. Las eficiencias del diesel son de 40+% en un motor con mantenimiento adecuado. Las celdas de combustible son una opción a largo plazo, probablemente después del 2020 o incluso del 2030. Los fabricantes de automóviles están introduciendo sistemas eléctricos híbridos en camiones de poca potencia. Los híbridos (las mezclas de varios combustibles y tecnologías eléctricas) serán muy importantes en este marco temporal. No se espera que las celdas de combustible tengan una penetración mayor que en un nicho antes del 2020. Para el 2020, los motores de encendido por bujías combinarán las tecnologías arriba mencionadas. Más allá del 2020 un objetivo es alcanzar un estado de “cero emisiones” con ICE, que si se logran, elimina efectivamente al automóvil de la ecuación ambiental.

ID+D: Objetivos y desafíos

Para los motores de encendido por bujías, es necesario reducir los desplazamientos de cilindros hasta un 40% para lograr un beneficio correspondiente en eficiencia. Es necesario reducir el consumo de combustible para todos los tipos de motores en un 40%, reducir el dióxido de carbono hasta 25%, aumentar la producción de potencia específica del diesel de poca potencia hasta 70 kilowatt-litro, y agregar nuevas tecnologías avanzadas de eliminación de NO_x y de partículas.

El desafío para los motores diesel es mejorar la eficiencia del combustible y satisfacer al mismo tiempo los rigurosos estándares de emisión que ya están en vigencia en algunas partes del mundo y que posiblemente se impongan en otras (por ejemplo, China). Las mejoras que se vislumbran para los motores diesel de alta potencia son un menor consumo de combustible con menores emisiones de NO_x y de partículas logradas mediante la mejora de la combustión con opciones tales como inyección flexible de alta presión, cilindros de válvulas múltiples, y control electrónico y de cebado. Para las emisiones, se utilizarán trampas de NO_x pobre y reducción catalítica selectiva basada en urea y un catalizador de oxidación. La formulación del combustible es importante para lograr este objetivo.

Comercialización y utilización

La industria del transporte espera que para alrededor del año 2020 estas tecnologías hayan pasado de la etapa de investigación (básica y aplicada) a la de desarrollo y demostración: primero sistemas avanzados de inyección de combustible, trenes de válvulas variables, híbridos, tratamientos posteriores, y mejoras en la transmisión, luego seguirán el cebado, los motores variables con sistemas de combustión combinados, pero auto inyección controlada. La fuerte relación entre la eficiencia y las emisiones (aumentando una sin dañar la otra), especialmente en motores diesel, es una importante barrera. Las opciones de diseño de motores para menores emisiones típicamente incluyen un castigo en la economía del combustible de hasta un 20%.

Costos y beneficios

Los beneficios de estas tecnologías son una mayor eficiencia (quizás del doble o más) y reducción de emisiones (quizás 25% o más, alcanzando con el tiempo el 100%), incluyendo las emisiones de gases de efecto invernadero. Los beneficios también incluyen una menor dependencia del petróleo. El gobierno de los EE.UU. está gastando más de US\$100 millones por año en tecnologías de combustibles alternativos. Al igual que en otras áreas, es difícil obtener un cálculo de la industria sobre estas tecnologías. Los costos son importantes fondos para ID+D, aunque es difícil calcular los montos a priori.

Factores de riesgo

- Técnicos—4: Los riesgos parecen ser bajos para muchas de estas tecnologías dado que ya pasaron la etapa de prueba del concepto. Para los motores diesel, el desafío es lograr la máxima eficiencia al tiempo que se reducen las emisiones.
- Comerciales—2: Los riesgos comerciales parecen ser bajos porque en su mayor parte son cambios evolutivos y no revolucionarios de la tecnología básica de transporte.
- Ambientales—1: Aunque las tecnologías analizadas son diseñadas para reducir las emisiones, siempre existe la posibilidad de efectos adversos imprevistos.
- Regulatorios—5: Los estándares ambientales siempre crecientes (NO_x, partículas, CO₂) podrían retardar la introducción de una tecnología dada. Estos estándares pueden ser un objetivo en movimiento con regulaciones cada vez más estrictas.

2. Sistemas alternativos de motores de combustible

Conceptos del sistema

Los combustibles alternativos son el gas natural comprimido y licuado (GNC y GNL), el etanol (ETOH, generalmente proveniente de biomasa tal como maíz o caña de azúcar), gas licuado de petróleo, combustible diesel proveniente de biomasa, metanol, metil éster de ácido graso (FAME), y éter dimetilo (DME) (ver Parte III.D.5 para más información acerca del rol de los biocombustibles). El hidrógeno también es un combustible alternativo que puede utilizarse en los ICE, pero es el principal combustible para los vehículos a celda de combustible donde puede alcanzar más fácilmente su máximo potencial (ver Parte III.C.1). Las industrias automotriz y de combustibles están desarrollando activamente el uso de mezclas de combustibles alternativos.

Descripción de la tecnología

Los vehículos que utilizan combustibles alternativos son similares a los vehículos actuales porque utilizan un ICE. Algunos requieren tubos de alimentación y tanques de combustibles modernizados, inyectores modificados, y lubricantes. Los combustibles gaseosos requieren reguladores de flujo. Entre los conceptos se encuentran los vehículos con flexibilidad de combustible que pueden pasar de un combustible a otro cuando se lo dispone.

Estado de la tecnología

Actualmente existe la tecnología para utilizar estos combustibles. Los precios generalmente están en el mismo rango del de los vehículos convencionales impulsados a gasolina, con la excepción de los vehículos alimentados a gas donde el equipo agregado suma hasta US\$5.000 al costo del vehículo. Algunos fabricantes de

automóviles han certificado un vehículo con combustible alternativo, de emisiones ultra bajas, para ser vendido en varios países.

El carburante GLP es el combustible alternativo utilizado más comúnmente (5,5 millones de vehículos en 1999 que utilizaban 6% del consumo mundial de GLP). El etanol se utiliza principalmente en Brasil y los EE.UU. y el GNC en Argentina e Italia. Los FAME son aceites producidos a partir de materia vegetal y son utilizados como aditivo para el combustible diesel. Si el ETOH proveniente de la biomasa se utiliza en concentraciones de hasta 10%, se requieren solo pequeños cambios a la tecnología actual.

ID+D: Objetivos y desafíos

El objetivo es desarrollar vehículos de poca y gran potencia para cumplir con los estándares de emisiones cada vez más estrictos. Los desafíos son alcanzar los objetivos ambientales, de costo y de rendimiento. Las áreas de preocupación son costo, alcance, y conveniencia de recarga de combustible, y rendimiento del arranque en frío y eficiencia del motor (especialmente alcoholes combustibles). La mayoría de los vehículos que funcionan con GLP tienen sistemas de doble combustible para compensar la falta de estaciones de servicio de GLP, y a su vez esto obstaculiza la capacidad de maximizar la eficiencia y reducir al mínimo las emisiones. El etanol da como resultado mejoras en las emisiones de CO y HC—emisiones de monóxido de carbono y (en este caso) hidrocarburo “no quemado”-, pero cuando se lo mezcla con la gasolina, da como resultado mayores emisiones de evaporación y de NO_x. El costo del etanol, si bien disminuyó marcadamente desde sus primeros usos en la década de 1970, sigue superando al de la gasolina, incluso en Brasil, donde el precio de la materia prima (caña de azúcar) es favorable (ver Figura II-1). Se necesita mayor desarrollo de los vehículos a GLP para que esta tecnología cumpla con los estándares de emisión, especialmente de metano.

Comercialización y utilización

Hace algún tiempo que los fabricantes de automóviles vienen produciendo vehículos que funcionan con combustibles alternativos. Hace varios años que Brasil hace funcionar una gran parte de la flota de vehículos con etanol. Los automóviles con gasohol han estado disponibles en varios países desde fines de la década de 1970. Los ómnibus a gas natural comprimido han funcionado al menos desde esa época. Los precios de estos vehículos generalmente se encuentran en el mismo rango que sus contrapartidas convencionales. De este modo, no hay un impedimento general de fabricación al uso masivo. La utilización de estos vehículos generalmente reducirá las emisiones. Esto ha tenido un importante impacto en la calidad del aire urbano y seguirá teniéndolo:

Factores de riesgo

- Técnicos—1-3: El riesgo técnico es bajo, ya que todas las tecnologías han sido desarrolladas al menos hasta cierto punto, aunque aún hay mucho trabajo por hacer. El GLP es de fácil utilización, pero el DME y el metanol son más difíciles y se necesitan mejoras (precintos, bombas, etc.).
- Comerciales—4: El riesgo comercial no es tan bajo porque no está claro que los consumidores se pasarán a combustibles alternativos, al menos sin subsidios o mandatos del gobierno.
- Ambientales—1: Dado que estos combustibles son superiores a la gasolina y al diesel y han sido desarrollados teniendo en cuenta los factores ambientales, el riesgo para el medio ambiente es esencialmente cero. Con algunos de los combustibles,

puede haber problemas con las emisiones específicas (por ejemplo, NO_x del etanol, metano del GNC o GLP).

- Regulatorios—1-9: El riesgo regulatorio es problemático y es bajo en países donde ya se han introducido combustibles específicos, pero pueden ser elevados donde dichos pasos aún no se han dado y donde los asuntos de costos dominan las preocupaciones ambientales.

3. Sistemas energéticos eléctricos híbridos

Conceptos del sistema

Los Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV) utilizan un motor eléctrico para impulsar las ruedas, ya sea en paralelo o en serie con un pequeño ICE a bordo.

Descripción tecnológica

La energía puede ser provista por unidades pequeñas de alta eficiencia, incluyendo turbinas de gas, ICE diesel de inyección directa y de encendido por bujías, motores Stirling, y celdas de combustible (ver Parte III.C.2.)

Estado de la tecnología

Los vehículos híbridos eléctricos están comercialmente disponibles en muchos países, actualmente impulsados por motores a gasolina de encendido por bujías. Los camiones están en los tableros de diseño de muchas compañías y actualmente los ómnibus ya están en servicio. En algunos países hay disponibles motores diesel limpios, muy eficientes y están desarrollándose en forma muy activa (ver Parte III.C.2). También se están desarrollando los tipos de motores avanzados tales como el motor Stirling, el motor de pistón libre, y los motores de vapor avanzados. Las crecientes cargas de energía requeridas por los vehículos híbridos son ayudadas por un generador de arranque integrado, capaz de proveer considerable energía al sistema (hasta 10 kW de energía de generador a 42 V). Los fabricantes de automóviles están introduciendo sistemas híbridos eléctricos en camiones livianos.

El éxito de los vehículos híbridos hasta la fecha se debe al avanzado estado de la tecnología de motor eléctrico. Los motores eléctricos son eficientes, potentes, y muy controlables. Se espera que esta tecnología siga mejorando.

El almacenamiento de la energía, particularmente para híbridos, actualmente se realiza en la forma de almacenamiento eléctrico y/o mecánico. La electricidad generalmente se almacena en baterías de plomo o de níquel-hidruro. La energía específica en las baterías actuales limita el rango de los vehículos completamente eléctricos (AEV) pero provee fuerza motriz más que adecuada en los híbridos. Se cree que los vehículos híbridos eléctricos van a ser muy importantes en los próximos 10–15 años.

ID+D: Objetivos y desafíos

- HEV con 2–3 veces el ~25% promedio de eficiencia de los actuales vehículos (~25%).
- Baterías avanzadas y aparatos de almacenamiento de electricidad con mayor alcance y ciclos de vida.

Comercialización y utilización

Los sistemas de propulsión de HEV actualmente están en producción por parte de algunos fabricantes, funcionando con motores de gasolina en modo paralelo. En general ha habido una buena aceptación de estos vehículos por parte del público. El mayor competidor es el vehículo avanzado accionado con ICE. La clave es si los consumidores pagarán más por un vehículo eficiente desde el punto de vista del combustible. Probablemente requieran mayor comodidad para compensar cualquier aumento en el costo. Para los sistemas con gasolina como combustible, no será necesario ningún cambio en la infraestructura más allá de lo que está disponible para los ICE.

Costos y beneficios

Los beneficios de estas tecnologías son una mayor eficiencia (quizás del doble o más) y menores emisiones, incluyendo emisiones de gases de efecto invernadero. Dependiendo de la tecnología en particular, podría haber más o menos beneficios.

Factores de riesgo

- Técnicos—6: Existe una serie de barreras técnicas (vida útil de las baterías, transmisión) que hay que superar para que estas tecnologías sean competitivas.
- Comerciales—7: Es necesario desarrollar los mercados para todas estas tecnologías. Las mejoras continuadas en los ICE y la transmisión de la fuerza motriz convencional puede impedir la introducción de los híbridos en el mercado.
- Ambientales—3: En general, estas tecnologías serán más respetuosas del medio ambiente al conservar combustible.
- Regulatorios—4: El exceso de regulación (seguridad, economía) podría impedir los avances.

4. Sistemas energéticos con celdas de combustible

Concepto del sistema

Las celdas de combustible utilizan hidrógeno combinado con oxígeno para hacer que la electricidad haga funcionar los motores. También se puede utilizar hidrógeno, aunque con menor eficiencia, en los ICE convencionales.

Descripción tecnológica

Las celdas de combustible convierten el hidrógeno directamente a electricidad en una reacción electroquímica. Su ventaja principal recae en la alta eficiencia de este proceso de conversión (teóricamente superior al 70%, pero menor en la práctica). Generalmente, los vehículos a celdas de combustible pueden ser el doble de eficientes que los actuales vehículos alimentados a gasolina y pueden no producir emisiones, aparte del agua, dependiendo del combustible de base para producir el hidrógeno. El combustible de hidrógeno puede almacenarse a bordo o puede producirse a bordo utilizando combustibles convencionales líquidos o gaseosos. Las celdas de combustible para transporte más avanzadas, la Membrana de Intercambio de Protones (PEM), actualmente están en la fase de demostración.

Estado de la tecnología

Los vehículos a celda de combustible PEM están siendo probados en una serie de mercados en Japón, los Estados Unidos y Europa, pero la mayoría de los escenarios

muestran una importante penetración de estos vehículos en el mercado después del 2020, y en muchos casos mucho después del 2020. (Los escenarios en la Parte II concuerdan con esta evaluación.) Las celdas de combustible son una opción a largo plazo para los camiones y probablemente primero se las introduzca en camiones livianos. Otra opción a largo plazo, especialmente para camiones, es la celda de combustible de óxido sólido.

Dos de los principales desafíos para los vehículos a celda de combustible son (1) transportar suficiente hidrógeno a bordo para proveer una autonomía adecuado del vehículo, y (2) proveer un sistema adecuado de recarga de hidrógeno [Ver también la Parte III.D, Referencia 1, para la descripción de un programa internacional de ID+D (IPHE) para desarrollar combustible de hidrógeno]. La producción de hidrógeno se logra mediante el reformado de gas natural (o metanol) con vapor, centralizado, o por electrólisis. El reformado es la opción económica actual. La producción distribuida es posible pero aún no está en funcionamiento y tendría la ventaja de producir hidrógeno más cerca de su punto de utilización, por ejemplo en una estación de servicio, y utilizar la estructura existente de gas natural o electricidad. La producción a bordo del vehículo con un pequeño reformador de gas natural ha sido estudiada por las compañías automotrices en los últimos años, pero recientemente se ha visto menos entusiasmo por parte de las automotrices a favor del almacenamiento a bordo del hidrógeno, ya sea como líquido o como gas comprimido (temperatura estándar o criogénico) (En la Referencia 5 se puede encontrar un análisis útil de los problemas asociados con el hidrógeno.)

ID+D: Objetivos y desafíos

- Los sistemas de apilamiento de celdas de combustible con una densidad de potencia de 20 kW por litro a fin de competir con el ICE, eficiencias de 60–70% al 25% de potencia pico, puesta en marcha rápida, y durabilidad de 5.000 horas. Los desafíos también son la integración del sistema y envasado, costo y durabilidad de los componentes e intoxicación por CO de las celdas de combustible, al igual que reducciones en peso, volumen y costo.
- Se necesitan reformadores de hidrógeno con buena relación entre costo y beneficio, del tamaño de la flota, para comenzar la transición. El mayor desafío técnico y económico es el efectivo secuestro del CO₂ producido por este método. En el largo plazo, la electrólisis a alta temperatura tiene potencial, al igual que los ciclos termoquímicos que convierten directamente los hidrocarburos a hidrógeno, si los costos pueden reducirse más probablemente mediante mejoras en la eficiencia utilizando tecnologías avanzadas.

Comercialización y utilización

Casi todos los fabricantes de automóviles están buscando el desarrollo de la celda de combustible, principalmente centrados en las celdas de combustible PEM que funcionan a temperaturas relativamente bajas. El otro tipo principal de celda de combustible adecuado para los vehículos (densidad de potencia elevada) es la celda de combustible de óxido sólido (SOFC) pero que funciona a una temperatura mucho mayor. Los asuntos más importantes son la manufacturabilidad y el costo. Aunque el tamaño y el peso están disminuyendo, siguen siendo asuntos de peso. Principalmente, los vehículos a celdas de combustible pueden combinar cero emisiones como en el AEV con el alcance de los vehículos convencionales (**Figura III-25**). Esta tecnología está rezagada con respecto tanto a los AEV como a los HEV, y por lo tanto requiere tiempos más prolongados de entrada en funcionamiento y mayores inversiones. Las celdas de combustible que no son las PEM están aún más atrasadas en el desarrollo, especialmente para los vehículos. Basándose en los precios pagados para fuerza

estacionaria y motriz, se esperaría que las celdas de combustible penetren primero en el mercado estacionario y el desarrollo tecnológico sería seguido de cerca por el sector del transporte (ver Parte III.D.1). Sin embargo, hay indicaciones de que cada sector está vigilando de cerca y esperando seguir el ejemplo del otro.

La tecnología para utilizar celdas de combustible en modo reversible, es decir fabricando electricidad al convertir el hidrógeno y el oxígeno en agua o utilizando electricidad para convertir agua en hidrógeno y oxígeno, es fascinante. La tecnología prevé vehículos que utilizan electricidad solar o de red, fabricando y almacenando combustible a bordo para accionar el vehículo cuando se lo solicita. También se prevén celdas de combustible en los vehículos para posiblemente brindar energía a un hogar cuando el ocupante no está manejando el vehículo.



Figura III-25. Ejemplos de vehículos híbridos a celda de combustible.

Uno de los asuntos claves que rodean el desarrollo y la utilización de los vehículos a celda de combustible, y hasta cierto punto los HEV, es el precio y la disponibilidad de combustible de hidrógeno. Como se ha señalado, la mayoría de los fabricantes ya han abandonado la reforma a bordo del combustible líquido en favor de hidrógeno gaseoso, comprimido y posiblemente criogénico. Los críticos del hidrógeno citan el costo, la seguridad y la falta de infraestructura como serias limitaciones a la comercialización de los vehículos alimentados a hidrógeno (ver Referencias 3 y 5).

Costos y beneficios

Los beneficios de estas tecnologías son mayor eficiencia (quizás el doble o más) y emisiones reducidas, incluyendo emisiones de gases de efecto invernadero.

Dependiendo de la tecnología en particular, los beneficios podrían ser mayores o menores. Para empezar, actualmente es muy difícil obtener incluso cálculos estimativos de los gastos en estas tecnologías. Hace algunos años, los gastos del gobierno de los EE.UU. en esta área estaban en el orden de los US\$100 millones por año. Es casi imposible obtener las inversiones de la industria en los Estados Unidos, mucho menos en todo el mundo, debido a fuerzas competitivas.

Claramente, el momento de colocar estas tecnologías en el mercado, suponiendo que el avance tecnológico continúa más o menos al mismo ritmo, depende de la tasa de inversión. Basándose en los gastos anuales del gobierno de los EE.UU. en I+D únicamente, el monto probablemente esté en los miles de millones de dólares o euros por año como mínimo, y posiblemente en los diez mil millones. El trabajo del Consejo Empresarial Mundial aboga en favor del apoyo del gobierno a la investigación básica y pre-competitiva para fomentar estas tecnologías.

Factores de riesgo

- Técnicos—6: Hay una serie de barreras técnicas (densidades de energía de las celdas de combustible, suficiente almacenamiento del hidrógeno compacto) que tienen que superarse para que estas tecnologías sean competitivas.
- Comerciales—7: Es necesario desarrollar los mercados para estas tecnologías.
- Ambientales—3: Esta tecnología debería ser más amigable con el medio ambiente.
- Regulatorios—4: El exceso de regulación (seguridad, economía) podría impedir el progreso.

5. Otros sistemas energéticos

Esta sección incluye la propulsión eléctrica y a turbina. (En la Referencia 6 se puede encontrar una referencia útil acerca del estado de las tecnologías analizadas aquí y la dirección que se espera que tomen). El transporte aéreo a alta velocidad es uno de los componentes del sector de transporte de crecimiento más rápido.⁷ En los países con alta densidad de población, el precio estable de la electricidad ha fomentado el crecimiento del ferrocarril de alta velocidad (ver Referencia 1).

Conceptos del sistema

Los AEV utilizan un sistema de almacenamiento de energía recargable (batería, rueda volante, ultracapacitador) para proveer energía a las ruedas motrices eléctricas.

Los nuevos conceptos de turbinas incluyen los aviones a reacción avanzados con mayores relaciones de derivación del turbo-ventilador, tasas de compresión de mayor ciclo, mayores presiones de entrada a la turbina, mejor aerodinámica de la turbina, menor peso sin carga, y sistemas de combustible que utilizan hidrógeno. Dado su bajo peso, los aviones avanzados son probablemente el primer uso del combustible de hidrógeno para transporte aéreo. Los transportes supersónicos (SST) son una opción a largo plazo.

El ferrocarril a alta velocidad (HSR) incluye vagones sobre rieles de acero o rieles de muy alta velocidad con uso de levitación magnética (maglev).

Descripción tecnológica

El sistema de tracción en los AEV recibe energía de dispositivos de almacenamiento de energía a bordo. Estos dispositivos de almacenamiento deben cargarse ya sea conectándose a la red de electricidad o a alguna otra fuente de electricidad (celda de

combustible, panel solar FV, generador). Los AEV utilizan una combinación de tecnologías y pueden ser utilizados con una variedad de métodos de almacenamiento de energía.

Los turbo-ventiladores con derivación ultraelevada, y las hélices transónicas con diseños de hélices contra-rotativas están disponibles para los aviones.

Los sistemas HSR existentes requieren ferrocarriles electrificados tales como el TGV francés, el japonés Nozomi, y el alemán Inter-City Express. Las velocidades alcanzadas llegan a los 320 kilómetros por hora. Los sistemas maglev existentes siguen en etapa de prueba e incluyen el japonés Linear Motor Express y el alemán Transrapid.

Estado de la tecnología

La energía específica en las baterías actuales limita la autonomía de los AEV. La industria aeronáutica (Boeing, Airbus, GE, y Pratt & Whitney) está investigando activamente todas las tecnologías aéreas de alta velocidad. Para los conceptos más avanzados, también están involucradas las agencias del gobierno (ej., NASA en los Estados Unidos).

HSR es una tecnología madura también en Italia y España. Maglev aún es una tecnología muy costosa.

ID+D: Objetivos y desafíos

- Cada reducción de porcentaje en el peso de los aviones reduce el consumo de combustible hasta un 0,5%. El objetivo es lograr una eficiencia del 40% en 20 años a partir de una combinación de mejoras en los motores y reducción de resistencia y peso. El desarrollo de tecnología de flujo laminar será muy importante para lograr este objetivo.
- Mejorar los sistemas y tecnologías maglev. Desarrollar maglev a temperatura ambiente para evitar elevados costos de enfriamiento.

Comercialización y utilización

Algunos fabricantes han alquilado AEV a individuos privados; sin embargo, los alquileres de los consumidores han sido menos que los que se esperaban. El principal problema de los AEV ha sido la autonomía de estos vehículos, y como con los HEV, hay cierta preocupación acerca de si las ventas pueden en algún momento ser lo suficientemente elevadas como para reducir los costos del consumidor hasta el nivel que no impidan las ventas. La industria sigue trabajando en ese punto. Los competidores de los AEV son el vehículo avanzado impulsado a ICE y los HEV. Con toda probabilidad los HEV tendrán emisiones más bajas.

Los aviones están siendo mejorados por la industria. Los trenes maglev existen en pequeñas rutas comerciales pero se necesitan más proyectos piloto. La tecnología maglev a temperatura ambiente existe pero requiere más desarrollo.

Costos y beneficios

Los beneficios de los AVE son las menores emisiones, aunque sigue habiendo emisiones en la fuente de energía con combustibles fósiles. Un 40% de mejora de la eficiencia en los aviones tendrá como resultado ahorros de casi 3 millones de barriles

de petróleo por día en 15 años.⁸ Un aumento del 50% en la eficiencia total del transporte por ferrocarril ahorraría aproximadamente la misma cantidad de energía.

Factores de riesgo

- Técnicos—2: Gran parte de la tecnología necesaria ha pasado la etapa de investigación básica y se encuentra en la investigación aplicada a reducir costos y mejorar la eficiencia.
- Comerciales—6: Dado que el mercado es limitado, los riesgos comerciales son superiores a los normales.
- Ambientales—4: Si bien los ferrocarriles electrificados son amigables con el medio ambiente, los efectos del transporte aéreo de alta velocidad, especialmente con combustibles fósiles, no son muy conocidos.

El combustible de hidrógeno, aunque es fundamentalmente benigno, introducirá vapor de agua adicional a la atmósfera superior, con consecuencias desconocidas.

- Regulatorios—2: Aunque se están introduciendo nuevas tecnologías, la industria trabaja en estrecha colaboración con las agencias del gobierno.

6. Resumen

Los motores de combustión interna están siendo mejorados continuamente y es posible que sean la fuerza motriz dominante en los próximos 10 a 15 años, por lo menos. Los vehículos que funcionan con combustibles alternativos ya han penetrado levemente los mercados mundiales y han tenido una mayor penetración en algunos mercados seleccionados (Brasil, ómnibus dentro de las ciudades en todo el mundo). Es probable que sigan avanzando al menos durante los próximos 50 años, impulsados por la necesidad de tener alternativas para el petróleo y ayudados por avances en los ICE. Se está empezando a incursionar en los HEV y seguirán haciéndolo, primero con híbridos paralelos leves y luego con motores eléctricos más poderosos. Esta tecnología también está impulsada por la necesidad de reemplazar las escasas reservas de petróleo (más crucial en algunos países) mediante un uso más eficiente y la elección de combustibles alternativos. Las celdas de combustible, junto con el combustible de hidrógeno, al tiempo que ingresan en los mercados en el corto plazo, tendrán dificultades para competir con motores y combustibles alternativos, a menudo en vehículos híbridos, hasta que se haya realizado suficiente investigación tecnológica para permitirles ser competitivos. El marco temporal probablemente será de 30–35 años, aunque esta mayor penetración en el mercado podría darse con anticipación si se realiza una investigación más intensiva.

Se debería realizar un estudio más detallado, analizando específicamente la utilización de nuevas tecnologías de transporte, sus marcos temporales y ubicaciones, a fin de que tanto la industria como los gobiernos puedan planificar adecuadamente para este importantísimo sector de uso final de la energía.

Referencias

1. L. Schipper, C. Marie-Lilliu, and G. Lewis-Davis, *Rapid Motorization in the Largest Countries of Asia: Implication for Oil, Carbon Dioxide and Transportation*, <http://www.iea.org/pubs/free/articles/schipper/rapmot.htm>, 2001.
2. *Mobility 2030: Meeting the Challenges to Sustainability*, World Business Council for Sustainable Development, Geneva, <http://www.wbcsd.org/plugins/DocSearch/details.asp?type=DocDet&DocId=6094>, 2004.
3. *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs*, U.S. National Academy of Sciences/National Research Council, Board on Energy and Environmental Sciences, Committee on Alternatives and Strategies for the Future

- Hydrogen Production and Use, Washington, D.C.,
<http://books.nap.edu/books/0309091632/html>, 2004. [No PDF available on line.]
4. European Automotive Research Partners Association, *Future Road Vehicle Research: R&D Technology Roadmap*, <http://www.furore-network.com/objectives.html>, 2004.
 5. A. Lovins, *Twenty Hydrogen Myths*, <http://www.rmi.org>, 2003.
 6. *Foresight Vehicle Technology Roadmap: Technology and Research Directions for Future Road Vehicles*, Institute for Manufacturing, University of Cambridge, Cambridge, U.K., <http://www.advantagem.co.uk/transport-forsight-vehicle-pdf>, 2002.
 7. World Energy Council, *Global Transportation*, September 1998.
 8. *International Energy Outlook*, Energy Information Agency, U.S. Department of Energy, <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>, 2002.

D. Tecnologías interdisciplinarias

Las tecnologías interdisciplinarias son aquellas que tienen el potencial de afectar en forma amplia y significativa el uso final de la energía, en lugar de estar concentradas en un solo sector. Pueden o no ser tecnologías energéticas en y por sí mismas. Quizás el mejor ejemplo sean las celdas de combustible, una tecnología energética que puede resultar útil tanto para aplicaciones estacionarias como móviles. Los ejemplos de tecnologías interdisciplinarias generales que tienen usos más amplios en la sociedad son la nanotecnología, la biotecnología, la informática, la automatización y la transmisión, distribución y almacenaje de formas de energía.

1. Celdas de combustible

Una central energética a celda de combustible típicamente consiste de dos o tres partes:

1. Un procesador para convertir el combustible de hidrocarburo o la electricidad en hidrógeno.
2. La celda de combustible misma en la forma de pilas de celdas individuales.
3. Un acondicionador de energía para convertir la corriente directa en corriente alterna regulada para uso estacionario.

Se puede tener acceso a una serie de documentos y sitios útiles donde obtener más información acerca de estas tecnologías y de otras tecnologías asociadas.¹ (Ver también Parte III.B, Referencias 21 y 22.)

Las celdas de combustible de membrana electrolítica de polímero (Membrana de Intercambio de Protones, o PEM), ácido fosfórico, óxido sólido, y carbonato fundido son tipos comunes de celdas de combustible que están en uso o en desarrollo. Las grandes celdas de combustible que producen hasta varios megawatts están avanzadas en la fase de demostración. Los sistemas que producen de 100 a 200 kW están siendo utilizados en transporte pesado (ómnibus) y en aplicaciones industriales y residenciales más pequeñas (ver Parte III.B.2).

Hay en uso en todo el mundo alrededor de 160 celdas de combustible de ácido fosfórico en la escala de 100–200 kW. Las celdas de combustible de carbonato fundido y de óxido sólido hasta ahora han sido probadas en varios países. Las celdas de combustible PEM son promisorias para los automóviles debido a su densidad energética específica muy elevada y funcionamiento con baja temperatura (ver Parte III.C.4). Sin embargo, se deben superar muchas barreras técnicas antes de la comercialización. Las industrias en los Estados Unidos, Europa, y Japón están invirtiendo importantes recursos en el desarrollo de productos comerciales.

Las celdas de combustible de ácido fosfórico han demostrado su rendimiento técnico en varios países (Estados Unidos, Alemania, Japón, Corea, India y Taiwán) que van desde los 50 kW a varios megawatts. Sin embargo, no se ha logrado un costo competitivo en el mercado. En los Estados Unidos, los Países Bajos, Alemania, Dinamarca, España, Italia, Corea y Japón se han introducido las celdas de combustible de carbonato fundido de segunda generación. Se caracterizan por la elevada eficiencia energética y el uso de calor residual. Las celdas de combustible de óxido sólido de tercera generación, de 100–1.000-kW han sido demostradas en los Estados Unidos, los Países Bajos, Alemania, Suiza y Japón. Asociado a su funcionamiento con alta temperatura se encuentra la cogeneración de energía a pequeña escala, de decenas de megawatts.

Los desafíos para el mayor desarrollo y comercialización de las celdas de combustible para transporte incluyen—

1. Reducción de costos mediante el desarrollo de materiales claves,
2. Desarrollo de reformadores a pequeña escala, y
3. Desarrollo de sistemas compactos de almacenamiento abordo para el hidrógeno.

El nivel objetivo es la competitividad del costo de estos tres sistemas con los sistemas convencionales basados en combustible líquido.

¿Cuándo será competitivo el costo de las celdas de combustible? El precio de las celdas de combustible debe caer de los actuales US\$10.000 por kW a alrededor de US\$3.000 por kW para alimentación estacionaria remota, US\$1.000 por kW para sistemas energéticos de red, y US\$100–300 por kW para automóviles. Los sistemas de generación de las empresas de servicios públicos ahora cuestan hasta US\$2.000–3.000 por kW. Los sistemas automovilísticos tienen que tener una centésima parte de su costo actual para competir con los motores diesel y a gasolina avanzados en configuraciones híbridas. Los sistemas automovilísticos deberían tener 50–70% de eficiencia, no tener emisiones reguladas, y un tiempo de vida de unas 5.000 horas, mientras que los sistemas estacionarios deberían tener una vida útil de 40.000 horas. Se espera que los sistemas de celda de combustible pequeños con el tiempo ingresen en los mercados de los hogares, los edificios comerciales, y los mercados industriales, y en los países en desarrollo se están utilizando unidades pequeñas para operaciones remotas de potencia estacionaria. Donde los costos de la energía pueden ser tan elevados como US\$5.000 por kW, se está desarrollando una subclase de celdas de combustible llamadas mini o micro celdas de combustible para potencia portátil. Las aplicaciones para las mini y micro celdas de combustible incluyen teléfonos móviles, computadoras portátiles, máquinas herramientas y aplicaciones médicas.

En cualquier penetración futura en el mercado, la reducción del CO₂ y de la contaminación del aire urbano son beneficios, si se pueden fabricar celdas de hidrógeno que no emitan CO₂ a la atmósfera. Las ventajas y la motivación de una economía del hidrógeno dependen esencialmente de los costos de producción del hidrógeno y de la eficiencia en la que puede utilizarse este combustible. Los incentivos del gobierno pueden ser beneficiosos para la introducción de esta tecnología. La Asociación Internacional para la Economía del Hidrógeno (IPHE) es un programa cooperativo internacional para avanzar el espectro de aplicación de la ID+D del hidrógeno y las celdas de combustible con el objetivo de hacer realidad la economía del hidrógeno.²

Hablando en términos generales, dado que la recuperación de la inversión en I+D puede tomar mucho tiempo, es decir, más de 10 años, los gobiernos tendrán que cargar con una porción significativa de los costos de I+ D hasta que la industria pueda prever una recuperación de la inversión y proceder a la fase de demostración.

2. Transmisión y distribución

Las tecnologías de transmisión y distribución (T&D) de electricidad y gas natural son los medios por los cuales los beneficios de la energía se tornan disponibles para los clientes, los usuarios finales de energía. Con los apagones de electricidad en el verano del 2003 en la costa este de los Estados Unidos y Canadá, y luego en Suecia y Dinamarca, y más tarde en Italia, las redes de transmisión de electricidad revelaron su vulnerabilidad. Las pérdidas de energía en el sistema de T&D de electricidad de los EE.UU. fueron de 7,2% en 1995, lo que representa 2,55 EJ. En Japón, las cifras fueron 5,4% en el 2002. Las pérdidas mundiales de T&D de electricidad totalizaron 1.333 TWh (14,1 EJ) en 1999, o 11,6% del consumo mundial de electricidad. Las

pérdidas en T&D representan 7,4% del consumo de electricidad en los países de la OCDE y 13,4% en los países en desarrollo.

Descripción y estado de la tecnología

Sistemas energéticos. La economía del futuro, basada en el conocimiento, requerirá un sistema de entrega de “potencia inteligente” que una la informática con la entrega de energía. El concepto de sistema de entrega de potencia inteligente incluye capacidades automatizadas para reconocer problemas, hallar soluciones, y optimizar el rendimiento del sistema de entrega de energía. Las herramientas básicas incluyen sensores avanzados, software de procesamiento de datos y reconocimiento de patrones y controladores de flujo de energía de estado sólido para reducir la congestión, reaccionar en tiempo real ante incidentes, y redirigir el flujo de energía como sea necesario. Hay tres objetivos primarios:

- **Optimizar el rendimiento total y la elasticidad del sistema.** Una serie de sensores controlarán las características eléctricas del sistema (voltaje, corriente, frecuencia, armónicos, etc.) al igual que la condición de componentes críticos, tales como los transformadores, líneas de alimentación, cortacircuitos, etc. El sistema se ajustará constantemente para lograr un estado óptimo, al tiempo que controlará constantemente los potenciales problemas que podrían afectarlo. Cuando se detecta e identifica un problema potencial, se evalúan su seriedad y las consecuencias resultantes, luego se identifican las acciones correctivas, y se evalúa la efectividad de cada acción. El operador puede entonces implementar las acciones correctivas en forma muy eficiente aprovechando el control automatizado de la red.
- **Responder instantáneamente ante incidentes para reducir al mínimo el impacto.** Cuando tiene lugar un incidente imprevisto, se lo detecta e identifica rápidamente. Por ejemplo, se puede activar instantáneamente una “isla” o programa modular inteligente para separar el sistema en partes autónomas para mantener el suministro de electricidad a los consumidores según prioridades específicas y para impedir que se propaguen los apagones.
- **Restablecer el sistema después de un incidente.** Después de la reacción del sistema ante un incidente importante, se toman medidas para que el sistema pase a un régimen estable y operativo. Para lograr esto, es necesario controlar el estado y la topología del sistema y evaluarlos en tiempo real, permitiendo que se identifiquen acciones correctivas alternativas y que se determine la efectividad de cada una de ellas mediante simulaciones anticipadas por computadora. Las acciones más efectivas se implementan entonces en forma automática. Cuando se logra un estado operativo estable, el sistema nuevamente comienza a auto-optimizarse.

Cuando sucede un incidente, el objetivo de funcionamiento pasa de reaccionar a restaurar y luego nuevamente a optimizar. Se dice entonces que el sistema de entrega de potencia inteligente es “autorreparable”. Algunas de las tecnologías claves que serán necesarias para implementar una red inteligente, auto curativa, son—

- **Controladores de flujo de energía, de estado sólido.** Actuando lo suficientemente rápido como para proveer control en tiempo real, los controladores de flujo de energía de estado sólido – tales como los dispositivos FACTS y Custom Power—pueden aumentar o disminuir el flujo de energía en líneas específicas, aliviando la congestión del sistema. Además, estos controladores aumentan la confiabilidad del sistema contrarrestando los incidentes pasajeros en forma casi instantánea, permitiendo al sistema funcionar más cerca de sus límites térmicos.

- **Previsión de fallas e interrupciones.** El EPRI y otros han trabajado mucho para determinar la causa de las fallas en componentes críticos, tales como los

transformadores, cables, relés de protección contra sobretensiones, etc., y para desarrollar sistemas de control y diagnóstico para estos componentes. El siguiente paso es desarrollar la tecnología de previsión de fallas que provea señales de alarma y que pronostique las fallas.

- **Islas de adaptación.** Después de un ataque terrorista o de una interrupción importante en la red por causas naturales, la reacción inicial se centra en crear islas autosuficientes en la red energética, adaptadas para utilizar de la mejor manera los recursos de la red que siguen disponibles. Para lograr este objetivo, se necesitan nuevos métodos de detección inteligente y extracción de patrones, que identifiquen rápidamente las consecuencias de varias reconexiones de islas. También se usa el pronóstico de carga de adaptación para despachar recursos distribuidos y otros recursos con anterioridad a la reconexión de la sección y para ayudar a estabilizar la totalidad del sistema T&D.

- **Sistema de control de área extensa, en tiempo real.** Los elementos del sistema de control de área extensa en tiempo real ya están en funcionamiento tanto en el sistema de transmisión como en el de distribución. Por ejemplo, el Sistema de Control de Área Extensa (WAMS), originalmente desarrollado por Bonneville Power Administration, es un sistema basado en control a alta velocidad de un conjunto de puntos de medición y la generación de indicadores basados en estas mediciones. El WAMS provee una fuerte base sobre la cual construir el sistema de control de área extensa, en tiempo real, requerido para la red autorreparable.

- **Sistemas de control de área extensa.** Una vez que se han hecho las predicciones acerca de la efectividad de varias acciones potenciales de control, es necesario llevar a cabo rápida y efectivamente las acciones identificadas. Lograr este objetivo requerirá automatizar muchas operaciones que harán más eficiente la intervención humana tanto en los sistemas de transmisión como de distribución. El desafío es desarrollar nuevos equipos con la inteligencia requerida al mismo tiempo que se desarrollan estrategias para reajustes de los equipos existentes.

A pesar de la promesa del futuro de las tecnologías de entrega de energía, la realidad actual es que los sistemas de entrega en el mundo desarrollado no pueden satisfacer la creciente complejidad del mercado o las crecientes necesidades digitales del siglo XXI. Para satisfacer los requisitos del futuro será necesario realizar importantes modernizaciones en tres grandes categorías:

- Continuar construyendo para el crecimiento de la carga y el reemplazo de los activos que están envejeciendo;
- Corregir las deficiencias en el sistema de entrega de energía y llevarlo a los niveles históricos de confiabilidad; se necesita más inversión para compensar los menores gastos realizados en los últimos años;
- Transformar la infraestructura existente en un sistema energético inteligente, con mayor funcionalidad para los clientes, y con la capacidad de proveer soporte confiable a la sociedad digital del futuro.

Estas tres categorías pueden utilizarse para calcular costos de la modernización de la transmisión y la distribución. Es importante recordar que el costo total de transformación de la red no es igual a la suma de los costos para crecimiento de la carga, correcciones de deficiencia, y transformación del sistema. De hecho, el costo marginal de la transformación es mucho menor que la suma de los componentes individuales. Esto se debe a que muchas de las tareas en las dos primeras categorías pueden realizarse de modo que también aborden las necesidades de transformación del sistema. Estas “sinergias” de reducción de costo tienen el potencial de reducir los costos totales de transmisión y distribución en un 30% o más.

Las importantes tecnologías incluyen la transmisión HVAC (corriente alterna en alta tensión) y HVDC (corriente continua en alta tensión), transformadores de alta eficiencia y controles de sistema en tiempo real para mejorar el despacho, máquinas rotativas superconductoras, cables HTS (superconductores de alta temperatura) y transformadores de energía, mejores materiales para el núcleo y diseños de bobinado de los transformadores, controles de tiempo real, y capacidades de medición de área extensa para analizar en tiempo real los inconvenientes en la red.

Los sistemas de transmisión HVDC tienen el potencial de funcionar en distancias muy grandes (>2.000 km). Actualmente, la transmisión HVDC más extensa se encuentra entre el norte de Québec, Canadá, y Nueva Inglaterra en los Estados Unidos (1.486 km). En el futuro la exportación e importación internacional de electricidad a grandes distancias (>2.000 km) se hará únicamente por HVDC. Las líneas HVDC de larga distancia o la transmisión submarina son una ventaja distintiva en cuanto a estabilidad del sistema debido a la elevada impedancia del cable. Aunque las ventajas de la HVDC sobre la HVAC son más pronunciadas para distancias mayores, ABB ha desarrollado una versión que parece ser económica incluso en distancias más cortas.

Hay muchas instalaciones HVDC en todo el mundo (**Figura III-26**). Una característica única de la HVDC es la conexión asincrónica de dos sistemas eléctricos HVAC que funcionan en frecuencias diferentes, por ejemplo entre sistemas de 50-Hz y 60-Hz, conectados mediante DC. Los artefactos energéticos convencionales (por ejemplo rectificadores) que utilizan HVDC es un producto de nicho comercial maduro con una instalación de 30-GW en América del Norte. El mercado potencial en China e India es muy grande, con 100 GW. Los objetivos de I+D incluyen una terminal de conversión de fuente de voltaje HVDC que cueste la mitad de los modelos actuales.

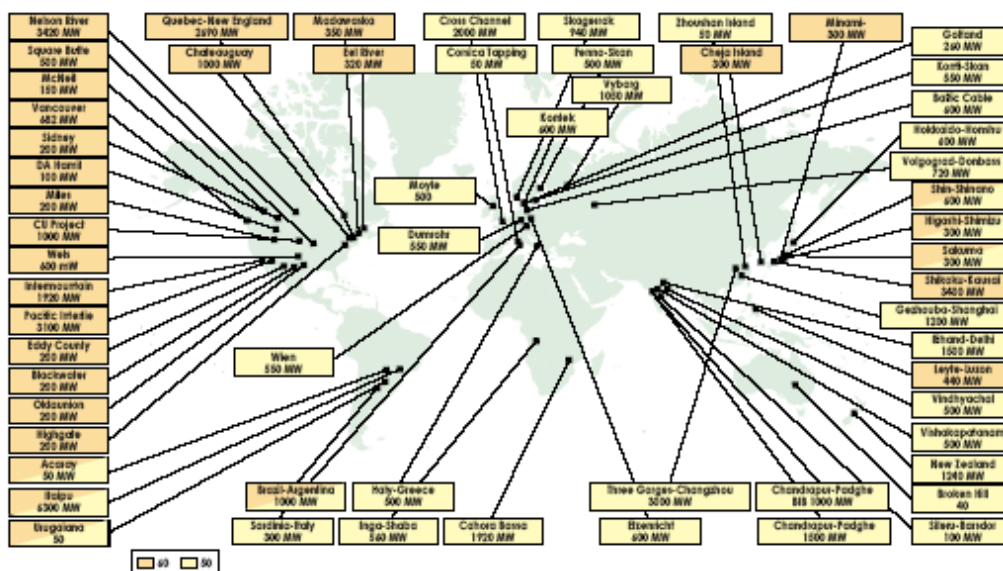


Figura III-26. Transmisión HVDC en funcionamiento en el mundo, 2001 (Fuente: <http://www.cigre.org>).

Los cables HTS modernizarán las redes urbanas de electricidad, reemplazando los cables convencionales. Las áreas muy densamente pobladas, tales como Tokio y Nueva York, con derechos de paso muy limitados para los sistemas de transmisión, requieren el reacondicionamiento de los sistemas existentes. Los cables HTS prácticamente no tienen pérdida de resistencia. Actualmente, 5–10% de la energía se pierde inevitablemente en los conductores convencionales de transmisión. Los Estados Unidos, Francia, Dinamarca y Japón han tenido proyectos de demostración

que utilizan los cables HTS. Un proyecto en Copenhague en 2001 fue la primera aplicación en red comercial del cable HTS. Un proyecto japonés tenía la línea más larga de cable a 100 m con 66 kV. Un transformador de potencia HTS japonés tiene una capacidad de 1 MW. Sin embargo, dado que los transformadores convencionales de potencia ya funcionan con un 99,80% de eficiencia, no está claro que se necesite esta tecnología específica. Sigue habiendo muchas barreras técnicas a la comercialización del cable HTS. Hace más de 15 años que los materiales de núcleo del transformador de baja pérdida vienen siendo ofrecidos en el mercado de los EE.UU. y Japón, pero las ventas han venido cayendo en los EE.UU. y los fabricantes están alejándose del mercado dado que los compradores pasan a transformadores convencionales de bajo costo y menor eficiencia.

Los objetivos de I+D son cables HTS capaces de densidades de corriente $>10^6$ amps por cm^2 en distancias en kilómetros y a un costo de menos del 10% de los materiales actuales, y costos del acero del transformador reducidos en un 50%. En los EE.UU. se realizó I+D sobre HTS al nivel de US\$19 millones en 1997. De esta cantidad, US\$12 millones pueden atribuirse aproximadamente a la T&D de HTS. Los mejores materiales para HTS y los menores costos de fabricación son áreas claves para la I+D. En general en esta área la I+D necesita la reducción de los requisitos de entrenamiento de una red neuronal artificial en un factor de 10.

Riesgo

En cuanto al riesgo, dado que la HVDC es tecnología comercial y tiene muchas aplicaciones en el mundo entero, el riesgo técnico es muy bajo. Por el contrario, el cable HTS sigue en la fase de demostración y aún no se ha demostrado ninguna transmisión a larga distancia (más de 100 m). Se necesita desarrollar el cable y las cajas de empalme y los periféricos. En este sentido, el riesgo técnico para la transmisión HTS es relativamente elevado.

La HVDC por transmisión aérea puede tener riesgos ambientales potenciales de EMF (campos electromagnéticos) de tensión continua sobre la salud humana. Este es un asunto muy polémico y no hay consenso científico o político. Por lo tanto, el riesgo ambiental es elevado. Los sistemas de cable HTS utilizan medios criogénicos y dado que la instalación de larga distancia de dichos cables y los sistemas de enfriamiento asociados no han sido evaluados, el riesgo ambiental es elevado. Las tecnologías HVDC están demostradas y utilizadas en todo el mundo con permisos y autorizaciones regulatorios, y por lo tanto el riesgo regulatorio parece ser muy bajo. En consideración con el estado de la tecnología del cable HTS, el riesgo regulatorio es moderado o alto.

La tecnología HVDC la mantienen un número limitado de proveedores tales como Siemens, ABB, GE, Alstom, Hitachi, Toshiba, y Mitsubishi y probablemente esta industria desarrolle los sistemas de la siguiente generación. El cable HTS ha sido desarrollado en parte por las industrias mundiales de cables, pero aún faltan muchos años para lograr su mayor impacto. Sin embargo, el alto potencial para la siguiente generación de sistemas de distribución urbana garantiza un apoyo continuado del gobierno a la I+D, si es que la tecnología va a ser utilizada tan pronto como sea posible.

Gas natural

Los sistemas de distribución de gas natural no han tenido grandes cortes de suministro sino interrupciones bastante limitadas debido a fallas provenientes de rupturas inesperadas. Las potenciales explosiones son una gran preocupación y los estudios de las vulnerabilidades del sistema se encuentran entre las áreas principales que

requieren I+ D, seguidas por estudios fundamentales de la química y el manejo de los gases. El sitio Web del Instituto de Tecnología del Gas provee más información sobre las actividades de I+D en T&D de gas natural.³ Las tecnologías específicas que están siendo estudiadas incluyen medidores avanzados de flujo de gas, métodos para evaluar la corrosión de los gasoductos, detección de corrosión por tensión en el gasoducto en funcionamiento, y detección a distancia de fugas de gas.

Los asuntos principales asociados con el mayor uso del gas natural para generación de electricidad son el uso, transporte y regasificación del gas natural licuado (GNL). Las terminales de GNL parecen ser necesarias si es que se debe aprovechar un recurso energético global que puede estar muy alejado de los usos finales.

3. Almacenamiento de energía

Los sistemas avanzados de almacenamiento de energía incluyen almacenamiento mecánico (ruedas volantes, neumático), electroquímico (baterías avanzadas, celdas de combustible reversibles, hidrógeno), puramente eléctrico o magnético (ultracapacitores, almacenamiento magnético superconductor), almacenamiento de agua bombeada (hidro), almacenamiento de gas comprimido (aire). Los varios requerimientos para el almacenamiento de la electricidad que aparecen en la **Figura III-27** ilustran la complejidad de los requisitos de almacenamiento energético para diferentes propósitos.

Agregar cualquiera de estos sistemas de almacenamiento necesariamente disminuye la eficiencia energética de la totalidad del sistema debido a las eficiencias de conversión tanto en los insumos como en la producción. Estas eficiencias son típicamente elevadas, y sin embargo multiplicativas. La principal ventaja del almacenamiento energético es equilibrar las cargas y permitir y mejorar el uso de las fuentes energéticas que generan electricidad durante momentos de poca demanda, tales como las centrales energéticas nucleares de carga base, e igualar las fluctuaciones en otras fuentes, tales como los sistemas eólicos y solares fotovoltaicos (**Figura III-28**). En los vehículos, esto permite que gran parte de la energía cinética sea recuperada y facilita las transmisiones eléctricas. El año 2003 marcó otro reconocimiento de la importancia del almacenamiento de electricidad con los apagones vividos a ambos lados del Atlántico.

El almacenamiento mecánico de la energía en ruedas volantes es muy antiguo. El factor más importante es cómo reducir la pérdida de energía en los cojinetes mecánicos que sostienen la rueda volante. Los vehículos requieren un almacenamiento de energía de 10–20 Wh por kg de peso de la rueda volante y densidades de potencia de 2 kW por kg y tienen un ciclo de vida alto (10^5 ciclos). Los requisitos para las empresas de servicios públicos o los hogares son diferentes, pero necesitan estar en los diez a mil megawatt-horas.

El almacenamiento de energía electroquímica utiliza reacciones químicas para almacenar electrones en una batería. Las baterías incluyen el clásico acumulador de plomo, la batería de cinc-bromuro, la batería de cloruro de cinc, la batería de flujo redox, y la batería de sodio-azufre. Las celdas de combustible reversibles son un tipo de batería electroquímica que, al encenderse, puede funcionar para producir electricidad a partir del hidrógeno y el oxígeno o producir hidrógeno (y oxígeno) a partir de la electricidad (un electrolizador).

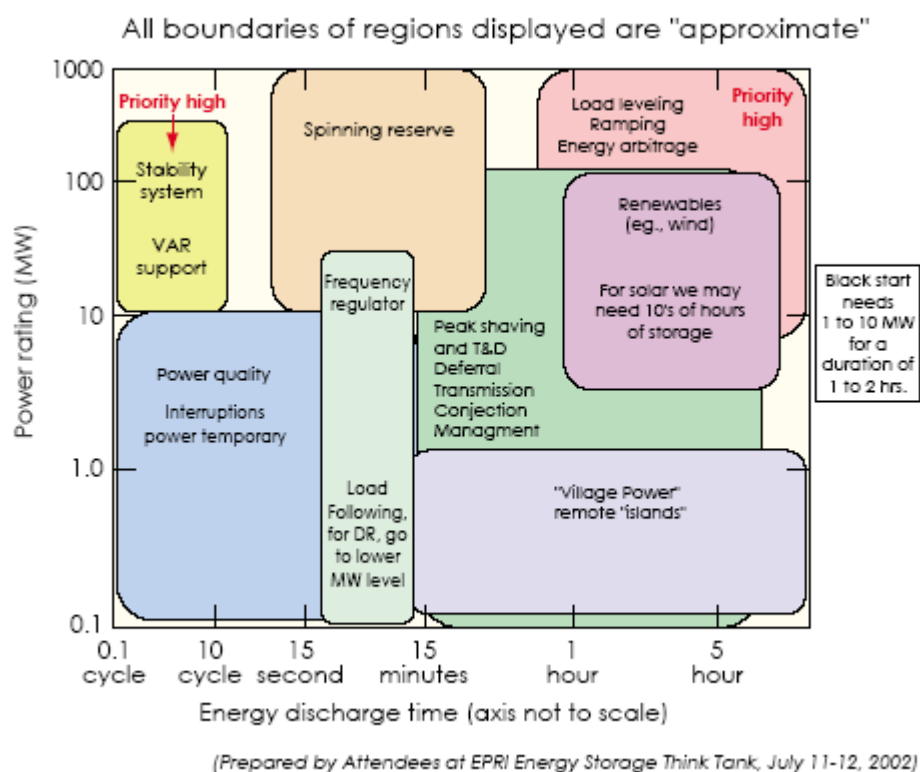


Figura III-27. Requisitos de energía y tiempo de descarga para los sistemas de almacenamiento de energía. Se señalan los asuntos de mayor prioridad, como lo es la puesta en marcha a partir de un apagón completo del sistema. Todos los límites de las regiones presentadas son aproximados (Fuente: Electric Power Research Institute, 2002).

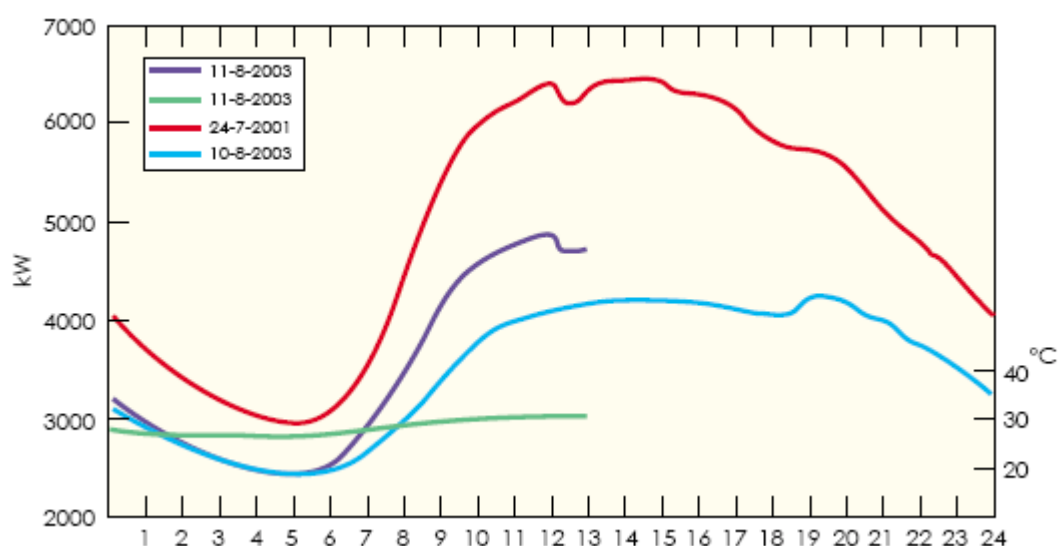


Figura III-28. Curva de carga diaria de Tokyo Electric Power. Rojo: demanda más elevada del pasado (azul: 1er día, celeste: 2do día, verde: temperatura del 1er días).

Los ultracapacitores tienen capacidad para una densidad de muy alta de energía en cuanto a masa y peso y utilizan materiales dieléctricos muy fuertes. Los dispositivos superconductores magnéticos de almacenamiento de energía (SMES) utilizan corriente persistente que corre por imanes superconductores. La entrada y salida de energía se logra mediante convertidores AC a DC con rápida respuesta (milisegundos). La **Tabla III-8** ilustra el estado general de estas tecnologías.

Los objetivos generales para cada tipo de almacenamiento de energía son la alta confiabilidad, más de 85% de eficiencia, y costos por kilowatt menores o iguales a los de la nueva generación de energía (US\$400–600 por kW). El principal obstáculo para todas las tecnologías de almacenamiento es la reducción de costos. El diseño de cables superconductores para estabilidad y bajas pérdidas es una importante área de investigación para los superconductores existentes. Los cables HTS que transportan altas corrientes podrían reducir los costos de capital y los costos operativos de los SMES. Para los dispositivos de almacenamiento de electricidad ligados a las redes de distribución o transmisión, las interfaces electrónicas de la energía representan una gran parte del costo total del almacenamiento de energía.

Las ruedas volantes requieren un mayor desarrollo de diseños de seguridad y contención liviana al igual que un incremento del tamaño y mejores cojinetes magnéticos superconductores. Los cojinetes magnéticos podrían reducir las cargas parásitas y hacer que las ruedas volantes sean atractivas para suministro de energía pequeño e ininterrumpible y como un actor en los sistemas de cogeneración de los hogares. El desarrollo de los ultracapacitores requiere mejor densidad energética que los actuales 2 Wh por kg para los vehículos híbridos de poca potencia. Antes de tener una importante penetración en el mercado se necesitan mejores baterías de mayor potencia para vehículos con capacidad de almacenamiento de energía de mayor tamaño y ciclos de vida más prolongados. En cuanto a la aplicación en las empresas de servicios públicos, es esencial reducir los costos, aunque algunas baterías avanzadas como las de sodio-azufre ya han penetrado en el mercado en Japón, logrando una duración de vida útil por ciclo de 1.500.

En general, para las aplicaciones de almacenamiento de energía de las empresas de servicios públicos, solo la acumulación de agua por bombeo ha tenido una importante penetración en el mercado mundial. La central más grande es de 2.100 MW. En todo el mundo hay 30 centrales hidroeléctricas de bombeo de más de 1.000 MW. Hay gran cantidad de trabajo de desarrollo de prototipo de SMES a pequeña escala en los EE.UU., Alemania, Rusia, y Japón. Por otro lado, los micro-SMES desarrollados por ASC (American Superconductivity Co.) han sido conectados a la red en Sudáfrica (ESKOM), y en Carolina Power and Light y Wisconsin Public Service en los Estados Unidos. Las baterías de potencia avanzada siguen en la etapa de demostración, con la excepción de las baterías de sodio-azufre en Japón. Se han instalado decenas de unidades de baterías de sodio-azufre de escala megawatt en Japón, y un banco de pruebas en el Centro de Investigaciones de American Electric Power en Columbus en los EE.UU. Si el costo de los equipos y dispositivos de almacenamiento de energía en dólares por kilowatt puede hacerse competitivo en relación a las actuales instalaciones de generación de energía, entonces habrá un enorme potencial de mercado.

Tabla III-8. Estado de la tecnología de varias opciones de almacenamiento de energía (Fuente: modificado de Technology Opportunities To Reduce U.S. Greenhouse Gas Emissions, http://www.ornl.gov/climate_change, 1997).

Tecnología	Eficiencia (%)	Densidad energética (Wh/kg)	Densidad de potencia (kW/kg)	Tamaño (MWh)
Estacionaria				
Acumulación de agua por bombeo	75	0,27	Baja	5-20 • 10 ³
Gas comprimido	75	No disponible	Baja	0,2 • 10 ³
SMES	>90	No disponible	Alta	10 ³
Móvil				
Baterías	70-84	30-50	0,2-0,4	17-40
Ruedas volantes	90+	15-30	1-3	0,1-2,0
Ultracapacitores	90+	2-10	0,5-2	0,1-0,5

Hay sistemas de ruedas volantes de acero comercialmente disponibles que funcionan a velocidades comparativamente bajas y energía eléctrica de red de soporte durante apagones planificados o interrupciones no planificadas donde la calidad de la energía es fundamental. Las aplicaciones incluyen centros de datos de Internet, plantas de fabricación de semiconductores, y procesamiento de datos (por ejemplo, sistema bancario). Las ruedas volantes que utilizan materiales avanzados tales como los compuestos tienen muchas barreras técnicas importantes que superar tales como la deformación de los materiales, el desarrollo de material superconductor, metodología de control estable, desarrollo del eje de rotación, una parada de emergencia confiable, y seguridad. Por lo tanto, el riesgo técnico es muy elevado. Algunas de las baterías avanzadas han sido puestas en servicio real, especialmente en Japón. El riesgo técnico para la batería de sodio-azufre es bajo. Los riesgos totales de esta tecnología que incluyen otros tipos de baterías avanzadas son moderados. Algunos proyectos de demostración a escala de banco han demostrado un buen rendimiento de las SMES. Sin embargo, es necesario confirmar el mismo rendimiento con máquinas a escala comercial y por lo tanto el riesgo técnico es bastante elevado.

Todos los tipos de tecnología de almacenamiento tendrán un enorme potencial de mercado una vez que se hayan superado los riesgos técnicos y que se hayan reducido los costos. Por lo tanto, el riesgo comercial es relativamente bajo. Es demasiado pronto para decir cuáles son los riesgos ambientales aunque deberían ser bajos. Solo las baterías presentan un riesgo potencial de la producción de sustancias químicas y de desechos. También es demasiado pronto para especular sobre los riesgos regulatorios, aunque con cualquier tecnología nueva, los obstáculos regulatorios pueden ser elevados.

En cuanto a la participación del gobierno en comparación con la industria en la I+D, a excepción de algunas baterías avanzadas como las de sodio-azufre, otros sistemas de almacenamiento de energía, especialmente para aplicaciones a escala de empresas de servicios públicos, necesitan una gran I+D para dejar que el mercado elija. Basándose en actividades de investigación por parte del sector privado, parcialmente financiadas por los gobiernos en los Estados Unidos, Japón y Alemania, sigue siendo necesario apoyar el desarrollo a largo plazo con fondos del gobierno, y promover la cooperación internacional de las actividades de investigación.

4. Nanotecnología y materiales avanzados

La destacada expansión en la capacidad de las computadoras y otros artefactos electrónicos en las últimas décadas ha sido posible gracias a la microminiaturización más que por cualquier otro factor independiente. Los fabricantes de circuitos integrados están en feroz competencia para poner más y más transistores en tajadas de silicio cada vez más pequeñas, poniendo a disponibilidad productos electrónicos con mayor potencia, velocidad, conectividad, y portabilidad para un público que espera continua innovación electrónica. Estas estructuras de microchips, miles de las cuales podrían alinearse una al lado de la otra en la cabeza de un alfiler, son sin embargo enormes bestias comparadas con los nano-dispositivos miles de veces más pequeños que se están creando en el siguiente esfuerzo de miniaturización. Todas estas aplicaciones dependerán de una potencia de alta calidad, y del sistema de potencia inteligente descrito anteriormente para que la provea.

La nanotecnología funciona en la escala de moléculas y átomos individuales – los bloques componentes básicos de la materia—y se relaciona con la creación de materiales y sistemas que tienen propiedades eléctricas, químicas, mecánicas, u ópticas superiores a sus homólogos más grandes. Al aprender cómo manejar y unir los bloques componentes atómicos y moleculares, los nanotécnicos esperan desarrollar materiales y artefactos funcionales diferentes de cualquiera de los que existen actualmente. Las posibilidades van desde catalizadores con áreas de superficie enormemente aumentadas hasta máquinas minúsculas que tienen verdaderas palancas, engranajes y motores. Las nuevas capacidades que se esperan de trabajar a nanoescala no son solo el resultado de reducción de tamaño en orden de magnitud sino de la posibilidad de descubrir y utilizar genuinamente nuevos fenómenos que aparecen solo al nivel atómico.

Oportunidades emocionantes

Una estructura macroscópica típica contiene grupos de muchos billones de moléculas. Por el contrario, la nanotecnología incluye grupos de unas pocas moléculas o incluso de una sola molécula. Esta diferencia es fundamental en relación al modo en que los materiales en cada régimen de tamaño responden a sus entornos. Las principales diferencias entre los comportamientos de las nanoestructuras y los materiales convencionales son el resultado de un área de superficie mucho mayor por unidad de volumen y efectos de reclusión dentro de los materiales nanoestructurados. Dado que muchas interacciones químicas y físicas importantes son regidas por las superficies, un material nanoestructurado puede tener propiedades completamente diferentes de aquellas de un material macroscópico con la misma composición. En comparación con los materiales convencionales, las sustancias nanoestructuradas pueden mostrar extraordinarias diferencias en tasas y control de reacciones químicas, conductividad eléctrica, propiedades magnéticas, conductividad térmica, potencia, ductilidad, y resistencia a la rotura. Los amplios esbozos de estas diferencias se conocen o se prevén,⁴ y sugieren una gran cantidad de aplicaciones posibles en una gran variedad de disciplinas.⁵ Los ejemplos seleccionados de avances en la nanotecnología siguen con énfasis en las aplicaciones pertinentes a las necesidades del sistema energético.

Aplicaciones del sistema energético

Se espera que los avances en los nanomateriales sean especialmente valiosos en aplicaciones del sistema energético, desde aleaciones de metal superfuertes para maquinaria de rotación hasta compuestos fuertes que resisten el ataque de la corrosión, cerámica menos quebradiza para aisladores de líneas de conducción eléctrica, y recubrimientos pulidos que reducirán la incrustación biológica en la entrada

de agua de refrigeración. Se espera que la investigación a nanoescala sobre estructuras reticulares y pareja de electrones mejore nuestra comprensión de la superconductividad, llevando a formulaciones de nuevas aleaciones, técnicas de fabricación novedosas, y si todo sale bien a un material que sea superconductor a temperatura ambiente. Otras investigaciones analizan el uso de la nanotecnología en la solución de problemas ambientales, en el desarrollo de tecnologías de procesamiento “verde”, y para sistemas de gestión de residuos nucleares (ver Referencia 5).

El hidrógeno es la materia prima ideal para las celdas de combustible (ver Parte III.D.1). Si bien los avances en el desarrollo de catalizadores para convertir internamente el metano en hidrógeno han reducido las temperaturas operativas de algunas celdas de combustible al rango de 300–400°C,⁶ los catalizadores nanoestructurales avanzados pueden permitir la reforma de los hidrocarburos a temperaturas muy bajas (por debajo de los 100°C). El desarrollo exitoso de dichos catalizadores ayudará en gran medida a construir celdas de combustible que funcionen a temperatura ambiente.

También se prevén aplicaciones en tecnologías avanzadas de generación de energía. Los catalizadores arriba mencionados deberían tener un uso directo en la mejora del rendimiento de las celdas de combustible, que ahora recién se están tornando comercialmente viables. Las celdas solares fotovoltaicas híbridas basadas en polímeros conductores y nanovarillas semiconductoras también son promisorias; al combinar las excelentes propiedades electrónicas de los semiconductores inorgánicos con la flexibilidad del proceso de los polímeros orgánicos, los investigadores están apuntando a dispositivos FV con buenas eficiencias que son más fáciles y más baratos de fabricar que las celdas solares convencionales. Los primeros prototipos han demostrado eficiencias de conversión de energía cercanas al 8% en el laboratorio, nivel que se espera mejore significativamente mediante el refinamiento de la ingeniería y las nuevas formulaciones de materiales.

Las opciones de generación completamente nuevas también pueden tornarse factibles con la llegada de los nuevos nanomateriales. Los generadores magneto-hidrodinámicos (MHD), que producen electricidad pasando un gas ionizado muy caliente por un campo magnético, han enfrentado obstáculos infranqueables en la etapa de desarrollo a causa de la insuficiente durabilidad de los componentes del sistema –especialmente los electrodos, que tienen a corroerse mucho bajo las altas temperaturas involucradas. Materiales más resistentes construidos especialmente para esta aplicación pueden reabrir la investigación de los MHD, que podrían utilizarse en una configuración de ciclo combinado con una turbina de vapor convencional.

Aplicaciones en electrónica

La aplicación de la nanotecnología en la electrónica no es tanto un asunto de abrir nuevas capacidades prácticas sino de encontrar modos de hacer lo que estamos haciendo ahora de modo más rápido, más económico y dejando menos huellas. La nanotecnología alcanzó un grado importante a fines de la década de 1990 cuando IBM comercializó el cabezal magnetorresistivo gigante – una tecnología de sensor generador que dio un enorme estímulo de eficiencia a la industria de almacenamiento de datos de alta densidad.⁷ La memoria y el almacenamiento seguirán siendo el centro principal de las aplicaciones de nanotecnología, y la investigación seguirá con enfoques centrados en tunelización de electrón único, diodos túnel resonante, y efectos de espín electrónico. En otras investigaciones, los generadores bi y tridimensionales de nanopartículas magnéticas cristalizadas fuera de una suspensión

coloidal parecen ofrecer una capacidad de almacenamiento 10 a 100 veces mayor que las de los actuales dispositivos de memorias.⁸

Comprimir más y más memoria en un espacio muy pequeño es una clave para reducir el tamaño de los componentes electrónicos y hacerlos más versátiles y menos costosos – características que siguen impulsando la proliferación de la electrónica de consumo. El tamaño y el costo decreciente de los componentes electrónicos ahora no solo están incrementando el uso “inadvertido” de los microprocesadores integrados en todo tipo de productos – un automóvil nuevo puede tener hasta 70—sino que también están posibilitando la convergencia de muchos artilugios diferentes en artefactos multifuncionales pequeños que combinan las capacidades de teléfonos, localizadores, auxiliares personales digitales (PDA), cámaras, sistemas globales de navegación (GPS), y navegadores de Internet.

Esencialmente, el desafío para las aplicaciones electrónicas se reduce a encontrar formas de ampliar la Ley de Moore, que dice que la cantidad de transistores que se pueden hacer caber en un circuito integrado se duplica aproximadamente cada 18 meses. Algunos expertos creen que la Ley de Moore no se cumplirá dentro de los próximos 15 años, dado que los chips de las computadoras se acercan a límites fundamentales de los métodos actuales de fabricación. El tamaño de los componentes microelectrónicas ya ha disminuido por debajo del nivel de micrones y actualmente se sitúa cercano a los 100 nm. Seguir más allá de este umbral parece ser mucho más complicado y sumamente más caro que en el pasado. Si bien la nanotecnología parecería ser lo que se necesita para solucionar este problema, el éxito está lejos de estar asegurado por las razones explicadas a continuación.

Brechas en la capacidad crítica

Problemas de fabricación. Se pueden hacer circuitos reales en microescala – varios tipos de transistores, los bloques componentes de la mayoría de los circuitos integrados, ya han sido construidos a partir de moléculas orgánicas y de carbono.⁹ El problema verdadero es hallar modos de producirlos en masa a bajo costo, como sucede actualmente con los circuitos a microescala. La microelectrónica en los equipos actuales se fabrica por fotolitografía, básicamente la misma técnica utilizada para hacer las placas de circuitos en las radios portátiles de la década de 1950. En la fotolitografía, se crea una máscara que traza el modelo del circuito y su tamaño se lo reduce fotográficamente; un rayo de luz brilla a través de la máscara y se centra en una oblea de silicio cubierta con una capa fotoresistente. Las áreas iluminadas (las áreas no ocultas) pueden eliminarse en forma selectiva en un proceso de atacado químico, y lo que queda es una réplica diminuta, en silicio, del modelo de circuito original (ver Referencia 8). Dicho proceso es perfecto para la producción en masa.

Lamentablemente, en la nanoescala, la longitud de onda de la luz utilizada en el proceso – incluso las longitudes de onda más cortas de ultravioleta—es más larga que los detalles deseados para el circuito mismo, causando efectos extremos de difracción y un resultado borroso. Si bien se ha investigado el uso de rayos X y de electrones en lugar de luz, estas substituciones acarrear sus propias dificultades técnicas. Se están ensayando las llamadas tecnologías litográficas “leves” basadas en estampado elástico, tirada por contacto, y moldeado con polímero para crear modelos de nanotamaño en substratos, pero ninguno de estos métodos de fabricación descendente es tan rápido, económico y flexible como la fotolitografía (ver Referencia 8). Como resultado, muchos investigadores se están centrando en la creación ascendente de nanoestructuras.

Necesidad de autoensamblaje. Se espera que el éxito de las técnicas de fabricación ascendente dependa en gran medida de la explotación del fenómeno de autoensamblaje—la tendencia de los átomos y moléculas de preferir naturalmente ciertas estructuras o modelos.¹⁰ El autoensamblaje es la base de toda síntesis y procesamiento biológico, desde la formación de membranas de células hasta la organización de componentes orgánicos e inorgánicos en compuestos estructurales tales como caparazones o huesos. Estos modelos de formación autónoma son específicos de los materiales mismos pero pueden ser cambiados por influencias externas tales como la temperatura, presión y reacción química. De este modo, el carbono puede encontrarse en forma amorfa (como en el carbón), como los cristales hexagonales del grafito (un mineral gris mate, relativamente blando), y los cristales octaédricos, dodecaédricos y cúbicos del diamante - transparente, brillante, y la sustancia más dura conocida en la naturaleza.

Hace menos de 20 años atrás, los científicos hallaron por casualidad una cuarta forma de carbono—el *fulereno*, una estructura molecular esférica producida sintéticamente, con autoensamblaje formada por hexágonos y pentágonos de átomos de carbono unidos. La capacidad de fabricar fullereno y nanotubos de carbono (sus retoños cilíndricos) ha provisto bloques componentes asombrosamente útiles y ha alentado a los investigadores a analizar el futuro del autoensamblaje controlado artificialmente. Hasta ahora, la mayoría de los experimentos de autoensamblaje basados en manipulación química y física cuidadosa no han producido más que capas complicadas de películas moleculares o cristales de tamaño específico como el punto cuántico. Aún no está claro cómo o si se pueden producir de este modo modelos diseñados, complicados.¹¹ Aún está lejos la llegada del autoensamblaje pre-programado de sistemas a nanoescala complicados, interconectados.

Efectos cuánticos. Otra dificultad surge del inusual ámbito de escala física de la nanociencia—exactamente donde se cruza el macromundo de la física newtoniana y el extraño mundo atómico regido por la mecánica cuántica. Los investigadores se refieren a este ámbito del tamaño como a la *mesoescala*. Si bien la mayoría de las nanoestructuras posiblemente sean construidas con cientos de átomos o moléculas, donde las leyes newtonianas son dominantes, no hay muchas posibilidades de que estén completamente libres de los efectos cuánticos.¹² Algunos de estos efectos pueden resultar ser bastante útiles al abrir oportunidades en la mesoescala y a menor escala. La posibilidad de computadoras cuánticas está siendo investigada, por ejemplo – no como una pequeña caja de estructuras de circuito de nanoingeniería interconectado, sino como un vaso de líquido cuyas partículas atómicas son manipuladas por resonancia magnética nuclear para controlar los “unos” y los “ceros” de su espín nuclear.

El estudio de tunelización, acoplamiento de canje y otros fenómenos cuánticos bien pueden abrir nuevas posibilidades y sugerir soluciones innovadoras a problemas difíciles. Por ejemplo, la confluencia de ingeniería de intervalo prohibido, epitaxia de haces moleculares, y capacidad de nanofabricación recientemente posibilitaron una nueva clase de aparatos electrónicos basados en los efectos cuánticos.^{13,14} Sin embargo, estar en el campo cuántico – donde la posición real de una partícula no es más específica que una distribución de probabilidad – es desconcertante, y los experimentos han demostrado que la mecánica cuántica puede regir completamente el comportamiento de pequeños aparatos eléctricos (ver Referencia 12). Es poco probable que los ingenieros puedan hacer nano-artefactos confiables hasta que se comprendan mejor los principios físicos que gobiernan en la mesoescala.

5. Biotecnología

Desde que Watson y Crick detallaron por primera vez la estructura del ADN en 1952, los científicos han llegado a comprender cómo el modelo simple y alterno de las sustancias químicas en el ADN codifica la gran diversidad biológica que se encuentra en el mundo natural. El avance de los biólogos, particularmente en la última década, ha permitido a muchos científicos utilizar esta información para aplicar organismos, sistemas y procesos biológicos a asuntos industriales, formando una nueva plataforma tecnológica transversal conocida como *biotecnología*.

La biotecnología abarca una miríada de procesos y aplicaciones, desde la fermentación de la cerveza y el vino hasta el uso de técnicas de ADN recombinante para producir nuevas drogas o variedades especializadas de cultivos comerciales. Además de la aplicación y manipulación directa de elementos biológicos para resolver problemas, la biotecnología también incluye una subdisciplina particularmente rica conocida como *biomimesis*—la imitación de los materiales naturales y diseños de procesos naturales en la ingeniería de estructuras y procesos fabricados por el hombre. Los materiales biomiméticos, que ofrecen típicamente propiedades y funcionalidad superior, tienen un tremendo potencial para mejorar las capacidades de una amplia gama de componentes y sistemas industriales.

Capacidades amplias

Las aplicaciones agrícolas de la biotecnología han sido especialmente importantes, incluyendo el desarrollo de variedades de cultivos resistentes a la sequía y a las plagas y enormes aumentos en los rendimientos de los cultivos. La mayor optimización de las variedades comestibles, junto con la aplicación de otras mejores prácticas de la agricultura, tienen el potencial de cuadruplicar el rendimiento agrícola en el mundo entero, reduciendo significativamente el hambre en el mundo.

La biotecnología ambiental es una especialidad relacionada con enorme potencial, que ofrece enfoques económicos novedosos para la limpieza tóxica y el tratamiento de corrientes de desechos industriales. Las bacterias han sido utilizadas durante muchos años para separar los componentes orgánicos de las aguas residuales en sistemas de desechos municipales. Ahora se están desarrollando microorganismos contruidos genéticamente para “comer” esos componentes orgánicos peligrosos tales como los bifenilos policlorados (PCB), dejando fundamentalmente nada más peligroso que agua y CO₂. Con trabajo de cartografía genética continuada y estudios de vías catabólicas, la ingeniería genética permitirá la creación de “bichos ambientales de diseño” confeccionados para destruir sustancias tóxicas específicas in situ en depósitos de residuos o sitios de derrames dejando intactos otros componentes del ecosistema. Un trabajo similar ha producido bichos capaces de eliminar el azufre orgánico y otras impurezas molestas del carbón pulverizado; si se pueden hacer lo suficientemente económicas para la limpieza de rutina del carbón, reducirán la necesidad de limpieza posterior a la combustión de las emisiones de las centrales energéticas.

Mientras tanto, la industria está explorando las funciones naturales de limpieza realizadas por los ecosistemas de tierras pantanosas – ciénagas cuyos minerales, vegetación y bacterias pueden filtrar o transformar una serie de contaminantes que se encuentran en las corrientes de aguas de desecho. Los pantanos ya están adquiriendo popularidad como medio de tratamiento de las aguas servidas municipales, y las empresas de servicios públicos de electricidad están trabajando para manipular y optimizar las tierras pantanosas contruidas para tratar aguas lixivadas de los subproductos de la combustión del carbón, escurrimiento de pila de carbón, drenaje

ácido de mina, y otras aguas residuales de empresas de servicios públicos que acarrean metales. Para que el diseño de tierras pantanosas pase de ser un arte a ser una ciencia, se necesita más investigación sobre los mecanismos físicos, químicos y biológicos involucrados en el manejo de residuos, tales como floculación, descomposición, absorción de nutrientes, fotosíntesis y volatilización. La investigación experimental de asuntos prácticos – la mejor temperatura, volumen de agua y elección de especies vegetales – posibilitará la optimización de los procesos de limpieza y su armonización con los contaminantes a los que se apunta. Además, las técnicas de ingeniería genética pueden aplicarse a producir plantas de pantanos y especies de bacterias con capacidades superiores para absorción, detoxificación y eliminación de oligoelementos.

La bioingeniería presenta una rica promesa para mejorar también los procesos industriales y los materiales. Se calcula que la corrosión de las cañerías es responsable de la mitad de los cortes de suministro forzados en las centrales energéticas a vapor, lo que le cuesta al sector energético norteamericano US\$5.000 a US\$10.000 millones por año. Las biopelículas – baba bacterial que se forma en los interiores de las cañerías bajo ciertas condiciones de funcionamiento – son parcialmente responsables del problema, con microbios reductores del sulfato que atacan incluso algunos metales normalmente resistentes a la corrosión como el acero inoxidable y el aluminio. Las nuevas variedades de bacterias ahora están modificadas genéticamente de modo que no solo pueden matar y remplazar a los reductores de sulfato sino que también consumen oxígeno que de otra manera oxidaría y corroería las cañerías de metal. Las pruebas de laboratorio indican que dichas biopelículas protectoras podrían lograr que se disminuya 40 veces la tasa de corrosión del acero.

En cuanto a los materiales industriales, se están desarrollando los ácidos polilácticos biodegradables que podrían reemplazar a los plásticos basados en el petróleo en una gama de aplicaciones de embalaje industrial y comercial, incluyendo las botellas moldeadas a inyección, bolsas de compras, y embalajes alimentarios de espuma. La aplicación amplia de dichos substitutos biodegradables nuevos no solo reduciría el creciente problema de la eliminación de residuos en tierras de relleno sino que también aumentaría el uso de los recursos naturales y reduciría la dependencia mundial del petróleo – todos ellos importantes objetivos de sustentabilidad.

Biocombustibles

Encontrar materias primas energéticas sostenibles en reemplazo del combustible de petróleo es un objetivo clave de I+D, encabezando la lista los substitutos de la gasolina producidos biológicamente. Los análisis realizados por la EPA muestran beneficios ambientales de la utilización en los motores del etanol derivado de las plantas. Mezclar etanol con gasolina, por ejemplo, aumenta el índice de octano y el contenido de oxígeno en el combustible, lo que facilita una combustión más completa y menores emisiones de ozono y tóxicos del aire. Actualmente, el etanol producido a partir del maíz mediante un proceso de digestión ácida tiene un uso limitado como base para gasolina, y el DOE de los EEUU está comprometido en triplicar el uso de los combustibles de base biológica para el año 2010 según su programa Bioenergía 2020. Lamentablemente, la economía de producir etanol como commodity a partir de maíz a gran escala sigue siendo turbia. Una opción es pasar del maíz amarillo No. 2 al maíz dulce, que tiene un rendimiento de etanol mucho más elevado por hectárea; sin embargo, el maíz dulce es más susceptible a la podredumbre y a las plagas, y el costo de sistemas de mejor secado, almacenamiento y transporte podría igualar el aumento del rendimiento.

Las reducciones de costo más radicales pueden provenir de dos fuentes: encontrar una materia prima energética biológica más económica y desarrollar un proceso de conversión menos costoso. En contraste con un almidón o azúcar como el maíz como fuente de etanol, los residuos de celulosa son abundantes y fácilmente disponibles como residuos agrícolas o forestales y como desechos sólidos municipales. El uso de dichos desechos podría no solo reducir los costos de materias primas energéticas y de tierras agrícolas de reserva para producción de alimentos, sino que también reduciría el insulto ambiental de la incineración o de la expansión de los terrenos de relleno. La conversión de materiales celulósicos a etanol consta de dos pasos principales: hidrólisis y fermentación. La hidrólisis puede lograrse ya sea con ácidos o con enzimas celulasas. Aunque las dos rutas de proceso actualmente son casi iguales en cuanto al costo, se espera que la hidrólisis ácida—una tecnología madura— produzca solo pequeñas mejoras en el costo. El costo de las enzimas mismas domina el proceso enzimático. Si bien sería costoso recoger suficientes enzimas naturales para convertir la biomasa en etanol a gran escala, el desarrollo de una enzima artificial poco costosa u otro catalizador de cambio químico mediante investigación biomimética podría proveer una solución. (Ver Referencia 15 para una excelente discusión sobre biotecnología para la energía, incluyendo biocombustibles.)

La promesa de la biomimesis

Los materiales biomiméticos son sustancias hechas por el hombre que imitan ya sea el resultado o el estilo de los sistemas naturales. La biomimesis se basa en la idea de que la naturaleza es el sumo ingeniero – que, mediante la evolución, la naturaleza ha resuelto un problema de optimización. Casi todos los materiales biológicos se caracterizan por una estructura interna a nanoescala y uno o más de los siguientes atributos:

- **Propiedades superiores.** Los materiales biológicos a menudo presentan propiedades que exceden lo que se puede lograr con la mayoría de los materiales hechos por el hombre, a menudo con sustancias primas que en sí mismas tienen propiedades extraordinarias.
- **Estructuras jerárquicas.** En los sistemas biológicos comúnmente se encuentra una arquitectura jerárquica, compuesta (uno de los modos de lograr propiedades superiores); dichas estructuras son mayormente inaccesibles mediante rutas de procesamiento convencionales.
- **Mecanismos de ensamble superiores.** Los procesos que pueden producir características a escala extremadamente pequeña, a menudo bajo condiciones de procesamiento sorprendentemente benignas (baja temperatura, baja presión, y medios químicos benignos), son comunes en los sistemas biológicos.
- **Control de proceso superior.** Los métodos de procesamiento que ofrecen un control extraordinario sobre la fase, direccionalidad, tamaño o distribución del crecimiento de los materiales – lo fundamental en los materiales hechos a medida – también son típicos de los materiales de construcción biológicos.
- **Multifuncionalidad.** Los materiales biológicos a menudo cumplen más de una función.
- **Adaptabilidad.** Los sistemas biológicos cambian en respuesta a requisitos funcionales a lo largo de escalas temporales que van desde ritmos rápidos (deformación de las hojas en el viento, que adoptan formas cónicas para reducir al mínimo la resistencia aerodinámica) hasta el ritmo más lento del cambio evolutivo.

Imitar los diseños y procesos de los materiales naturales es un enfoque joven y tremendamente fértil para desarrollar nuevas capacidades y lograr grandes mejoras en los sistemas existentes. Tradicionalmente, la búsqueda de materiales nuevos y mejorados ha sido guiada por inspiración y predicción de la física y la química, y por la

suerte para hallar cosas valiosas por casualidad. Sin embargo, en los últimos años se ha tomado mayor conciencia de que los diseños biológicos o los enfoques de procesamiento aplicados a los materiales sintéticos pueden ofrecer importantes mejoras en el rendimiento en comparación con diseños y métodos de fabricación más tradicionales. Además, la biomimesis bien puede ser una de las pocas rutas hacia la creación de materiales hechos a medida con propiedades “afinables”, que por mucho tiempo ha sido el objetivo de la ciencia y la ingeniería de los materiales. Con los llamados materiales avanzados que ahora representan alrededor del 20% del valor total de los materiales despachados en los Estados Unidos, el aprovechar esta oportunidad tendrá un rol cada vez más importante en la competitividad tecnológica y económica.

Las aplicaciones para los materiales biomiméticos son tan variadas como sus modelos biológicos – los caparazones de las criaturas marinas, la madera, el hueso, la cutícula de los insectos, las cáscaras de los huevos, las fibras, y los adhesivos naturales, para nombrar unos pocos. Los caparazones de los moluscos, con su estructura física jerárquica extremadamente fuerte, proveen excelentes modelos para las cerámicas de alta temperatura y estructuras resistentes a la fractura, revestimientos de barrera térmica con resistencia superior a la oscilación térmica, e incluso nuevos hormigones con elevada resistencia a la flexión y daño tolerable. La elevada fuerza y extensibilidad de las fibras de seda natural provee inspiración para compuestos avanzados de fibra reforzada y filtros superdurables. La cubierta de queratina de los cuernos de las cabras, que presentan gran insensibilidad a las muescas y tolerancia al daño, podrían mostrarnos cómo fabricar capas superficiales superiores para componentes críticos de fractura.

Hay numerosas rutas de procesamiento biológico, tanto dentro como fuera de las células, que proveen modelos fascinantes para procesos de fabricación optimizados. Van desde deposición controlada de los complejos compuestos orgánicos y de fase mineral que constituyen los huesos y caparazones, pasando por el autoensamblaje de fibras y láminas orientadas, hasta el hilado de fibras con elevada solidez directamente desde una solución bajo condiciones ambientales. Se ha dado solo un paso inicial en la duplicación de la precisión, el control y las intrincadas arquitecturas de los mecanismos biológicos de ensamblaje.

Aplicaciones biomiméticas

Imitar en forma sintética los procesos naturales puede acarrear ventajas prácticas concretas – un buen ejemplo es la conversión de biomasa a etanol mediante catálisis biomimética, como se mencionara anteriormente. Las reacciones químicas en los sistemas naturales están catalizadas por enzimas, que proveen eficiencias y especificaciones inigualadas bajo ciertas condiciones cercanas a las ambientales. Las enzimas producidas artificialmente a la larga pueden igualar estas elevadas eficiencias y también lograr reacciones mucho más rápidamente y bajo condiciones de proceso más agresivas. Dada la importancia de los procesos catalíticos en las industrias química y manufacturera, la investigación sobre el desarrollo de los catalizadores basados en enzimas tiene potencial para un tremendo impacto en una amplia gama de aplicaciones. A continuación se describen otras oportunidades biomiméticas de alta utilidad – desde las supercolas industriales hasta la electrónica molecular.

Adhesivos proteicos. Los animales marinos tales como los mejillones y los balanos producen adhesivos a base de proteína que son extremadamente fuertes y a la vez adecuados para los ambientes húmedos. El mejillón es capaz de formar un vínculo adhesivo bajo el agua en dos o tres minutos con una gran variedad de materiales naturales y sintéticos, incluyendo no solo metales sino también superficies

resbaladizas tales como el vidrio y el Teflón. La máxima resistencia a la tensión de este vínculo adhesivo puede llegar a 5 MN/m². Además, estos adhesivos con base de proteínas forman nexos con superficies metálicas que son más estables que los catecoles actualmente utilizados en la industria para fijación de revestimientos. Una aplicación obvia en la generación de energía es la unión de revestimientos resistentes a la corrosión en los interiores de los ductos y buques; sin embargo, la capacidad de los adhesivos proteicos de unirse a tan gran variedad de materiales abre sus beneficios a una amplia gama de aplicaciones de procesamiento y fabricación que requieren medios húmedos.

La investigación acerca de lo que le provee propiedades especiales a las proteínas de los mejillones ha señalado que los aminoácidos Dopa (derivado de la tirosina) y lisina tienen mucha importancia.¹⁶ A pesar del volumen de trabajo que se ha hecho, la complejidad de este sistema natural y la dificultad de estudiarlo experimentalmente han dejado sin responder una serie de preguntas: ¿cómo se produce Dopa a partir de la tirosina?, ¿cómo se mantiene la estabilidad de las Dopa-proteínas durante el almacenamiento?, ¿cómo interactúa la Dopa-proteína con la enzima catecol oxidasa durante la secreción y fijación?, la naturaleza precisa de la unión a moléculas de llenado, tales como el colágeno, la quitina, y la celulosa; y la naturaleza de los eslabones en cruz que se forman.¹⁷ Tampoco está claro si la proteína es extendida o si tiene alguna forma de estructura plegada regular. La resolución de estos asuntos será esencial para el desarrollo de adhesivos sintéticos superiores.

Fotosíntesis artificial para celdas fotovoltaicas. La fotosíntesis de las plantas tiene mucho en común con la producción de electricidad fotovoltaica (FV): ambas requieren la recolección de fotones de la luz solar, la formación y separación de cargas positivas y negativas, y el transporte de esas cargas. Mientras las plantas utilizan entonces las cargas para sintetizar electroquímicamente los hidrocarburos para alimento, las celdas FV consolidan las cargas individuales en un circuito para producir corriente DC. Los enfoques biomiméticos para recolección de luz y separación de carga han demostrado ser una promesa tentadora para mejorar la eficiencia y economía de las celdas FV.

La investigación sobre fotosíntesis ha llevado al desarrollo de un “aparato molecular de antena sensibilizadora” para recolección fotoelectroquímica de luz, y el artefacto ha sido incorporado en los prototipos de celdas solares ensambladas a partir de un complejo de rutenio trimérico absorbido en películas de partículas de tamaño nanométrico de dióxido de titanio.¹⁸ El rendimiento del prototipo ha sido muy atractivo. Se han registrado eficiencias de conversión de 7,1% bajo luz solar total, y aumentos de eficiencia de hasta 12% bajo luz natural difusa – mejor que el rendimiento de la celda de los artefactos de silicio bajo condiciones de poca luz.^{19,20} Se ha confirmado el rendimiento de este prototipo, y se están examinando nuevas combinaciones de celdas para un mejor desarrollo. Se espera que el avance de la investigación en esta área sea rápido.^{21,22}

En el campo de separación de carga, los investigadores están analizando el uso de estructuras que constan de fosfonatos metálicos y moléculas orgánicas, tales como las porfirinas y viologeno que responden a la luz produciendo pares electrón-hueco.²³ Este enfoque es particularmente estimulante porque las estructuras muestran la capacidad del autoensamblaje²⁴; combinando el autoensamblaje bajo condiciones “benignas” con los sistemas de antena biomimética descritos anteriormente es posible reducir substancialmente los costos de fabricación de las celdas. Sin embargo, antes de que las celdas operativas puedan ser una realidad, se deben resolver varios problemas prácticos – incluyendo el paso crítico de la acumulación de electrones.

Descomposición del agua fotoinducida. Los procesos efectivos para separar agua en hidrógeno y oxígeno molecular son de especial interés para el uso del hidrógeno como un combustible no carbónico, ya sea en combustión directa o como el combustible primario en las celdas de combustible. Durante muchos años se supo que las partículas de sulfuro de zinc en suspensión acuosa catalizan la fotodescomposición del agua. Sin embargo, después de varias décadas de estudio, el rendimiento del hidrógeno para este enfoque siguió siendo bajo, y la corrosión anódica de los catalizadores por el oxígeno resultó ser problemática. Más recientemente, el interés ha pasado a un enfoque bioquímico, combinando los fotosistemas biológicos – cloroplastos – con sustratos artificiales. Se han explorado los cloroplastos de la espinaca inmovilizados con la enzima hidrogenasa y las partículas de polietileno cubiertas con clorofila extraída de las algas. Sin embargo, el rendimiento sigue siendo bajo.

Experimentos recientes con algas salvajes y mutantes de la familia *chlamydomonas* sugieren que la máxima eficiencia de conversión termodinámica para convertir la energía de la luz en energía química potencialmente puede ser duplicada desde alrededor de 10% hasta 20% cuando la diferencia potencial entre la oxidación del agua (evolución del oxígeno) y la reducción de protones (evolución del hidrógeno) puede medirse con un fotón único en lugar de los dos fotones convencionales.²⁵ Continuar la investigación de este enfoque, especialmente para descubrir un modelo biomimético para el proceso de síntesis, puede tener como resultado mejoras substanciales.

Si ciertamente se puede desarrollar una técnica para separar el agua a niveles industriales significativos, los ciclos de proceso novedosos pueden mejorar la economía total y proveer beneficios adicionales. Por ejemplo, la desalinización del agua de mar – actualmente lograda por evaporación y condensación a alta temperatura o por ósmosis inversa a alta presión—podría integrarse en el proceso de descomposición fotoinducido.²⁶ El hidrógeno separado del agua de mar podría ser quemado en una caldera o servir de alimentación para una celda de combustible para producir electricidad. El vapor de agua resultante de la combustión (o reacción electroquímica) entonces podría ser condensado y purificado por tecnología convencional de tratamiento de agua para proveer agua potable. Por supuesto, sería necesario que dicho ciclo fuera económicamente competitivo con los enfoques convencionales de desalinización.

Extracción de protones para celdas de combustible de baja temperatura. Las celdas de combustible parecen ser una tecnología de generación de energía hecha a media para un futuro sostenible. Al producir electricidad electroquímicamente en lugar de mediante combustión de combustible, no tienen partes móviles y no generan ruido o emisiones contaminantes. Sin embargo, las celdas de combustible actualmente en desarrollo deben funcionar a temperaturas medias a elevadas – algunas llegan a 900°C. Una celda de combustible a temperatura ambiente representaría un importante avance de la tecnología. La investigación biomimética del transporte de iones en plantas al nivel macromolecular podría hacer posible dicho artefacto.

La función de generación de electricidad de las actuales celdas de combustible depende de la extracción catalítica de un ion de hidrógeno – un protón – de un átomo de hidrógeno y de inducirlo a viajar desde el ánodo de la celda, mediante un electrolito, hasta su cátodo bañado en oxígeno. La electricidad se genera cuando el electrón que queda de cada átomo del que se extrae el protón viaja desde el ánodo mediante un circuito externo para reunirse en el cátodo. El proceso crea agua y calor además de electricidad.

La capacidad de algunos sistemas biológicos de transportar iones a través de membranas celulares e intracelulares provee un modelo para un proceso de extracción de protones a temperatura más baja. Específicamente, la bacteriorrodopsina (bR), un pigmento en bacterias que crecen en pantanos salados, es un extractor de protones accionado por la luz.²⁷ En otras palabras, la bR utiliza la energía que se obtiene de la luz para extraer los protones a través de la membrana. Se postula que una membrana biomimética transmisora de protones (como bR), podría ser la base de una celda de combustible a temperatura ambiente. La investigación reciente se ha centrado principalmente en caracterizar la estructura y función de la bR, pero el énfasis ya está cambiando hacia la investigación de cómo podría aplicarse este fenómeno a un sistema hecho por el hombre.²⁸

A pesar de los importantes avances, el proceso de extracción de protones aún no se comprende en su totalidad a nivel molecular, y se requiere una comprensión más completa de la fotoquímica. Sin embargo, si se pudiera aplicar la extracción biomimética de protones al desarrollo de una celda de combustible a baja temperatura, acarrearía consigo ventajas reales en costo, peso, ciclo de vida y materiales de construcción.

6. Electrónica y semiconductores

En este informe la electrónica y los semiconductores se tratan en paralelo porque los asuntos energéticos en estos sectores son muy similares. La electrónica y los semiconductores están ampliamente reconocidos como uno de los principales motores del crecimiento económico y de la productividad en el mundo desarrollado. De hecho, se cree que el crecimiento en la productividad de los trabajadores experimentado en los Estados Unidos entre 1995 y el 2000 es el resultado de un aumento repentino en la aplicación de semiconductores a nuevas funciones no imaginadas previamente. La creciente contribución de las tecnologías digitales – aquellas que dependen de los productos de la industria de los chips- al crecimiento económico y la prosperidad ha aumentado el foco estratégico de los ejecutivos de semiconductores centrado en la importancia de un suministro de electricidad confiable.

Las implicancias energéticas para la electrónica y los semiconductores son muy diferentes a la situación en la producción de metal primario. Aunque la calidad de la energía y la confiabilidad son importantes en ambas industrias, el impacto de los problemas de la calidad de la energía, especialmente aquellos de corta duración, es mayor para el sector semiconductor en cuanto a producción perdida y daños a los equipos. Además, el proceso de fabricación de semiconductores es sensible a los eventos de calidad de energía de muy corta duración (de minutos a segundos a milisegundos), mientras que las fundiciones de aluminio pueden recuperarse de una interrupción del servicio que dura varias horas siempre y cuando no se congele el electrolito.

Las ventas de semiconductores han venido aumentando firmemente, casi desde el comienzo de la industria. Tal como se ve en la **Figura III-29**, las ventas aumentaron de alrededor de US\$1.000 millones a fines de la década de 1960 hasta el pico máximo jamás alcanzado de US\$204.000 millones en el 2000. Después de este momento, las ventas cayeron a alrededor de US\$140.000 millones en el 2002. Sin embargo, hay una evidente mejora en las ventas para el 2003 (último año para el que hay datos disponibles).

Es notable que las ventas de semiconductores hayan aumentado exponencialmente a lo largo de casi cuatro décadas, indicando el fuerte crecimiento en este sector, y también la continuada diversidad en las aplicaciones de los semiconductores que crea

múltiples mercados para los proveedores de barcos (**Figura III-30**). Incluso a medida que se satura el mercado para algunas aplicaciones tales como las PC autónomas, surgen nuevas aplicaciones para mantener el crecimiento del mercado. Por ejemplo, en la actualidad gran parte del reciente crecimiento en las ventas de semiconductores refleja la demanda de chips destinados al servicio en pequeños artefactos manuales, tales como los teléfonos celulares y las PC de bolsillo.

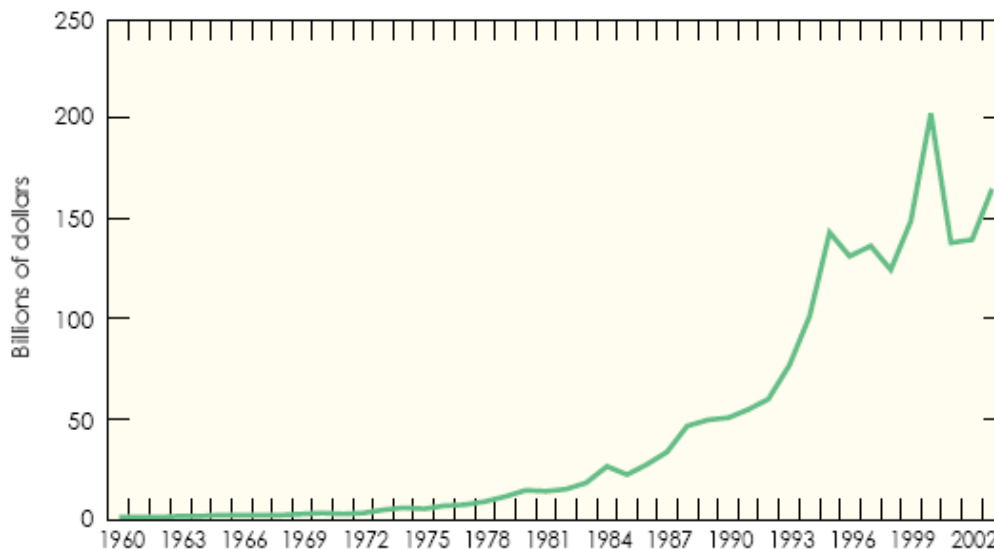


Figura III-29. Despachos mundiales de semiconductores.

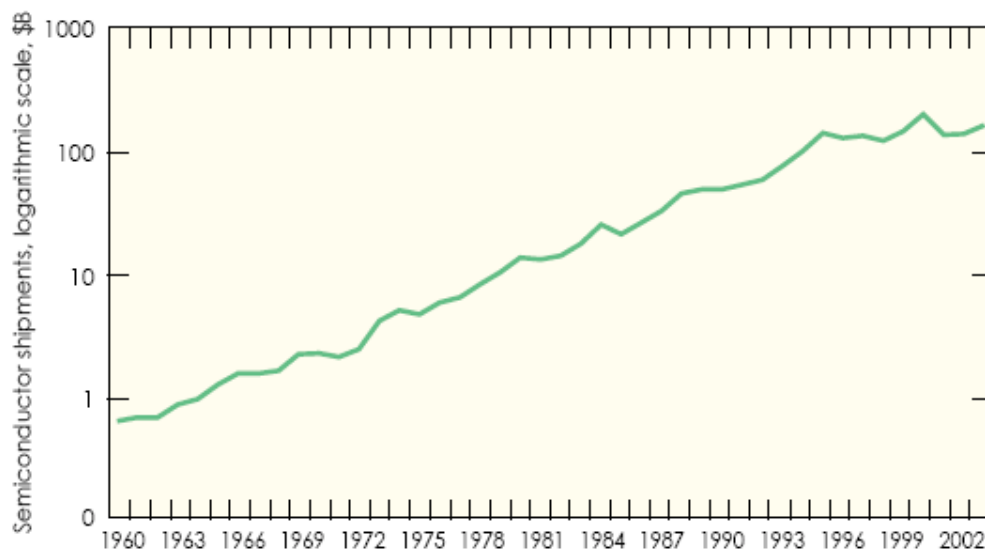


Figura III-30. Las ventas de semiconductores han seguido una ley de crecimiento exponencial desde la década de 1960.

Las ventas regionales de semiconductores siguen el mismo modelo que las ventas totales mundiales (**Figura III-31**). Nótese sin embargo, que el salto en las ventas en el 2003 es más pronunciado en la región Asia-Pacífico y en Japón.

ID+D: Objetivos y desafíos

Los objetivos claves de la industria electrónica y de semiconductores son—

- Mejorar el rendimiento de los edificios mediante mejoras en la iluminación y en HVAC
- Reducir los requisitos de energía y los costos mejorando la eficiencia del proceso

- Reducir el consumo y pérdida de energía de los chips de los procesadores para reducir las pérdidas de calor y prolongar la vida de las baterías
- Agregar sistemas de control para asegurar que el equipo crítico está funcionando en condiciones óptimas
- Reducir los requisitos de carga pico
- Mejorar la confiabilidad y la calidad de la energía agregando sistemas de generación y almacenamiento on-site y otros recursos de energía distribuida.

Un área en la cual parecen ser posibles importantes mejoras es la de los centros de datos de Internet. Estas instalaciones, los “cerebros” de la Internet, son responsables de la transmisión y distribución de miles de millones de mensajes diariamente. Los datos anecdóticos indican que los sistemas energéticos abarcan hasta dos tercios del costo total de los grandes centros de datos de Internet. Estudios recientes sugieren oportunidades específicas para reducir los requisitos de energía de los centros de datos de Internet. Estas oportunidades incluyen el desarrollo de chips de procesadores con mejor eficiencia energética para reducir la carga calorífica en los edificios, suministros de energía de alta eficiencia que mantienen la eficiencia en una amplia gama de cargas, y sistemas de enfriamiento de fluidos altamente eficientes que utilizan caloriductos para aislar el fluido de los componentes electrónicos.

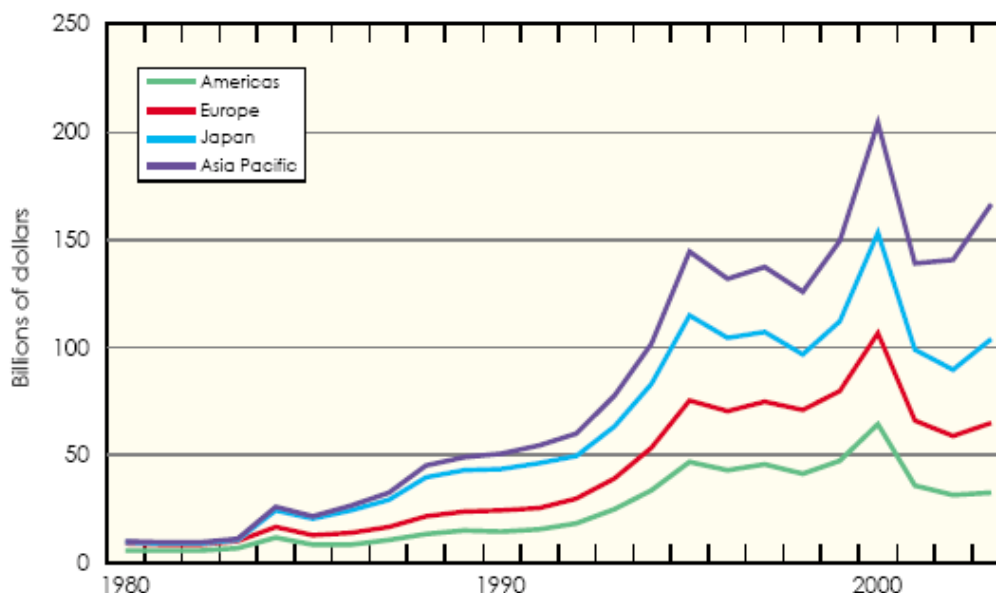


Figura III-31. Ventas regionales de chips en paralelo con las ventas mundiales totales.

Estas soluciones son importantes, pero por sí mismas, no parecen proveer las soluciones integradas necesarias en todas las áreas de fabricación de alta tecnología. Estas industrias, incluyendo la electrónica y los semiconductores, necesitan un sistema de entrega realmente inteligente. A continuación, en la discusión sobre industrias de servicios, se describen los atributos de un sistema de entrega inteligente del futuro.

7. Automatización industrial

La tecnología de la información y el control tiene una importancia duradera para los procesos en las industrias del hierro, el acero y la pulpa y el papel. Esto es cierto para todos los eslabones de la cadena – desde los sensores para una amplia gama de parámetros hasta procesamiento de señal, modelado, simulación y regulación adaptiva. El desarrollo de la informática moderna impulsa y es impulsado por la productividad en diferentes tipos de industria.

Las tendencias en los controles de proceso basados en tecnología informática industrial están avanzando hacia una mayor integración entre el proceso de producción, los recursos reunidos de la compañía, y las necesidades de los clientes. En grupos de negocios mundiales, el control puede estar centralizado y extendido a unidades de producción geográficamente dispersas. Para las industrias con intensidad de energía, el desarrollo de la informática puede fortalecer aún más estas tendencias actuales. Algunos ejemplos son la localización de la producción en lugares más cercanos a los crecientes mercados, la llegada de nuevos materiales que substituyen a los antiguos, nuevas materias primas y reciclado, y menores unidades de producción adaptadas a las necesidades del mercado y a las condiciones locales pero que pueden ser controladas mundialmente.

La automatización industrial se está desarrollando hacia muchos objetivos. La inteligencia en los sistemas de control se acerca al proceso pero también al cliente. De haber sido un puro control de proceso, donde se optimizó el consumo de material y de energía y el impacto ambiental, ahora está avanzando también hacia el manejo de parámetros “suaves” tales como la calidad y los tiempos de entrega.

8. Tecnología de medición y control

La tecnología de medición y control afecta y continuará extendiéndose sobre todas las tecnologías de uso final; por lo tanto es vital para asegurar que la energía se utilice en forma óptima en el sector de uso final. En este caso, las medidas cuidadosas se traducen en tiempo real en disposiciones que controlan la conversión de la energía en trabajo útil. Ejemplos son la medición y luego optimización de las emisiones de los automóviles, tales como CO, NO_x, e hidrocarburos, para optimizar la combustión, y luego la medición de parámetros físicos y químicos tales como la presión, la viscosidad, el flujo y la concentración de especies químicas para procesos de control industrial.

Los sensores avanzados son claves para las mediciones exactas. Estos sensores no solo tienen que controlar con exactitud el/los parámetro/s necesario/s, sino que también a menudo deben trabajar en entornos difíciles, tales como altas temperaturas, fluidos cáusticos, y flujos altamente abrasivos. También deben ser económicos, de modo que el beneficio de su uso valga más que el costo del sensor.

Los objetivos incluyen el desarrollo o uso de materiales que pueden soportar ambientes difíciles, embalaje que permite el funcionamiento en ambientes destructivos, reconocimiento de modelos, inteligencia artificial, y tecnologías de lógica difusa para procesamiento de señales y análisis de datos en tiempo real, y comunicación bilateral inalámbrica, todos utilizando materiales y procesos de fabricación económicos.

9. Modelado y simulaciones

Las tecnologías de modelado y simulación son esenciales para el desarrollo de cualquier tecnología exitosa, incluyendo las tecnologías de uso final de la energía. Los modelos pueden ayudar a entender el efecto de las nuevas tecnologías sobre las economías y el medio ambiente, evaluar el efecto de las nuevas tecnologías sobre los objetivos de políticas de los gobiernos, y cooperar en la optimización del diseño de las tecnologías y su ubicación en la infraestructura. Además, los modelos pueden evaluar las relaciones riesgo-beneficios asociadas con la introducción de nuevas tecnologías (ej., combustible de hidrógeno). A medida que avanzan las capacidades computacionales, se pueden lograr simulaciones cada vez más realistas. El software

avanza al ritmo de la velocidad computacional y la capacidad de memoria, y algunos dirían que incluso ayuda a impulsarlos.

Los objetivos incluyen las simulaciones de alta resolución de las operaciones de fabricación, generación de energía, operaciones de transmisión y almacenamiento, emisiones de motores de combustión interna, costos del ciclo de vida, y los efectos ambientales de los sistemas alternativos tales como las celdas de combustible, y la optimización de revestimientos de los edificios desde el punto de vista de la economía, la eficiencia, y los impactos ambientales, y las simulaciones de flujos en relación a los vehículos, especialmente camiones.

Referencias

1. A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy—to 2030 and Beyond, http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/annual_report.html; http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/vision_doc.pdf; http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/national_h2_roadmap.pdf; *Fuel Cell Report to Congress, February 2003* (ESECS EE-1973), http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fc_report_congress_feb2003.pdf, 2003.
2. <http://www.state.gov/g/oes/rls/fs/2003/25983.htm>, 2003.
3. <http://www.gastechnology.org>.
4. S.I. Stupp and P.V. Braun, "Molecular Manipulation of Microstructures: Biomaterials, Ceramics and Semiconductors," *Science*, Vol. 277, pp. 1243–1248, 1997.
5. *National Nanotechnology Initiative: Leading to the Next Industrial Revolution*, Committee on Technology, National Science, and Technology Council, Washington, DC, February 2000.
6. T. Hibino, A. Hashimoto, T. Inoue, et al., "A Low-Operating-Temperature Solid Oxide Fuel Cell in Hydrocarbon-Air Mixtures," *Science*, Vol. 288, pp. 2031–2033, 2000.
7. G. Stix, "Little Big Science," *Scientific American*, September 2001, pp. 32–37.
8. G.M. Whitesides and J.C. Love, "The Art of Building Small," *Scientific American*, September 2001, pp. 39–47.
9. C.M. Lieber, "The Incredible Shrinking Circuit," *Scientific American*, September 2001, pp. 59–64.
10. G.M. Whitesides and B. Grzybowski, "Self-Assembly at All Scales," *Science*, Vol. 295, pp. 2418–2421, 2002.
11. K. Pohl, M.C. Bartelt, J. de la Figuera, et al., "Identifying the forces responsible for self-organization of nanostructures at crystal surfaces," *Nature*, Vol. 397, pp. 238–241, 1999.
12. M. Roukes, "Plenty of Room Indeed," *Scientific American*, September 2001, pp. 48–57.
13. F. Capasso, "Band-Gap Engineering: From Physics and Materials to New Semiconductor Devices," *Science*, Vol. 235, pp. 172–176, 1987.
14. G.A. Prinz, "Magnetoelectronics," *Science*, Vol. 282, pp. 1660–1663, 1998.
15. RISØ Energy Report 2, Risø National Laboratory, Denmark, November 2003.
16. J.H. Waite, "Marine Adhesive Proteins: Natural Composite Thermosets," *Int. J. Biol. Macromol.*, Vol. 12, pp. 193–144, 1990.
17. J.H. Waite, "The Phylogeny and Chemical Diversity of Quinone-Tanned Glues and Varnishes," *Comp. Biochem. Physiol.*, Vol. 97B, pp. 19–29, 1990.
18. B. O'Regan and M. Gratzel, "A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films," *Nature*, Vol. 353, pp. 737–740, 1991.
19. G. Smestad, C. Bignozzi, and R. Argazzi, "Testing of Dye-Sensitized TiO₂ Solar Cells I: Experimental Photocurrent Output and Conversion Efficiencies," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 32, p. 259, 1994.
20. A. Hagfeldt, et al., "Verification of High Efficiencies for the Gratzel Cell. A 7%

Efficient Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 31, p. 481, 1994.

21. D. Gust, "Very Small Arrays," *Nature*, Vol. 386, pp. 21–22, 1997.

22. S. Mukamel, "Trees to Trap Protons," *Nature*, Vol. 388, pp. 425–427, 1997.

23. G. Cao, H-G. Hong, and T.E. Mallouk, "Layered Metal Phosphates and Phosphonates: From Crystals to Monolayers," *Acc. Chem. Res.*, Vol. 25, pp. 420, 1992.

24. R.F. Service, "Self-Assembly Comes Together," *Science*, Vol. 265, p. 316, 1994.

25. E. Greenbaum, J.W. Lee, C.V. Tevault, S.L. Blankenship, and L.J. Mets, "CO₂ Fixation and Photoevolution of H₂ and O₂ in a Mutant of *Chlamydomonas* Lacking Photosystem I," *Nature*, Vol. 376, pp. 438–441, 1995.

26. R.H. Richman, G.M. Bond, and W.P. McNaughton, *State-of-the-Art and Outlook for Biomimetic Materials*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, TR-104128, 1994.

27. J.K. Lanyi, "Bacteriorhodopsin as a Model for Proton Pumps," *Nature*, Vol. 375, pp. 461–463, 1995.

28. G. Steinberg-Yfrach, P.A. Liddell, S-C. Hung, A.L. Moore, D. Gust, and T.A. Moore, "Conversion of Light Energy to Proton Potential in Liposomes by Artificial Photosynthetic Reaction Centres," *Nature*, Vol. 385, pp. 239–241, 1997.

IV. Inversiones en ID+D

Un estudio limitado como el presente no puede calcular en detalle las inversiones en ID+D necesarias para desarrollar las tecnologías abordadas aquí hasta el punto en que están listas para ser evaluadas por el mercado. Los esfuerzos conjuntos de los gobiernos y la industria sobre dichos estudios serán fructíferos, no solo en la identificación de objetivos y métodos para fomentar las inversiones de capital, sino también para resaltar el alcance mundial que requieren los esfuerzos efectivos.

En la primera fase de este estudio se comenzó un esfuerzo relacionado con los costos de inversión de capital para proveer tecnologías. En 1999, el estudio PCAST¹ de los EE.UU. identificó la necesidad de un Fondo Estratégico de Cooperación Energética para complementar los presupuestos existentes y recomendó una contribución del gobierno de los EE.UU. de US\$500 millones por año hacia el 2005. De esta suma, se identificaron US\$100 millones para tecnologías de uso final, además de otros US\$240 millones para sociedades entre el gobierno y la industria, cooperación en investigación y demostración industrial, y utilización, todas primariamente en tecnologías de uso final. El presupuesto total del gobierno de los EE.UU. para I+D energética (no demostración) actualmente es de alrededor de US\$2.000 millones por año, de los cuales alrededor de un tercio, o US\$660 millones, se gastan en tecnologías de uso final. Sumando esto al suplemento sugerido por PCAST se obtienen US\$1.000 millones por año en toda la I+D. Si tomamos la economía de los EE.UU. como aproximadamente el 25% de la economía mundial, parece asegurarse un gasto mundial en cooperación internacional en tecnologías de uso final de la energía de cuatro veces esta cantidad, o US\$4.000 millones por año. (Para comparar y poner esta cifra en perspectiva, la AIE ha calculado que la inversión mundial de capital necesaria en la infraestructura energética es de US\$16.000 billones en el período hasta el 2030.² Por lo tanto, US\$4.000 millones por año para I+D parecen ser más que justificados, y de hecho es una cifra muy conservadora).

Estas cifras conservadoras no incluyen dinero para importantes actividades de demostración. La porción de desarrollo puede ser mucho más costosa, como lo ilustran los gastos asociados a la demostración de tecnologías conocidas. Las solares fotovoltaicas, el etanol, la energía eólica y las turbinas de gas han sido estudiadas todas ellas en detalle y requieren o requerirán alrededor de US\$2.000 millones cada una para llevarlas al mercado, la mayor parte de eso en demostración. Las tecnologías identificadas en este informe son alrededor de 50 y por lo tanto necesitarían una inversión colectiva de alrededor de US\$100.000 millones en su ciclo de vida de 20–40 años solo para las tecnologías de uso final más importantes. Algunas costarán más, otras menos, e incluso surgirán otras nuevas. Además, serían útiles hacer otros análisis más detallados, siguiendo con aquellos realizados hasta la fecha para un alcance más limitado.³

Si estos esfuerzos de I+D y luego demostración están ausentes, las tecnologías para el uso final de la energía no estarán listas para el mercado en marcos temporales requeridos por los escenarios aún más pesimistas del desarrollo económico mundial. Además, las tecnologías de uso final tendrán un impacto inigualable sobre el uso total de la energía y los objetivos de *Accesibilidad, Disponibilidad y Aceptabilidad* de la energía y los servicios energéticos.

Referencias

1. *Powerful Partnerships: The Federal Role in International Cooperation on Energy Innovation*, Report from the Panel on International Cooperation in Energy Research, Development, Demonstration, and Deployment of the President's Committee of

Advisors on Science and Technology, 1999, http://www.whitehouse.gov/WH/EOP/OSTP/html/OSTP_home.html.

2. International Energy Agency, World Energy Investment Outlook, 2003 Insights, IEA, Paris, 2003.

3. R.N. Schock, et al., "How Much Is Energy R&D Worth as Insurance?" *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol. 24, pp. 487–512, 1999.

Anexo A: Miembros del Grupo de Estudio y Expertos Invitados

Miembros del Grupo de Estudio

Dr. Robert Schock	Presidente del estudio Senior Fellow Lawrence Livermore National Laboratory, ESTADOS UNIDOS
Dr. Saleh Bin Abdul Al-Ajlan	Energy Research Institute, ARABIA SAUDITA
Shri S. Balagurunathan	Bharat Heavy Electricals Limited (BHEL), INDIA
Sr. Raouf Bennaceur	Ministro de Investigación Científica y Tecnologías, TUNEZ
Dr. Carl Calantone, M.B.A.	TransCanada Pipelines Ltd., CANADA
Dr. Alessandro Clerici	Asesor senior del presidente de ABB, ITALIA
Sr. Brian Cox	East Harbour Management Services, NUEVA ZELANDA
Dr. Lothario Deppe	Engenharia de Operação Eletronuclear, BRASIL
Dr. Stephen Gehl	Electric Power Research Institute, ESTADOS UNIDOS
Dr. Francisco C. Guzmán	Instituto Mexicano del Petróleo, MEXICO
Sr. Harald Haegermark	Consultor, antes en Elforsk AB, SUECIA
Dr. Sayed B. Abdel Hamid	Nuclear Power Plants Authority, EGIPTO
Sr. G. Paul Horst	DTE Energy Technologies, ESTADOS UNIDOS
Sr. Hirohiko Hoshi	Toyota Motor Corporation, JAPON
Sr. Malek Kabariti	National Energy Research Center, JORDANIA
Dr. Hans Larsen	Risø National Laboratory, DINAMARCA
Dr. Natasa Markovska	Academy of Sciences and Arts, MACEDONIA
Sr. Yasuo Matsumoto	Nissan Motor Company Ltd., JAPON
Sr. Reginald Modlin	JD DaimlerChrysler Corporation-CIMS, ESTADOS UNIDOS
Sr. Masao Morishita	Tokyo Electric Power Company, JAPON
Dr. Gürgen Olkhovsky	All-Russia Thermal Engineering Institute, FEDERACIÓN RUSA
Dr. Juan Ignacio Pardo	UNION FENOSA., S.A., ESPAÑA
Sr. Teodor-Ovidiu Pop	TERMOELECTRICA SA, RUMANIA
Sra. Sarah Raiss	TransCanada Pipelines Ltd., CANADA
Sr. Scott Rouse	CANADA
Dr. Seyed M. Sadeghzadeh	Energy Planning Bureau, IRAN (República Islámica)
Sr. Takanori Shiina	Honda R&D Co. Ltd., JAPON
Dr. Sung-Chul Shin	Korea Institute of Energy Research-KIER, COREA
Sr. Yoshitaka Sugiyama	Nissan Motor Co Ltd., JAPON
Dr. Tuomo Suntola	Fortum Corporation, FINLANDIA
Dr. August Valfells	Vir hf, ISLANDIA
Sr. V.S. Verma	Government of India Central Electricity Authority, INDIA
Dr. Nicolas Vortmeyer	Siemens AG Power Generation, ALEMANIA

Expertos invitados*

Dr. David L. Bodde	University of Missouri, ESTADOS UNIDOS
Sr. Lucien Y. Bronicki	Ormat Industries Ltd., ISRAEL
Dr. Chris Cooper	South African Energy Association, SUDAFRICA
Sr. Mark E. Dunn	Los Alamos National Laboratory, ESTADOS UNIDOS
Sr. Michael Eckhart	American Council for Renewable Energy, ESTADOS UNIDOS
Sr. Latsoucabe Fall	Comité Miembro de Senegal, CME
Sr. Thomas Flowers	Siemens AG Power Generation, ESTADOS UNIDOS
Prof. William Fulkerson	University of Tennessee, ESTADOS UNIDOS
Sr. Kokichi Ito	The Institute of Energy Economics, JAPON
Sr. Luc Kersten	Shell International Petroleum Company, REINO UNIDO
Sr. Hisham Khatib	Comité miembro de Jordania, CME
Mr. Michael McKale	DELPHI Automotive Systems, ESTADOS UNIDOS
Prof. J.T. McMullan	University of Ulster, REINO UNIDO
Sr. Jyoti Mehta	National Thermal Power Corporation, INDIA
Dr. Nebojsa Nakicenovic	IIASA, AUSTRIA
Dr. Franz-Josef Paefgen	Bentley Motors Ltd., REINO UNIDO
Sr. Robert Rivard	Robert Bosch Corporation, ESTADOS UNIDOS
Sr. Joe Slenzak	Robert Bosch Corporation, ESTADOS UNIDOS
Dr. Jan Sundell Vattenfall	SUECIA
Prof. Dr. Orhan Yesin	Middle East Technical University, TURQUÍA

* Los expertos invitados hicieron útiles contribuciones pero no participaron en el estudio.

Anexo B: Abreviaturas, siglas y definiciones

Factor	Nombre	Símbolo
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^{-9}	nano	n

Accesibilidad	Conveniencia, costo y eficiencia de la energía y de los servicios energéticos
Aceptabilidad	Aceptabilidad ambiental de la energía y de los servicios energéticos
ACV	Vehículo convencional avanzado
AEV	Vehículo completamente eléctrico
AHSS	Aceros avanzados de alta resistencia
BPA	Bonneville Power Administration
BTU	Unidad térmica británica ($\cong 24 - 10^9$ toe)
C	Carbono
CEFIC	Consejo Europeo de la Industria Química
CEI	Comunidad de Estados Independientes, de la ex Unión Soviética
CME	Consejo Mundial de la Energía
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
Disponibilidad	Calidad y confiabilidad de la energía y de los servicios energéticos
DMFC	Celda de combustible de metanol directo
EMF	Campo electromagnético
EPA	Agencia de Protección Medioambiental
EPRI	Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, Estados Unidos
ETOH	Etanol
FACTS	Sistema de transmisión flexible AC
FAME	Metil éster de ácido graso
FV	Fotovoltaico
GD	Generación distribuida
GEP	Perspectivas Energéticas Mundiales (Global Energy Perspectives), por N. Nakicenovic, A Grubler y A McDonald, Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados y Consejo Mundial de la Energía, Cambridge University Press, 1998
GLP	Gas licuado de petróleo
GNC	Gas natural comprimido
GWP	Producto mundial bruto
HC	Hidrocarburos, generalmente no quemados
HEV	Vehículos híbridos eléctricos
HHV	Poder calorífico superior
HSR	Ferrocarril a alta velocidad
HTS	Superconductores de alta temperatura
HVAC	Corriente alterna en alta tensión
HVDC	Corriente continua en alta tensión
I&CT	Tecnologías de información y comunicación
ICE	Motor de combustión interna
ID+D	Investigación, desarrollo y demostración
IPHE	Asociación Internacional para la Economía del Hidrógeno
Joules	10^{18} Joules ($\sim 10^{15}$ BTU)
KAM	Ecocyclic Pulp Mill (Suecia)
kWh	Kilowatt-hora
LHV	Poder calorífico inferior
maglev	Levitación magnética
MHD	Magnetohidrodinámica
Micro-PCCE	Producción micro-combinada de calor y electricidad
NAFTA	Tratado de Libre Comercio de América del Norte

NO_x	Varios óxidos de nitrógeno, principalmente NO y NO ₂
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
PBI	Producto bruto interno
PCCE	Producción combinada de calor y electricidad
PEM	Membrana de intercambio de protones
SMES	Dispositivos superconductores magnéticos de almacenamiento de energía
SOFC	Celda de combustible de óxido sólido
SST	Transporte supersónico
T&D	Transmisión y distribución
Tecnología de uso final	Conversión a trabajo útil, como en calor de proceso, iluminación o transporte
TGV	Train à Grande Vitesse (Tren a alta velocidad- Francia)
TMP	Producción termomecánica de pulpa
Tpe	Tonelada de petróleo (energía) equivalente
UNEP	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
WAMS	Sistema de medición de áreas amplias