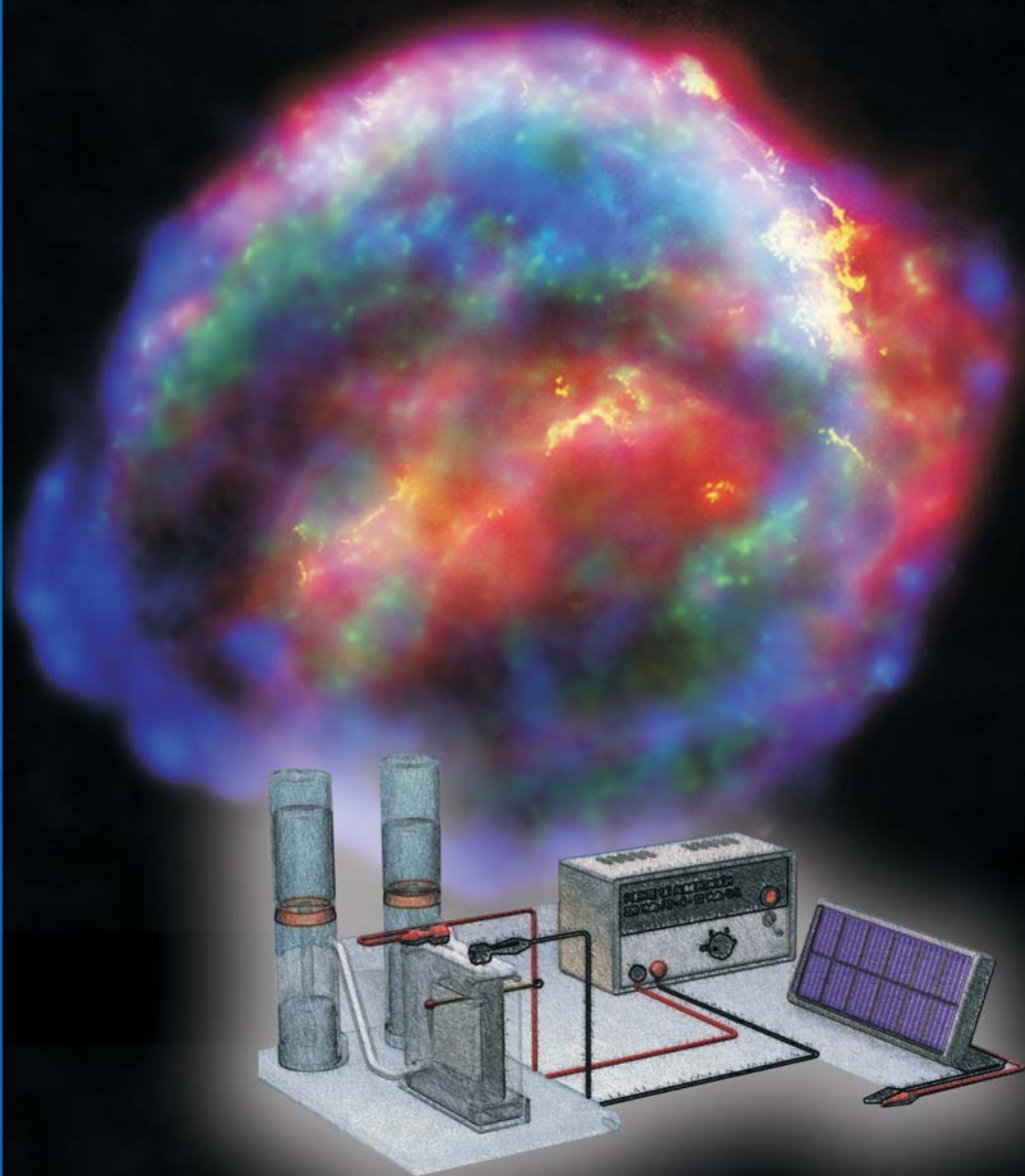




Pila de combustible



Serie: Recursos didácticos

Tapa:
Imagen combinada de la Supernova Remnant captada
por el telescopio Hubble - NASA.

a u t o r i d a d e s

PRESIDENTE DE LA NACIÓN

Dr. Néstor Kirchner

MINISTRO DE EDUCACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Lic. Daniel Filmus

SECRETARIO DE EDUCACIÓN, CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Prof. Alberto E. Sileoni

DIRECTORA EJECUTIVA DEL INSTITUTO NACIONAL DE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Lic. María Rosa Almandoz

DIRECTOR NACIONAL DEL CENTRO NACIONAL DE
EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Pila de combustible

Mónica Alegría

Colección Serie “Recursos didácticos”.
Coordinadora general: Haydeé Noceti.

Distribución de carácter gratuito.

Queda hecho el depósito que previene la ley nº 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

La reproducción total o parcial, en forma idéntica o modificada por cualquier medio mecánico o electrónico incluyendo fotocopia, grabación o cualquier sistema de almacenamiento y recuperación de información no autorizada en forma expresa por el editor, viola derechos reservados.

Industria Argentina.

ISBN 950-00-0528-X

Alegría, Mónica

Pila de combustible / Mónica Alegría; coordinado por Juan Manuel Kirschenbaum.

- 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2005.

112 p.; 22x17 cm. (Recursos Didácticos; 20)

ISBN 950-00-0528-X

1. Hidrógeno-Energía. 2. Fuel Cell.

I. Kirschenbaum, Juan Manuel, coord. II. Título

CDD 665.81

Fecha de catalogación: 3/11/2005

Impreso en Gráfica Pinter S. A., México 1352 (C1097ABB), Buenos Aires,
en noviembre 2005

Tirada de esta edición: 3.000 ejemplares

Serie: “**Recursos didácticos**”

- 1 Invernadero automatizado
- 2 Probador de inyectores y motores paso a paso
- 3 Quemador de biomasa
- 4 Intercomunicador por fibra óptica
- 5 Transmisor de datos bidireccional por fibra óptica, entre computadoras
- 6 Planta potabilizadora
- 7 Medidor de distancia y de velocidad por ultrasonido
- 8 Estufa de laboratorio
- 9 Equipamiento EMA -Características físicas de los materiales de construcción-
- 10 Dispositivo para evaluar parámetros de líneas
- 11 Biodigestor
- 12 Entrenador en lógica programada
- 13 Entorno de desarrollo para programación de microcontroladores PIC
- 14 Relevador de las características de componentes semiconductores
- 15 Instalación sanitaria de una vivienda
- 16 Equipamiento para el análisis de estructuras de edificios
- 17 Cargador semiautomático para máquinas a CNC de accionamiento electropneumático
- 18 Biorreactor para la producción de alimentos
- 19 Ascensor
- 20 Pila de combustible

LAS METAS, LOS PROGRAMAS Y LAS LÍNEAS DE ACCIÓN DEL INSTITUTO NACIONAL DE EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

El Instituto Nacional de Educación Tecnológica -INET- enmarca sus líneas de acción, programas y proyectos, en las metas de:

- Coordinar y promover programas nacionales y federales orientados a fortalecer la educación técnico-profesional, articulados con los distintos niveles y ciclos del sistema educativo nacional.
- Implementar estrategias y acciones de cooperación entre distintas entidades, instituciones y organismos –gubernamentales y no gubernamentales-, que permitan el consenso en torno a las políticas, los lineamientos y el desarrollo de las ofertas educativas, cuyos resultados sean considerados en el Consejo Nacional de Educación-Trabajo –CoNE-T– y en el Consejo Federal de Cultura y Educación.
- Desarrollar estrategias y acciones destinadas a vincular y a articular las áreas de educación técnico-profesional con los sectores del trabajo y la producción, a escala local, regional e interregional.
- Diseñar y ejecutar un plan de asistencia técnica a las jurisdicciones en los aspectos institucionales, pedagógicos, organizativos y de gestión, relativos a la educación téc-

nico-profesional, en el marco de los acuerdos y resoluciones establecidos por el Consejo Federal de Cultura y Educación.

- Diseñar y desarrollar un plan anual de capacitación, con modalidades presenciales, semipresenciales y a distancia, con sede en el Centro Nacional de Educación Tecnológica, y con nodos en los Centros Regionales de Educación Tecnológica y las Unidades de Cultura Tecnológica.
- Coordinar y promover programas de asistencia económica e incentivos fiscales destinados a la actualización y el desarrollo de la educación técnico-profesional; en particular, ejecutar las acciones relativas a la adjudicación y el control de la asignación del Crédito Fiscal –Ley N° 22.317–.
- Desarrollar mecanismos de cooperación internacional y acciones relativas a diferentes procesos de integración educativa; en particular, los relacionados con los países del MERCOSUR, en lo referente a la educación técnico-profesional.

Estas metas se despliegan en distintos programas y líneas de acción de responsabilidad de nuestra institución, para el período 2003-2007:

Programa 1. Formación técnica, media y superior no universitaria:

- 1.1. Homologación y validez nacional de títulos.
- 1.2. Registro nacional de instituciones de formación técnica.
- 1.3. Espacios de concertación.
- 1.4. Perfiles profesionales y ofertas formativas.
- 1.5. Fortalecimiento de la gestión institucional; equipamiento de talleres y laboratorios.
- 1.6. Prácticas productivas profesionalizantes: Aprender emprendiendo.

Programa 2. Crédito fiscal:

- 2.1. Difusión y asistencia técnica.
- 2.2. Aplicación del régimen.
- 2.3. Evaluación y auditoría.

Programa 3. Formación profesional para el desarrollo local:

- 3.1. Articulación con las provincias.
- 3.2. Diseño curricular e institucional.
- 3.3. Información, evaluación y certificación.

Programa 4. Educación para el trabajo y la integración social.

Programa 5. Mejoramiento de la enseñanza y del aprendizaje de la Tecnología y de la Ciencia:

- 5.1. Formación continua.
- 5.2. Desarrollo de recursos didácticos.

Programa 6. Desarrollo de sistemas de información y comunicaciones:

- 6.1. Desarrollo de sistemas y redes.
- 6.2. Interactividad de centros.

Programa 7. Secretaría ejecutiva del Consejo Nacional de Educación Trabajo –CoNE-T–.

Programa 8. Cooperación internacional.

Los materiales de capacitación que, en esta ocasión, estamos acercando a la comunidad educativa a través de la serie “Recursos didácticos”, se enmarcan en el Programa 5 del INET, focalizado en el mejoramiento de la enseñanza y del aprendizaje de la Tecnología y de la Ciencia, uno de cuyos propósitos es el de:

- Desarrollar materiales de capacitación destinados, por una parte, a la actualización de los docentes de la educación técnico-profesional, en lo que hace a conocimientos tecnológicos y científicos; y, por otra, a la integración de los recursos didácticos generados a través de ellos, en las aulas y talleres, como equipamiento de apoyo para los procesos de enseñanza y de aprendizaje en el área técnica.

Estos materiales didácticos han sido elaborados por especialistas del Centro Nacional de Educación Tecnológica del INET y por especialistas convocados a través del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo –PNUD– desde su línea “Conocimientos científico-tecnológicos para el desarrollo de equipos e instrumentos”, a quienes esta Dirección expresa su profundo reconocimiento por la tarea encarada.

María Rosa Almandoz

Directora Ejecutiva del Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología

LAS ACCIONES DEL CENTRO NACIONAL DE EDUCACIÓN TECNOLÓGICA

Desde el Centro Nacional de Educación Tecnológica –CeNET– encaramos el diseño, el desarrollo y la implementación de proyectos innovadores para la enseñanza y el aprendizaje en educación técnico-profesional.

El CeNET, así:

- Es un ámbito de desarrollo y evaluación de metodología didáctica, y de actualización de contenidos de la tecnología y de sus sustentos científicos.
- Capacita en el uso de tecnología a docentes, profesionales, técnicos, estudiantes y otras personas de la comunidad.
- Brinda asistencia técnica a autoridades educativas jurisdiccionales y a educadores.
- Articula recursos asociativos, integrando a los actores sociales involucrados con la Educación Tecnológica.

Desde el CeNET venimos trabajando en distintas líneas de acción que convergen en el objetivo de reunir a profesores, a especialistas en Educación Tecnológica y a representantes de la industria y de la empresa, en acciones compartidas que permitan que la educación técnico-profesional se desarrolle en la escuela de un modo sistemático, enriquecedor, profundo... auténticamente formativo, tanto para los alumnos como para los docentes.

Una de nuestras líneas de acción es la de diseñar y llevar adelante un sistema de capaci-

tación continua para profesores de educación técnico-profesional, implementando trayectos de actualización. En el CeNET contamos con quince unidades de gestión de aprendizaje en las que se desarrollan cursos, talleres, pasantías, conferencias, encuentros, destinados a cada educador que desee integrarse en ellos presencialmente o a distancia.

Otra de nuestras líneas de trabajo asume la responsabilidad de generar y participar en redes que vinculan al Centro con organismos e instituciones educativas ocupados en la educación técnico-profesional, y con organismos, instituciones y empresas dedicados a la tecnología en general. Entre estas redes, se encuentra la Red Huitral, que conecta a CeNET con los Centros Regionales de Educación Tecnológica –CeRET– y con las Unidades de Cultura Tecnológica –UCT– instalados en todo el país.

También nos ocupa la tarea de producir materiales de capacitación docente. Desde CeNET hemos desarrollado distintas series de publicaciones –todas ellas disponibles en el espacio web www.inet.edu.ar–:

- *Educación Tecnológica*, que abarca materiales que posibilitan una definición curricular del área de la Tecnología en el ámbito escolar y que incluye marcos teóricos generales, de referencia, acerca del área en su conjunto y de sus contenidos, enfoques, procedimientos y estrategias didácticas más generales.

- *Desarrollo de contenidos*, nuestra segunda serie de publicaciones, que nuclea fascículos de capacitación en los que se profundiza en los campos de problemas y de contenidos de las distintas áreas del conocimiento tecnológico, y que recopila, también, experiencias de capacitación docente desarrolladas en cada una de estas áreas.
- *Educación con tecnologías*, que propicia el uso de tecnologías de la información y de la comunicación como recursos didácticos, en las clases de todas las áreas y espacios curriculares.
- *Educadores en Tecnología*, serie de publicaciones que focaliza el análisis y las propuestas en uno de los constituyentes del proceso didáctico: el profesional que enseña Tecnología, ahondando en los rasgos de su formación, de sus prácticas, de sus procesos de capacitación, de su vinculación con los lineamientos curriculares y con las políticas educativas, de interactividad con sus alumnos, y con sus propios saberes y modos de hacer.
- *Documentos de la escuela técnica*, que difunde los marcos normativos y curriculares que desde el CONET –Consejo Nacional de Educación Técnica– delinearon la educación técnica de nuestro país, entre 1959 y 1995.
- *Ciencias para la Educación Tecnológica*, que presenta contenidos científicos asociados con los distintos campos de la tecnología, los que aportan marcos conceptuales que permiten explicar y fundamentar los problemas de nuestra área.
- *Recursos didácticos*, que presenta contenidos tecnológicos y científicos,

estrategias –curriculares, didácticas y referidas a procedimientos de construcción– que permiten al profesor de la educación técnico-profesional desarrollar, con sus alumnos, un equipamiento específico para integrar en sus clases.

Desde esta última serie de materiales de capacitación, nos proponemos brindar herramientas que permitan a los docentes no sólo integrar y transferir sus saberes y capacidades, sino también, y fundamentalmente, acompañarlos en su búsqueda de soluciones creativas e innovadoras a las problemáticas con las que puedan enfrentarse en el proceso de enseñanza en el área técnica.

En todos los casos, se trata de propuestas de enseñanza basadas en la resolución de problemas, que integran ciencias básicas y tecnología, y que incluyen recursos didácticos apropiados para la educación técnico-profesional.

Los espacios de problemas tecnológicos, las consignas de trabajo, las estrategias de enseñanza, los contenidos involucrados y, finalmente, los recursos didácticos están planteados en la serie de publicaciones que aquí presentamos, como un testimonio de realidad que da cuenta de la potencialidad educativa del modelo de problematización en el campo de la enseñanza y del aprendizaje de la tecnología, que esperamos que resulte de utilidad para los profesores de la educación técnico-profesional de nuestro país.

Juan Manuel Kirschenbaum

Director Nacional del Centro Nacional de Educación Tecnológica.
Instituto Nacional de Educación Tecnológica

LA SERIE “RECURSOS DIDÁCTICOS”

Desde esta serie de publicaciones del Centro Nacional de Educación Tecnológica, nos proponemos:

- Poner a consideración de los educadores un equipamiento didáctico a integrar en los procesos de enseñanza y de aprendizaje del área técnica que coordinan.
- Contribuir a la actualización de los docentes de la educación técnico-profesional, en lo que hace a conocimientos tecnológicos y científicos.

Inicialmente, hemos previsto el desarrollo de veinte publicaciones con las que intentamos abarcar diferentes contenidos de este campo curricular vastísimo que es el de la educación técnico-profesional.

En cada una de estas publicaciones es posible reconocer una estructura didáctica común:

1 Problemas tecnológicos en el aula. En esta primera parte del material se describen situaciones de enseñanza y de aprendizaje del campo de la educación técnico-profesional centradas en la resolución de problemas tecnológicos, y se presenta una propuesta de equipamiento didáctico, pertinente como recurso para resolver esas situaciones tecnológicas y didácticas planteadas.

2 Encuadre teórico para los problemas. En vinculación con los problemas didácticos y tecnológicos que constituyen el punto de partida, se presentan conceptos

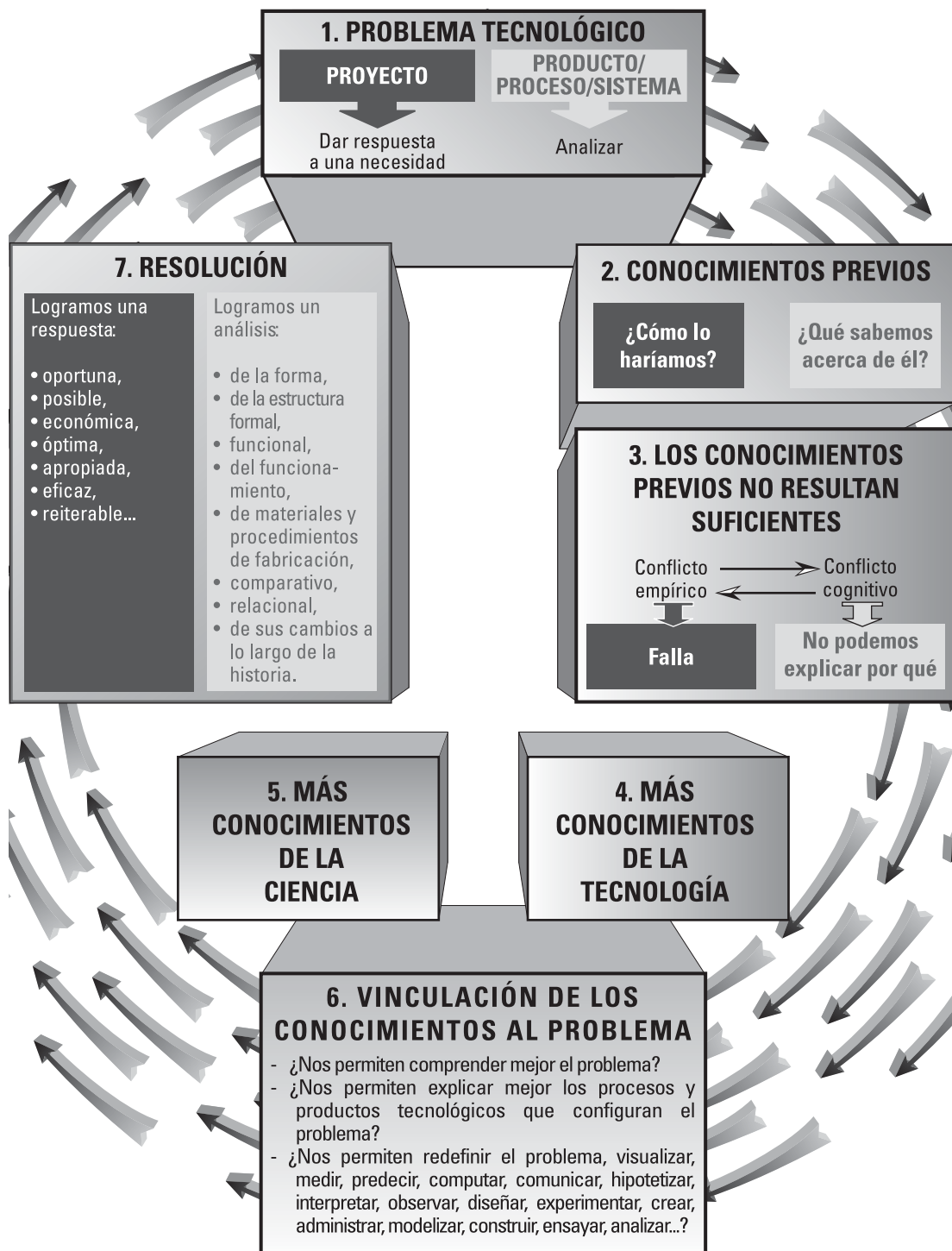
tecnológicos y conceptos científicos asociados.

3 Hacia una resolución técnica. Manual de procedimientos para la construcción y el funcionamiento del equipo. Aquí se describe el equipo terminado y se muestra su esquema de funcionamiento; se presentan todas sus partes, y los materiales, herramientas e instrumentos necesarios para su desarrollo; asimismo, se pauta el “paso a paso” de su construcción, armado, ensayo y control.

4 El equipo en el aula. En esta parte del material escrito, se retoman las situaciones problemáticas iniciales, aportando sugerencias para la inclusión del recurso didáctico construido en las tareas que docente y alumnos concretan en el aula.

5 La puesta en práctica. Este tramo de la publicación plantea la evaluación del material didáctico y de la experiencia de puesta en práctica de las estrategias didácticas sugeridas. Implica una retroalimentación –de resolución voluntaria– de los profesores destinatarios hacia el Centro Nacional de Educación Tecnológica, así como el punto de partida para el diseño de nuevos equipos.

Esta secuencia de cuestiones y de momentos didácticos no es azarosa. Intenta replicar –en una producción escrita– las mismas instancias de trabajo que los profesores de Tecnología ponemos en práctica en nuestras clases:



Es a través de este circuito de trabajo (problema-respuestas iniciales-inclusión teórica-respuestas más eficaces) como enseñamos y como aprenden nuestros alumnos en el área:

- La tarea comienza cuando el profesor presenta a sus alumnos una **situación codificada en la que es posible reconocer un problema tecnológico**; para configurar y resolver este problema, es necesario que el grupo ponga en marcha un proyecto tecnológico, y que encare análisis de productos o de procesos desarrollados por distintos grupos sociales para resolver algún problema análogo. Indudablemente, no se trata de cualquier problema sino de uno que ocasiona obstáculos cognitivos a los alumnos respecto de un aspecto del mundo artificial que el profesor –en su marco curricular de decisiones– ha definido como relevante.
- El proceso de enseñanza y de aprendizaje comienza con el planteamiento de esa situación tecnológica seleccionada por el profesor y con la construcción del espacio-problema por parte de los alumnos, y continúa con la búsqueda de **respuestas**.
- Esta detección y construcción de respuestas no se sustenta sólo en los conocimientos que el grupo dispone sino en la **integración de nuevos contenidos**.
- El enriquecimiento de los modos de “ver” y de encarar la resolución de un problema tecnológico –por la adquisición de nuevos conceptos y de nuevas formas técnicas de intervención en la situación

desencadenante– suele estar **distribuida materialmente** –en equipamiento, en materiales, en herramientas–.

No es lo mismo contar con este equipamiento que prescindir de él.

Por esto, lo que intentamos desde nuestra serie de publicaciones es acercar al profesor distintos recursos didácticos que ayuden a sus alumnos en esta tarea de problematización y de intervención –sustentada teórica y técnicamente– en el mundo tecnológico.

► Caracterizamos como **recurso didáctico** a todo material o componente informático seleccionado por un educador, quien ha evaluado en aquél posibilidades ciertas para actuar como mediador entre un problema de la realidad, un contenido a enseñar y un grupo de alumnos, facilitando procesos de comprensión, análisis, profundización, integración, síntesis, transferencia, producción o evaluación.

Al seleccionar los recursos didácticos que forman parte de nuestra serie de publicaciones, hemos considerado, en primer término, su potencialidad para posibilitar, a los alumnos de la educación técnico-profesional, configurar y resolver distintos problemas tecnológicos.

Y, en segundo término, nos preocupó que cumplieran con determinados rasgos que les permitieran constituirse en medios eficaces del conocimiento y en buenos estructurantes cognitivos, al ser incluidos en un aula por un profesor que los ha evaluado como perti-

nentes. Las cualidades que consideramos fundamentales en cada equipo que promovemos desde nuestra serie de publicaciones "Recursos didácticos", son:

- Modularidad (puede adaptarse a diversos usos).
- Resistencia (puede ser utilizado por los alumnos, sin peligro de romperse con facilidad).
- Seguridad y durabilidad (integrado por materiales no tóxicos ni peligrosos, y durables).
- Adaptabilidad (puede ser utilizado en el taller, aula o laboratorio).
- Acoplabilidad (puede ser unido o combinado con otros recursos didácticos).
- Compatibilidad (todos los componentes, bloques y sistemas permiten ser integrados entre sí).
- Facilidad de armado y desarmado (posibilita pruebas, correcciones e incorporación de nuevas funciones).
- Pertinencia (los componentes, bloques funcionales y sistemas son adecuados para el trabajo con los contenidos curriculares de la educación técnico-profesional).
- Fiabilidad (se pueden realizar las tareas preestablecidas, de la manera esperada).
- Coherencia (en todos los componentes, bloques funcionales o sistemas se siguen las mismas normas y criterios para el armado y utilización).
- Escalabilidad (es posible utilizarlo en proyectos de diferente nivel de com-

plejidad).

- Reutilización (los diversos componentes, bloques o sistemas pueden ser desmontados para volver al estado original).
- Incrementabilidad (posibilidad de ir agregando piezas o completando el equipo en forma progresiva).

Haydeé Noceti

Coordinadora de la acción "Conocimientos científico-tecnológicos para el desarrollo de equipos e instrumentos".
Centro Nacional de Educación Tecnológica



20. Pila de combustible

Este material de capacitación fue desarrollado por:

Mónica Alegría.

Es profesora en Disciplinas Industriales con especialidad en Química (Instituto Nacional Superior del Profesorado Técnico) y licenciada en Tecnología Educativa (Universidad Tecnológica Nacional –UTN–). Es profesora del Instituto Nacional Superior del Profesorado Técnico (UTN), de la Escuela Superior de Comercio Carlos Pellegrini (Universidad de Buenos Aires) y del Profesorado en Docencia Superior con modalidad a Distancia (UTN). Fue profesora de Química en escuelas de enseñanza técnica de la Nación y en escuelas de educación media privadas. Fue profesora de Química de la Facultad de Agronomía (Universidad de Buenos Aires). Es coautora del *Módulo de metodología de la enseñanza de la Química* (Curso de Formación Docente para Profesionales Universitarios. UTN) y de los libros *Química I. Polimodal* (Santillana. 1999. Buenos Aires) y *Química II. Polimodal* (Santillana. 1999. Buenos Aires).

Coordinación general:

Haydeé Noceti

Diseño didáctico:

Ana Rúa

Administración:

Adriana Perrone

Monitoreo y evaluación:

Laura Irurzun

Diseño gráfico:

Tomás Ahumada

Karina Lacava

Alejandro Carlos Mertel

Diseño de tapa:

Laura Lopresti

Juan Manuel Kirschenbaum

Con la colaboración
del equipo de profesionales
del Centro Nacional
de Educación Tecnológica



Índice

Las metas, los programas y las líneas de acción del Instituto Nacional de Educación Tecnológica.....	VIII
Las acciones del Centro Nacional de Educación Tecnológica.....	X
La serie “Recursos didácticos”.....	XII

1 Problemas tecnológicos en el aula.....	4
• El recurso didáctico que proponemos	
2 Encuadre teórico para los problemas.....	7
• La energía. Tipos de energía	
• Los recursos renovables y los recursos agotables	
• La energía solar	
• Un combustible: El hidrógeno	
• La electrólisis	
• Las pilas de combustible y su aplicación como energía renovable	
• La pila de combustible de intercambio protónico –PEM–	
3 Hacia una resolución técnica.	
Manual de procedimientos para la construcción y el funcionamiento del equipo.....	58
• Los componentes	
• Los materiales herramientas e instrumentos	
• La construcción	
• El armado	
• El ensayo y el control	
• La superación de dificultades	
4 El equipo en el aula.....	66
• Un auto con energía limpia	
• Una pila de combustible y una pila voltaica	
5 La puesta en práctica	72

1. PROBLEMAS TECNOLÓGICOS EN EL AULA

Lo invitamos a analizar estos testimonios:

Situación 1

En la clase de *Tecnología*, los alumnos están analizando distintos tipos de pilas y reconstruyendo las características de cada uno, a partir de las hojas de datos técnicos provistas por los fabricantes.

– *Nunca vi una pila de combustible como ésta, profesora. ¿Funciona igual una pila voltaica?*

Situación 2

En uno de los cursos de la Red Nacional de Formación Profesional para el Sector Mecánico Automotor, el instructor y su grupo de cursantes están desarrollando un prototipo de producción de energía limpia, mediante la utilización del agua como combustible, a modo de integración de las nuevas tecnologías del hidrógeno en la industria automotriz.

En este momento, están analizando una tabla comparativa:

Comparación entre vehículos convencionales y vehículos con celdas¹ de combustible²

	Vehículo convencional con motor a combustión interna –CI–	Vehículo con celdas de combustible	
Ambientalmente limpio	No	Sí	La única emisión de hidrógeno en celdas de combustible es agua tibia.
Alto desempeño	Sí	Sí; superan a los vehículos convencionales	Típicamente, los vehículos con celda de combustible son más rápidos fuera de línea y comienzan a demostrar mayor potencia. Por ejemplo: el Focus® de la Ford de CI ofrece 110 Hp; mientras que el auto más nuevo con celdas de combustible® también Ford, tiene una celda de combustible Mark 902 de Ballard con 117 Hp.
Bajo mantenimiento	No	Sí	Al no tener prácticamente partes móviles, estos autos no requieren aceite para lubricación ni para mantenimiento general.
Confiabilidad	No	Sí	Las celdas de combustible han demostrado ser una fuente de poder 99.99 % confiable.

¹ En mucha de la bibliografía en español se usa la denominación “celda de combustible”, como traducción de *fuel cell*. Aún cuando esta denominación es correcta, en este material de capacitación optamos por “pila de combustible”.

² La investigación que incluye esta tabla comparativa es “Beneficio de las celdas de combustible en el transporte”. Fue desarrollada por Fuel Cells 2000. Centro de información en línea en celdas de combustible y está disponible, en su versión completa en: http://www.worldwide.fuelcells.org/sp_base.cgim?template=sp_benefits

Comparación entre vehículos convencionales y vehículos con celdas de combustible

	Vehículo convencional con motor a combustión interna –CI–	Vehículo con celdas de combustible	
Confort	Sí; para los estándares actuales, no para los futuros	Sí	Existen muchas razones por las cuales los vehículos con celda de combustible serán más cómodos: <ul style="list-style-type: none"> - no transmisión para un paseo suave, - bajo ruido, - escape limpio, - más espacio interior, - más potencia a bordo, - mayor libertad de diseño, - tecnología <i>drive-by-wire</i>.
Bajo ruido	No	Sí	Prácticamente, todo el ruido de los vehículos con celdas de combustible proviene del compresor o de los ventiladores.
Alta eficiencia	No	Sí	Los autos con celdas de combustible no están limitados por el ciclo de Carnot ni conexiones mecánicas que resulten en fricción, como los autos de CI.
Libertad de diseño	No	Sí	Todos los componentes de un vehículo con celdas de combustible son eléctricos y están conectados por cables; los vehículos convencionales, en cambio, consisten en componentes mecánicos interconectados. Este hecho permite que los diseñadores ubiquen cualquier componente en cualquier sitio dentro del vehículo, a diferencia de los vehículos que hoy utilizamos.
Potencia a bordo	No; supeditada a la energía almacenada por la batería	Sí	Los vehículos con celda de combustible son, esencialmente, fuentes de poder portátiles. Pueden ser utilizados para alimentar muchos más equipos electrónicos a bordo, que los vehículos convencionales y proveer energía eléctrica a aplicaciones externas al auto (al acampar, obtener créditos de la red eléctrica, etc.).

Durante el diseño constructivo, el grupo discute los materiales con los que va a desarrollar el prototipo: acrílico, cables varios, cubas de electrólisis, reactivos y electrolizadores.

Cuando llega el momento de prever los componentes, se plantea el costo de construir su propia pila tipo PEM, que es la que está siendo utilizada en la industria automotriz.

Uno de los alumnos sugiere que pueden adquirir una pila terminada a bajo costo y completar el prototipo probando la efectividad de la pila PEM reversible que funciona en los automotores, comprobar si realmente se puede utilizar el agua como combustible y utilizar, para la electrólisis, energía producida por un módulo solar.

El grupo evalúa la sugerencia y decide trabajar con la idea de su compañero.

El recurso didáctico que proponemos

Nuestra propuesta didáctica consiste en diseñar y construir un modelo en escala de **pila de combustible**, con el objeto de permitir a nuestros alumnos analizar las operaciones y procesos que tienen lugar en ella.

En una **pila de combustible** se desarrolla una serie de procesos que tienen al hidrógeno como promotor, ya sea generándolo como utilizándolo para la transformación de energía química en energía térmica y eléctrica.

En nuestro recurso didáctico, los procesos modelizados corresponden a una pila PEM –*Protonic Exchange Membrane*– reversible y son:

- Captación de energía solar y su posterior transformación en energía eléctrica mediante un módulo fotovoltaico.
- Electrólisis del agua para la obtención del hidrógeno que, luego, utilizamos como combustible.

En el proceso de la pila de combustible, la electrólisis es sumamente importante porque es la que provee de combustible al sistema.

- Luego de la electrólisis, el hidrógeno y el oxígeno obtenidos vuelven a la pila en donde –por medio del proceso inverso a la electrólisis– se combinan para formar, nuevamente, agua.

En una pila de combustible típica, el combustible hidrógeno en estado

gaseoso es continuamente suministrado al compartimiento del ánodo (-).

Por otro lado, se suministra continuamente oxígeno (el oxidante) en el compartimiento del cátodo (+).

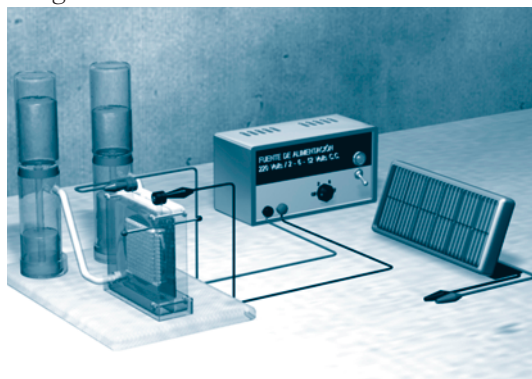
La reacción electroquímica se produce en los electrodos, en los que se da origen a una corriente eléctrica.

La diferencia entre las pilas de combustible radica, específicamente, en el electrolito que éstas utilicen.

En nuestro equipo utilizamos como electrolito una membrana polimérica PEM –*Proton Exchange Membrane*; membrana de intercambio protónico, MIP–. Esta membrana está formada por polímeros fluorocarbonados parecidos al teflón a los que se añaden grupos de ácido sulfónico.

- En la última etapa del proceso, está instalado un pequeño ventilador cuyo funcionamiento nos permite comprobar la efectividad de la pila construida. El ventilador funciona con la energía producida por la pila.

Cada una de estas etapas del proceso de funcionamiento de la pila se encuentra representada en el equipo didáctico que le sugerimos integrar a sus clases.



2. ENCUADRE TEÓRICO PARA LOS PROBLEMAS

La energía. Tipos de energía

El término *energía*³ es pronunciado diariamente por políticos, economistas, físicos, químicos, biólogos y toda persona que, de una u otra

forma, se ha planteado como tarea la de enfrentar la crisis energética y luchar por la conservación de los recursos naturales no renovables.

La energía se encuentra y se manifiesta en la naturaleza de diferentes formas:

- luminosa (luz),
- calorífica (calor),
- eléctrica (electricidad),
- química (manifestada en los cambios químicos),
- mecánica.

Gracias a la energía, el ser humano puede realizar procesos y trabajos que le garantizan la supervivencia a la cabeza de las otras espe-

La **energía** es la capacidad que tiene un cuerpo para realizar un movimiento, un cambio físico o uno químico.

cies animales, y la comodidad y el dominio que ha venido ejerciendo, por largo tiempo, sobre el medio natural.

Cualquier forma de energía se transforma en otra; porque: “La energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”. Este proceso constituye la *Ley de la conservación de la energía*.

La **energía mecánica** es la suma de la energía potencial –almacenada en un cuerpo– y la cinética –que se produce debido a la velocidad o movimiento de un cuerpo–. Por ejemplo, una roca enorme en lo alto de un precipicio posee energía potencial que, al caer, se transforma en energía cinética.

La energía puede transformarse de una forma a otra. Por ejemplo, en una central hidroeléctrica, el movimiento del agua (energía cinética) produce electricidad que se utiliza para encender focos (energía luminosa), generar movimientos en un aparato –como la batidora de nuestra cocina– (energía mecánica) o producir calor en las planchas (energía calorífica).

Casi toda la energía utilizada por el ser humano se ha originado a partir de la radiación solar llegada a la Tierra. Un 96 % de las necesidades energéticas queda satisfecha por la combustión de carburantes fósiles –carbón, petróleo y gas natural–, que representan

³ Para ahondar en la problemática de la energía, le recomendamos consultar otros módulos de capacitación de esta misma serie “Recursos didácticos” desarrollada desde el Instituto Nacional de Educación Tecnológica:

- Gay, Aquiles (2005) *Estufa de laboratorio*. INET. Bs. As.
- Pizarro, Sergio (2005) *Quemador de biomasa*. INET. Bs. As.
- Pizarro, Sergio (2005) *Biodigestor*. INET. Bs. As.

la energía química almacenada biológicamente durante el largo pasado de la Tierra. Ante el riesgo certero de su agotamiento, el hombre debe buscar –cada vez con mayor dedicación– los carburantes nucleares (fusión nuclear y fisión nuclear), la energía de gravitación en las mareas y la energía solar.

● **Energía**

● **Fuentes**

● **Tipos**

Las fuentes de energía son aquéllas que brindan energía como producto original, producen la energía directamente –siempre, cumpliendo con la ley de conservación de la energía–.

Como **fuentes de energía** se pueden mencionar: sol, viento, carbón, petróleo, caídas de agua, desechos orgánicos, átomos, olas del mar, reacciones químicas, sonido, entre otras.

Los **tipos de energía** son aquellos que identifican la forma en que se manifiesta la energía. Entre los distintos tipos de energía se destacan la solar, la atómica o nuclear, la hidráulica, la química, la eléctrica, la eólica, la mecánica (cinética y potencial) y la térmica.

Con respecto a la **energía solar**, cabe señalar que cada punto de la superficie del Sol emite radiaciones electromagnéticas al espacio y que estas radiaciones son tanto luminosas como invisibles. Cuando estas radiaciones llegan a la Tierra, su intensidad ha disminuido en unas 500 mil veces. A pesar de ello, casi toda la energía que se puede aprovechar en la Tierra proviene del Sol.

Gran parte de la **energía eléctrica** con que

cuenta el ser humano se debe a la evaporación del agua producida por el Sol y a su posterior precipitación. Este ciclo natural permite mantener llenos los embalses que producen **energía hidroeléctrica**. Sin embargo, la energía proveniente del agua o **energía hidráulica**, no se emplea solamente en la producción de electricidad; a veces se utiliza, también, para imprimir movimiento a la maquinaria de una fábrica, por medio de una caída o salto de agua, o para mover un molino de agua.

La energía que es absorbida o liberada como resultado de una reacción química, se denomina **energía química**. Los alimentos, las pilas eléctricas y los explosivos contienen este tipo de energía.

La energía del aire se conoce como **energía eólica**. Es un tipo de energía cinética que hace funcionar los molinos de viento, las veletas y los aerogeneradores. Un problema en el uso de la energía eólica reside en el carácter fluctuante de las corrientes de viento, por lo que no se puede asegurar su suministro regular.

La **energía nuclear** es aquella que mantiene unidas las partículas de los núcleos atómicos. Por medio de los procesos de fusión y fisión, se liberan grandes cantidades de energía.

El calor que produce la combustión en las máquinas térmicas de hulla, gas natural, petróleo y otros combustibles, se manifiesta como **energía térmica**.

El calor como tal no se considera un tipo de energía en sí, sino una energía en tránsito; o sea, una energía que pasa de un cuerpo a otro.

FUENTES Y TIPOS DE ENERGÍA

Fuente	Tipo	Se transforma en...	Se manifiesta en forma de...
Sol	Solar	Luminosa y calor	Calor y luz
Viento	Eólica	Mecánica, eléctrica	Movimiento y electricidad
Carbón, petróleo, gas natural	De combustión de fósiles	Luminosa, química, eléctrica y calor	Calor, luz y reacción química
Caídas de agua	Hidráulica	Mecánica (potencial y cinética)	Movimiento
Desechos orgánicos	Biomásica	Lumínica y calor	Calor y luz
Calor de la Tierra	Geotérmica	Eléctrica	Electricidad
Átomos	Nuclear y atómica	Eléctrica	Electricidad
Olas del mar	Marítima	Mecánica	Movimiento
Reacciones químicas	Química	Química, eléctrica y calor	Reacción química y electricidad
Sonido	Sonora	Mecánica y sonora	Movimiento y sonido


Los recursos renovables y los recursos agotables

Existen recursos energéticos como el agua, el Sol y el viento que, al existir en grandes cantidades, difícilmente podrían agotarse. Estos recursos se llaman **renovables**.

Por otra parte, están aquellas fuentes de energía perecedas, como el carbón y el petróleo que, en algún momento, van a acabarse sin que puedan ser renovadas. Estos recursos se denominan **agotables o no renovables**.


Las tecnologías de energía renovable ofrecen beneficios muy importantes, tanto en lo económico como en lo ambiental, debido a que, sin usar combustible fósil, brindan energía en forma de electricidad, fuerza motriz o calor. Como resultado, se evita tanto la emisión de gases del efecto invernadero como la contaminación de la atmósfera. Por lo general, los sistemas de energía renovable presen-

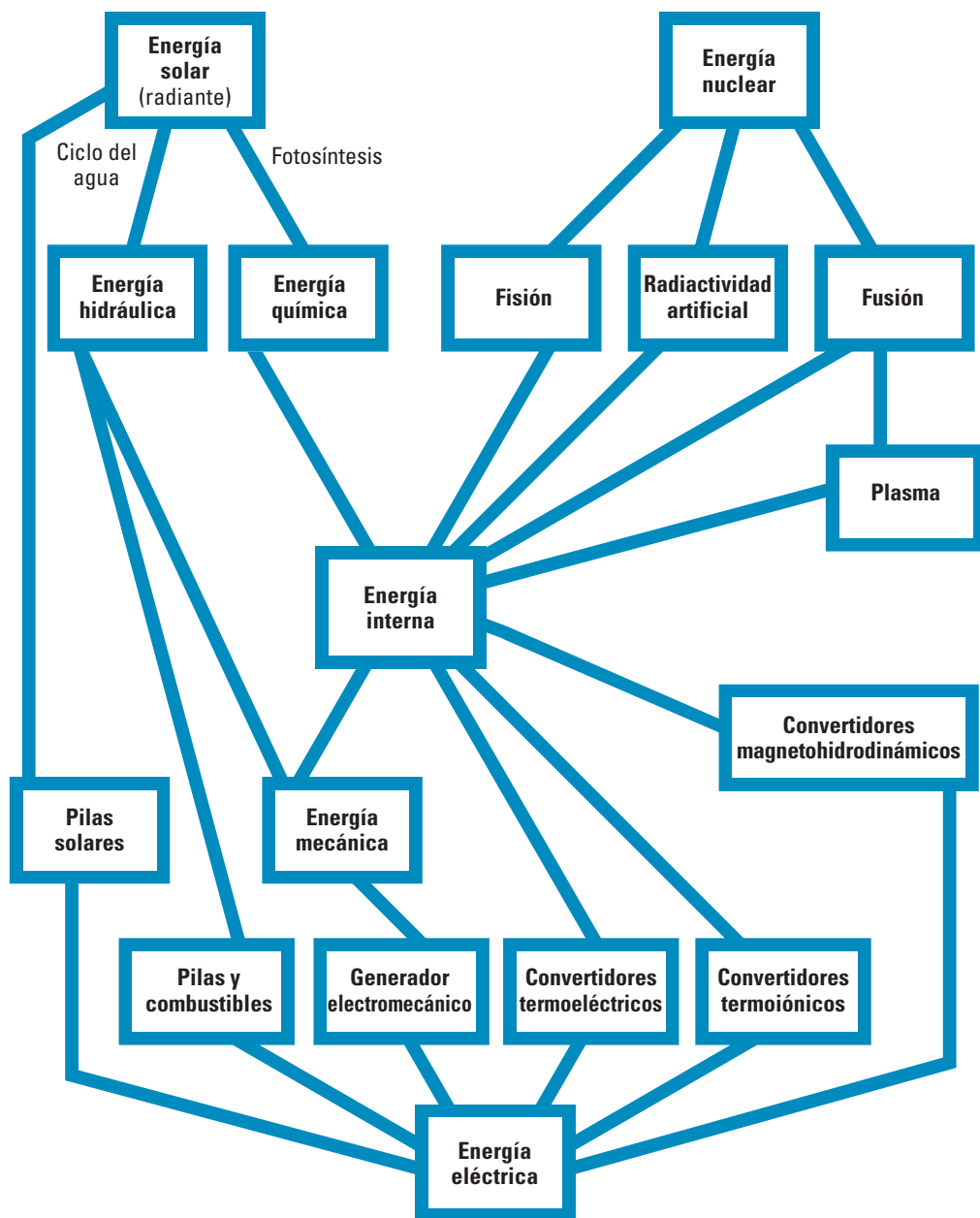
tan costos más bajos en operaciones y mantenimiento, porque su recurso combustible es el sol o el viento. La mayoría funciona con muy poco ruido, en contraste con la contaminación por ruido que se asocia con pequeños generadores de gas y de diesel. En muchos sitios remotos apartados de la red de servicios públicos, los sistemas comerciales de energía renovable presentan el costo de energía más bajo por ciclo de vida.



Nuestra pila de combustible constituye un modelo de la utilización de energías y recursos renovables.

La energía solar fotovoltaica y la utilización del agua –como recurso renovable– aportan el hidrógeno, combustible de nuestra pila.





Una **energía alternativa** es aquella que se busca para suplir a las energías convencionales, en razón de su menor efecto contaminante y de su capacidad de renovarse. El término se gesta, de la mano de científicos y movimientos ecologistas y sociales, con el propósito de proponer un modelo energético emergente al imperante en la actualidad.

La discusión *energía alternativa versus energía convencional* no debe entenderse como una mera clasificación de las fuentes de energía sino como representación de dos modelos energéticos distintos.

El modelo energético alternativo se basa en las siguientes premisas:

- El uso de fuentes de energía renovables, ya que las fuentes fósiles actualmente explotadas, van a terminar agotándose –según los pronósticos actuales, en el transcurso de este siglo XXI–.
- El uso de fuentes limpias, abandonando los procesos de combustión convencionales y la fisión nuclear.
- La explotación extensiva de las fuentes de energía, proponiéndose como alternativa el fomento del autoconsumo que evita, en la medida de lo posible, la construcción de grandes infraestructuras de generación y distribución de energía eléctrica.
- La disminución de la demanda energética, mediante la mejora del rendimiento de los dispositivos eléctricos (electrodomésticos, lámparas, etc.).

Este modelo se enmarca en una estrategia de mayor escala: El desarrollo sostenible.

El actual modelo energético basado en la quema de combustibles fósiles y la energía nuclear es insostenible. La única alternativa posible viene dada por un modelo energético basado en la eficiencia energética y las energías renovables; porque, el sistema energético debe someterse a los límites de la naturaleza, aún cuando la sociedad actual utiliza la energía como si no existiesen límites.

Pero, existen. Hay un límite que no podemos franquear y es la capacidad de la atmósfera para absorber CO₂.

Las investigaciones científicas indican que, aparentemente, la cantidad de dióxido de carbono atmosférico habría permanecido estable durante siglos, en unas 260 ppm (partes por millón). Pero, en los últimos 100 años ha habido un aumento de su concentración en la atmósfera de alrededor de 260 ppm, en 1850, a 364 ppm, en 1998; principalmente, debido a las actividades humanas durante y después de la revolución industrial, que empezó en 1850.

La Organización de las Naciones Unidas –ONU– busca lograr el **desarrollo sostenible**: un mayor desarrollo de los pueblos sin poner en peligro el medio ambiente.

Para ello instaura, en 1972, el Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente –PNUMA–, que se encarga de promover actividades medioambientales y crear conciencia entre la población sobre la importancia de cuidar el medio ambiente.

En esta dirección, usted puede encontrar los convenios marco, y la información referente a la Cumbre de la Tierra y la Energía.

http://www.cinu.org.mx/ninos/html/onu_n5.htm

Este gas ha aumentado en la atmósfera a causa del uso indiscriminado de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y sus derivados). Lo significativo de este cambio es que puede provocar un aumento de la temperatura del planeta.

En esta dirección usted encontrará los datos sobre Proyecto ARG/95/G/31, PNUD –Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo–, SECYT –Secretaría de Ciencia y Técnica de la Nación Argentina–. Allí se detalla el inventario de gases de efecto invernadero en nuestro país, en el convenio marco con el PNUD:

<http://www.medioambiente.gov.ar/documentos/acuerdos/convenciones/unfccc/Inventario.pdf>

Básicamente, le sugerimos analizar los cuadros “Evolución de las emisiones *per cápita* de CO₂ del sistema energético argentino”, “Inventario de gases de efecto invernadero” y “Emisiones *per cápita* de CO₂ 1970–1994”.

En la actualidad, la concentración de CO₂ en la atmósfera es de algo más de 300 ppm; pero, se observa la influencia de las plantas en sus pequeñas oscilaciones: por la noche, al no hacer fotosíntesis las plantas, aumenta ligeramente y lo mismo sucede en el invierno.

Entre 2001 y 2002, los mg/kg de CO₂ pasaron de 371,02 a 373,10 (un alza de 2,08 ppm en un año). Después, progresó hasta 375,64 en 2003 (un alza anual de 2,54 ppm).

Estos datos son registrados en la cima del monte Mauna Loa, en Hawaii, desde 1958, por los servicios de Charles Keeling, científico norteamericano.

El cambio climático es uno de los mayores problemas ambientales de escala global a los que el planeta se está enfrentando. La comunidad internacional ha reaccionado ante el problema asumiendo, como primer paso, compromisos para reducir las emisiones de gases invernadero a través del Protocolo de Kyoto



Situación extrema de contaminación; en este caso, en Moscú

Según el Centro de información de las Naciones Unidas⁴, las actividades humanas han estado contribuyendo al aumento de la temperatura atmosférica, especialmente por la tala inmoderada y por el uso de combustibles fósiles que contribuyen a la acumulación de gases de efecto invernadero –básicamente, dióxido de carbono (CO₂)–.

Con el fin de hacer mayores investigaciones acerca del cambio climático, fue establecido de forma conjunta por el PNUMA y la OMM⁵, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático –IPCC–. Este grupo está constituido por 2.500 científicos y expertos.

⁴ Centro de Información de las Naciones Unidas: www.cinu.org.mx/temas/des_sost/camclim.htm

⁵ La OMM es la Organización Meteorológica Mundial –WMO, en inglés–.

En 1989 el IPCC, predijo que la temperatura mundial habrá aumentado entre 1 y 3,5 grados para el 2100, lo cual es un aumento mayor que el sufrido por la atmósfera desde hace 10.000 años.

Tomando en consideración estas conclusiones y con el fin de evitar el aumento de la temperatura atmosférica, en la Cumbre de Río de 1992 se elaboró y firmó la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” que, hasta diciembre de 2000, había sido ratificada por 186 países. En esta Convención, los países desarrollados -responsables de, aproximadamente, 60 % de las emisiones anuales del dióxido de carbono en el mundo- se comprometieron a reducir, antes de 2010, sus emisiones de gases de efecto invernadero a los niveles que tenían antes de 1990.

A pesar del adelanto que la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” constituía, el *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* determinó que la influencia humana en el clima mundial era perceptible y, aunque se cumpliera cabalmente la meta de la Convención, no se evitaría el aumento de la temperatura atmosférica ni los problemas derivados, por lo que sería necesario pactar nuevas reducciones.

Debido a esto, los países que habían firmado la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” se reunieron, en 1997, en Kyoto, Japón. La reunión dio lugar a un protocolo jurídicamente vinculante, en virtud del cual los países desarrollados deben reducir sus emisiones colectivas de seis gases de efecto invernadero en un

5.2 % entre 2008 y 2012, tomando los niveles de 1990 como base de referencia. Este documento es conocido como **Protocolo de Kyoto**.

Consideremos el artículo 2 del Protocolo de Kyoto, referido a políticas y medidas.

“(…) Con el fin de promover el desarrollo sostenible, cada una de las partes incluidas en el anexo I, al cumplir los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo 3 (...) aplicará y/o seguirá elaborando políticas y medidas de conformidad con sus cir-

Puede usted acceder al protocolo de Kyoto completo en:

<http://www.medioambiente.gov.ar/acuerdos/convenciones/unfccc/ccprokio.htm>

Le sugerimos la lectura de los anexos A y B, en donde va a encontrar los datos de los gases de efecto invernadero, los sectores y las categorías de fuentes:

- Energía: Quema de combustible, emisiones fugitivas de combustibles.
- Procesos industriales, uso de disolventes y de otros productos.
- Agricultura.
- Desechos contaminantes del medio ambiente.
- Listado de países que adquirieron el compromiso cuantificado de limitación o reducción de las emisiones.

También puede acceder al Protocolo de Montreal, desde el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente:

http://www.unep.org/ozone/spanish/Treaties_and_Ratification/2B_montreal_protocol.asp

cunstancias nacionales; por ejemplo, las siguientes:

- i) fomento de la eficiencia energética en los sectores pertinentes de la economía nacional;
- ii) protección y mejora de los sumideros y depósitos de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, teniendo en cuenta sus compromisos en virtud de los acuerdos internacionales pertinentes sobre el medio ambiente, promoción de prácticas sostenibles de gestión forestal, la forestación y la reforestación;
- iii) promoción de modalidades agrícolas sostenibles, a la luz de las consideraciones del cambio climático;
- iv) investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales;
- v) reducción progresiva o eliminación gradual de las deficiencias del mercado, los incentivos fiscales, las exenciones tributarias y arancelarias, y las subvenciones que sean contrarios al objetivo de la Convención en todos los sectores emisores de gases de efecto invernadero y aplicación de instrumentos de mercado;
- vi) fomento de reformas apropiadas en los sectores pertinentes, con el fin de promover políticas y medidas que limiten

o reduzcan las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal;

- vii) medidas para limitar y/o reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal en el sector del transporte;
- viii) limitación y/o reducción de las emisiones de metano, mediante su recuperación y utilización en la gestión de los desechos, así como en la producción, el transporte y la distribución de energía.”

La energía solar

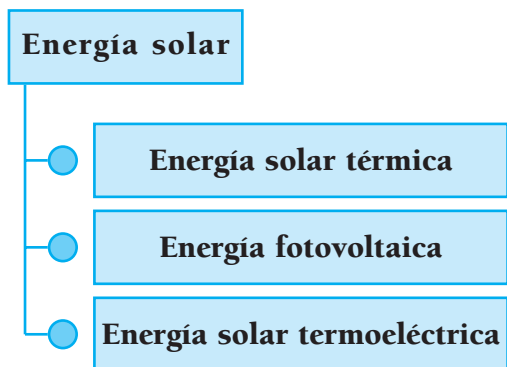
La **energía solar** es la energía obtenida directamente del Sol. La radiación solar incidente en la Tierra puede aprovecharse por su capacidad para calentar directamente, o a través del aprovechamiento de la radiación en dispositivos ópticos o de otro tipo.

- La **radiación directa** es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias.
- La **radiación difusa** es aquella que está presente en la atmósfera gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar de las nubes, y el resto de elementos atmosféricos y terrestres.

La radiación es aprovechable en sus dimensiones directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización; pero, no es posible concentrar la luz difusa, que proviene de todas direcciones.

La potencia de la radiación varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que, en buenas condiciones de irradiación, el valor es superior a los 1000 W/m^2 –1000 vatios por metro cuadrado–, al nivel de la superficie terrestre. Esta potencia se conoce como **irradiancia**.

La irradiancia directa normal (o perpendicular a los rayos solares) fuera de la atmósfera, recibe el nombre de constante solar y tiene un valor medio de 1354 W/m^2 (que corresponde a un valor máximo en el perihelio de 1395 W/m^2 y un valor mínimo en el afelio de 1308 W/m^2).



La **energía solar térmica** consiste en el aprovechamiento de la energía del Sol para producir el calentamiento de agua destinada al consumo doméstico, ya sea agua caliente, sanitaria o calefacción. Adicionalmente, puede emplearse para alimentar una máquina de refrigeración por absorción, que emplea calor en lugar de electricidad para acondicionar el aire.

Básicamente, el funcionamiento de una instalación solar térmica consiste en un circuito cerrado de tuberías (circuito primario) por el que se hace circular agua (con o sin anticon-

gelante) que, al pasar por los colectores solares, se calienta en mayor o menor medida. El agua caliente procedente de los colectores es reconducida a un depósito acumulador, cediendo su calor al circuito de agua de consumo doméstico (circuito secundario). Una vez que ha cedido su calor, el agua fría es bombeada de nuevo hacia los colectores.

Es habitual encontrarse con instalaciones en las que el acumulador contiene una resistencia eléctrica de apoyo, que actúa en caso de que el sistema no sea capaz de alcanzar la temperatura de uso (normalmente, 45°C).

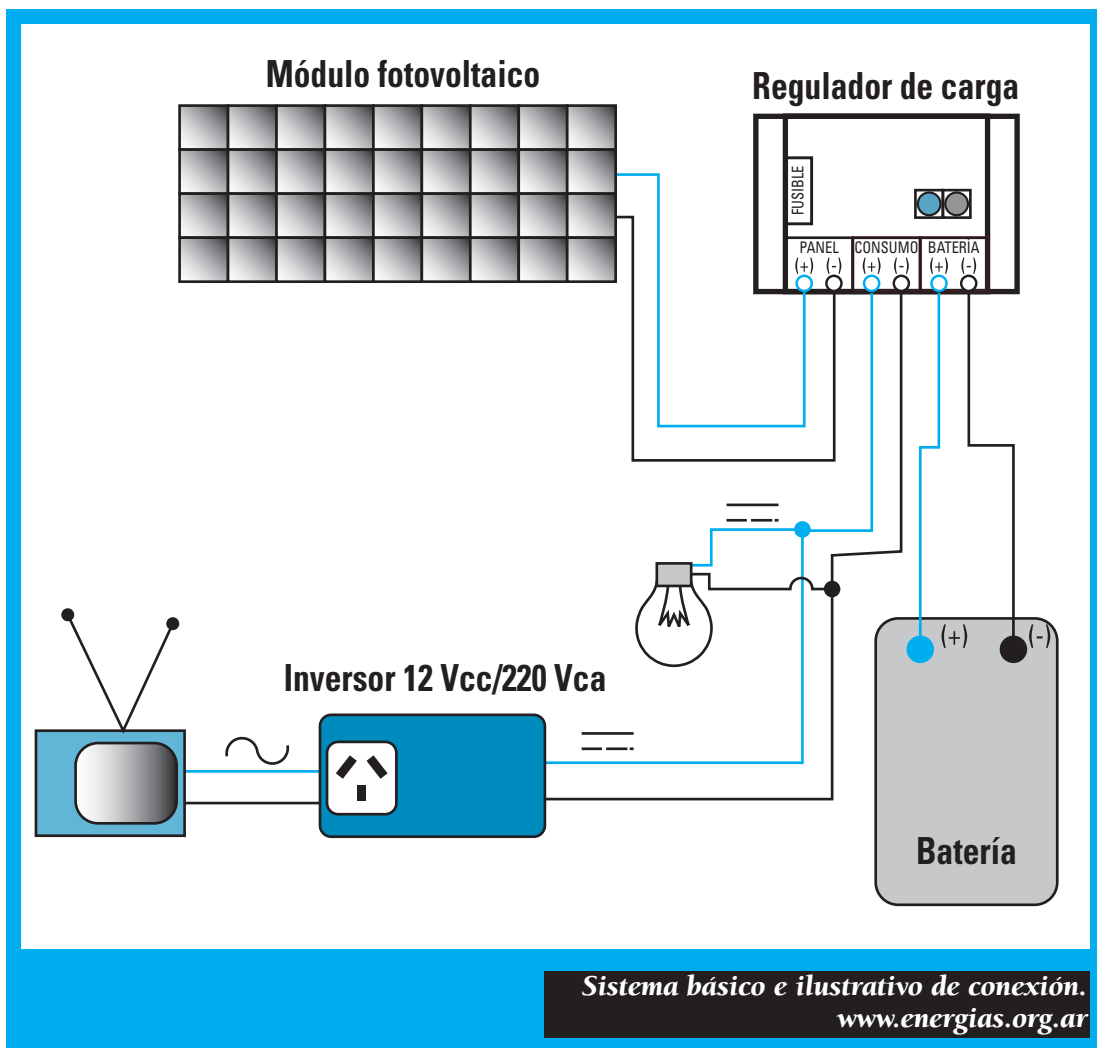
Las características constructivas de los colectores responden a la minimización de las pérdidas de energía, una vez calentado el fluido. Como éste transcurre por los tubos, se requieren aislamientos a la conducción (vacío u otros) y a la reradiación de baja temperatura.

Además de su uso como agua caliente sanitaria, calefacción y refrigeración (mediante máquina de absorción), el uso de placas solares térmicas ha proliferado para el calentamiento de piscinas exteriores residenciales, en países donde la legislación impide el uso de energía de otro tipo para este fin.

La **energía fotovoltaica** permite la obtención de energía a través de dispositivos semiconductores del tipo diodo que, al recibir radiación solar, se excitan, provocan saltos electrónicos y una pequeña diferencia de potencial en sus extremos. El acoplamiento en serie de varios de estos fotodiodos permite la obtención de voltajes mayores en configuraciones muy sencillas y aptas para alimentar pequeños dispositivos electrónicos. A mayor escala, la corriente eléctrica continua que pro-

porcionan las placas fotovoltaicas se puede transformar en corriente alterna e inyectar en la red, operación que es poco rentable económicamente y que precisa todavía de subvenciones para su viabilidad. En entornos aislados en los que se requiere poca corriente eléctrica y el acceso a la red está penalizado económicamente por la distancia –estaciones meteorológicas o repetidores de comunicaciones–, se emplean las placas fotovoltaicas como alternativa económicamente viable.

Alemania es, en la actualidad, el segundo productor mundial de energía solar fotovoltaica tras Japón, con cerca de 5 millones de metros cuadrados de colectores de sol –porcentaje que sólo representa el 0,03 % de su producción energética total–. Las ventas de paneles fotovoltaicos han crecido en el mundo al ritmo anual del 20 % en la década de los noventa. En la Unión Europea, el crecimiento medio anual es del 30 %.



La mayor central de energía solar del mundo se inauguró el 9 de septiembre de 2004 en la ciudad de Espenhain, cerca de Leipzig, Alemania. Con 33.500 paneles solares modulares monocristalinos y una capacidad de producción de 5 megavatios, la central abastecerá a 1.800 hogares. La inversión ascendió a 20 millones de euros, según *Shell Solar* y *Geosol*, las firmas constructoras.

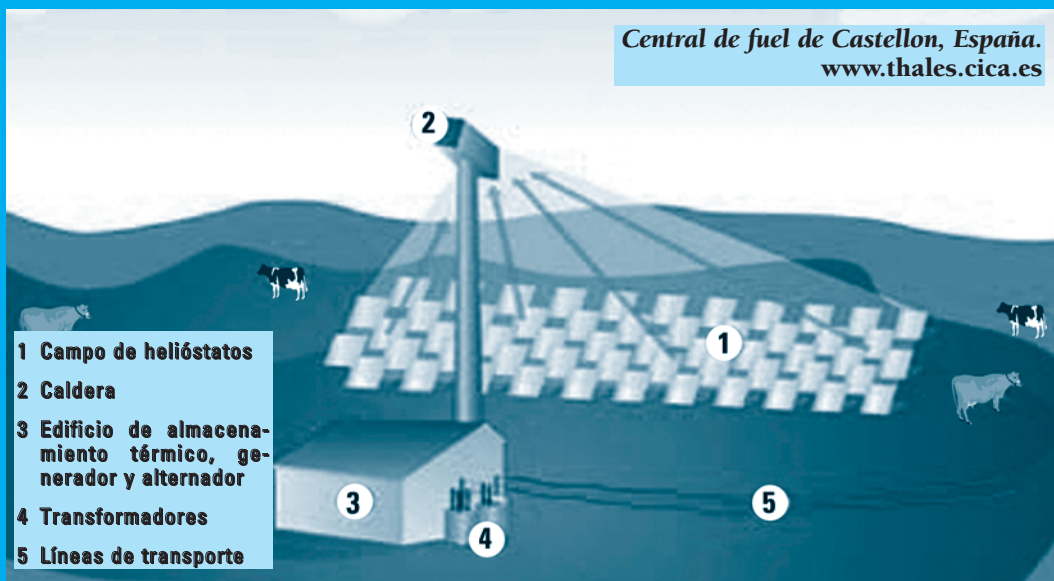
En este sitio, usted encontrará información adicional acerca de la utilización y la legislación de la energía solar fotovoltaica:
<http://archivo.greenpeace.org/GuiaSolar/S-home.htm>

Centrémonos, ahora, en la **energía solar termoeléctrica**. Una central térmica solar es una instalación industrial en la que, a partir del calentamiento de un fluido mediante radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, se produce la potencia necesaria para mover un alternador que genera electricidad, como en una central térmica clásica.

Constructivamente, es necesario concentrar la radiación solar para que se puedan alcanzar temperaturas elevadas, de 300 °C hasta 1000 °C y obtener, así, un rendimiento aceptable en el ciclo termodinámico, que no se podría obtener con temperaturas más bajas. La captación y la concentración de los rayos solares

se hacen por medio de espejos con orientación automática, que apuntan a una torre central donde se calienta el fluido, o con mecanismos más pequeños de geometría parabólica. El conjunto de la superficie reflectante y su dispositivo de orientación se denomina heliostato.

Central de fuel de Castellon, España.
www.thales.cica.es



Los fluidos y ciclos termodinámicos escogidos en las configuraciones experimentales que se han ensayado, así como los motores que implican, son variados y van desde el ciclo Rankine (centrales nucleares, térmicas de carbón) hasta el ciclo Brayton (centrales de gas natural), pasando por muchas otras variedades como el motor de Stirling. En la actualidad, la tecnología sigue en fase experimental, y existen dudas sobre su futura viabilidad técnica y económica.

Detengámonos en el estudio de un **ciclo**.

En la termodinámica⁶ se analizan, especialmente, los sistemas termoelásticos, llamados así porque efectúan cambios de calor con el medio exterior que los rodea y experimentan variaciones de volumen por efecto de las modificaciones de su presión o de su temperatura; son sistemas termoelásticos, los gases y los vapores encerrados en un recinto cualquiera. Cuando alguna de las propiedades de estos sistemas sufre un cambio continuo, experimenta una transformación. Si el estado final del sistema es distinto al del estado inicial, se ha producido una transformación abierta. Si, en cambio, al final de la transformación, el estado del sistema coincide con el estado inicial, es decir si todas las propiedades han retomado el valor inicial, se dice que el sistema ha recorrido una transformación cíclica, es decir ha efectuado un ciclo. Por lo general, los ciclos se desarrollan periódica y

repetidamente.

Toda máquina térmica que funciona a ciclos comprende los siguientes elementos esenciales:

1. un **fluido** que evoluciona experimentando cambios de estado y recibiendo calor, y realizando trabajo; o viceversa;
2. una **fente calórica** (el foco caliente) llamada también depósito de calor, dentro del cual se agrega calor al fluido que evoluciona y trabaja;
3. un **receptor** (el foco frío) llamado también sumidero, donde el fluido entrega calor; generalmente, es la atmósfera o un río, lago o mar; y
4. un **motor o máquina** en el cual el fluido puede realizar trabajo (si recibe calor) o recibir trabajo (cuando entrega calor).

El estudio teórico de los ciclos se efectúa considerando al aire como el fluido que evoluciona, con calor específico constante y cumpliendo las leyes de los gases perfectos. Tal ciclo hipotético se denomina **ciclo ideal o ciclo reversible**.

En el análisis de un ciclo cualquiera, hay interés particular en determinar:

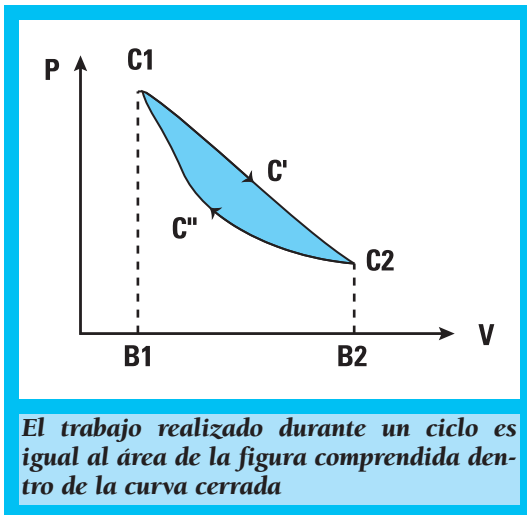
- la cantidad de calor suministrada y la cantidad de calor cedida,
- el trabajo neto,
- el rendimiento,
- la presión media efectiva, la cual se obtiene con la altura de un rectángulo cuya área es igual al área encerrada en el

⁶ Termodinámica:

a) Rama de la física que se ocupa del trabajo mecánico producido por cualquier máquina térmica.

b) La capacidad que cualquier máquina térmica tiene para convertir en trabajo mecánico la energía interna de cualquier combustible.

ciclo; y cuya longitud es igual al volumen de desplazamiento, es decir, al volumen barrido por el émbolo durante una carrera.



En lo que respecta a la energía solar termoelectrónica, hemos mencionado los ciclos Rankine y Brayton. Ambos ciclos se aplican en las máquinas a vapor y en las centrales de gas natural, respectivamente.

En el **ciclo Brayton**, la combustión de los gases se produce a presión constante. Si se trabaja a cielo abierto, los residuos se expulsan a la atmósfera; y, si es cerrado, los productos de la combustión pasan por un intercambiador o regenerador que aprovecha el calor de los gases de la combustión para calentar el aire comprimido que ingresa a la cámara de combustión.

El ciclo Brayton está compuesto por las siguientes transformaciones:

- compresión isoentrópica (adiabática) del aire, realizada dentro del compresor;

- suministro del calor a presión constante, en la cámara de combustión;
- expansión isoentrópica de los gases de la combustión dentro de la turbina;
- entrega de calor a presión constante, es decir el enfriamiento de los gases de la combustión hasta llegar al estado inicial (a), reiniciándose el ciclo.

En cuanto al **ciclo Rankine** es aplicable a una máquina a vapor con condensador. Durante el funcionamiento real de una central de vapor hay varios procesos que dificultan el análisis exacto del problema; éstos son: la aceleración y la turbulencia producidas por la diferencia de presión necesaria para hacer fluir el vapor de una parte a otra de la máquina, los rozamientos, la conducción del vapor a través de las paredes y la transferencia irreversible de calor debida a la diferencia de temperatura entre el hogar y la caldera.

Para resolver el problema, se introducen algunas hipótesis mediante el **ciclo ideal Rankine** en el cual todos los procesos son reversibles, eliminándose las complicaciones mencionadas.

El ciclo comprende:

- la compresión adiabática del agua, hasta la presión necesaria en la caldera. En este proceso, sólo se produce una variación muy pequeña de temperatura.
- El calentamiento isobárico del agua hasta el punto de ebullición.
- La vaporización isotérmica e isobárica del agua, para convertirse en vapor saturante.

- d. El sobrecalentamiento isobárico del vapor, hasta convertirse en vapor sobrecalentado a una determinada temperatura.
- e. La expansión adiabática del vapor, hasta lograr la temperatura deseada.
- f. La condensación isotérmica e isobárica del vapor, hasta transformarse en agua saturada
- g. El ciclo tiene cambios, dependiendo de si la máquina tiene o no recalentador.

Un combustible: El hidrógeno

En un principio, el hidrógeno no se distinguió de otros gases, hasta que el químico británico Henry Cavendish demuestra, en 1766, que se forma en la reacción del ácido sulfúrico con los metales y, más tarde, descubre que el hidrógeno es un elemento independiente que se combina con el oxígeno para formar agua. El químico británico Joseph Priestley lo llama “aire inflamable”, en 1781; y el químico francés Antoine Laurent de Lavoisier le da, finalmente, el nombre de hidrógeno.

En la tabla periódica no hay una posición totalmente adecuada para el hidrógeno. Se parece a los metales alcalinos en que tiene su CEE (configuración electrónica externa) un solo electrón en el subnivel s y en que forma el ion H^+ , el cual es hidratado en solución, similar, por ejemplo a los iones Na^+ (ac).

En otro orden, el hidrógeno forma también iones hidruro (H^-), los cuales son muy reactivos para existir en agua; pero, existen en algunos compuestos iónicos.

NOMBRE	HIDRÓGENO
Número atómico	1
Estado de oxidación	+1
Electronegatividad	2,1
Radio covalente (Å)	0,37
Radio iónico (Å)	2,08
Presión crítica (bar)	12,98
Configuración electrónica	$1s^1$
Densidad del gas (15 °C, 1 atm) (kg/m ³)	0,0899
Masa molar (g/mol)	2,016
Densidad del líquido (kg/m ³)	70,973
Punto de ebullición (°C) y 1 atm	-252,766
Punto de fusión (°C) 1 atm	-259,2

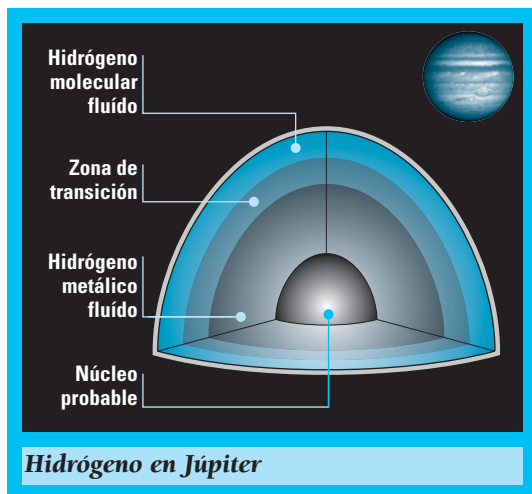
En condiciones normales, es un gas incoloro, inodoro e insípido, compuesto de moléculas biatómicas H_2 .

Por más de un siglo, el hidrógeno se ha considerado como un combustible conveniente y limpio. Puesto que se obtiene de una diversa gama de fuentes domésticas, el hidrógeno puede reducir los costos económicos, políticos y ambientales de los sistemas de energía; y, producto de fuentes renovables, ofrece un potencial de energía sostenible.

El hidrógeno es un portador de energía —como la electricidad— y puede producirse a partir de una amplia variedad de fuentes tales como: el gas natural, el carbón, la biomasa, el agua, etc., así como de las aguas negras, de los residuos sólidos, de las llantas y de los desechos de petróleo.

El átomo de hidrógeno, símbolo H, consta de un núcleo de unidad de carga positiva y un solo electrón. Tiene número atómico 1 y masa atómica de 1.00797. Es uno de los constituyentes principales del agua y de toda la materia orgánica, y está distribuido de manera amplia no sólo en la Tierra sino en todo el universo. Existen 3 isótopos del hidrógeno: el protio, de número másico 1, que representa más del 99.98 % del elemento natural; el deuterio, de número másico 2, que se encuentra en la naturaleza, aproximadamente en un 0.02 %; y, el tritio, de número másico 3, que aparece en pequeñas cantidades en la naturaleza, pero que puede producirse artificialmente por medio de varias reacciones nucleares.

El hidrógeno en estado libre sólo se encuentra en muy pequeñas cantidades en la atmósfera; aunque, en el espacio interestelar, abunda en el Sol y otras estrellas; es, de hecho, el elemento más común en el Universo, constituyendo el 70 % de su masa total. En combinación con otros elementos, se encuentra ampliamente distribuido en la Tierra, siendo el tercer elemento en abundancia.



El compuesto más abundante e importante del hidrógeno es el agua, H_2O .

El hidrógeno se halla en todos los componentes de la materia viva y de muchos minerales. También es parte esencial de todos los hidrocarburos y de una gran variedad de otras sustancias orgánicas. Todos los ácidos contienen hidrógeno; una de las características que define a los ácidos es su disociación en una disolución, produciendo iones hidrógeno.

El hidrógeno reacciona con una gran variedad de elementos no metálicos. Se combina con nitrógeno –en presencia de un catalizador– formando amoníaco; con azufre, formando sulfuro de hidrógeno; con cloro, formando cloruro de hidrógeno; y, con oxígeno, para formar agua. Para que se produzca la reacción entre oxígeno e hidrógeno a temperatura ambiente, se necesita la presencia de un catalizador como el platino finamente dividido. Si se mezcla con aire u oxígeno y se prende, explota. También se combina con ciertos metales como sodio y litio, formando hidruros. Actúa como agente reductor de óxidos metálicos como el óxido de cobre, extrayendo el oxígeno y dejando el metal en estado puro. El hidrógeno reacciona con compuestos orgánicos insaturados, formando los compuestos saturados correspondientes. Grandes cantidades de hidrógeno se emplean como combustible de cohetes, en combinación con oxígeno o flúor, y como un propulsor de cohetes impulsados por energía nuclear.

Se obtiene en el laboratorio por la acción de ácidos diluidos sobre los metales –como el cinc– y por electrólisis del agua. Industrial-

mente, se producen grandes cantidades de hidrógeno a partir de los combustibles gaseosos.

El hidrógeno se separa del vapor de agua, del gas natural y del gas de hulla, bien por licuación de los demás componentes del gas, bien por conversión catalítica del monóxido de carbono en dióxido de carbono, que resulta fácilmente extraíble.

La hidrogenación de aceites para producir grasas comestibles, la de la hulla para producir petróleo sintético y la que tiene lugar en el refinado del petróleo, requieren grandes cantidades de hidrógeno.

Es el gas menos denso que existe, y se ha utilizado para inflar globos y dirigibles.



El Hindenburg y otros dirigibles

El hidrógeno es la sustancia más inflamable de todas las que se conocen. El hidrógeno es

un poco más soluble en disolventes orgánicos que en el agua.

Muchos metales absorben hidrógeno. La adsorción del hidrógeno en el acero puede volverlo quebradizo, lo que lleva a fallas en el equipo para procesos químicos.

A temperaturas ordinarias, el hidrógeno es una sustancia poco reactiva, a menos que haya sido activado de alguna manera; por ejemplo, por un catalizador adecuado. A temperaturas elevadas, es muy reactivo.

Aunque, por lo general, es biatómico, el hidrógeno molecular se disocia a temperaturas elevadas en átomos libres. El hidrógeno atómico es un agente reductor poderoso, aún a la temperatura ambiente. Reacciona con los óxidos y los cloruros de muchos metales, entre ellos la plata, el cobre, el plomo, el bismuto y el mercurio, para producir los metales libres. Reduce a su estado metálico algunas sales, como los nitratos, nitritos y cianuros de sodio y potasio. Reacciona con cierto número de elementos, tanto metales como no metales, para producir hidruros, como el NaH , KH , H_2S y PH_3 . El hidrógeno atómico produce peróxido de hidrógeno, H_2O_2 , con oxígeno. Con compuestos orgánicos, el hidrógeno atómico reacciona para generar una mezcla compleja de productos; con etileno, C_2H_4 , por ejemplo, los productos son: etano, C_2H_6 , y butano, C_4H_{10} .

El calor que se libera cuando los átomos de hidrógeno se recombinan para formar las moléculas de hidrógeno, se aprovecha para obtener temperaturas muy elevadas en soldadura de hidrógeno atómico.

LOS NÚMEROS DEL HIDRÓGENO

Densidad

0,0899 g/cm³ (gas)
0,0708 kg/l (liquido)

Poder calorífico inferior

120 MJ/kg

Poder calorífico superior

141,86 MJ/kg

Límites de explosión

4,0 - 75,0 %
(concentración de H₂ en aire)

Límites de detonación

18,3 - 59,0 %
(concentración de H₂ en aire)

Coefficiente de difusión

0,61 cm²/s

Factor de compresibilidad

De acuerdo con la siguiente tabla

Calor específico a presión constante

$C_p = 14,199 \text{ J (kg.K)}$

Calor específico a volumen constante

$C_v = 10,074 \text{ J (kg.K)}$

EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL FACTOR DE COMPRESIBILIDAD:

1 botella (las convencionales) de 50 litros a 200 bar de hidrógeno contiene a 0 °C:
 $0,050 \text{ m}^3 \cdot 200 \text{ bar} / 1,132 = 8,834 \text{ Nm}^3$

Presión (bar)	1	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800	900	1000
Factor de compresión	1	1,032	1,065	1,089	1,132	1,166	1,201	1,236	1,272	1,344	1,416	1,489	1,560	1,632	1,702

EQUIVALENCIAS HIDRÓGENO-ENERGÍA

Masa H ₂ (kg)		H ₂ gas (Nm ³)		H ₂ líquido* (litros)		Energía** (MJ)		Energía** (kW·h)
1	=	11,12	=	14,12	=	120	=	33,33
0,0899	=	1	=	1,270	=	10,8	=	3,00
0,0708	=	0,788	=	1	=	8,495	=	2,359
0,00833	=	0,0926	=	0,1177	=	1	=	0,278
0,0300	=	0,333	=	0,424	=	3,6	=	1

* El hidrógeno es líquido a presión atmosférica por debajo de 20,39 K.

** Basado en poder calorífico inferior.

CAUDAL DE HIDRÓGENO - POTENCIA ELÉCTRICA

kg/h de H ₂		Nm ³ /h de H ₂ gas		Litros/h de H ₂ líquido *		Potencia** (kW)
1	=	11,12	=	14,12	=	33,33
0,0899	=	1	=	1,270	=	3,00
0,0708	=	0,788	=	1	=	2,359
0,00833	=	0,0926	=	0,1177	=	0,278
0,0300	=	0,333	=	0,424	=	1

* El hidrógeno es líquido a presión atmosférica por debajo de 20,39 K.

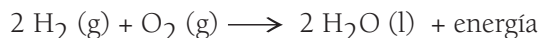
** Basado en poder calorífico inferior.

Consideremos algunos ejemplos:

- Un electrolizador con un rendimiento del 85 % que produce 10 Nm³ por hora, tiene un consumo eléctrico de 35,29 kW $\left(\frac{10,3,00}{0,85}\right)$, y consume 8,091 kg de agua por hora, $\left(10,0,0899 \cdot \frac{18}{2}\right)$.
- Una pila de combustible de 10 kW que tiene un rendimiento global del 45 %, consume 7,40 Nm³ por hora de H₂, $\left(\frac{10,0,333}{0,45}\right)$ o 0,667 kg/hora de H₂, $\left(\frac{10,0,033}{0,45}\right)$, y produce 6,00 kg de agua a la hora, $\left(0,667 \cdot \frac{18}{2}\right)$.

El hidrógeno reacciona con oxígeno para formar agua. Esta reacción es extraordinariamente lenta a temperatura ambiente; pero, si la acelera un catalizador como el platino o una chispa eléctrica, se realiza con violencia explosiva.

La ecuación que representa la reacción es:



Al analizar cambios de energía de este tipo, se puede considerar a la mezcla reaccionante (moléculas de hidrógeno, oxígeno y agua) como el sistema y al resto como el entorno.

Comparación entre el hidrógeno y otros combustibles

–Valor energético basado en poder calorífico inferior–

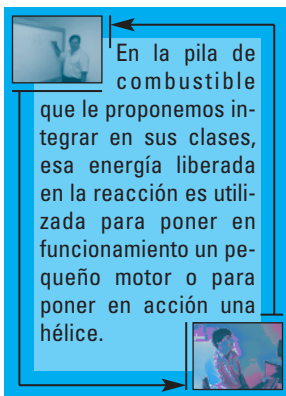
1 kg de H₂ ↔ 2,78 kg de nafta ↔ 2,80 kg de gasoil ↔ 2,40 kg de metano entre ↔ 2,54 y 3,14 kg de gas natural (dependiendo de la composición del GN) ↔ 2,59 kg de propano ↔ 2,62 kg de butano ↔ 6,09 kg de metanol.

1 litro de H₂ líquido ↔ 0,268 litros de gasolina ↔ 0,236 litros de gasóleo ↔ 0,431 litros de metanol.

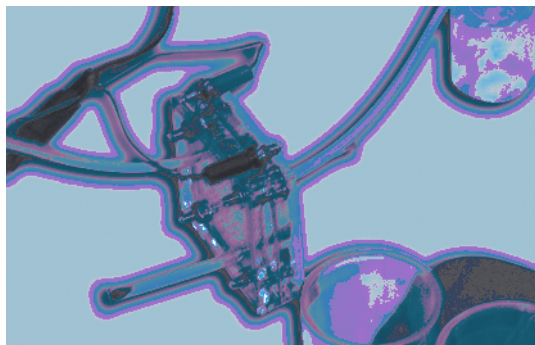
1 litro de H₂ (a 350 bar) ↔ 0,0965 litros de nafta ↔ 0,0850 litros de gasoil ↔ 0,240 litros de metano (a 350 bar) ↔ entre 0,3 y 0,35 litros de gas natural (a 350 bar) ↔ 0,117 litros de propano (a 350 bar) ↔ 0,127 litros de butano (a 350 bar) ↔ 0,191 litros de metanol.

Dado que la energía no se puede crear ni destruir, cualquier pérdida de energía del sistema es de ganancia del entorno.

Así, el calor generado por el proceso de combustión se transfiere del sistema al entorno. Cualquier proceso que cede calor (esto es, que transfiere energía térmica a su entorno) se denomina **proceso exotérmico**.



Con nitrógeno, el hidrógeno experimenta una importante reacción para dar amoníaco. El hidrógeno reacciona a temperaturas elevadas con cierto número de metales y produce hidruros. Los óxidos de muchos metales son reducidos por el hidrógeno a temperaturas elevadas, para obtener el metal libre o un óxido más bajo. El hidrógeno reacciona a temperatura ambiente con las sales de los metales menos electropositivos y los reduce a su estado metálico. En presencia de un catalizador adecuado, el hidrógeno reacciona con compuestos orgánicos no saturados, adicionándose al enlace doble.



Un combustible: El hidrógeno

Hidrógeno solar

Obtención térmica

Descomposición directa

Proceso termoquímico

Obtención eléctrica —electrolíticamente—

Obtención directa

biofotólisis

fotólisis

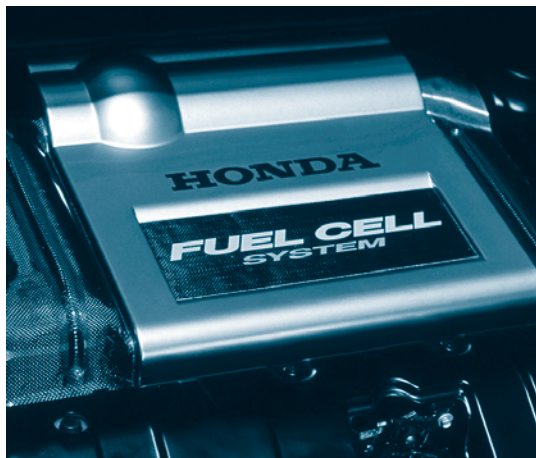
Almacenamiento del hidrógeno

Generación de energía a partir del hidrógeno

Hidrógeno solar

En general, el almacenamiento del hidrógeno en baterías es adecuado para valores de potencia almacenada relativamente pequeños. Para poder lograr sistemas autónomos descentralizados, no obstante, se necesita almacenar cantidades superiores de energía.

El *Hydrociclo®* es un concepto de bicicleta de pila de combustible, desarrollado por *Manhattan Scientifics*; en él, el combustible hidrógeno es almacenado en un contenedor a presión, de fibras de carbón de 2 litros, ubicado atrás del asiento. La bicicleta, desarrollada para competir con las bicicletas actuales de baterías, tiene una autonomía de 70 a 100 kilómetros y una velocidad máxima de 30 kilómetros por hora.



El almacenamiento de hidrógeno se tiene en la perspectiva como el más promisorio, por ofrecer muchas ventajas:

- Se obtiene por descomposición del agua, que es abundante y asequible.
- No influye en el medio ambiente y, cuando cede la energía almacenada, sólo genera, de nuevo, agua. O sea, es limpio y renovable.

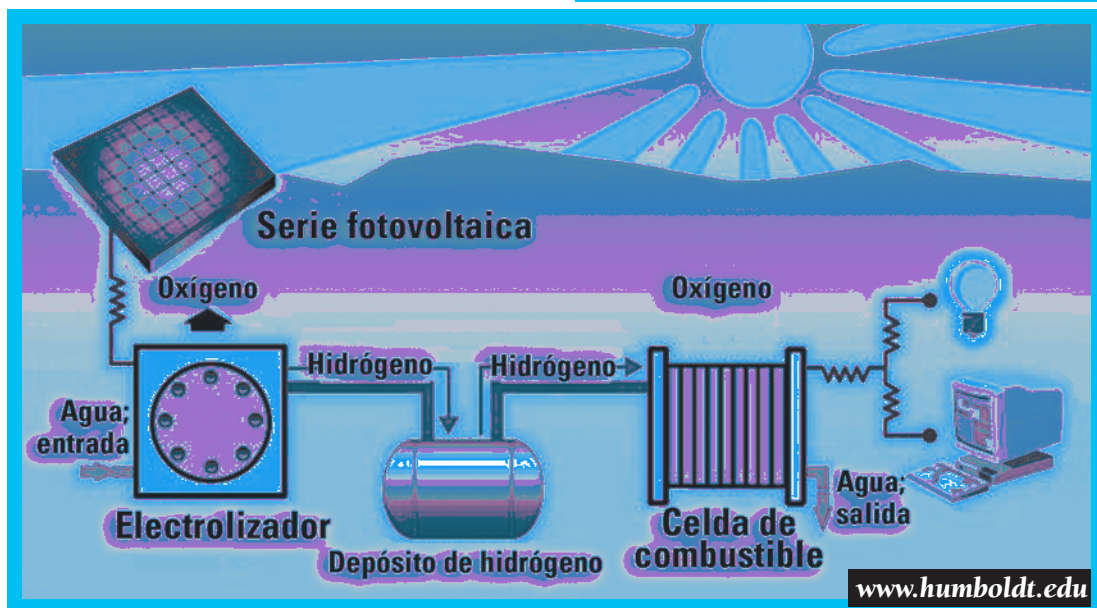
- Es adecuado para el uso doméstico e industrial.
- Se transporta y almacena con pocas pérdidas.

El ciclo del hidrógeno solar comprende:

- La obtención de hidrógeno utilizando energía solar (fotovoltaica u otra).
- El almacenamiento de esta energía (que, desde luego, también puede utilizarse directamente).
- La distribución o transportación del H_2 (la que es de menor peso relativo en aquel ámbito en el que se tiene abundante sol y se puede descentralizar el sistema energético).
- La reconversión a otro tipo de energía útil (ya sea eléctrica o calor, en distintas formas).

En el sitio web de la *Asociación española del hidrógeno*, usted puede encontrar información sobre uso energético del hidrógeno:

<http://aeh2.org/ponencias/pres03.pdf>



El hidrógeno puede obtenerse de energía térmica, eléctrica (electrolíticamente) o directamente.

Para la obtención de hidrógeno del agua **utilizando energía solar térmica**, pueden emplearse la descomposición directa y el proceso termoquímico:

- **Descomposición directa.** Se necesita del desarrollo de materiales que puedan soportar más de 2000 °C de temperatura, para disociar la molécula de agua por calor.
- **Proceso termoquímico.** Puede usarse la descomposición termoquímica; se buscan, entonces, materiales reciclables eficientes y que puedan soportar muchos ciclos de oxidación-reducción. Por ejemplo, el vapor de agua a alta temperatura se hace circular a través de polvo de hierro; éste se oxida tomando el oxígeno del vapor y el hidrógeno queda libre. Es necesario que el óxido de hierro pueda reducirse nuevamente, para repetir el ciclo.

La instrumentación práctica de estas posibilidades es lejana aún.

Decíamos que también es posible la obtención de hidrógeno **utilizando electricidad**. La electricidad para la electrólisis puede obtenerse por diversas vías, a partir de la energía solar, con la conversión térmica, la energía eólica, la hidroenergía y otras fuentes renovables.

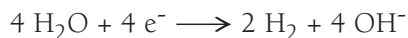
Para convertir la energía eléctrica en hidróge-

no se necesitan los electrolizadores, que son equipos modulares cuya unidad es la celda electrolítica (un vaso). El escalado de sistemas modulares, o sea, de aquellos donde se logra una mayor potencia incorporando un número mayor de unidades, es más simple y constituye un factor importante.

En cada pila, los elementos constituyentes son los electrodos y el electrolito. Las reacciones que se producen en uno y otro electrodo son las siguientes.

- Reacciones en la electrólisis en medio básico (alcalina):

En el cátodo (Reducción):

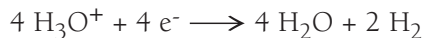


En el ánodo (Oxidación):



- Reacciones en la electrólisis en medio ácido (ácida):

En el cátodo (Reducción):



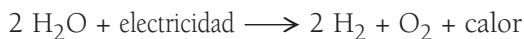
En el ánodo (Oxidación):



Como se puede observar, en una y otra electrólisis, el hidrógeno se desprende en el cátodo y el oxígeno en el ánodo; se invierte, así, la formación de agua que ocurre en el ánodo,

en la alcalina, y en el cátodo, en la ácida.

En ambos casos, ocurre la reacción neta:



Los electrolizadores ácidos trabajan en condiciones más agresivas y corrosivas para el cátodo, donde se desprende hidrógeno, que los alcalinos⁷.



En la pila de combustible que proponemos como recurso didáctico, el hidrógeno se obtiene mediante electrólisis del agua desionizada, utilizando un polímero similar al teflón como electrolito.

La relación entre los componentes de esta pila es similar a la secuencia del hidrógeno solar: En nuestro modelo, un panel fotovoltaico transforma la energía solar en energía eléctrica. Esta energía eléctrica hace funcionar el electrolizador y permite la producción de hidrógeno y oxígeno por electrólisis del agua desionizada. Los productos de la electrólisis se introducen en la PEM –Protonic Exchange Membran–; allí, se produce el proceso inverso de la electrólisis; entonces, el sistema recupera el agua y produce energía eléctrica que pone en funcionamiento un pequeño motor.



Hablábamos de un tercer modo de obtención del hidrógeno, su **obtención directa**. Aunque el hidrógeno puede producirse según las variantes analizadas, en la descomposición directa sólo hay una transformación de energía; por lo tanto, éste resulta el mejor camino –energéticamente hablando–.

El agua se descompone fotoquímicamente, utilizando:

- biofotólisis y
- fotólisis.

Las plantas y bacterias han resuelto de manera eficiente la descomposición del agua, a través del proceso de **biofotólisis** que forma parte de la fotosíntesis. La planta utiliza los cuantos de luz para obtener oxígeno e hidrógeno –aunque, este último no se obtiene en su forma molecular sino que pasa, por otras reacciones, a formar parte de la biomasa que la planta sintetiza utilizando también CO_2 del aire–. La planta almacena la energía solar en la biomasa que produce. Algunas algas, en condiciones especiales, pueden producir hidrógeno molecular, por lo que su cultivo es una vía de producir hidrógeno utilizando la biofotólisis⁸.

La investigación del proceso de biofotólisis ha conocido grandes progresos en la última década, en cuanto a la caracterización bioquímica de las algas que son capaces de hacerlo y a las condiciones necesarias para que la producción de hidrógeno ocurra; pero, falta un largo camino que recorrer para la obtención del alga superproductora y para el diseño de fotobioreactores adecuados que permitan la realización de un proceso tecnológicamente práctico para que la producción

⁷ Savadogo O (1996) *Proceeding of the 11th World Hydrogen Energy Conference*. John Wiley and Sons. New York.

⁸ Podestá J. J.; R. C. V. Piatti, R. C. V. (1997) *Hydrogen Energy*. Vol. 22.

Vigil, Elena (s/f) “El ciclo del hidrógeno solar y los nuevos materiales”. Cátedra de Energía Solar. Instituto de Materiales y Reactivos. Facultad de Física. Universidad de La Habana. La cita de este material ha sido autorizada por Fernando González, coordinador de la Red Solar.

www.cubasolar.cu

de hidrógeno a partir de luz, agua, dióxido de carbono y algas verdes, se convierta en la mayor fuente biológica de energía renovable, sin emisión de gases con efecto invernadero ni contaminación medioambiental.

La **fotólisis** es el procedimiento empleado por el hombre para descomponer directamente la molécula de agua mediante la radiación luminosa, en lugar de la electricidad. Este procedimiento está en desarrollo; aún no se aplica en la práctica y se trabaja en los materiales para lograrlo. Los sistemas utilizados hasta el momento se basan en la interfase electrolito semiconductor, al igual que las pilas fotovoltaicas electroquímicas que hemos descrito.

Al principio de la década del setenta, Fujishima y Honda demostraron el uso de fotoelectrodos semiconductores para la descomposición fotoasistida de la molécula de agua. Estos investigadores emplearon el dióxido de titanio como semiconductor. El elemento clave para poder introducir en la práctica este tipo de pila es el material para el fotoelectrodo; su eficiencia de conversión fotoquímica de la energía del espectro solar y su estabilidad en el tiempo son factores críticos para determinar el buen comportamiento y la eficiencia de la pila.

En general, los diseños reportados pueden clasificarse en dos grupos:

- **pilas homogéneas**; aquellas en que tanto el cátodo como el ánodo están en el mismo electrolito y
- **pilas heterogéneas** que tienen compartimentos separados con diferentes elec-

trolitos para el cátodo y el ánodo, con el objetivo de producir una diferencia de voltaje adicional. Uno solo de los electrodos puede recibir la luz o pueden actuar ambos como fotoelectrodos.

En estas pilas, como en las fotoelectroquímicas fotovoltaicas, existen fotoelectrodos que se descomponen o degradan con la luz, y fotoelectrodos estables pero poco eficientes –porque sólo absorben una pequeña parte del espectro solar–. Para extender la zona de absorción, se ha trabajado en dopar el semiconductor, así como en sensibilizar el semiconductor o la solución electrolítica⁹.

También se han reportado pilas fotoelectrolíticas para la obtención de hidrógeno, a partir de agua de mar. Todas estas investigaciones están indisolublemente unidas al estudio de nuevos materiales. Recientemente, en el *National Renewable Energy Laboratory* de EE.UU. se ha obtenido una estructura sobre la base de semiconductores III-V (como Ga/As e In/P y sus aleaciones). Como semiconductores de este tipo también podemos encontrar, fundamentalmente, el Ga/As junto con la solución sólida $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, los II-VI CdS, CuInSe_2 , CdTe, con las cuales se ha logrado una eficiencia para la producción fotolítica de hidrógeno superior al 10 %, por primera vez. Llegar a materiales que permitan introducir en la práctica el proceso de fotólisis tendrá, sin duda, grandes implicaciones de tipo político, económico y social, así como la reconsideración de los presu-

⁹En esta dirección, se destacan las investigaciones de Savadogo (1971), Kikkawa et al. (1991) y Gurunathan et al. (1993) citadas por Kikkawa, B.S. (1991); Ph. D. de la Universidad de California y de la Universidad de Pennsylvania.

puestos estatales para implementar la producción del hidrógeno en escalas hasta ahora impensadas.

Almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno puede almacenarse como gas natural. La densidad energética (energía almacenada por unidad de volumen) del hidrógeno gaseoso, incluso comprimido, es baja. Por ello, esta forma de almacenamiento no es adecuada para usos en el transporte por el espacio que requiere.

La mayor parte de las investigaciones en materiales para el almacenamiento de hidrógeno tienen como objetivo su uso en el transporte, con el propósito de reducir las dimensiones del tanque de hidrógeno necesario para garantizar los recorridos que se alcanzan actualmente con la nafta.

El hidrógeno puede combustionarse directamente; es posible convertir los motores de los vehículos actuales para ello. Sin embargo, la solución que parece más viable en la perspectiva es el uso de motores eléctricos, más eficientes que los de combustión interna, en los que la electricidad proviene de una pila de combustible que transforma en electricidad la energía almacenada en el hidrógeno. Éste es un proceso limpio donde sólo se genera agua. Los materiales que se investigan¹⁰ deben ser capaces de retener y expulsar el hidrógeno con facilidad bajo la acción, por ejemplo, de variaciones de temperatura y/o presión. Se busca, también, aumentar la

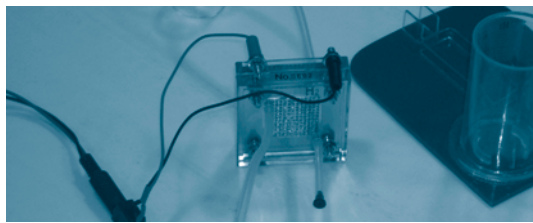
relación de masa de hidrógeno almacenada a volumen ocupado y disminuir el peso total del “depósito”. Se han utilizado y estudian hidruros de compuestos intermetálicos, zeolitas y carbones superactivados.

También se investigan materiales compósitos¹¹ para lograr depósitos de hidrógeno gaseoso a presión, más ligeros que los empleados normalmente¹².

Generación de energía a partir del hidrógeno

Del hidrógeno puede obtenerse energía térmica, por combustión o electricidad, utilizando las pilas de combustible.

Las pilas de combustible se basan en el proceso inverso a la electrólisis del agua: En ellas, el hidrógeno y el oxígeno se recombinan para dar agua. Ésta es una reacción con desprendimiento de energía, lo que se hace en forma de electricidad en estas pilas. Al igual que en las pilas para la electrólisis del agua, los estudios para el desarrollo de estas pilas abarcan tanto los materiales de los electrodos y los electrólitos sólidos, como materiales y procesos catalizadores de la reacción.



¹¹ Un compuesto es un material constituido por más de un componente.

¹² Chahine, R.; Bose, T. K. (1996) *Proceeding of the 11th World Hydrogen Energy Conference*. John Wiley and Sons. New York.

¹⁰Kronberger, H. (1996) *Hydrogen Energy*. Vol. 21; Weitkamp et al. (1995) *Hydrogen Energy*. Vol. 20.

Pilas de combustible ¹³			
Tipo	Eficiencia	Uso	Potencia
Alcalinas, KOH 30 %	40-50 %	Militar, espacial	10-100 kW
Ácidas, ácido fosfórico	40-45 %	Cogeneración durante “picos”	1 kW-5 MW
Carbonato fundido	45-60 %	Gasificación de carbón	1-100 MW
Óxidos sólidos	45-60 %	Cogeneración	0,1-100 MW
Polímero –PEM–	45-50 %	Transporte, sistemas de energía autónomos	Hasta 1 MW

Las pilas de combustible tienen las ventajas de:

- Ser modulares.
- No tener partes móviles.
- No contaminar.
- No hacer ruido.
- Ser seguras.
- Tener altas eficiencia y densidad de energía.
- Ser de fácil mantenimiento.

Como en otras partes componentes del sistema del hidrógeno solar, las investigaciones sobre los materiales están guiadas a reducir los costos y a aumentar la eficiencia.

Dos objetivos fundamentales dependen del desarrollo futuro de las pilas de combustible y de los materiales que ellas utilizan:

- los sistemas de energía autónomos basados en el ciclo del hidrógeno y
- los vehículos eléctricos.

En el caso de los vehículos eléctricos sobre la base de pilas de combustible que se están

En el aeropuerto de Munich, Alemania, por ejemplo, hay una gasolinera muy especial que provee hidrógeno líquido. Es la primera que se abre en el mundo e inicia el camino que va directamente a la automoción del futuro.

La idea proviene de 1839 y, desde entonces, no ha cesado en evolución, siempre en el mismo sentido: unir hidrógeno y oxígeno para dar lugar a una reacción química que produce electricidad en grandes cantidades.

Su aplicación se ha aprovechado en naves espaciales; las naves norteamericanas *Géminis* y *Apolo* alimentaban electricidad con pilas de combustible. Esto, sumado a la utilización que hacen los submarinos, es una clara muestra de su utilidad.

En cuanto a su aplicación en automóviles, se está estudiando la posibilidad de construir un auto con motor eléctrico, dirigido por la energía obtenida del hidrógeno en las pilas de combustible.

Quizá, uno de los experimentos más avanzados sea el que ha unido a *Mercedes Benz* y *Shell* en Europa. Tiene, sobre todo, el interés de involucrar por primera vez a una compañía petrolera en un proyecto de este tipo.

En este sitio, usted puede encontrar una nota periodística acerca de la utilización del hidrógeno como combustible: <http://axxon.com.ar/not/132/c-1320050InfoHidrogeno.htm>.

También resulta de mucho interés la información del sector de enlaces de <http://www.otrasenergias.com> y la de http://worldwide.fuelcells.org/sp_base.cgim

¹³ Fuel Cell Systems (1993) *Celdas de combustible*.

desarrollando por prácticamente todos los fabricantes de autos, se está tratando de utilizar un combustible fósil y, de él, obtener el hidrógeno. Por esta vía, por lo tanto, se siguen enviando grandes cantidades de CO_2 al medio ambiente –aunque, un poco menor, dada la mayor eficiencia del motor eléctrico–. La opción verdaderamente limpia es desarrollar la utilización del hidrógeno.

Si bien hemos mencionado distintas técnicas de obtención de hidrógeno, nos detendremos en la que nos interesa para la producción del hidrógeno de nuestro equipo, que es la electrólisis.

La electrólisis

Una de las formas de energía de mayor importancia para el mundo actual es la energía eléctrica.

Imaginemos, por ejemplo, un día sin energía eléctrica –ya sea de la compañía de luz o de las baterías–.

Existe un área de la Química que trata de la interconversión de energía eléctrica y energía química; es la electroquímica. Su campo de estudio son las reacciones que incluyen dos procesos diferentes:

- el proceso en el cual, a partir de una reacción química espontánea, se obtiene electricidad (pila galvánica) y
- el proceso inverso a éste, denominado electrólisis, por el cual una sustancia química se descompone (pila electroquímica).

Dado que todas las reacciones químicas implican intercambio de electrones de una sustancia a otra, su acción puede entenderse en términos de reacciones *redox*, denominadas así ya que la oxidación y la reducción ocurren simultáneamente.

Contrariamente a las reacciones redox espontáneas, que resultan en la conversión de energía química en energía eléctrica, la **electrólisis** es el proceso en el que la energía eléctrica se usa para provocar una reacción química que no ocurriría espontáneamente.

El resultado de las reacciones redox en condiciones del estado estándar se puede predecir mediante la utilización de la tabla de potenciales estándar de reducción a 25°C , ya sea que éstas reacciones se lleven a cabo en una pila electroquímica –en la que el agente reductor y el agente oxidante están físicamente separados uno del otro– o en un vaso donde se mezclan todos los reactivos juntos.

Tabla de potenciales normales de reducción estándar a 25°C

Electrodo	Proceso catódico de reducción	E° (volt)
$\text{Li}^+ \text{Li}$	$\text{Li} + e^- = \text{Li}$	-3,045
$\text{K}^+ \text{K}$	$\text{K}^+ + e^- = \text{K}$	-2,925
$\text{Ca}^{2+} \text{Ca}$	$\text{Ca}^{2+} + 2 e^- = \text{Ca}$	-2,866

Electrodo	Proceso catódico de reducción	E° (volt)
Na ⁺ Na	Na ⁺ + e ⁻ = Na	-2,714
Mg ²⁺ Mg	Mg ²⁺ + 2 e ⁻ = Mg	-2,363
Al ³⁺ Al	Al ³⁺ + 3 e ⁻ = Al	-1,662
Mn ²⁺ Mn	Mn ²⁺ + 2 e ⁻ = Mn	-1,179
OH ⁻ H ₂ (Pt)	2 H ₂ O + 2 e ⁻ = H ₂ + 2 OH ⁻	-0,828
Zn ²⁺ Zn	Zn ²⁺ + 2 e ⁻ = Zn	-0,763
S ²⁻ S (Pt)	S + 2 e ⁻ = S ²⁻	-0,479
Fe ²⁺ Fe	Fe ²⁺ + 2 e ⁻ = Fe	-0,44
Cr ³⁺ , Cr ²⁺ Pt	Cr ³⁺ + e ⁻ = Cr ²⁺	-0,408
Cd ²⁺ Cd	Cd ²⁺ + 2 e ⁻ = Cd	-0,403
Tl ⁺ Tl	Tl ⁺ + e ⁻ = Tl	-0,336
Co ²⁺ Co	Co ²⁺ + 2 e ⁻ = Co	-0,277
Ni ²⁺ Ni	Ni ²⁺ + 2 e ⁻ = Ni	-0,250
Sn ²⁺ Sn	Sn ²⁺ + 2 e ⁻ = Sn	-0,136
Pb ²⁺ Pb	Pb ²⁺ + 2 e ⁻ = Pb	-0,126
Fe ³⁺ Fe	Fe ³⁺ + 3 e ⁻ = Fe	-0,037
H ⁺ H ₂ (Pt)	2H ⁺ + 2 e ⁻ = H ₂	0,000
Sn ⁴⁺ , Sn ²⁺ Pt	Sn ⁴⁺ + 2e ⁻ = Sn ²⁺	+0,150
Cu ²⁺ , Cu ⁺ Pt	Cu ²⁺ + e ⁻ = Cu ⁺	+0,153
Cu ²⁺ Cu	Cu ²⁺ + 2 e ⁻ = Cu	+0,336
OH ⁻ O ₂ (Pt)	O ₂ + 2 H ₂ O + 4e ⁻ = 4 OH ⁻	+0,401
Cu ⁺ Cu	Cu ⁺ + e ⁻ = Cu	+0,520
I ⁻ I ₂ (Pt)	I ₂ + 2e ⁻ = 2I ⁻	+0,535
Fe ³⁺ , Fe ²⁺ Pt	Fe ³⁺ + e ⁻ = Fe ²⁺	+0,770
Hg ₂ ²⁺ Hg	Hg ₂ ²⁺ + 2e ⁻ = 2Hg	+0,788
Ag ⁺ Ag	Ag ⁺ + e ⁻ = Ag	+0,799
Hg ²⁺ Hg	Hg ²⁺ + 2e ⁻ = Hg	+0,854

Electrodo	Proceso catódico de reducción	E° (volt)
$\text{Hg}^{2+}, \text{Hg}_2^{2+} \text{Pt}$	$2\text{Hg}^{2+} + 2e^- = \text{Hg}_2^{2+}$	+0,919
$\text{Br}^- \text{Br}_2 (\text{Pt})$	$\text{Br}_2 + 2e^- = 2\text{Br}^-$	+1,066
$\text{H}^+ \text{O}_2 (\text{Pt})$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- = 2\text{H}_2\text{O}$	+1,229
$\text{Tl}^{3+}, \text{Tl}^+ \text{Pt}$	$\text{Tl}^{3+} + 2e^- = \text{Tl}^+$	+1,252
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}, \text{H}^+, \text{Cr}^{3+} \text{Pt}$	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6e^- = 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$	+1,333
$\text{Cl}^- \text{Cl}_2 (\text{Pt})$	$\text{Cl}_2 + 2e^- = 2\text{Cl}^-$	+1,359
$\text{Au}^{3+} \text{Au}$	$\text{Au}^{3+} + 3e^- = \text{Au}$	+1,497
$\text{MnO}_4^-, \text{H}^+, \text{Mn}^{2+} \text{Pt}$	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5e^- = \text{Mn}^{2+} + 4\text{H}_2\text{O}$	+1,507
$\text{Au}^+ \text{Au}$	$\text{Au}^+ + e^- = \text{Au}$	+1,691
$\text{Pb}^{4+}, \text{Pb}^{2+} \text{Pt}$	$\text{Pb}^{4+} + 2e^- = \text{Pb}^{2+}$	+1,693
$\text{Co}^{3+}, \text{Co}^{2+} \text{Pt}$	$\text{Co}^{3+} + e^- = \text{Co}^{2+}$	+1,808
$\text{F}^- \text{F}_2 (\text{Pt})$	$\text{F}_2 + 2e^- = 2\text{F}^-$	+2,865

La corriente eléctrica consiste en el flujo o movimiento de cargas eléctricas, ya sean electrones o iones, a través de un conductor –por ejemplo, un hilo de cobre o una solución salina–. Para que se produzca ese movimiento de cargas, debe existir una diferencia

Michael Faraday: Químico y físico inglés, es reconocido por muchos como el experimentador más grande del siglo XIX. Fue el inventor del motor eléctrico y la primera persona en demostrar el principio que gobierna a los generadores eléctricos. Además de incursionar en los campos de la electricidad y el magnetismo, también trabajó en actividad óptica y descubrió y dio nombre al benceno.

de potencial eléctrico entre dos puntos de ese conductor. Esta diferencia se produce mediante un dispositivo que posibilita el flujo de corriente eléctrica (una batería o una pila).

El químico inglés sir Humphry Davy (1778-1829) es el primero en emplear este procedimiento en sustancias

fundidas.

Michael Faraday (1791-1867) llama electrólisis al proceso que consiste en descomponer sustancias a través del uso de la corriente eléctrica continua.

Además, denomina:

- *electrolitos*, a las sustancias que, al disolverse en agua, producen una solución capaz de conducir la electricidad;
- *electrodos*, a las varillas de metal o placas (pueden ser también de grafito) que se introducen en la solución o en la sustancia fundida;

► *Electrólisis* procede de dos radicales, *electro* que hace referencia a electricidad y *lisis* que quiere decir rotura.

- **ánodo**, al electrodo positivo y
- **cátodo**, al electrodo negativo;
- iones (palabra que, en griego, significa “viajero”), a las entidades que viajan hacia los electrodos;
- **aniones**, a los que van hacia el ánodo, y
- **cationes**, a los que se trasladan hacia el cátodo.

Materiales para pilas electrolíticas

En las pilas electrolíticas se logra descomponer la molécula de agua cuando se aplica un

voltaje mayor que el mínimo indispensable de 1,23 V.

Para cumplir con este proceso, se desarrollan materiales para electrodos que permiten que el voltaje necesario sea lo más cercano a 1,23 V.

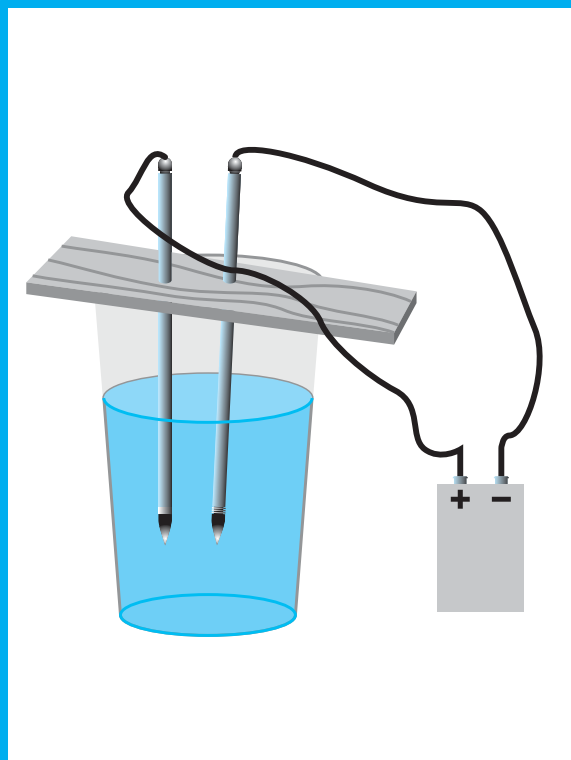
Para la optimización de la pila, también se utilizan y prueban diferentes electrocatalizadores, así como los materiales de las membranas necesarias para mantener sin mezclarse, el oxígeno e hidrógeno que se forman. Se emplean tanto electrolitos ácidos como alcalinos, y se tratan de encontrar la mayor eficiencia y durabilidad a los menores costos.

Materiales utilizados en pilas ¹⁴		
Material	Electrólisis en medio ácido	Electrólisis en medio básico
Para cátodos	Platino Carbón con Pt Compuestos con Pt, Pd-P, Au-P y Co-P amorfos	Níquel brillante o poroso (níquel-Raney)
Para ánodos	RuO ₂ (óxido de rutenio) , IrO ₂ (óxido de iridio), óxido de Ru-Ir-Ta	Níquel brillante, CoNiO ₃ (óxido de níquel y cobalto), NiCo ₃ O ₄ (óxido de níquel y cobalto), espi- nelas con Co
Membranas separadoras	Ácido sulfónico perfluorinado (polímero nafion , polímeros sulfonados poliaromáticos)	Asbestos Membranas orgánicas de políme- ros (PTFE, FEP, PFA, PPS, PETF- CE, PSP); BaTiO ₃ , CaTiO ₃
Electrolitos sólidos	Membranas poliméricas con- ductoras de protones; –PEM; <i>proton exchange membrane</i> – ¹⁵	

¹⁴ Savadogo, Oumarou (1996) *Materiales utilizados en celdas electrolíticas*. Laboratoire de Electrochimie, Matériels Energetiques École Polytechnique. Montreal.

¹⁵ Hasta el momento, las membranas PEM desarrolladas que

actúan como electrolito sólido no pueden trabajar a temperaturas superiores a 180 °C, lo cual sería una ventaja. El lograr mayores eficiencias, estabilidad y durabilidad a menor costo, depende del desarrollo futuro de los materiales necesarios para las partes componentes.



<http://omega.ilce.edu.mx:3000>

La pila, fuente de voltaje, almacena energía eléctrica porque posee una diferencia del potencial entre su polo positivo y su polo negativo. Si se conectan dichos polos con un alambre metálico, los electrones fluyen desde el polo negativo hacia el positivo. Es posible obtener una corriente eléctrica si se intercala en el circuito una solución que contiene iones. Estos iones pueden reaccionar al ponerse en contacto con las partes metálicas sumergidas, los electrodos. En este caso, se produce una electrólisis. Las burbujas se generan por los gases (hidrógeno y oxígeno) liberados por la ruptura -electrólisis- del agua. Es importante recordar que, para que se produzca la electrólisis del agua, se la debe acidular o agregarle una cucharada de sal para lograr la producción de iones y que la electrólisis sea posible. En nuestro recurso didáctico, la energía necesaria para que se produzca la electrólisis –utilizando la pila de combustible reversible tipo PEM– es provista por un panel solar fotovoltaico.

Energía eléctrica, calor y circuitos eléctricos

La materia en sí no contiene calor; sí contiene energía. El calor representa la energía transferida de un cuerpo con mayor temperatura a otro con menor temperatura; concluida la transferencia, la energía deja de ser calor y pasa a ser energía interna.

La energía eléctrica es aquella que permite la traslación de electrones dentro de un con-

ductor, o sea, la presencia de corriente eléctrica en un circuito eléctrico.

Los circuitos eléctricos son un conjunto de elementos -como las resistencias y las pilas- que integran un camino para la corriente eléctrica, con lo que se logra transformar energía eléctrica en calor o en energía luminosa.

La resistencia puede ser una lámpara, el disco de la cocina eléctrica, el radio, el televisor o cualquier elemento que requiera de electrici-

dad para funcionar.

Los circuitos eléctricos se pueden presentar como circuitos en serie y circuitos en paralelo, según cómo se acomoden los elementos con respecto a la fuente.

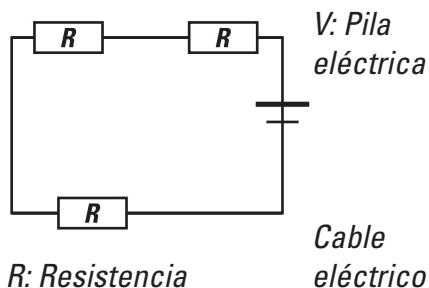
En la vida cotidiana, observamos estos circuitos en las instalaciones eléctricas domésticas. La conexión entre las lámparas de una misma habitación está en paralelo, de manera que si una lámpara se “quema”, las demás quedan encendidas. Pero, entre el interruptor y las lámparas, el circuito es en serie, de

manera que si se “apaga” la luz, se interrumpe el fluido eléctrico y las lámparas se apagan todas juntas.

Los cables eléctricos y las resistencias deben ser de materiales que resulten buenos conductores, como: oro, plata, cobre, aluminio, bronce, entre otros; éstos son materiales que presentan poca resistencia. Los que se utilizan para hacer las lámparas eléctricas deben tener alta resistencia, para que se pongan incandescentes y alumbren. El mejor de ellos, para este fin, es el wolframio (tungsteno).

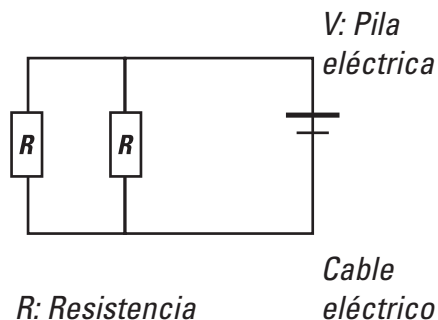
Circuitos en serie

Aquellos en que la misma corriente eléctrica pasa por todos los elementos del circuito.



Circuito en paralelo

Aquellos en que la corriente eléctrica se divide a su paso por el circuito, para alimentar los diferentes elementos que lo componen.



El silicio, componente de los paneles fotovoltaicos

Numerosos elementos tienen propiedades intermedias entre los metales y los no metales, y, por ello, se denominan elementos semiconductores. La brecha energética entre las bandas llenas y las bandas vacías en estos sólidos es mucho menor que en el caso de los aislantes. Si se suministra energía necesaria para excitar electrones de la banda de valencia a la de conducción, el sólido se convierte en un conductor. Este comportamiento es opuesto al de los metales, ya que la capacidad de un metal para conducir la electricidad disminuye al aumentar la temperatura, al acentuarse la vibración de los átomos a mayores temperaturas y esto tiende a romper el flujo de electrones.

La capacidad de un semiconductor también se puede incrementar mediante la adición de pequeñas cantidades de ciertas impurezas al elemento. Cuando, en este proceso llamado de dopado, se agregan huellas de boro o fósforo al silicio sólido, casi cinco de cada millón de átomos de silicio se sustituyen por átomos de B o P.

La estructura del silicio sólido es similar a la del diamante; cada átomo de silicio está unido por enlaces covalentes a otros cuatro átomos de silicio. En el proceso, al fósforo le queda un electrón sin compartir con otros átomos de silicio; entonces, ese electrón libre se puede mover a través de la estructura y funcionar como un electrón de conducción. Las impurezas de este tipo se conocen como **impurezas donadoras**, dado que proporcio-

nan electrones de conducción. Los sólidos que contienen *impurezas donadoras* se llaman **semiconductores tipo -n**, en donde *n* corresponde a “negativo” (la carga del electrón extra).

Si se añade boro al silicio -este elemento tiene un electrón de menos que el silicio-, es posible excitar un electrón de un átomo vecino de silicio a este orbital vacío. El hueco generado en el átomo de silicio puede, entonces, ser cubierto por otro electrón de otro átomo de silicio vecino a aquél; y, así, sucesivamente. De este modo, los electrones se pueden mover a través del cristal en una dirección, mientras los huecos o “agujeros positivos” se mueven en la dirección opuesta. El sólido se convierte, entonces, en un conductor eléctrico.

Los semiconductores que contienen *impurezas aceptoras* -deficientes en electrones- se llaman **semiconductores tipo -p**, en donde la *p* corresponde a positivo.

Tanto en los semiconductores de tipo -p como en los de tipo -n se reduce eficazmente la brecha energética entre las bandas de valencia y de conducción, de modo que sólo se requiere una pequeña cantidad de energía para excitar a los electrones. Por lo común, la conductividad de un semiconductor se incrementa en un factor de 100.000 por la presencia de átomos de impurezas.

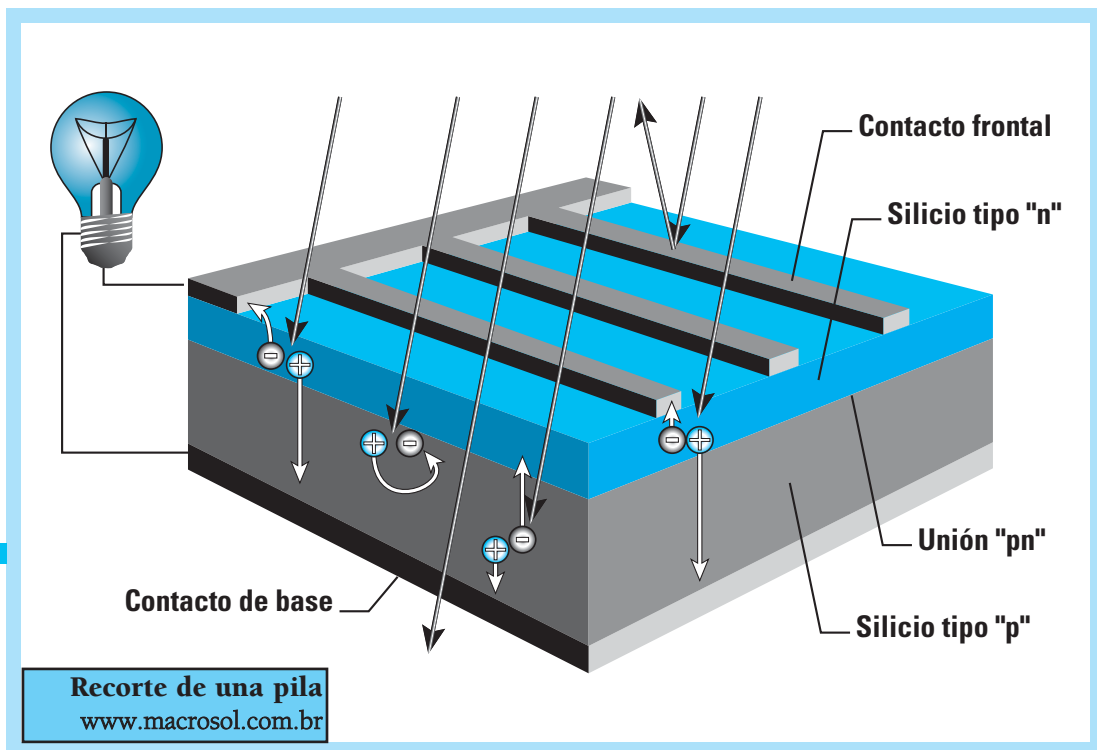
Hoy en día, los semiconductores son componentes esenciales de casi cualquier equipo electrónico, desde la radio y el televisor hasta las calculadoras de bolsillo y las computadoras. Su ventaja es que se pueden construir en un solo circuito integrado (chip) de silicio,

no mayor que la sección transversal de una goma de lápiz, y almacenar mucho más equipo en un espacio pequeño, aspecto de particular importancia en los viajes espaciales y en los microprocesadores.

El Si puede adoptar diferentes estructuras, desde una en que sus átomos están completamente ordenados (Si cristalino) hasta el extremo carente de orden (Si amorfo), pasando por el Si microcristalino (cristales del tamaño de milésimas de milímetro, rodeados por material amorfo). Es posible, incluso, obtener Si con una estructura “esponjosa”, llamado Si poroso.

Las pilas solares de Si cristalino ya son una rea-

lidad; se las utiliza en satélites, en equipos de telecomunicaciones, en la electrificación rural y en todas aquellas aplicaciones en las que resulta muy costoso llegar con el tendido eléctrico. En nuestro país, unas 180 escuelas rurales del norte cuentan con electricidad gracias a las pilas solares. Sin embargo, para que la energía solar pueda sustituir masivamente a las fuentes convencionales, deben bajarse los costos de producción. Es aquí donde intervienen las variedades no-cristalinas del Si, que pueden ser obtenidas a menores costos¹⁶. El mercado fotovoltaico nacional está creciendo. Empero, sólo existe una compañía, radicada en La Rioja, que produce paneles solares; compra las pilas de Si cristalino en el exterior y ensambla los paneles.



¹⁶ Entrevista con Javier Schmidt, investigador en física de semiconductores. Se desempeña en el INTEC (Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química).

Tipos de paneles fotovoltaicos

Existen tres calidades de paneles, que dependen del método de fabricación. De mayor a menor calidad, éstos son¹⁷:

PANEL DE SILICIO MONOCRISTALINO. Sus células se obtienen a partir de barras cilíndricas de silicio monocristalino producidas en hornos especiales. Resultan del cortado de las barras en forma de obleas cuadradas delgadas (0,4-0,5 mm de espesor). Su eficiencia en conversión de luz solar en electricidad es superior al 12 %. Constituyen, por lo tanto, los paneles más caros pero los más efectivos.

PANEL DE SILICIO POLICRISTALINO. Estas células se obtienen a partir de bloques de silicio que resultan de la fusión de trozos de silicio puro en moldes especiales. En los moldes, el silicio se enfría lentamente, solidificándose. En este proceso, los átomos no se organizan en un único cristal; se forma una estructura policristalina con superficies de separación entre los cristales. Su eficiencia en conversión de luz solar en electricidad es algo menor a la de silicio monocristalino.

PANEL DE SILICIO AMORFO. Estas pilas se obtienen mediante la deposición de capas muy delgadas de silicio sobre superficies de vidrio o metal. Su eficiencia en conversión de luz solar en electricidad varía entre un 5 y un 7 %. Constituyen, por consiguiente, los paneles más baratos.

En estas direcciones, usted hallará más información acerca de los diversos tipos de módulos fotovoltaicos, incluyendo las curvas de rendimiento y los materiales suplementarios para innovación.

http://www.inelsacontrols.com/mod_bp_785.htm

http://www.ciemat.es/actividad/programas/p_er_fotovoltaica.html

¹⁷ Información obtenida en www.inelsacontrols.com, www.macrosol.com.br y www.ecorete.it.

Las pilas de combustible y su aplicación como energía renovable

SIN CARBÓN NO HABRÁ MAQUINARIA Y SIN MAQUINARIA NO HABRÁ FERROCARRILES, NI MÁQUINAS A VAPOR, NI FÁBRICAS, NADA DE LO QUE SEA INDISPENSABLE PARA LA CIVILIZACIÓN MODERNA.

¿QUÉ QUEMARÁN EN LUGAR DE CARBÓN?

AGUA, RESPONDIÓ HARDING.

¿AGUA? , GRITÓ PENCROFT. ¿AGUA PARA CALENTAR AGUA?

SI; PERO AGUA EN SUS ELEMENTOS PRIMITIVOS, RESPONDIÓ HARDING.

CREO QUE ALGÚN DÍA SE EMPLEARÁ EL AGUA COMO COMBUSTIBLE, QUE EL HIDRÓGENO Y EL OXÍGENO DE LOS QUE ESTÁ FORMADA, USADOS POR SEPARADO O EN FORMA CONJUNTA, PROPORCIONARÁN UNA FUENTE INAGOTABLE DE LUZ Y CALOR.

ME GUSTARÍA VER ESTO, DIJO EL MARINERO. NACISTE DEMASIADO PRONTO, PENCROFT.

Julio Verne (1874)

La isla misteriosa

Los problemas de contaminación ambiental, así como la futura crisis energética mundial hacen pensar en el ahorro de energía. Esta situación, aplicada a la sociedad y, en particular, al transporte, se traduce en las necesidades:

- utilizar de modo eficiente la energía,
- mejorar la calidad del medio ambiente.

Para lograr satisfacer esa necesidad, en los últimos años se han venido desarrollando vehículos propulsados por motores eléctricos accionados con la energía que suministran las pilas de combustible –*fuel cells*–. Aunque en la actualidad resulta muy costosa, este

costo disminuirá al incrementarse la demanda, en el futuro.

Las pilas de combustible se desarrollaron para aplicaciones militares y espaciales en los EEUU desde la década del '60. Hoy son utilizadas en el *Space Shuttle* para generar energía eléctrica y agua.



Space Shuttle.

<http://www.dfrc.nasa.gov>

En principio, una **pila de combustible** opera como una batería. Genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente, sin realizar un proceso de combustión, evitando emisiones nocivas –elementos particulados, y óxidos de nitrógeno y azufre (NO_x y SO_x)– que contribuyen a la formación de lluvia ácida.

Las pilas de combustible, alimentadas con hidrógeno o metanol, son una alternativa eficiente a los motores de combustión.

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten, directamen-

te, energía química en eléctrica, sin combustión y con alta eficiencia. Estructuralmente, no son otra cosa que una pila común, con un par de electrodos separados por un electrolito. Funcionalmente, como toda pila, efectúan un intercambio iónico proveniente de los electrodos a través del electrolito, con una corriente eléctrica que cierra el circuito a través de una carga externa. La reacción responde al potencial electroquímico que existe entre las sustancias presentes en los electrodos.

Los primeros desarrollos de pilas de combustible datan del siglo XIX. Varios son los científicos que generaron propuestas:

W. R. Grove, F. W. Ostwald, W. W. Jacques, E. Baur, F. T. Bacon, entre otros.

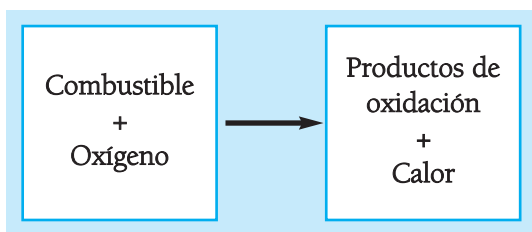
A diferencia de las baterías, una pila de combustible no se agota ni requiere recarga. Produce energía en forma de electricidad y calor, mientras se le provea combustible.

Pero, las similitudes llegan hasta aquí. A diferencia de las pilas galvánicas comunes, en las pilas de combustible los reactivos no se agotan, sino que se aportan continuamente desde afuera; la pila funciona mientras se asegure este aporte de combustible –de allí su nombre–.

Los reactivos son hidrógeno y oxígeno, con un fuerte potencial electroquímico. La reacción es provocada por la presencia de catalizadores (Pt, Pd, Ni) presentes en los electrodos y/o por altas temperaturas de operación. Los productos de escape son: agua pura y calor utilizable. Las pilas de combustible pueden alimentar cualquier cosa, entre un teléfono celular y una ciudad, pasando por un automóvil, una escuela o un taxi espacial. Son modulares: pueden tener el tamaño de una pila AAA o el de un vagón de ferrocarril. Generan potencia en un rango que va de los mW hasta los MW. No tienen partes móviles. Son silenciosas. Su eficiencia arranca en el 40 % y puede llegar, en cogeneración, hasta un 75 %. Adecuadamente reformadas, pueden utilizar cualquier combustible que les aporte hidrógeno –gas natural, combustibles fósiles, metanol, metano de digestión biológica, hidrógeno electrolítico....–.

Transformación de energía

Cuando un combustible se quema en atmósfera de aire, la fuerza que impulsa esta reacción química es la afinidad, es decir, la tendencia que presenta el combustible a reaccionar con el oxígeno. En una combustión normal, la energía resultante de la oxidación del combustible se libera en forma de calor.

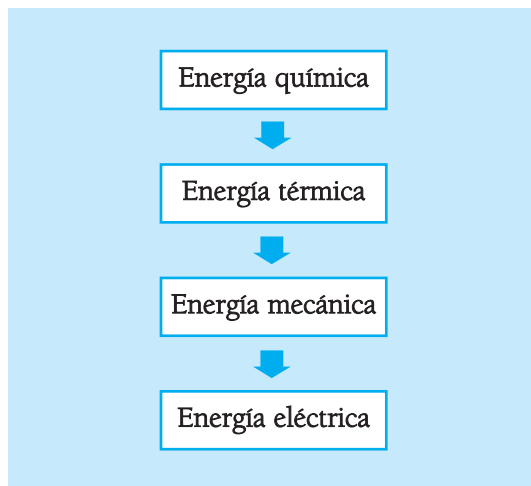


Este proceso se emplea también para la “generación de energía” en las centrales térmicas en las que, a través de la producción de vapor, se obtiene energía mecánica que, luego, se transforma en energía eléctrica. Sin embargo, es también posible conseguir que esta reacción siga un camino directo de forma que, como consecuencia de la transformación de la energía, se libere inmediatamente energía eléctrica.

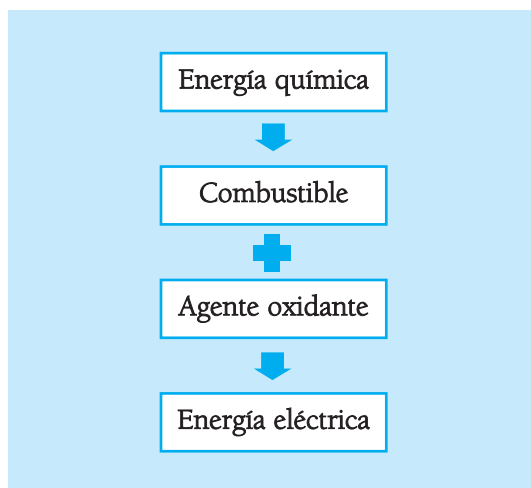
Por pila de combustible se entiende un dispositivo electroquímico que permite transformar directamente la energía química resultante de una reacción de oxidación de un combustible en energía eléctrica sin tener que convertirla primero en energía térmica. En las pilas de combustible, los reactivos (combustible y agente oxidante) se conducen a los electrodos de forma continua.

En un proceso térmico, la energía química se

transforma en energía eléctrica después de convertirse, sucesivamente, en energía térmica y mecánica:



En una pila de combustible, en cambio, se produce un proceso electroquímico directo:



En nuestro recurso didáctico, el combustible es el hidrógeno y el agente oxidante el oxígeno.



Elementos primarios, secundarios y pilas de combustible

Las pilas de combustible y las baterías se asemejan más de lo que se diferencian. Unas y otras se apoyan en la electroquímica para obtener electricidad a partir de la energía química almacenada en una sustancia. El proceso de inicio en la célula de combustible típica con el auxilio de un catalizador que ayuda a liberar electrones de las moléculas de combustible, dejando un residuo de iones cargados positivamente. Los electrones viajan de un electrodo a otro a través de un circuito externo, mientras que los iones recién formados atraviesan un material llamado electrolito, que está intercalado entre los dos electrodos. Las dos corrientes paralelas –de electrones (negativa) y de iones (positiva)– se compensan entre sí, equilibrando las cargas separadas. La extracción directa de electrones de los agentes químicos para generar energía eléctrica es un proceso silencioso, sencillo, relativamente frío y limpio; su rendimiento puede, incluso, triplicar al de un sistema alimentado por un pequeño motor de explosión.¹⁸

Los elementos galvánicos primarios –o pilas– y los secundarios –o acumuladores– se diferencian de las pilas de combustible en que los reactivos vienen prescritos por los electrodos elegidos, por lo que su cantidad y su potencial quedan limitados. En los acumuladores, los productos generados durante la descarga pueden convertirse, de nuevo, en

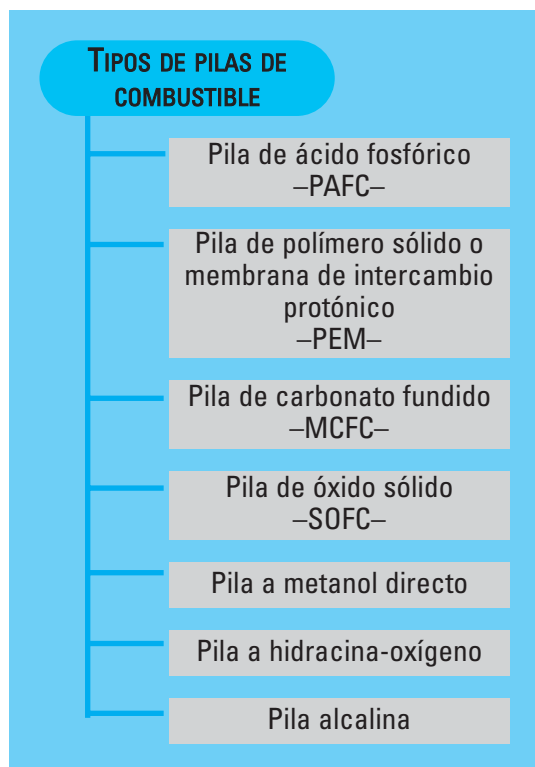
las sustancias iniciales mediante una electrólisis posterior; este proceso no resulta posible en las pilas primarias, ya que los procesos químicos que se desarrollan durante la generación de energía eléctrica son, en gran medida, irreversibles.



La pila de combustible puede suministrar energía mientras se alimenta con combustible y oxígeno. La tensión de salida de la pila es relativamente pequeña; pero, la intensidad de la corriente y el rendimiento son favorables.

¹⁸Christopher K. Dyer (1999) "Hazañas de la electroquímica". Revista *Investigación y Ciencia*; septiembre. Madrid

Tipos de pilas de combustible



Es difícil, hoy en día, determinar cuál es la mejor pila de combustible. Un estudio realizado por *Arthur D. Little Inc.*¹⁹ expresa que no existe una pila de combustible que eclipse a las otras. Básicamente, este resultado se debe a que el mercado para las *fuel cells* es muy variado, yendo de estaciones generadoras de gran tamaño hasta automóviles. Cada segmento de este mercado, así, puede ser satisfecho con una variada mezcla de tecnologías.

No obstante, aportamos un panorama de los tipos más comunes.

Pila de ácido fosfórico –PAFC–. Este tipo de pila está desarrollado a escala comercial. Genera electricidad a más del 40 % de eficiencia y cerca del 80 %, si el vapor producido es empleado en cogeneración; comparado con el 30 % de la más eficiente máquina de combustión interna, éste resulta un rendimiento óptimo.

Los iones de hidrógeno emigran, a través del electrolito, del ánodo al cátodo. Los electrones viajan del ánodo a través de un circuito externo, proporcionando energía eléctrica en el camino, y van al cátodo. Allí, los electrones, iones de hidrógeno y el oxígeno forman agua, que es eliminada de la pila.

Un catalizador de platino en los electrodos acelera las reacciones. Las temperaturas de operación se encuentran en el rango de los 200 °C.

Su uso es muy apropiado para generación estacionaria o móvil de gran dimensión, como sucede en camiones, embarcaciones o trenes.

En producción comercial existen unidades de entre 5 kW y 500 kW.

Pila de polímero sólido o membrana de intercambio protónico –PEM–. Estas pilas operan a relativamente bajas temperaturas de alrededor de los 90 °C. Su eficiencia llega al 40 % o 50 %. Su comportamiento interno es similar al de las pilas de óxido fosfórico –PAFC–.

Tienen una densidad de potencia alta; pueden variar su potencia de salida rápidamente, para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones

¹⁹ Global Management Consulting. www.adlittle.com.

donde se requiere una demanda inicial rápida, tal como el caso de los automóviles. Un reformador externo puede obtener hidrógeno de los combustibles como metanol o naftas.

Actualmente, unidades de la demostración de 70 kW de capacidad están operando y unidades de 250 kW están en desarrollo.

Son las principales candidatas para vehículos livianos, edificios y, potencialmente, para otras aplicaciones mucho más pequeñas como las baterías recargables de las videocámaras, teléfonos celulares, etc.

Pila de carbonato fundido –MCFC–. En una pila de combustible de carbonato fundido, las sales del carbonato constituyen el electrolito. Calentado a 650 °C, las sales funden y los iones carbonato (CO_3^{2-}) se conducen del cátodo al ánodo. En el ánodo, el hidrógeno reacciona con los iones para producir agua, anhídrido carbónico y electrones. Los electrones viajan a través de un circuito externo, entregando energía eléctrica, hasta el cátodo. Allí, oxígeno del aire y anhídrido carbónico reciclados del ánodo reaccionan con los electrones, para formar iones de CO_3^{2-} que atraen el electrolito hasta el ánodo.

Las altas temperaturas de las MCFC permiten extraer el hidrógeno de una variedad de combustibles, con el uso de un reformador interior o externo. Las MCFC son menos sensibles a la contaminación con monóxido de carbono que “envenena” a las otras pilas de combustible de baja temperatura; esto hace que estas pilas sean atractivas para la alimentación con combustibles fósiles o

basados en carbón.

Las MCFC trabajan bien con catalizadores hechos de níquel, que son mucho más económicos que los de platino. Las MCFC tienen un 60 % eficacia; ésta puede subir al 80 %, si el calor desechado se utiliza para la cogeneración. Actualmente, las unidades de la demostración han producido hasta 2 MW; pero, existen planes para unidades de 50 a 100 MW de capacidad

Dos son las mayores dificultades con que la tecnología del carbonato fundido está en desventaja, comparada con las pilas de óxido sólido:

- la complejidad de trabajar con un electrolito líquido en lugar de uno sólido,
- la reacción química dentro de una pila del carbonato fundido, en donde los iones del carbonato del electrolito se agotan en las reacciones al ánodo, haciendo necesaria su compensación inyectando anhídrido carbónico al cátodo.

Pila de óxido sólido –SOFC–. La pila de combustible de óxido sólido usa un electrolito cerámico duro, en lugar de un líquido, y opera a las temperaturas a alrededor de 1000 °C; se trata de una mezcla de óxido de circonio y óxido de calcio en una estructura cristalina, aunque también se han usado otras combinaciones del óxido como electrolitos.

A temperaturas de funcionamiento altas, los iones de oxígeno (con carga negativa) emigran a través de los espacios del cristal. Cuando un gas de combustible que contiene

el hidrógeno se pasa por el ánodo, el flujo en movimiento de los iones de oxígeno negativamente cargados provenientes del electrolito, oxidan al combustible. El oxígeno se toma, normalmente del aire, al cátodo. Los electrones hacen su viaje del ánodo, a través de una carga externa, al cátodo, completando el circuito y proporcionando energía eléctrica en el camino.

La eficacia obtenida puede llegar al 60 %, aproximadamente.

El uso con cogeneración –utilizando microturbinas– está siendo desarrollado por *Siemens Westinghouse*, que se encuentra a la vanguardia en estas tecnologías.

Las potencias oscilan entre 5 kW a 10 MW; éstas resultan altamente prometedoras para generación estacionaria (grandes usinas) o pequeñas generaciones (alrededor 200 kW) en cogeneración con microturbinas.

Pila a metanol directo. Nuevos miembros de la familia de pilas de combustible, tales como las de alimentación a metanol directo, surgen como resultado de la necesidad de contar con un producto fácil de transportar, relativamente seguro y esencialmente rico en hidrógeno.

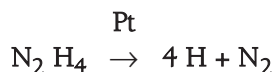
Pila a hidracina-oxígeno. El sistema consta de un electrodo de red de níquel platinado (ánodo) dispuesto en el lado del combustible (con interfase binaria) y de un electrodo poroso de carbón con algo de plata (cátodo) con interfase ternaria.

El combustible (hidracina) se mezcla con el electrolito y circula, por tanto, por el interior

de la pila. El oxígeno se lleva al cátodo con una presión de 14 N/cm² (1 bar = 10 N/cm². 1 N [Newton] = 10⁵ Pa [Pascal]). La oxidación de la hidracina con el oxígeno se realiza de acuerdo con la siguiente reacción neta:

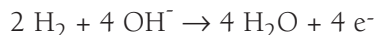


Teóricamente, puede obtenerse de la pila una tensión de salida $U_t = 1,61 \text{ V}$. En realidad, no se alcanza esta tensión de salida, ya que el electrodo de hidracina trabaja esencialmente como uno de hidrógeno:

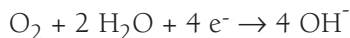


Pila alcalina. Históricamente, es la primera utilizada. Sirvió en los programas espaciales Géminis y Apolo de los '60, proveyendo electricidad y agua potable a los astronautas. Con electrolito líquido alcalino y alimentada con hidrógeno y oxígeno puros, es sólo apta para ambientes aislados, dado que el dióxido de carbono del aire la contamina.

En el caso de una pila de combustible de hidrógeno-oxígeno con un electrolito de hidróxido de metal alcalino, la reacción del ánodo es:



Y, la reacción del cátodo es:



Los electrones generados en el ánodo se mueven por un circuito externo que contiene la carga y pasan al cátodo. Los iones OH^-

generados en el cátodo son conducidos por el electrolito al ánodo, donde se combinan con el hidrógeno y forman agua.

El voltaje de la pila de combustible, en este caso, es de unos 1,2 V; pero, disminuye conforme aumenta la carga. El agua producida en el ánodo debe ser extraída continuamente, para evitar que inunde la pila.

La pila de combustible de intercambio protónico –PEM–

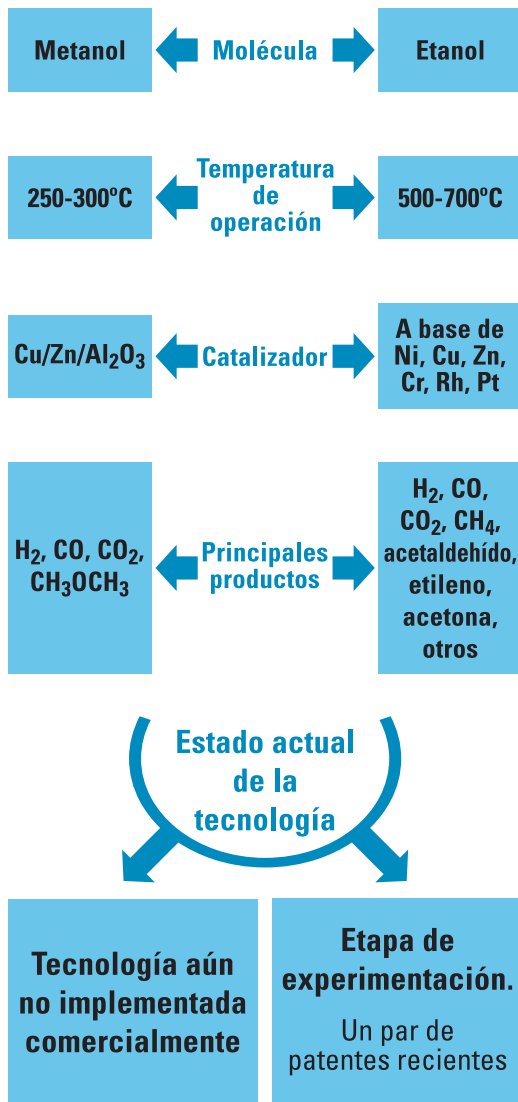
La pila de combustible de membrana de intercambio protónico o pila de combustible polimérica –PEM; *Proton Exchange Membrane*– ofrece densidades de corriente mucho mayores que las de cualquier otro tipo de pilas de combustible, con al excepción a algunas pilas alcalinas desarrolladas para aplicaciones espaciales. Las pilas PEM pueden ser alimentadas por combustibles reformados²⁰ y con aire. La utilización de un polímero sólido como electrolito elimina la corrosión y los problemas de seguridad asociados a los electrolitos líquidos. Su temperatura de funcionamiento es baja (80 a 110 °C), lo que permite arranques instantáneos y no requiere aislamientos térmicos.

Como hemos mencionado, las pilas tipo PEM utilizan un polímero sólido como elec-

²⁰ Si usted quiere seguir profundizando sobre el reformado del metanol, puede consultar: Comas, José; Más, Verónica y otros (2005) “Producción de hidrógeno por reformado de etanol...” Primeras Jornadas *La ingeniería y el medio ambiente*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. <http://www.fi.uba.ar/eventos/medioambiente2005/intro.htm>

Producción de H₂ reformado de alcoholes

Reformado con vapor de metanol y etanol





En nuestro equipo, la pila de combustible es de tipo PEM reversible. Separa el agua en el modo electrolizador, almacena el hidrógeno y el oxígeno, y recombina los elementos por acción de la electricidad en el modo pila de combustible.



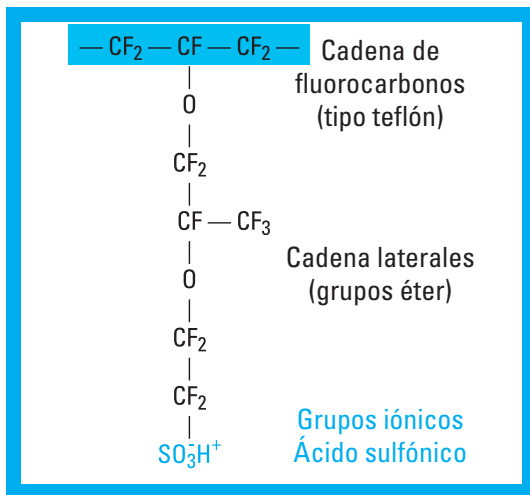
trolito. Esta membrana es un aislante electrónico, pero un excelente conductor de iones hidrógeno.

Los materiales utilizados para este tipo de membrana son polímeros fluorocarbonados (con átomos de flúor en lugar de hidrógeno) parecidos al teflón, a los cuales se añaden grupos sulfónicos²¹. Su estructura molecular posibilita que absorba agua y que, húmedo, conduzca selectivamente solamente iones de carga positiva (los protones de los grupos ácidos), bloqueando los iones de carga negativa (los aniones del ácido sulfónico se fijan en el polímero y no pueden separarse). El hidrógeno libre salta de un SO_3^- a otro SO_3^- del material, para pasar del otro lado de la membrana.

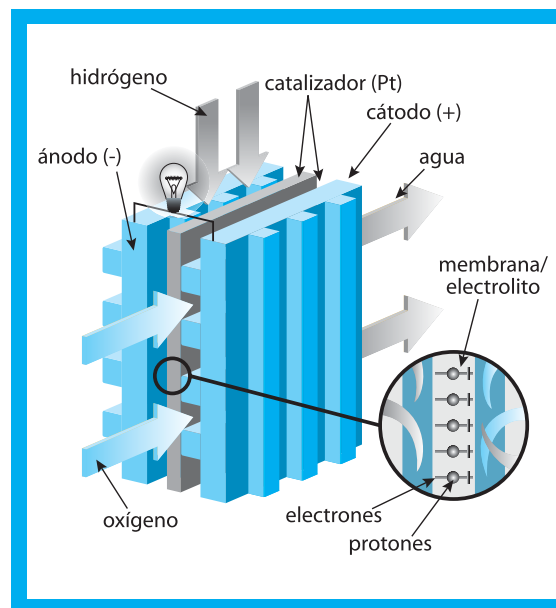
Ésta es la razón por la cual es llamada *membrana de intercambio protónico*. Esta característica, asociada con la inercia química, con la resistencia mecánica y con la estabilidad conocidas de las resinas teflón, torna la membrana útil como electrodo sólido separador, para aplicaciones tales como pilas de combustible, en procesos de electrolisis de agua y en producción de cloro-soda. Al ser una membrana sólida, no hay problemas de pérdida de electrolito que puedan afectar a la

vida de la pila de combustible.

Puede ser tomada como ácido sulfúrico en estado sólido como electrolito.

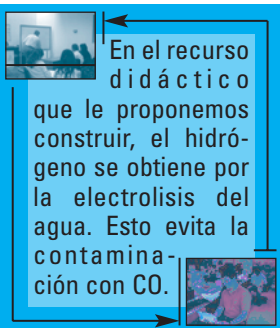


El aspecto de la membrana es similar a una hoja de gelatina; puede ser manejada fácilmente y sin peligro alguno.



²¹ En esta dirección, usted encontrará una descripción más detallada de las propiedades del nafion <http://www.dupont.com.co>.

Estas pilas operan con un catalizador de platino, lo que encarece mucho el sistema. Además, el catalizador de platino es extremadamente sensible a la contaminación por CO, por lo que es necesario utilizar un reactor adicional para reducir el nivel de CO en el gas combustible. Este problema se agudiza cuando el hidrógeno empleado proviene de un combustible de alcohol o de hidrocarburo. Actualmente, se está estudiando reemplazar estos catalizadores por los de platino/rutenio, que presentan más resistencia a la contaminación por CO.



El ánodo y el cátodo se ponen en contacto, por la parte de atrás, por placas de grafito con canales. Los electrones circulan por el espacio entre canales, lo que permite la cir-

culación de la corriente eléctrica por un circuito externo.

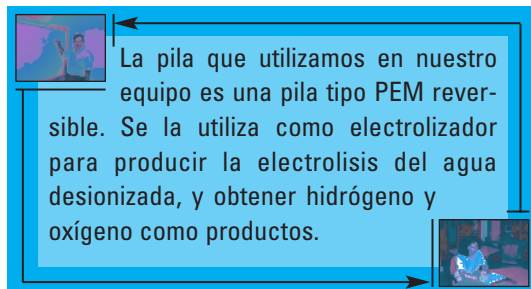
Los electrodos empleados en las pilas de combustible son del tipo poroso de difusión gaseosa. De esta forma, puede establecerse un buen contacto entre las tres fases que participan en la reacción. En estos puntos se forma la interfase ternaria a través de la que entran en contacto el gas de reacción, el electrodo y el electrolito. En una parte de los poros se alcanza el equilibrio entre la fuerza capilar y la presión del gas. En ellos, tiene lugar la reacción en la que se generan la corriente y la tensión. Por tanto, en un electrodo poroso sólo contribuyen a la generación de energía eléctrica aquellos poros en los que la presión capilar y la presión del gas se equilibran (poros en equilibrio); los poros demasiado estrechos se llenan totalmente de electrolito por efecto de la presión capilar, por lo que en ellos no puede tener lugar la reacción; en los poros demasiado anchos, el gas circula libremente sin llegar a reaccionar.

Esquema de la estructura y el funcionamiento de una pila de combustible. El hidrógeno fluye hacia el ánodo donde un catalizador –como el platino– facilita su conversión en electrones y protones (H^+). Éstos atraviesan la membrana electrolítica para combinarse con el oxígeno y los electrones en el lado del cátodo (una reacción catalizada también por el platino). Los electrones, que no pueden atravesar la membrana de electrolito, fluyen del ánodo al cátodo a través de un circuito externo y alimentan nuestros dispositivos eléctricos. La figura muestra una sola celda electroquímica que produce aproximadamente 1 voltio. Para aplicaciones de potencia, se apilan muchas celdas para formar la pila de combustible, cuyo voltaje aumenta en proporción al número de celdas apiladas.

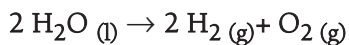
<http://www.cienciateca.com>

Para conseguir la transformación más completa posible del gas, los electrodos porosos se construyen con una estructura de doble capa:

- la capa de cubierta, dotada de poros finos, se dispone por el lado del electrolito;
- la capa activa, con poros gruesos, queda en el lado del gas.



Ya hemos hablado acerca de la electrólisis, por lo que nos limitaremos a recordar cuáles son las reacciones que ocurren en el ánodo donde se produce la oxidación y en el cátodo donde se produce la reducción.

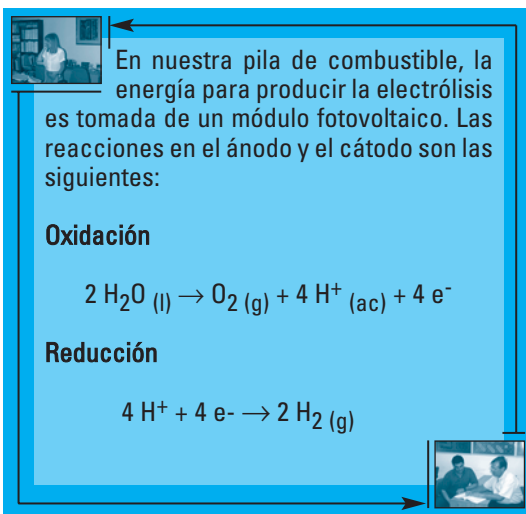


Para que tenga lugar, es necesario aportar energía eléctrica mediante una pila galvánica o un generador de corriente continuo. Es por este motivo que la reacción se lleva a cabo en una celda electrolítica, que es un sistema electroquímico generador de sustancias, por la acción de un flujo de electrones suministrado por la fuente de voltaje externa. El hidrógeno obtenido por electrólisis del agua es muy puro; pero, también es muy caro, debido al importante gasto eléctrico que comporta.

La electrólisis del agua puede considerarse como una fuente de energía secundaria producida a partir de la combustión de combustibles fósiles o biológicos por medio de ciclos térmicos; esto, a partir de la energía solar –por conversión fotovoltaica– o a partir de la energía cinética –utilizando la conversión mecánica–.

El agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Por ello, si la experiencia en la celda se ha realizado correctamente, en el tubo del hidrógeno se acumula el doble de gas que en el del oxígeno.

En la electrólisis, la energía eléctrica se utiliza para provocar una **reacción química no espontánea**.



En nuestra pila de combustible, la energía para producir la electrólisis es tomada de un módulo fotovoltaico. Las reacciones en el ánodo y el cátodo son las siguientes:

Oxidación

$$2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow \text{O}_2 (\text{g}) + 4 \text{H}^+ (\text{ac}) + 4 \text{e}^-$$

Reducción

$$4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2 (\text{g})$$

La separación del hidrógeno y del oxígeno del agua no es una reacción espontánea.

La reacción contraria ocurre en nuestra pila cuando funciona en “modo pila”, combinando los productos de la electrólisis (hidrógeno y oxígeno) para producir agua y energía eléctrica.

La espontaneidad de las reacciones es uno de los principales objetivos de estudio de la termodinámica.

Para revisar la idea de espontaneidad, podemos pensar en :

- Una cascada de agua cae y nunca sube espontáneamente.
- Un cubito de azúcar se disuelve espontáneamente en una taza de café y el azúcar disuelta nunca reaparece espontáneamente en su forma original.
- El calor fluye de un objeto más caliente a otro más frío; lo inverso nunca ocurre espontáneamente.

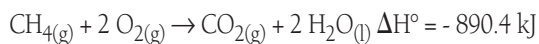
- La expansión de un gas en una bombilla evacuada es un proceso espontáneo. El proceso inverso, es decir, la reunión de todas las moléculas dentro de una bombilla, no es espontáneo

Estos ejemplos y muchos otros muestran que los procesos que ocurren en forma espontánea en una dirección, pueden no ocurrir del mismo modo en la dirección opuesta.

Parece lógico suponer que los procesos espontáneos ocurren para disminuir la energía de un sistema.

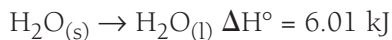
En las reacciones químicas, se encuentra un gran número de reacciones exotérmicas que son espontáneas a temperatura ambiente.

Un ejemplo es la combustión del metano:



Pero, la suposición de que los procesos espontáneos siempre disminuyen la energía del sistema falla en numerosos casos.

Si consideramos la transición de fase sólido-líquido del agua



La experiencia indica que el hielo se funde espontáneamente arriba de 0°C, aunque el proceso es endotérmico.

Mediante éste y otros ejemplos –como la disolución del nitrato de amonio o la descomposición del óxido de mercurio (II)–, podemos afirmar que la exotermicidad

favorece la espontaneidad de una reacción pero no la garantiza. No basta considerar sólo los cambios y la energía para predecir la espontaneidad o no espontaneidad. Así, se hace necesario buscar otra cantidad termodinámica (además de la entalpía) que ayude a predecir la dirección de las reacciones químicas. Esta cantidad resulta ser la entropía.

La **entropía (S)** es una medida directa de la aleatoriedad o del desorden del sistema.

Mientras mayor es el desorden en el sistema, mayor es la entropía.

- Los valores de entropía que se registran para las diferentes sustancias se dan para 1 atm y 25 °C; estos valores se denominan entropías estándar (S°).
- Tanto las entropías de los elementos como las de los compuestos son positivas ($S^\circ > 0$). Por el contrario, las entalpías estándar de formación (ΔH°) para los elementos en su forma más estable valen cero; pero, para los compuestos pueden ser positivas o negativas.
- Las unidades de la entropía son J/K o J/K.mol para un mol de una sustancia (dado que los valores de la entropía son, por lo general, muy pequeños, se usan joules más que kilojoules)
- Para cualquier sustancia, la entropía siempre aumenta en el siguiente orden:

$$S_{\text{sólido}} < S_{\text{líquido}} \ll S_{\text{gas}}$$

Como la energía y la entalpía, la entropía es una función de estado.

La conexión entre la entropía y la espontaneidad es el tema de la *Segunda ley de la termodinámica*: La entropía del universo aumenta en un proceso espontáneo y se mantiene constante en un proceso que se encuentra en equilibrio.

Como el universo está constituido por el sistema y su entorno, para cualquier proceso el cambio de entropía del universo (ΔS_{univ}) es la suma de los cambios de entropía del sistema (ΔS_{sis}) y de su entorno (ΔS_{ent}).

Matemáticamente, la *Segunda ley de la termodinámica* se puede expresar como:

Para un proceso espontáneo:

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{ent}} > 0$$

Para un proceso en equilibrio:

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{ent}} = 0$$

La ley dice que, para un proceso espontáneo, ΔS_{univ} debe ser mayor que cero; pero, no restringe los valores negativos de ΔS_{sis} o de ΔS_{ent} . Entonces, ΔS_{sis} o ΔS_{ent} pueden ser negativos siempre y cuando su suma sea mayor que cero. Para un proceso en equilibrio ΔS_{univ} es cero y, en este caso, ΔS_{sis} y ΔS_{ent} deben ser iguales en magnitud, pero de signo contrario.

¿Qué ocurre si, para algún proceso, se encuentra que el ΔS_{univ} es negativo? Significa que el proceso es no espontáneo en la dirección descrita. El proceso es espontáneo en la dirección opuesta.

Como la *Segunda ley de la termodinámica* dice que un proceso espontáneo debe llevar un aumento en la entropía del universo, $\Delta S_{\text{univ}} > 0$, para determinar el signo de ΔS_{univ} cuando ocurre una reacción, se necesita calcular tanto ΔS_{sis} como ΔS_{ent} . Por lo tanto, ya que interesa sólo lo que ocurre en un sistema en particular y no en todo el universo, y como, por otra parte, el cálculo de ΔS_{ent} suele ser difícil, es deseable tener otra función termodinámica que ayude a determinar si una reacción ocurre espontáneamente aunque sólo se está considerando el sistema mismo.

Si para un proceso espontáneo es:

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{ent}} > 0$$

Sustituyendo ΔS_{ent} por $-\Delta H_{\text{sist}}/T$, se escribe

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sis}} - \Delta H_{\text{sist}}/T > 0$$

Multiplicando miembro a miembro por T da:

$$T\Delta S_{\text{univ}} = -\Delta H_{\text{sist}} + T\Delta S_{\text{sis}} > 0$$

Por varios procesos matemáticos se llega a que:

$$-T\Delta S_{\text{univ}} = \Delta H_{\text{sist}} - T\Delta S_{\text{sis}} < 0$$

Así, se tiene un criterio para una reacción espontánea que se expresa sólo en términos de las propiedades del sistema; ya no es necesario considerar su entorno.

Se introduce una nueva función termodinámica, llamada energía libre de Gibbs o, simplemente, **energía libre (G)**.

$$G : H - TS$$

G tiene unidades de energía; al igual que H y S es una función de estado.

El cambio de energía libre para un proceso a temperatura constante está dado por:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Específicamente, se ha identificado el cambio de energía libre del sistema con el término $-T\Delta S_{\text{univ}}$.

Ahora, podemos resumir las condiciones para la espontaneidad y el equilibrio a temperatura y presión constantes en términos de DG, como sigue:

- $\Delta G < 0$. Una reacción es espontánea.
- $\Delta G > 0$. Una reacción no es espontánea. La reacción es espontánea en la dirección inversa.
- $\Delta G = 0$. El sistema está en equilibrio. No hay cambio neto.

Para especificar la energía libre, debemos aclarar que el adjetivo “libre” describe la energía utilizable o disponible —energía en forma que puede ser utilizada para realizar trabajo—. Así, si una reacción en particular va acompañada de la liberación de energía útil (esto es, si su ΔG es negativo), esto garantiza que debe ser espontánea, sin importar lo que ocurra en el resto del universo.

Consideremos nuestra celda PEM. La tensión de salida de la pila depende de forma decisiva de la afinidad **A**; es decir, de la tendencia

que presentan ambos reactivos a reaccionar entre sí. A temperatura constante (proceso isotérmico) y bajo condiciones reversibles a presión constante, la oxidación del combustible, por ejemplo del hidrógeno, se desarrolla aprovechando al máximo la entalpía libre de reacción ΔG , es decir, el trabajo de reacción correspondiente al proceso generador de energía eléctrica.

$$A = - \Delta G$$

Esta magnitud está relacionada termodinámicamente con la entalpía de reacción ΔH y la entropía de reacción ΔS (de las que hemos hecho mención) de acuerdo con la ecuación:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

$$\Delta G = - n \cdot F \cdot E$$

Donde:

- **n**: Número de moles de electrones.
- **F**: Constante de Faraday:
96487 A s mol⁻¹ o J mol⁻¹ · V⁻¹
- **E**: Fuerza electromotriz.
- **T**: Temperatura absoluta en K (Kelvin).
- El signo menos es convencional. Se evalúa el intercambio de energía visto desde el sistema. ΔG es negativo cuando la reacción conduce a un estado final de menor energía²².

En esta ecuación, $- T \cdot \Delta S$ representa la ganancia o la pérdida de energía que resulta al calentar o al enfriar la pila. Como la fuerza

²² Para profundizar, le sugerimos consultar: Chang, Raymond (1997; 4ª ed.) *Química*. McGraw Hill. Madrid.

electromotriz $E = -U$ coincide, salvo en el signo, con la tensión de salida de la pila sin carga.

La tensión U teórica correspondiente a la oxidación del hidrógeno en un proceso reversible e isotérmico puede calcularse de acuerdo con la expresión:

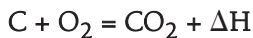
$$U = \frac{\Delta G}{n \cdot F}$$

$$U = \frac{237400 \cdot \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}}{2 \cdot 96487 \cdot \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}}$$

$$U = 1,229 \cdot \text{V}$$

Es el caso en que se forma agua en estado líquido como producto final. La tensión de salida de la pila es, por tanto, del orden de **1 volt**.

Al comienzo de nuestra exposición, planteábamos que la energía química acumulada, por ejemplo, en el carbón, se transforma –primero– totalmente en calor en las centrales térmicas, de acuerdo con la reacción de combustión



Donde:

- ΔH : Entalpía de reacción.

Este calor se convierte, después, en energía mecánica y, finalmente, en energía eléctrica.

Según el segundo principio de la termodinámica sólo una fracción, caracterizada por el “rendimiento del ciclo de Carnot” η de la energía resultante del movimiento desordenado de las moléculas –es decir, del calor–

puede convertirse en energía mecánica o en trabajo.

Se cumple:

$$\eta(\text{Carnot}) = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

Donde:

- T : Temperatura absoluta en K (Kelvin).

Ciclo que se considera como el de mayor rendimiento térmico. Ya hemos hablado de las características de los ciclos cuando trabajamos el ciclo Rankine en la sección de energía solar termoeléctrica.

Si, por ejemplo, la temperatura del vapor en la caldera es $T_2 = 600 \text{ K}$ y la temperatura del vapor de escape de la turbina es $T_1 = 360 \text{ K}$, el rendimiento termodinámico η (Carnot) es, como máximo, del 40 %.

$$\eta(\text{Carnot}) = \frac{(600 - 360) \cdot \text{K}}{600 \cdot \text{K}}$$

$$\eta(\text{Carnot}) = \frac{240 \cdot \text{K}}{600 \cdot \text{K}}$$

$$\eta(\text{Carnot}) = 0,4$$

$$\eta(\text{Carnot}) = 40 \%$$

El rendimiento de las centrales térmicas sin ciclo combinado (aprovechamiento del calor disipado) se aproxima a este valor. Por el contrario, la subsiguiente transformación de la energía mecánica en eléctrica se produce casi sin pérdidas.

Considerando el rendimiento termodinámico, cuando la pila tipo PEM reversible trabaja en “modo pila”, el rendimiento termodinámico que puede alcanzarse en una pila de

combustible es, en condiciones favorables, considerablemente mayor que en las máquinas térmicas, ya que no está sujeta al mismo tipo de limitaciones termodinámicas en cuanto a conversión de energía que éstas.

$$\eta_{\text{term}} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

$$\eta_{\text{term}} = \frac{n \cdot F \cdot U}{\Delta H}$$

Si, como resultado de la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno, se obtiene agua en estado líquido como producto final, el rendimiento termodinámico llega a ser del 83%. Los valores de ΔG y ΔH se expresan en J mol^{-1} .

$$\eta_{\text{term}} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

$$\eta_{\text{term}} = \frac{237400 \cdot \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}}{286000 \cdot \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}}$$

$$\eta_{\text{term}} = 0,83$$

$$\eta_{\text{term}} = 83 \%$$

Si el producto de la reacción, es decir, el agua, está en forma de vapor, el rendimiento termodinámico alcanza el 94,5 %.

$$\eta_{\text{term}} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

$$\eta_{\text{term}} = \frac{228600 \cdot \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}}{242000 \cdot \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}}$$

$$\eta_{\text{term}} = 0,945$$

$$\eta_{\text{term}} = 94,5 \%$$

Cuando el carbono **C** se oxida para dar monóxido de carbono **CO**, el rendimiento termodinámico puede llegar a ser, incluso, del 124 %; la energía adicional necesaria se toma del ambiente en forma de calor y se cede como energía eléctrica.

Si analizamos la toma o cesión de calor en las reacciones de la pila, vemos que ΔG y ΔH son siempre negativas en las reacciones que se utilizan, en general, para generar energía.

El rendimiento termodinámico está influido por ΔS de la forma siguiente:

- Cuando $\Delta S > 0$, aumenta la entropía (grado de desorden) y el rendimiento termodinámico η_{term} es mayor que 1. La pila produce, en este caso, más energía eléctrica que la equivalente a la energía térmica resultante de la reacción correspondiente. En una pila que opera de forma isotérmica, la energía adicional necesaria **T**. ΔS se toma del ambiente en forma de calor. Por ejemplo, en la reacción:

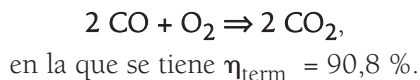


- Cuando $\Delta S = 0$, el rendimiento es del 100 %. En esta reacción no se toma ni se cede calor. La tensión de salida de la pila no varía con la temperatura. Éste es, por ejemplo, el caso de la reacción:



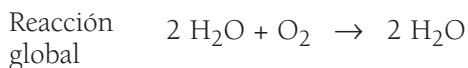
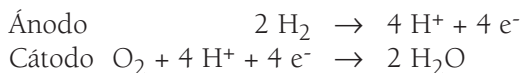
- Cuando $\Delta S < 0$, se cumple $\eta_{\text{term}} < 1$. Entonces, la pila genera, además de la energía eléctrica, la cantidad de calor $-T \cdot \Delta S$. Durante la reacción debe extraerse el

calor producido en la pila. En caso contrario, aumentaría la temperatura en ella y caería su tensión de salida. Éste es, por ejemplo, el caso de la reacción:



A diferencia de las baterías, las pilas de combustible no almacenan energía eléctrica. Los reactivos deben reponerse y los productos deben retirarse constantemente. En este aspecto, se asemejan más a un motor que a una batería.

Las reacciones que tienen lugar en una pila tipo PEM son análogas a las de la pila de combustible de ácido fosfórico.



Como las pilas tipo PEM operan a unos 60 °C, el agua se produce de forma líquida, no se disuelve en el electrolito y se expulsa por el excedente de flujo de alimentación del cátodo²³.

Las prestaciones de las PEM han mejorado mucho en los últimos años. Se consiguen densidades de corriente cercanas a los 900 mA/cm² a una tensión de 0.7 V por celda, con hidrógeno y oxígeno a unas 4 atm de presión. Si el hidrógeno y el oxígeno se introducen a presión ambiente, se pueden alcanzar densidades de 530 mA/cm².

La eficiencia eléctrica de un *stack* –apilamiento de pilas en serie– depende mucho de la tensión a la cual cada monocelda opera. Para una misma tensión, una PEM es capaz de entregar mucha más corriente y, por consiguiente, más potencia que pilas como las PAFC, MCFC o SOFC; o, lo que es lo mismo, para una misma potencia, una pila tipo PEM tiene tamaño más reducido y menor costo.

Cuando una PEM opera con hidrocarburos reformados, el CO producido en el proceso debe ser eliminado y convertido en CO₂ por un proceso de oxidación. Este proceso es simple, desde el punto de vista de la catálisis, y se puede integrar fácilmente en el sistema completo.

Si utilizamos hidrocarburos como combustible, la eficiencia de las pilas como MCFC o SOFC es mayor, ya que el calor que producen se puede utilizar en el proceso de reformado de manera más eficiente, además de poder aprovechar este calor residual para producir más electricidad con cogeneración. En el caso de una PEM, el calor que se evacua en el circuito de refrigeración es de baja calidad y sólo se puede aprovechar para agua caliente o aplicaciones similares.

Una inquietud que surge cuando hablamos de hidrógeno es sobre la seguridad que implica su empleo generalizado. Al respecto, desde hace años se trabaja con la norma ISO/TC 197, dedicada al tema y especialmente orientada a establecer códigos, normas y estándares de seguridad. Desde 1997 nuestro país está adherido y colabora activamente en el desarrollo de la tal norma. Es decir, aplicando correctamente los criterios en ella establecidos para la producción, almacena-

²³ O'M Bockris, John; Supramanian Srinivasan (1969) *Fuel Cells: Their Electrochemistry*. McGraw Hill. Washington.

miento, transporte y distribución en aplicaciones y usos del hidrógeno, cuyo riesgo es incluso menor al de los combustibles tradicionales.

El interés creciente por el hidrógeno a escala mundial se muestra claramente con acciones desplegadas en desarrollos industriales, inversiones y políticas de estado respectivas; básicamente, en la Comunidad Europea, Japón y los Estados Unidos, a los que se suman países como Canadá, China, Corea, Australia.

En la industria automotriz, las ocho principales compañías del mundo están apostando al hidrógeno. En Europa se encuentra en etapa de implementación el programa CUTE –*Clean Urban Transport Energy*– que empleará combustible hidrógeno para el transporte urbano en colectivos, en diez grandes ciudades, como demostración y viabilidad de esta tecnología.

El sector universitario, de investigación y de desarrollo de Argentina también muestra un mayor número de instituciones dedicadas a estudiar el hidrógeno y las pilas de combustible. Destacamos universidades de la zona austral, como la Universidad Nacional de la Patagonia Austral –UNPA–, la Escuela Superior Técnica –EST– y la Universidad Tecnológica Nacional –UTN– que se interesan junto, con la Asociación Argentina del Hidrógeno²⁴, en llevar adelante un programa de difusión en el conjunto de treinta unidades académicas regionales, ubicadas en la mayor parte del país.

²⁴ La imagen que integramos en esta página fue presentada en una conferencia por el doctor Juan C. Bolcich, de la Asociación Argentina de Hidrógeno.

Otra de las inquietudes que las PEM plantean es el costo de los catalizadores de platino, por lo que en los últimos años se ha tratado de reducir la cantidad de necesaria para la reacción. En principio, se están utilizando cantidades de platino cercanas a los 0.00032 g/cm^2 , aunque algunos desarrollos de *Alamos Laboratory* han demostrado técnicas para reducir esta cantidad hasta los $0.00000023 \text{ g/cm}^2$, manteniendo las prestaciones. Se espera que en los próximos años se sigan reduciendo estas cantidades, para poder abaratar las pilas de combustible.

En nuestro país, tanto miembros de la Asociación Argentina del Hidrógeno como investigadores de la Universidad Nacional de La Plata y del CONICET –Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas– están trabajando en el análisis de los catalizadores adecuados para la producción de hidrógeno.



3 HACIA UNA RESOLUCIÓN TÉCNICA

Manual de procedimientos para la construcción y el funcionamiento del equipo

A partir del diseño y de la construcción de la pila de combustible, y de la integración conceptual involucrada, los alumnos pueden realizar experiencias referidas a los tipos de energía y sus aplicaciones, y comprobar las propiedades de las pilas y de un electrolizador que puede funcionar con energía fotovoltaica y con energía eléctrica.

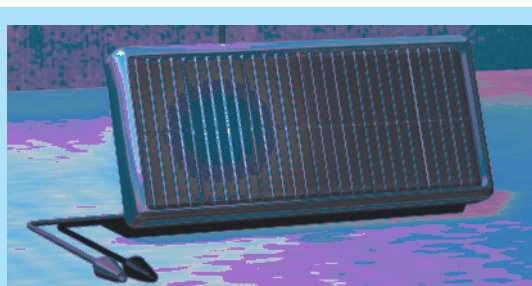
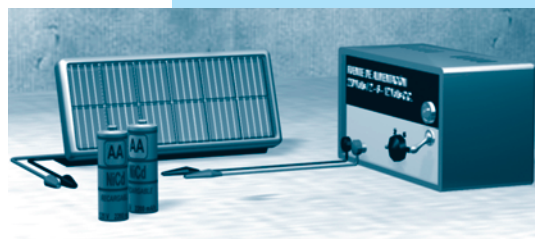
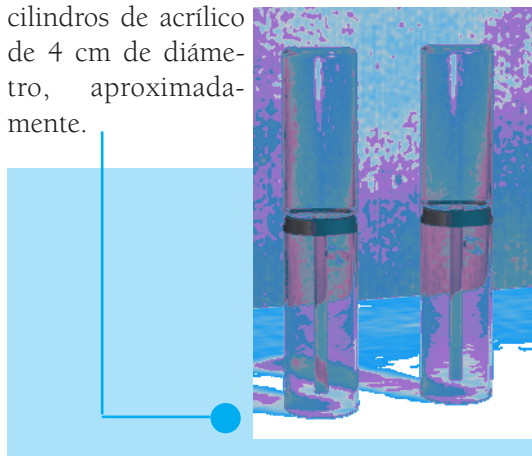
Los componentes

En la pila de combustible es posible detectar cuatro componentes básicos:

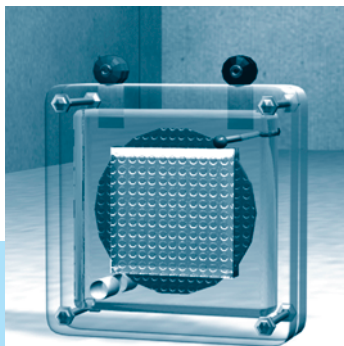
- Panel fotovoltaico, fuente de alimentación o dos pilas recargables Ni/Cd tipo AA:
- Tanques de almacenamiento.
- Pila PEM.
- Hélice para lancha.

Tanto el panel fotovoltaico como la fuente de alimentación o las pilas Ni/Cd de tipo AA recargables aportan la energía necesaria para que funcione la pila reversible, ya sea como electrolizador como en su carácter de pila tipo PEM.

Los **tanques de almacenamiento** de hidrógeno, oxígeno y agua están confeccionados con cilindros de acrílico de 4 cm de diámetro, aproximadamente.



La **pila de combustible** es una celda de tipo PEM – pila de combustible de intercambio protónico– reversible; ésta hace las veces de electrolizador y de pila de combustible. Está comunicada con los tanques de almacenamiento por dos tubos de silicona por los que circula el agua cuando la celda funciona como electrolizador y por los que, luego, son conducidos el hidrógeno y el oxígeno a los tanques de almacenamiento.



El último componente del equipo es una hélice con motor de imán permanente, cuyo funcionamiento nos permite comprobar la eficiencia el equipo construido.



El resto de los componentes está formado por material de laboratorio, cables de conexión, fuentes de alimentación, led, pinzas cocodrilo, conectores, motor pequeño y agua desionizada.

Todos estos componentes se encuentran disponibles en ferreterías, negocios proveedores de material de electrónica y de material de laboratorios de física.

La pila de combustible se consigue por un precio accesible en www.fuelcellstore.com

Los materiales, herramientas e instrumentos

Para la construcción de la pila de combustible, necesitamos:

Materiales

- Panel solar fotovoltaico de 2 V, o dos pilas AA que suplen en el suministro de energía, o una fuente de potencia (0 – 2.0 V DC).
- 1 pila de combustible de tipo PEM reversible. Modo electrolizador 1 W / Modo pila 0,500 mW.
- Polímetro.
- Cilindros de acrílico de 5 cm y 2 cm de diámetro (para tanques de gas de acrílico de 20 cm³ de H₂ / O₂).
- Una base de melanina; puede ser un estante de alacena de 35 cm de largo por 20 cm de ancho y 5 cm de espesor.
- 1 plancha de acrílico de 25 cm de largo por 15 cm de ancho y 1,5 cm de espesor.

- 1 plancha de acrílico de 15 cm de largo por 10 cm de ancho y 0,5 cm de espesor.
- 1 hélice (o cualquier consumo que funcione con el rendimiento de la pila).
- Adhesivo silicona.
- Motor de 0,3 V. Imán permanente.
- Autos eléctricos de juguete con motor adecuado al rendimiento de la pila.
- Tubos de silicona para conexiones.
- Cables para conexión y conectores.
- Rollo de papel para cocina.

Materiales y sustancias de laboratorio

- 1 botella de 1 litro de agua desionizada; también puede ser de agua destilada de uso comercial.
- Cloroformo.
- Tubos de vidrio de 0,5 cm de diámetro.
- Jeringas y agujas descartables.
- 1 pipeta de 10 ml.
- Vidrio de reloj.
- Reloj digital pequeño.

Herramientas

- Tijera para cortar chapa o PVC.
- Alicata.
- Llaves tubo.
- Pistola de encolar.
- Limas.
- Tijera
- Marcador indeleble.

Instrumentos

- Cinta métrica.
- Escuadra.
- Regla metálica.
- Cronómetro.

La construcción

La manufactura del equipo no es un proceso complicado; pero, algunos pasos requieren de cuidados, ya que debemos manipular material delicado y sensible como la celda misma y algunos productos químicos volátiles y tóxicos que se utilizan para conectar los tanques de almacenamiento a la pila.

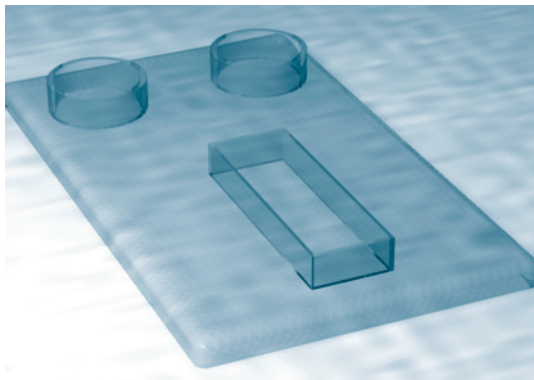
La construcción de la pila de combustible consta de dos etapas²⁵:

- 1 Construcción de la base.
- 2 Construcción de los tubos de almacenamiento.

1. Construcción de la base

La base es un rectángulo de acrílico de 25 cm de largo por 15 cm de ancho; pero si, en nuestra escuela, tenemos otros materiales que se adapten, que sean resistentes a la humedad y que sean livianos, podemos utilizarlos.

²⁵ La tercera etapa de construcción sería la del panel solar; pero, desde aquí no vamos a encararla, porque planteamos la opción de usar la fuente y las pilas recargables AA. Si, en función de los contenidos que usted enseña, le resulta oportuna la inclusión de un panel solar, considere que se venden unas lámparas para jardín que lo incluyen y que se pueden desarmar para analizarlo.



Cuando compramos el acrílico, pedimos al vendedor que corte dos anillos de 2 cm de altura –a partir de un tubo- para contener los tanques de almacenamiento. Pegamos esos cilindros a la base, usando cloroformo.

De la plancha de acrílico adicional de 10 cm de ancho por 15 cm de largo y 0,5 cm de espesor, cortamos rectángulos de 2 cm de altura, de dimensiones acordes para contener la celda. De este modo, la celda se puede usar separada del resto del equipo.

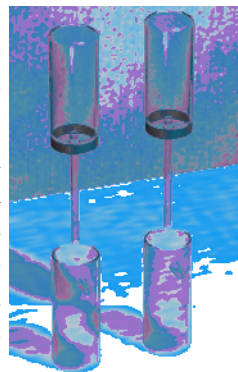
- Sobre la base de acrílico (o del material que hayamos seleccionado) construimos los compartimientos para contener la celda y los tubos de almacenamiento. Es muy importante que los cortes de las planchas sean exactos, para que no queden espacios que impidan un correcto armado.
- Limamos las asperezas del acrílico y, luego, limpiamos el polvillo para que no interfiera en el sellado de las partes.
- Retiramos las láminas protectoras del acrílico.
- Llenamos la jeringa con cloroformo; unimos las paredes de acrílico de los compartimientos.

- Presentamos los pequeños rectángulos sobre la base mayor de acrílico y comenzamos a pegarlos desde el centro hacia los extremos. Repetimos, hasta haber construido los estanques de contención de la celda y de los tubos de almacenamiento.

2. Construcción de los tubos de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento están formados por:

- un tanque de almacenamiento de hidrógeno y agua con una salida lateral en donde van los tubos de silicona que conectan los tanques de almacenamiento con la pila;
- un tanque de compensación con una arandela que permite sujetar el tanque a los tanques de hidrógeno y oxígeno, y un tubo de silicona que, cuando se une el tanque de compensación con el tanque de almacenamiento, “pesca” en el tanque de almacenamiento; ambos cilindros tiene el mismo diámetro de 3 cm.



En el tanque de compensación realizamos una perforación de, aproximadamente, 0,6 cm de diámetro en donde se introduce el tubo de silicona, cuando la pila funciona a “modo pila”; por ese tubo de silicona asciende al agua a los tanques de compensación, a medida que la desplazan los gases H_2 y O_2

producto de la electrólisis.

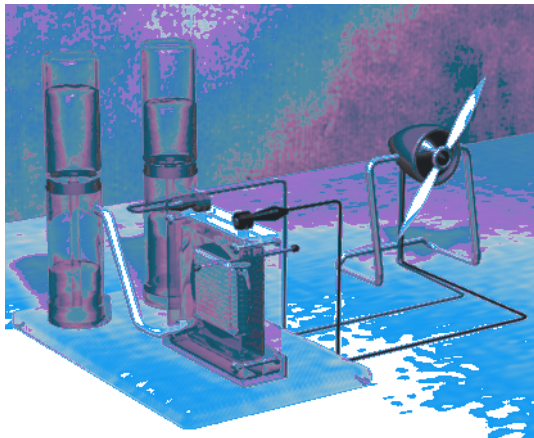
Calibramos los tubos para que retengan 30 cm^3 de gas.

El armado

En la base ya armada, insertamos los tanques de almacenamiento en los cilindros asignados para tal caso. Realizamos el mismo procedimiento con la pila y su compartimiento.



Los tubos de almacenamiento se conectan a la celda mediante los tubos de silicona.



El panel fotovoltaico, la hélice o el consumo que hayamos seleccionado, se conectan a la pila recién cuando comenzamos a trabajar con el equipo.

El ensayo y el control

El éxito de la experiencia depende de la supervisión de las conexiones, luego del armado completo del equipo.

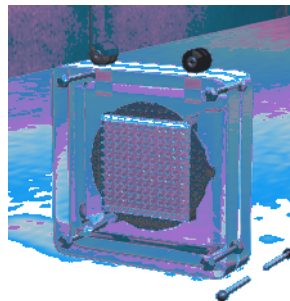
Antes de poner en funcionamiento el equipo, le recomendamos leer atentamente las instrucciones de uso de la pila PEM y tenerlas a mano, para cualquier duda que pudiera surgir.

Durante la operación, ya sea de electrólisis como de generación de energía, es necesario que usted y sus alumnos utilicen gafas de protección, para mayor seguridad.


La celda es un dispositivo sumamente delicado, por lo que debemos manipularla con cuidado, respetando las indicaciones de voltaje que se suministran para la realización de las experiencias.

Una vez tomados los recaudos necesarios, comenzamos a usar el equipo:

- 1 Abrimos los orificios de ventilación de la pila, quitando sus tapones de goma.




- 2 Llenamos por completo el tanque de almacenamiento de agua e hidrógeno con agua desionizada, hasta que ésta desborda el orificio.
- 3 Una vez lleno el tanque, cerramos con el tapón del lado de la pila correspondiente al hidrógeno.
- 4 Repetimos el procedimiento en la zona del oxígeno. Nos aseguramos que la pila se moje por completo y que no queden burbujas de aire en su interior. Si, cuando se han cumplido los pasos previos, el nivel de agua no llega al nivel requerido, agregamos la cantidad suficiente para asegurarnos que no entrará aire al sistema.
- 5 Absorbemos el agua derramada con el papel para cocina.



Importante: Los iones en el agua pueden afectar el electrolito de la PEM, por lo que es aconsejable que la conductividad del agua utilizada sea menor a $2 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Nunca debemos poner el equipo en funcionamiento si no tiene agua destilada en los tanques de almacenamiento.



Para su uso como electrolizador:

- 1 Conectamos una fuente de potencia; ésta puede ser el panel fotovoltaico, pilas tipo AA o un alimentador a los terminales de la pila. Recordamos no aplicar voltaje

superior a 2,0 V ni invertir las polaridades, ya que estos procedimientos destruyen las pilas; para evitar esta situación, le recomendamos utilizar un polímetro. En caso de usar panel solar, operamos con una lámpara potente o con energía directa del Sol.

En ninguna circunstancia atamos o impedimos la circulación de las válvulas, tubos o tanques; estos dispositivos se usan para regular la presión del sistema.

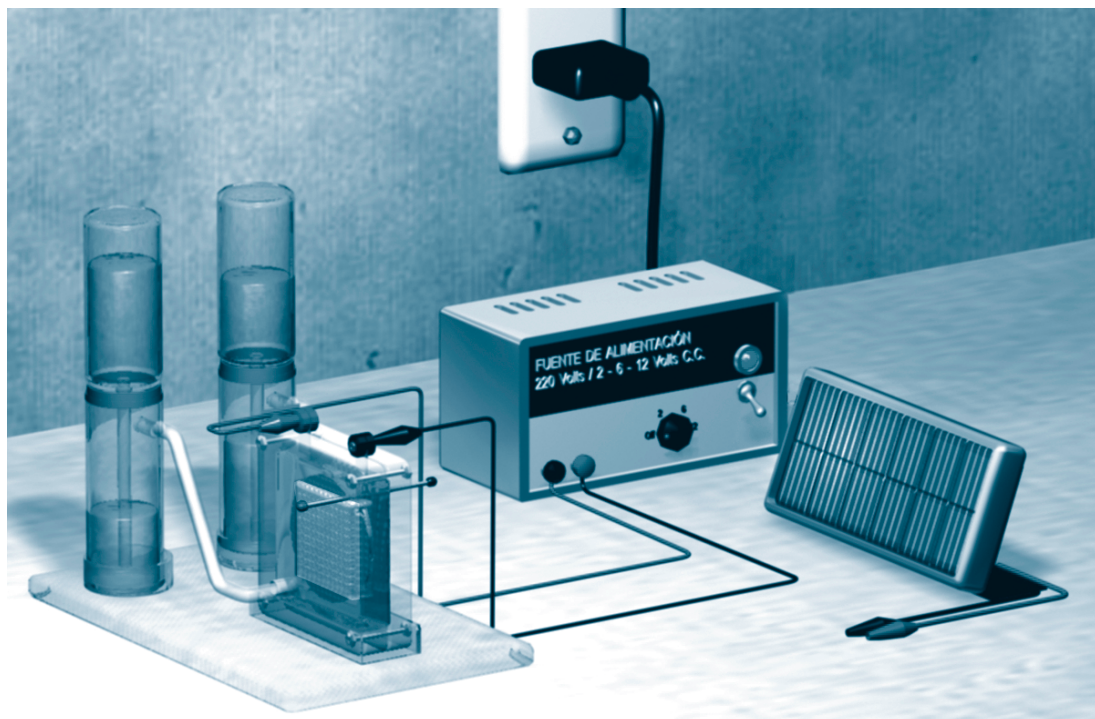
Las condiciones de operación del sistema son siempre a presión y a temperatura ambiente.

- 2 Observamos que comienzan a producirse hidrógeno y oxígeno, por el desplazamiento del agua desde los tanques de almacenamiento hacia los tanques de compensación.

- 3 Una vez llenado lo suficiente el tanque de hidrógeno, desconectamos el voltaje que estamos aplicando.

Ahora, el sistema está en condiciones de funcionar como pila de combustible de tipo PEM, realizando el proceso inverso de la electrolisis y oxidando el hidrógeno, para generar energía eléctrica.

- 4 Conectamos el ventilador o el dispositivo seleccionado, para comprobar que el hidrógeno generado y almacenado es el combustible.



Lista de control para el uso de la pila de combustible en el aula



Antes de conectar el sistema, ¿probamos que no esté en cortocircuito?



¿Realizamos una ventilación adecuada del ambiente de trabajo?



Con nuestros alumnos, ¿analizamos los peligros potenciales del uso de la pila de combustible?



¿Realizamos un registro de las conexiones, para asegurar el trabajo a presión y temperatura ambiente del sistema?



¿Nos aseguramos que la fuente no exceda los 2,0 V?



¿Controlamos que el agua a utilizar tenga conductividad menor que $2\mu\text{S}/\text{cm}$?



La PEM, ¿siempre produce la energía esperada?

La superación de dificultades

- ✖ *Dado el carácter combustible del hidrógeno, mantenemos el sistema alejado de llamas o materiales cargados eléctricamente.*
- ✖ *Cuando utilizamos módulos solares y la fuente de energía para éstos es una lámpara, mantenemos unos y otros alejados a, por lo menos, 50 cm de distancia.*
- ✖ *Asimismo, como los módulos solares suelen alcanzar altas temperaturas, cuando el sistema está operando somos cuidadosos en su manipulación.*
- ✖ *Cuando los tanques de almacenamiento están completamente llenos de gas, es posible que se desprenda algo a la atmósfera; para asegurarnos que no haya peligro de combustión, mantenemos bien aireada el aula en donde trabajamos.*
- ✖ *En caso de no disponer de agua desionizada, podemos utilizar agua destilada comercial; siempre, controlando su conductividad.*

En el material de capacitación:

- Alegría, Mónica (2005) *Planta potabilizadora*. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Buenos Aires.

usted encontrará un método sencillo para determinar, con sus alumnos, la conductividad del agua a utilizar.

Puede acceder a esta publicación desde www.inet.edu.ar; específicamente, dirigiéndose al espacio de “Materiales de capacitación” y, ya en éste, a la serie “Recursos didácticos”.

4. EL EQUIPO EN EL AULA

Un auto con energía limpia

En uno de los testimonios que tomamos como punto de partida, los alumnos:

- están analizando la celda de combustible tipo PEM, para comprobar los resultados de la utilización del agua como combustible y
- están diseñando experiencias para comprobar la eficiencia de la pila que van a integrar, luego, en un prototipo a escala de auto con motor eléctrico que funcione con hidrógeno como combustible.

La pila es reversible. Para estudiar esta condición, el instructor propone al grupo iniciar el análisis considerando la energía almacenada al producir hidrógeno y oxígeno.

Para realizar este análisis, los alumnos tienen en cuenta que las pilas de combustible no son máquinas térmicas, por lo que su rendimiento no está limitado por el ciclo de Carnot y pueden acercarse, teóricamente, al 100 %; sólo las limitaciones en el aprovechamiento de la energía generada y en los materiales empleados en su construcción pueden impedirles alcanzar este valor.

En este estudio, concretan dos experiencias:

- a. Uso de la pila en modo “electrolizador”.
- b. Uso de la pila en modo “pila de combustible”.

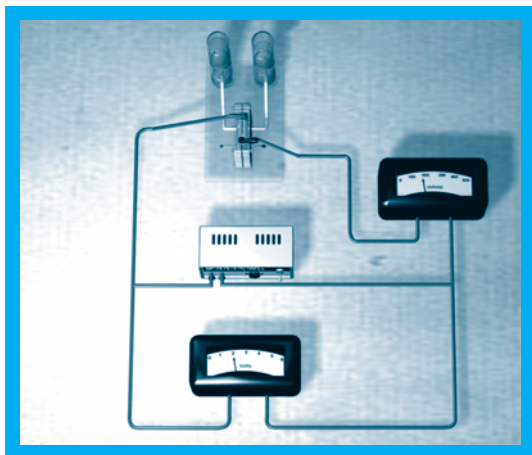
a. Uso de la pila en modo “electrolizador”

Recuerde considerar las instrucciones y las medidas de seguridad que hemos planteado páginas atrás.

Si bien en las especificaciones del producto está indicado el voltaje y la intensidad, los alumnos los comprueban experimentalmente:

- Llenan los tubos de almacenamiento con 30 ml de agua desionizada.
- Suministran corriente a la pila de una fuente de 2 V (el valor recomendado es entre 1.8 Vcc y 2 Vcc).
- En paralelo con la fuente, conectan un voltímetro para comprobar la tensión en la escala de 2 Vcc.
- En serie con la fuente y la pila, conectan un amperímetro para medir la corriente suministrada, en la escala de 200 mA.

En esta experiencia los alumnos utilizan una fuente de energía convencional. Si, en su escuela, disponen de un panel solar o si el presupuesto les permite adquirirlo, el aconsejado es un panel de 2,5 V. La utilización del panel permite almacenar los reactivos durante el día y poder utilizarlos en momentos en que no es disponible contar con el Sol como fuente de energía.



- Una vez que está todo el circuito armado, conectan los tubos a la pila PEM.
- Observan cómo es desplazada el agua en los tanques de almacenamiento, debido a la formación de hidrógeno y de oxígeno, por el proceso de electrólisis.
- Cada 15 segundos, miden la intensidad de corriente y la registran en una tabla, junto con el valor de tensión utilizado.
- Cada 15 segundos, miden el volumen de hidrógeno producido para, luego, realizar una curva de producción de combustible (potencia entregada y energía acumulada), en función del tiempo. Toman, como mínimo, 10 o 15 valores.
- Registran la intensidad de corriente y el voltaje en el circuito, en el rango de 200 mA y 2 Vcc.²⁶
- Con estos registros, realizan una curva que representa la variación de intensidad de la pila en función del tiempo; ésta permite determinar la energía acumulada (potencia entregada) para el cálculo energético.

²⁶ En la experiencia comprueban que la pila, en el vacío, registra una diferencia de potencial de 0.8 V y que, cuando se conecta a un consumo, el registro es de 0.6 V y así se mantiene.

Con los mismos datos extraídos de las tablas, los estudiantes están en condiciones de calcular la potencia de la pila, sabiendo que $P = I \cdot V$ (intensidad de corriente expresada en ampere y V expresada en voltios).

Los alumnos verifican que la pila utilizada no varía su potencia a través del tiempo.

Una vez calculada la potencia, determinan el trabajo que produce la pila como electrolizador.

Si multiplican la potencia por el tiempo aplicado, obtienen la energía acumulada en la pila de combustible por unidad de tiempo.

$$W (\text{Joule}) = P (\text{watt}) \cdot T (\text{s})$$

De la observación, comprueban que el volumen de hidrógeno producido es el doble que el de oxígeno.

t –tiempo–	i –intensidad de corriente–
t ₁	
t ₂	
t ₃	
t ₄	
t ₅	
t ₆	
t ₇	
t ₈	
t ₉	
t ₁₀	
t ₁₁	
t ₁₂	
t ₁₃	
t ₁₄	
t ₁₅	

b. Uso de la pila en modo “pila de combustible”

Una vez que los alumnos han concretado el proceso de producción del hidrógeno y del oxígeno por medio de la electrólisis, están en condiciones de comprobar el funcionamiento del recurso didáctico como pila y de determinar su eficacia, conectándole una resistencia a modo de “consumo”.

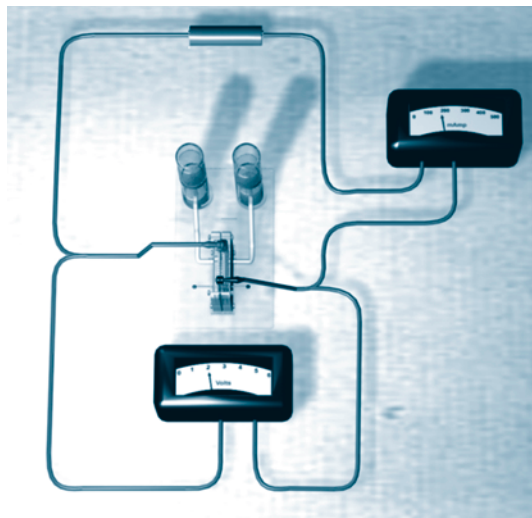
Como la hipótesis de los alumnos es que el agua puede ser el combustible de un auto, su instructor les propone que conecten la pila a un motor de imán permanente de baja tensión (entre 0.5 y 1 V) y que verifiquen su funcionamiento.

Tanto la resistencia que se conecta en serie con la pila como el motor de imán permanente, funcionan a consecuencia del proceso que ocurre en la pila:

El hidrógeno producido mediante la electrólisis pasa por la membrana polimérica de intercambio y se combina con el oxígeno, obteniéndose agua y energía como productos de la reacción.

Con la utilización de la PEM para la electrólisis, no es necesario acidular el agua porque la membrana de intercambio protónico contiene grupos sulfónicos que cumplen la función del ácido sulfúrico en la electrólisis convencional.

A su vez, los electrodos de la PEM son de platino.



El interés de los alumnos es conocer en cuánto tiempo se puede consumir el hidrógeno obtenido, para calcular el rendimiento de esta pila de combustible que va a hacer funcionar su prototipo de auto. Para ello realizan la siguiente experiencia:

- Conectan resistencias de 1 k Ω , 10 k Ω , 100 Ω , en paralelo con la pila.
- Conectan un amperímetro de 500 mA fs (fondo de escala), en serie con la pila.
- Conectan un voltímetro de 2 V fs (fondo de escala).
- Conectan la pila a un consumo; éste puede ser la resistencia o el motor de imán permanente.
- Cada 5 segundos y por un período de 5 minutos, con cada uno de los “consumos” (resistencias o motor), miden la entrega de la pila: el potencial y la intensidad de corriente que circula.
- Al mismo tiempo, registran el volumen de hidrógeno consumido.

Cuando el consumo utilizado es una resistencia, la tabla sugerida para cada resistencia o consumo es:

R_1		$1K\Omega$	
A	V	Ts	Volumen H_2 consumido
Intensidad o corriente	Tensión o diferencia de potencial	Tiempo en segundos	

Por un lado, obtienen una curva que vincula el consumo de energía en función de tiempo (potencia entregada). Por el otro, pueden verificar cuál es el consumo de combustible para la producción de esa cantidad de energía.

Así, los alumnos obtienen el rendimiento de la pila como electrolizador, el rendimiento de la pila como fuente de energía y el control del consumo de combustible por unidad de tiempo.

Con estos datos, ya pueden producir su propio prototipo de auto funcionando con hidrógeno como combustible.

En el taller, el paso siguiente es probar el motor adecuado para la energía que produce la pila y el tiempo en que tarda en consumir el combustible.

Es importante que los alumnos diferencien el funcionamiento de esta pila –en la que ambos reactivos se obtienen por la electrólisis del agua– y el proceso de los autos eléctricos que funcionan con pila de combustible –en donde el hidrógeno proviene de una reserva y el oxígeno se toma del aire–.

Una pila de combustible y una pila voltaica

En la clase de Tecnología, los alumnos se interrogan acerca de si una pila de combustible funciona igual que una pila voltaica.

Para esto, concretan experiencias de:

- Medición de la diferencia de potencial en una pila voltaica.
- Medición de la diferencia de potencial de una pila de combustible de tipo PEM

a. Medición de la diferencia de potencial en una pila voltaica

En esta tarea utilizan un amperímetro, un voltímetro y una pila recargable Ni/Cd, cables cocodrilos, un cronómetro, una lámpara de 0,5 V y un botón interruptor.

- Conectan la pila Ni/Cd en serie con un amperímetro y la carga (resistencia o motor eléctrico).
- Cada 30 segundos, pulsan el botón interruptor y miden la intensidad durante un período de 5 minutos.
- Registran los datos en una tabla.
- Realizan una curva de intensidad en función del tiempo.

t	V Diferencia de potencial	Intensidad de corriente en mA
0 s		
30 s		

Los estudiantes verifican que la diferencia de voltaje de la pila decrece a medida que ésta funciona y que, además, disminuye la intensidad de corriente.

Aquí, la profesora recuerda a los alumnos que la diferencia de voltaje entre los electrodos de una pila está relacionada con el cambio de energía libre ΔG° , e indica que estas propiedades son proporcionales y que tienen signos algebraicos opuestos: cuando E total de la pila > 0 implica que $\Delta G^\circ < 0$.

Los alumnos analizan qué sucede en relación con el potencial eléctrico, $E_{\text{total de la pila}}$, y el cambio de energía libre, cuando una pila funciona durante un tiempo prolongado.

Repiten la experiencia por lo menos tres veces, para poder comparar y extraer datos confiables.

b. Medición de la diferencia de potencial de una pila de combustible de tipo PEM

Los materiales necesarios son los mismos que para la experiencia anterior; sólo que, ahora, los alumnos utilizan la pila PEM de nuestro recurso didáctico.

- Conectan la pila de combustible tipo PEM en serie con un amperímetro y la carga (motor o resistencia eléctrica).
- Cada 30 segundos, pulsan el botón interruptor y miden la intensidad, durante un periodo de 5 minutos.
- Registran los datos en una tabla.
- Realizan una curva de intensidad en función del tiempo.
- Repiten la experiencia por lo menos tres veces.

Una vez realizadas las experiencias de medición de la caída de potencial en una pila voltaica y de medición de la caída de potencial de una pila de combustible de tipo PEM, mediante el análisis de los resultados, los alumnos están en condiciones de responder a la pregunta que los inquietaba.

Sus conclusiones son:

- La pila seca recargable varía su potencial con el transcurso del tiempo. Si bien en el tiempo de medición de la experiencia la variación es mínima, es suficiente para compararla con la pila PEM.
- Cuando la experiencia se realiza con la pila de combustible de tipo PEM, se observa que el potencial no decae con el uso, mientras la pila tenga el combustible necesario para su funcionamiento.
- El combustible para la pila seca está compuesto de sustancias tóxicas para el que las utiliza y, por supuesto, para el medio ambiente.

- El combustible para la pila PEM es el hidrógeno obtenido de la electrólisis del agua, combustible limpio y renovable que no afecta el medio ambiente en comparación con los combustibles fósiles.
- Una pila de combustible nunca se agota; mientras haya combustible, continúa produciendo electricidad. Cuando una batería se agota, debe experimentar un largo e inconveniente tiempo de recarga para reemplazar la electricidad gastada. La contaminación, los costos y los problemas en cuanto a la eficiencia se transfieren desde el emplazamiento de las baterías a la planta generadora central, según dónde se genere la electricidad.
- Al estar sustituida la combustión a alta temperatura de combustibles fósiles por una reacción electroquímica catalizada entre el hidrógeno y el oxígeno, no existe emisión de gases contaminantes (óxidos de nitrógeno y azufre, hidrocarburos insaturados, etc.), con lo que el impacto sobre el medio ambiente es mínimo. Es éste quizás, el aspecto más atractivo de las pilas de combustible.

En la Argentina se venden 5 tipos de pilas no recargables:

- carbón-zinc,
- alcalinas,
- cloruro de zinc,
- óxido de plata,
- óxido de mercurio.

Las dos primeras son las más comunes; las usamos para radios, linternas, *walk-man* y contienen diferentes porcentajes de mercurio.

Las otras tres también se venden mucho; son las baterías botón de los relojes, calculadoras, cámaras de fotos.

En ambos grupos, existe un elemento altamente contaminante: el mercurio; el porcentaje de óxido de mercurio en ellas puede llegar al 50 % de su peso total. Así, cuando uno arroja pilas con mercurio a la basura, éstas van a parar a la tierra, junto con el resto de los residuos; y, a pesar de estar en desuso, siguen descargando ese mineral a su alrededor.

Si multiplicamos las pilas que usa cada habitante por la cantidad de habitantes, nos damos cuenta cómo estamos contaminando nuestra tierra con mercurio. O sea, que la posibilidad de ingesta de este mineral no es un mal lejano sino actual, que puede provocar daños cerebrales, en los riñones y en la función motora.

La mayoría de las pilas y baterías recargables actuales carece de mercurio –pero, no son todas las que se comercializan–. Sin embargo, contienen níquel y cadmio, dos metales pesados altamente tóxicos. La exposición al níquel puede destruir los tejidos de las membranas nasales. Los estudios sobre el cadmio lo califican como cancerígeno y causante de trastornos en el aparato digestivo, además de resultar altamente peligroso para las mujeres embarazadas.

5. LA PUESTA EN PRÁCTICA

Esta parte final de nuestro módulo de capacitación contiene un cuadernillo para la evaluación del recurso didáctico que le presentamos y, de las experiencias didácticas y contenidos propuestos a partir de él:

Esta evaluación tiene dos finalidades:

- Brindarle a usted, como docente que utiliza este material, la oportunidad de documentar el seguimiento de las actividades que realice con sus alumnos, a partir de nuestras propuestas y, en función de esta memoria de acciones, propiciar una reflexión acerca de los cambios, mejoras o enriquecimiento de su propia tarea de enseñanza.
- Obtener de su parte, como usuario de este material, información sobre todos los aspectos en torno a los cuales gira la propuesta.

Para este relevamiento de información, usted encontrará, a continuación, una serie de cuestionarios organizados básicamente en tablas o matrices para completar. Con los datos que usted exprese en ellos esperamos tener una realimentación que nos permita mejorar todos los componentes de la serie de publicaciones “Recursos didácticos” y enriquecerla con propuestas o documentación complementaria para aquellos docentes que planteen iniciativas, interro-

gantes o dificultades específicas con relación a la construcción del recurso didáctico, a las actividades de aula, a los contenidos científicos y tecnológicos, a la metodología de enseñanza, a los procedimientos incluidos, a la información sobre materiales y a otros aspectos.

Dada la importancia que esta información de retorno tiene para nuestro trabajo de seguimiento, mejora y actualización, le agradecemos que nos remita el cuadernillo con todas las observaciones, comentarios o sugerencias adicionales que nos quiera hacer llegar. Para ello puede remitirnos una copia, a través de correo postal, a

Área de Monitoreo y Evaluación –CeNET–
Oficina 112
Saavedra 789. C1229ACE.
Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
República Argentina.

O, si lo prefiere, solicitarnos el archivo electrónico de las páginas que siguen a evcenet@inet.edu.ar, enviándonos la versión digitalizada de sus respuestas a través del mismo correo electrónico.

Desde ya, muchas gracias.

Las dimensiones que se consideran para la evaluación del módulo de capacitación y del recurso didáctico son:

1. Nivel educativo
2. Contenidos científicos y tecnológicos
3. Componentes didácticos
4. Recurso didáctico
5. Documentación
6. Otras características del recurso didáctico
7. Otras características del material teórico
8. Propuestas o nuevas ideas

[illegible]

Asignatura/espacio curricular en el que usted lo utilizó:.....

(*) Por favor, indique la modalidad, la orientación, la especialidad, etc.

2. Contenidos científicos y tecnológicos trabajados:

[illegible]



3. Componentes didácticos:

3.1. Testimonios (situaciones problemáticas) presentados en el material

	Sí	No	Otro ¹
a. ¿Le resultaron motivadores para iniciar las actividades propuestas?			
b. ¿Le facilitaron el desarrollo de contenidos curriculares que usted tenía previstos?			
c. A su criterio, ¿están vinculados con el recurso didáctico que se le propone desarrollar?			
d. ¿Le facilitan la organización de situaciones didácticas para el trabajo de los contenidos científicos y tecnológicos propuestos?			
e. El nivel de las situaciones problemáticas que se plantean, ¿es el adecuado al nivel educativo para el que está previsto?			
f. En caso negativo, ¿permiten adecuaciones para ser trabajados en el nivel educativo de sus alumnos o en otro nivel educativo?			
g. Los testimonios iniciales, ¿permiten generar diferentes soluciones (soluciones tecnológicas o didácticas)?			

En caso que su respuesta sea negativa (en cualquier ítem), le pedimos que nos indique por qué (señale el número del ítem a que corresponde su comentario).....

.....

.....

.....

.....

.....

Otro (indique el ítem al que corresponde el comentario):

.....

.....

.....

.....

.....

¹ Utilice esta opción para indicar que agregará comentarios al final de este sector de la matriz.

3.2. Estrategias

A partir de la utilización de las propuestas de trabajo en el aula contenidas en el material y del recurso didáctico con el que se asocian, le solicitamos que nos indique (tomando como referencia su forma de trabajo anterior a disponer del material), cómo resolvió las actividades consignadas en la tabla siguiente:

3.2.1. Contextualización de la estrategia didáctica	Mejor	Igual	No aplicado ²	Incorporado ³
Con respecto a su forma habitual de trabajo, usted logró:				
a. Determinar las capacidades, habilidades, conocimientos previos necesarios para iniciar las actividades propuestas.				
b. Organizar, asociar, relacionar los conocimientos científicos y tecnológicos para resolver un problema tecnológico.				
c. Recortar (identificar) los contenidos científicos y tecnológicos a trabajar con sus alumnos para el desarrollo de un sistema/producto tecnológico como el propuesto por el material.				
d. Vincular estos conocimientos con los saberes previos de los alumnos.				
e. Establecer la secuencia adecuada de los contenidos científicos y tecnológicos, y de los procedimientos para generar una solución tecnológica (la propuesta por el material u otra diferente).				
f. Organizar una experiencia didáctica integrando conocimientos científicos y tecnológicos, metodología de resolución de problemas y procedimientos propios del trabajo tecnológico.				
g. Otras (que haya incorporado o hecho mejor con el recurso).				

² No aplicado: No lo hizo antes ni ahora con este recurso didáctico.
³ Incorporado: Integró la estrategia a sus clases a partir de la utilización del recurso didáctico propuesto.





3.2.2. Desarrollo de la estrategia didáctica	Mejor	Igual	No aplicado	Incorporado
Con respecto a su forma habitual de trabajo, usted logró:				
h. Encuadrar la tarea a partir de la formulación de uno (o varios) problemas.				
i. Explicitar consignas de trabajo que plantean una situación problemática.				
j. Organizar las actividades de aprendizaje atendiendo a las etapas propias de la resolución de problemas.				
k. Utilizar técnicas de trabajo grupal.				
l. Promover el trabajo colaborativo y cooperativo.				
m. Otras (que haya incorporado o hecho mejor con el recurso).				

3.2.3. Aspectos cognitivos (proceso de aprendizaje de sus alumnos)	Mejor	Igual	No aplicado	Incorporado
Con respecto a su forma habitual de trabajo, usted logró:				
n. Estimular a sus alumnos en la búsqueda de información e investigación en torno al problema eje del material.				
o. Promover la consulta a variadas fuentes de información.				
p. Rescatar, incorporar los aportes del grupo para identificar aspectos o variables críticas del problema.				
q. Evaluar los conflictos cognitivos propios del proceso de aprendizaje.				
r. Detectar, evaluar, la comprensión asociativa.				
s. Promover la reflexión sobre las actividades realizadas y las estrategias utilizadas en cada parte del proceso.				
t. Otras (que haya incorporado o hecho mejor con el recurso).				

4.1. Construcción del recurso didáctico

4.1.1. Utilizó:

- Si su respuesta fue “d.” indíquenos la razón, por favor:

[illegible]

4.1.2. ¿Realizó todo el proceso de construcción del recurso didáctico con sus alumnos? (Conteste este apartado en caso de que haya construido un equipo igual al propuesto. En caso contrario, pase al apartado 5 “Documentación”)

Sí	No
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.1.3. En caso de que su respuesta sea afirmativa, le pedimos que nos indique:

	Sí	No
a. ¿Pudo seguir sin dificultades los procedimientos indicados en el “Manual de construcción”?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b. La secuencia indicada, ¿fue la adecuada para la construcción?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c. El grado de complejidad, ¿fue el apropiado para el nivel educativo a que se dirige el recurso?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
d. Los contenidos científicos asociados, ¿son pertinentes para el desarrollo del recurso propuesto?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
e. Los contenidos tecnológicos asociados, ¿son pertinentes para el desarrollo del recurso propuesto?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
f. Con sus alumnos, ¿construyó el recurso didáctico siguiendo el proceso y la metodología de resolución de problemas?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
g. ¿Siguió todos los procedimientos propuestos para la construcción pero incorporó sus propios contenidos científicos y tecnológicos?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
h. Por el contrario, ¿hizo adaptaciones en los procedimientos de construcción pero mantuvo los mismos contenidos?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
i. ¿Realizó la construcción siguiendo las actividades de aula propuestas en el material?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
j. ¿Diseñó sus propias experiencias en función de su grupo de alumnos?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sí	No
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

¿Completó todas las etapas del proceso de construcción propuesta?

En caso negativo, indíquenos a qué fase llegó:

a. <input type="checkbox"/> Planificación.	b. <input type="checkbox"/> Diseño en dos dimensiones.
c. <input type="checkbox"/> Construcción, armado.	d. <input type="checkbox"/> Ensayo y control.
e. <input type="checkbox"/> Superación de dificultades (evaluación del funcionamiento, siguiendo las indicaciones y la lista de control que brinda el material).	
f. <input type="checkbox"/> Construcción de otro equipo que se adapta más a sus necesidades curriculares (Si marcó esta alternativa, lo invitamos a responder, directamente, el apartado 4.1.5.).	

	Sí	No
a. La especificación de los materiales para la construcción, ¿fue suficiente para conseguirlos?		
b. ¿Utilizó los mismos materiales (en calidad y tipificación) indicados en la documentación?		
c. ¿Reemplazó materiales, instrumentos, componentes, piezas, etc., sin alterar el resultado final previsto en el material?		
d. La especificación de las herramientas a utilizar, ¿le resultó adecuada?		
e. La cantidad de herramientas indicadas, ¿fue la necesaria?		
f. Los instrumentos, ¿estuvieron bien especificados?		
g. El tipo y cantidad de instrumentos, ¿fueron los adecuados para armar el recurso didáctico?		

a. ☐ El propuesto no se ajustaba a sus necesidades curriculares.

b. ☐ No pudo conseguir los materiales o instrumentos indicados.

c. ☐ No pudo interpretar el manual de construcción.

d. ☐ Otra (Por favor, especifíquela).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



4.1.6. ¿Qué características específicas destacaría en este recurso didáctico diferente al propuesto por el material, que sus alumnos han construido. (Marque todas las opciones que considere necesarias):

a. ☐ Se ajusta mejor a los contenidos curriculares que necesita trabajar.

b. ☐ Es más económico.

c. ☐ Permite su reutilización (mediante el desarme y armado, en función de necesidades didácticas).

d. ☐ Es más adaptable (a diversos usos).

e. ☐ Otra (Por favor, especifique):

.....

.....

.....

.....

f. Descripción del recurso didáctico construido:

.....

.....

.....

.....

.....

g. Indique las principales diferencias con el equipo propuesto (estructurales, funcionales, didácticas):

.....

.....

.....

.....

.....

4.2.1. ¿Cómo utilizó el recurso didáctico (hecho por usted o ya construido), en las experiencias didácticas que concretó? (Puede marcar todas las opciones que crea necesarias)

- a. ☐ Aprovechando todo el proceso y la secuencia de construcción propuestos en el material.
- b. ☐ Aplicándolo (como algo ya completo) a la solución de problemas diferentes al propuesto en el material.
- c. ☐ Utilizándolo como un sistema tecnológico (ya construido) en las funciones para las que está pensado (manejo de las variables, control de operaciones, etc.).
- d. ☐ Otra (Por favor, especifique):

[illegible]



4.2.2. Ya sea que haya desarrollado el recurso didáctico con sus alumnos según las especificaciones del material, ya sea que haya construido otro diferente o que haya utilizado un equipo ya construido, en relación con las actividades que usted venía realizando, la utilización del recurso didáctico propuesto por el material le permitió (seleccione la opción que coincida con sus experiencias):

Con respecto a su forma habitual de trabajo, este recurso didáctico le permitió a usted, como docente:	Mejor	Igual	No aplicable ⁴	Otro ⁵
a. Integrar contenidos científicos y tecnológicos en la solución de situaciones problemáticas de carácter tecnológico.				
b. Diseñar situaciones de enseñanza y de aprendizaje centradas en la resolución de problemas tecnológicos.				
c. Planificar y promover en sus alumnos la organización del trabajo (planificación y secuenciación de tareas), según el proceso tecnológico.				
d. Favorecer la identificación de aspectos o variables críticas de una situación problemática.				
e. Organizar las actividades de manera que facilite la toma de decisiones por parte de los alumnos (determinación y selección de alternativas, opciones de diseño, materiales, etc.).				
f. Organizar la actividad de sus alumnos en función de soluciones diversas a los problemas planteados.				
g. Agregue otras que usted considere haber logrado de una mejor manera con este recurso didáctico				

⁴ NA: No aplicable; es una actividad que no realizó antes ni ahora.
⁵ Otro: Recuerde utilizar esta opción para indicar que agregará comentarios al final de este sector de la tabla.

[illegible]

Capacidad de aplicar y transferir	Mejor	Igual	No aplicable	Otro
s. Interrelacionar los datos, técnicas y procedimientos en el diseño de la solución.				
t. Utilizar técnicas de representación adecuadas al equipo que se construye o en el ya construido que se utiliza.				
u. Integrar los conocimientos científicos y tecnológicos en los momentos pertinentes para el diseño de la solución.				
v. Relacionar, ensamblar componentes en la secuencia adecuada.				
w. Utilizar de manera correcta la simbología y los lenguajes propios de la tecnología (representación gráfica, simbólica, etc.).				
x. Transferir conocimientos científicos y tecnológicos en otras actividades similares.				
y. Agregue otras que considere que sus alumnos alcanzaron mejor con este recurso didáctico				

Otro (Por favor, exprese aquí los comentarios que tenga, identificando el ítem con la letra que corresponda):

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....





5. Documentación (Material teórico, manual de procedimientos y propuestas didácticas):

5.1. ¿Cómo calificaría los aportes del material recibido (encuadre y desarrollo teórico, y experiencias propuestas para el aula)?

	MV ⁶	V	PV
a. Por su potencialidad didáctica (sugerencias, propuestas de trabajo en el aula, papel motivador, etc.).			
b. Para sus necesidades curriculares (desarrollo de los contenidos y experiencias previstas en su planificación).			
c. Para organizar, planificar, concretar experiencias didácticas relacionadas con problemas de Educación Tecnológica.			
d. Para renovar, actualizar, ampliar (subraye el que se ajusta más a su experiencia) los contenidos que desarrolla en su área/ disciplina.			
e. Para trabajar conocimientos científicos y tecnológicos de manera asociada a un problema tecnológico.			
f. Para organizar experiencias de aprendizaje en torno a la utilización de recursos didácticos.			
g. Para utilizar un recurso didáctico en el marco de experiencias didácticas organizadas en función de la resolución de problemas.			
h. Para integrar mejor contenidos científicos y tecnológicos en la solución de problemas de carácter tecnológico.			
i. Para estimular la generación creativa de otros recursos didácticos.			

Otras (Especifíquelas, por favor)

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

⁶ Escala= MV: Muy valioso / V: Valioso / PV: Poco valioso

5.2. Manual de procedimientos para la construcción y el funcionamiento del recurso didáctico

En caso de que haya seguido los procedimientos contenidos en el Manual (ya sea para hacer un equipo igual o uno diferente al propuesto), le pedimos nos indique si:

	Sí	No	Otro
a. ¿Pudo seguir todos los procedimientos descritos, sin dificultad?			
b. ¿La secuencia descrita le resultó la adecuada?			
c. ¿La secuencia establecida le planteó alternativas según algún criterio (disponibilidad de los materiales, trabajo de contenidos específicos, etc.)?			
d. ¿La finalidad (para qué sirve) del equipo está indicada con claridad?			
e. ¿Se establecen cuáles son los contenidos (científicos o tecnológicos) que se asocian al equipo a construir?			
f. ¿Se determina la relación entre conocimientos implicados, procedimientos a seguir, materiales a utilizar y experiencias posibles de realizar?			
g. ¿Considera que la relación anterior es pertinente (es la que corresponde) para la construcción que se propone?			
h. ¿La descripción de los procedimientos le facilitaron la organización de las experiencias de trabajo con sus alumnos?			
i. ¿Pudo seguir las indicaciones para la puesta en funcionamiento?			
j. ¿Todas las indicaciones para el uso son claras?			

Por favor, fundamente sus respuestas negativas o agregue los comentarios que crea pertinentes (identifique el ítem a que se refiere):

Otro (identifique con la letra que corresponda el ítem sobre el que hace observaciones)



6.2. Técnicas (Por favor, complete tanto si construyó el equipo como si utilizó uno ya construido)

	Sí	No
a. Portabilidad. Puede ser utilizado en el taller, aula, laboratorio.		
b. Modularidad. Puede ser adaptado a diversos usos; para trabajar diversos contenidos curriculares o para realizar diferentes experiencias didácticas; para aprendizaje, demostraciones, análisis, etc.		
c. Reutilización. Posee partes, componentes, bloques o subsistemas que pueden ser desmontados para volver a su estado original, y usados en sí mismos o en forma independiente.		
d. Incrementabilidad. Puede complejizarse agregando piezas o completando el sistema para mejorar su funcionalidad, rendimiento, precisión o calidad.		
e. Aplicabilidad múltiple. Como sistema tecnológico, permite que usted seleccione las variables con las que desea trabajar (algunas de las que maneja el sistema, todas las previstas o agregar otras).		

Si su respuesta es negativa en alguna de ellas, indique por qué, identificando su comentario con la letra correspondiente:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



6.3. Didácticas (Por favor, complete tanto si construyó el equipo como si utilizó uno ya construido)



	Sí	No
a. Congruencia. Tiene relación con los testimonios de realidad incluidos en el módulo de capacitación.		
b. Pertinencia. Los componentes, bloques funcionales y sistemas son adecuados para el trabajo con los contenidos curriculares de la educación técnico-profesional.		
c. Integración. Posibilita el tratamiento asociado de los conocimientos científicos y tecnológicos propuestos en el material.		
d. Escalabilidad. Es posible utilizarlo con proyectos o problemas con diferentes niveles de complejidad.		
e. Complejidad creciente. Las soluciones alcanzadas para una parte del problema, sirven de base para las siguientes o permite que, agregando componentes, sea utilizado como solución a problemas más complejos.		
f. Adaptabilidad. Permite su adaptación a soluciones diversas en torno a las problemáticas planteadas.		

Si su respuesta es negativa en alguna de ellas, indique por qué, identificándola con la letra correspondiente:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

7. Otras características del material teórico:

¿Cómo calificaría el diseño del módulo escrito (desarrollo de contenidos científicos y tecnológicos, y propuestas de experiencias didácticas)?

	MB ⁷	B	R	M
a. Formato gráfico del material (distribución del contenido, márgenes, distribución de texto e imágenes, inserción de gráficos, diseño gráfico global, etc.).				
b. Lenguaje utilizado (claridad, adecuación al destinatario).				
c. Organización (secuencia entre cada parte).				
d. Adecuación al destinatario (evidencia que se toma en cuenta que es un material para ser trabajado en un ámbito escolar).				
e. Pertinencia de los conocimientos científicos con las problemáticas planteadas.				
f. Pertinencia de los conocimientos tecnológicos con las problemáticas planteadas.				
g. Vinculación (pertinencia) del recurso didáctico que propone con las situaciones didácticas planteadas.				
h. Congruencia (vinculación) de los contenidos propuestos con el recurso didáctico.				
i. Aporte metodológico para enriquecer sus estrategias didácticas.				
j. Aporte teórico (en general) para su trabajo docente.				
k. Valor motivador para el trabajo con sus alumnos.				
l. Valor orientador para generar sus propios recursos didácticos.				
m. Concepción innovadora para el trabajo didáctico en la educación técnico-profesional.				

Si marcó la opción “Malo”, le pedimos que nos explique por qué:

.....

.....

.....

⁷ Escala= MB: Muy bueno / B: Bueno / R: Regular / M: Malo



8. Propuestas o nuevas ideas:

Tanto para los autores de este material, como para el CeNET como institución responsable de su elaboración y distribución, una de las finalidades más importantes es suscitar en los educadores nuevas ideas, aplicaciones o propuestas creativas a partir de la lectura o el trabajo con el módulo.

En función de ello, le solicitamos que nos indique:

Si a partir del módulo (contenido teórico y recurso didáctico) usted, en su calidad de (marque todas las opciones que correspondan):

a. ☐ docente a cargo de un grupo de alumnos

b. ☐ directivo

c. ☐ responsable de la asignatura:

d. ☐ lector del material

.....

e. ☐ otro (especifique):

.....

.....

ha generado nuevas ideas o propuestas:

Respecto de los contenidos (independientemente del recurso didáctico):

	Sí	No
a. Organización de su asignatura.		
b. Contenidos científicos y tecnológicos (formas de asociarlos, ampliarlos, desarrollarlos, etc.)		
c. Planificación de las experiencias didácticas.		
d. Trabajo con resolución de problemas.		

Otras (Por favor, especifique en qué ámbitos ligados con los contenidos ha generado estas nuevas ideas o propuestas):

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Si su respuesta fue afirmativa le pedimos que la amplíe:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



En relación con el recurso didáctico. Le pedimos que nos relate (libremente) las nuevas ideas o propuestas que el trabajo con este material le ha suscitado:

This image shows a full page of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page, typical of notebook or legal stationery. There are no margins, text, or other markings on the page.

Títulos en preparación de la serie “**Recursos didácticos**”.

- Agenda electrónica para personas con disminución visual
- Arquitectura bioclimática
- Auto solar
- Banco de trabajo
- Generador eólico
- Manipulador neumático
- Máquina de vapor
- Matriceria. Moldes y modelos
- Planta de tratamiento de aguas residuales
- Simuladores interconectables basados en lógica digital
- Sismógrafo
- Sistemas SCADA para el control de procesos industriales
- Tren de aterrizaje