

# Combustible hidrógeno para el ciclo Rankine

Rafael Sánchez Dirzo<sup>1</sup> y Rodolfo Silva Casarín<sup>2</sup>

## ABSTRACT (Hydrogen Fuel for Rankine Cycle)

As we become more conscious of the problem of global warming, CO<sub>2</sub> is seen as the principal villain in the drama, though it is not the only substance involved. Since the production of CO<sub>2</sub> comes mainly from motor vehicles and electricity-generating processes, most investigation is focused on energy saving and improving efficiency in these two areas.

In this paper we address the question of electricity generation. The Rankine cycle is the means by which most electricity is generated, using heat combustion, with consequent polluting emissions. By changing the combustion material, from oil, gas or coal, to hydrogen, as in electrolysis cycles, we could eliminate the emissions and recycle the hydrogen.

At present only 2% of the electricity generated worldwide comes from renewable, non-polluting sources (sun, wind and sea). In this article we look at the possibility of harnessing sea power to produce the energy required to burn hydrogen in an innovative Rankine cycle which would allow us to produce electricity without further contaminating the planet.

**KEYWORDS:** Rankine cycle, fuel cycle, renewable energies, process flow diagrams.

## Introducción

El bióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, es la sustancia química más célebre por el efecto invernadero que está causando sobre el planeta pero no es la única. Producto de los procesos de combustión del petróleo, gas natural, carbón y madera, su presencia en la atmósfera rebasa ya las 380 ppm y va en aumento, el límite considerado para un cambio climático irreversible es de 500 ppm. Los pronósticos más pesimistas indican que se llegará al mismo a mediados del siglo.

Ya que el CO<sub>2</sub> proviene de la combustión de los hidrocarburos utilizados en los automóviles y las centrales de potencia eléctrica principalmente, la investigación para disminuir su presencia se centra en incrementar la eficiencia y los ahorros de dichos dispositivos pero, pese a los notables avances que la ingeniería ha logrado en estos rubros ello aún no es suficiente. Del total de la electricidad generada en el mundo, 39.8% proviene de quemar carbón, 19.6% de quemar gas natural, 15.7% de fisión nuclear, 6.7% de quemar los líquidos del petróleo, 16% de las hidroeléctricas y el resto, menos de 2%, de las energías del mar, sol y vientos. Estas últimas, tecnologías que no emiten CO<sub>2</sub> al generar electricidad, tienen marginal presencia en la industria energética y son conside-

radas tan sólo como promisorios “juguetes científicos”.

Las centrales de potencia operan basadas en ciclos termodinámicos conocidos como Rankine y Brayton, y cuando operan juntos se les llaman ciclos combinados; éstos forman parte de un grupo de ciclos que sostienen todo el movimiento de las sociedades contemporáneas. Disminuir no solamente la presencia del CO<sub>2</sub> en el planeta sino el resto de sustancias que la contaminan como los productos de los fenómenos de combustión, significa incidir en tales ciclos para innovarlos. Al momento las mejoras a los ciclos Rankine y Brayton se han centrado en variar las condiciones de presión y temperatura de su fluido motor, mejorar la composición de su combustible (quitar compuestos de azufre por ejemplo), usar materiales más resistentes, mejorar el diseño de sus turbinas y aplicar sistemas de control automatizado, lo que ha permitido, para el caso de las mejores centrales eléctricas que son precisamente de ciclos combinados, alcanzar el 60% de eficiencia, logro notable en tanto que el promedio de las centrales de potencia convencionales —que siguen siendo mayoría— es de 34%.

Existe una posibilidad adicional de innovación y es el cambio de combustible. De quemar hidrocarburos a quemar hidrógeno se tendría la alternativa de operar un ciclo del combustible toda vez que el hidrógeno tiene la capacidad de volverse a reciclar, una propiedad notable que está fuera del alcance del resto de los combustibles y que la economía lineal clásica no considera cuando se determinan sus costos de producción. La investigación del hidrógeno como combustible se ha centrado en su uso al transporte, destacadamente la industria aeroespacial, y la generación de electricidad mediante las celdas de combustible. Pero hay un área que este trabajo pre-

<sup>1</sup> Fes- Zaragoza, UNAM.

**Correo electrónico:** rafaelsanchezdirzo@yahoo.com.mx

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería, UNAM.

**Correo electrónico:** RSilvaC@ii.unam.mx

**Recibido:** 21 de noviembre 2007; **aceptado:** 29 de octubre 2008.

tende resaltar: la alternativa de usar el hidrógeno como combustible para operar el ciclo Rankine (en los últimos lustros en combinación con el ciclo Brayton).

## El problema del combustible

Los ciclos de potencia que sostienen el movimiento de la infraestructura material de nuestras sociedades modernas son: Otto y Diesel, que mueven a los millones de autos y maquinaria pesada; Brayton, que hace volar aviones y cohetes; Rankine y Brayton, que separados o combinados producen casi toda la electricidad en el mundo, y el ciclo de Carnot, que sustenta el desarrollo teórico de todos ellos. Existen dos ciclos adicionales que poco a poco se abren paso en la ingeniería conocidos como ciclo Stirling y ciclo Ericsson. Todos estos ciclos pueden encontrarse en los textos de termodinámica y representan uno de los más notables resultados de la interacción entre la ciencia y la tecnología, sin la cual sería inconcebible nuestra civilización. Hasta el momento la mayor parte de la energía para operar estos ciclos proviene de quemar hidrocarburos y en menor medida de fisiónar el núcleo de uranio. En promedio los hidrocarburos usados como combustibles tienen un calor de combustión de 40 MJ por cada kilogramo de combustible quemado.

En la práctica las reacciones de combustión que se llevan a cabo para operar los ciclos de potencia están muy lejos de ser elementales. Lo que se quema son mezclas de extrema complejidad y se les denominan genéricamente naftas, mazutes, gasolinas, combustóleos, diésels, turbosinas y GLP (Gases Licuados a Presión) cuando son líquidos; biogas, gas natural y singas cuando son gases, y biomasa, lignitos, esquistos, turbas, hullas, coques, bagazos, carbonos y leñas cuando son sólidos. Algunos hidrocarburos se presentan en dos o tres estados de agregación como los betunes, ceresinas y parafinas. Cada combustible debe poseer propiedades fisicoquímicas específicas para ser usado en una u otra máquina y su caracterización es una tarea fundamental para el correcto funcionamiento de las mismas. Las centrales eléctricas que utilizan hidrocarburos como combustible emiten al ambiente diversas sustancias; un ejemplo lo son las centrales que queman carbón o combustóleo, y las nucleoelectricas de 1 GW de capacidad instalada —para comparar México tiene una capacidad instalada de 50 GW—, que emiten al ambiente los promedios mostradas en la tabla 1 (Culp, 1991).

Sólo las emisiones de las centrales eléctricas lanzadas al planeta entero son impresionantes. Si se suma las que el transporte genera, los contaminantes se cuantifican en miles de millones de toneladas al año. El problema de disminuirlas conlleva el problema de quemar menos y utilizar más eficientemente el petróleo, carbón, gas natural y leña, y de ahorrar y hacer un uso razonable de su consumo. Esto en sí sería un gran avance y significaría parte de la solución al problema. La otra parte lo es sin duda el desarrollo de las fuentes de energía renovables, particularmente obtener energía eléctrica de los mares, vientos y sol. Conociendo la naturaleza caótica de tales fuentes es necesario desarrollar técnicas para almacenar quí-

Tabla 1. Emisión de contaminantes en centrales de 1 GW.

Emisiones	Carbo- eléctricas	Termo- eléctricas	Nucleares
	(ton/año)		
CO <sub>2</sub>	7,800,000	4,700,000	0
SO <sub>2</sub>	40,000	91,000	0
NOx	9,500	6,500	0
Sólidos			
– cenizas	330,000	0	0
– polvos	6,000	6,500	0
– productos de fisión	0	0	0.9
– combustible gastado	0	0	30

micamente parte de su inmensa potencialidad. Tal almacenamiento puede lograrse mediante el acoplamiento de los sistemas para captar a las renovables y las plantas de electrólisis de agua. Estas últimas pueden diseñarse para responder al carácter irregular y difuso de las primeras, lo que conllevaría a abrir la posibilidad de plantear la producción masiva del hidrógeno en su función de combustible.

## Plantas de electrólisis: la producción industrial del hidrógeno

En la actualidad el 96% de las 65 millones de toneladas al año de hidrógeno —equivalente a 8 EJ, menor que el 2% del suministro total de energía primaria en el mundo—, es obtenido de la reforma del metano, refinerías y gasificación del carbón (IEA, 2007). El resto se obtiene por la electrólisis del agua. Hasta para la obtención del hidrógeno la participación de los hidrocarburos es notable. No será fácil revertir esta realidad aunque el conocimiento básico para hacerlo ya existe. El cuestionamiento más fuerte que se le ha hecho al hidrógeno como combustible es de tipo económico. El informe de la IEA antes aludido muestra que en efecto su producción por electrólisis es en promedio de dos a tres veces más costosa que su obtención por medio de la reforma del gas natural y como energético cuesta al menos el doble que por ejemplo la gasolina. Pero si se consideran los costos ocultos de la quema de los hidrocarburos en su impacto negativo sobre la salud y los ecosistemas, resulta que éstos son iguales o más caros que el hidrógeno si consideramos también que éste se puede reciclar en el caso de usarse en la generación de electricidad. En otras palabras, si bien el hidrógeno es más oneroso que el carbón, combustóleo y gas natural —combustibles utilizados en las centrales de potencia—, la cantidad requerida de hidrógeno es mucho menor para generar la misma cantidad de electricidad, con la ventaja adicional de que puede ser reciclado. El papel de combustible que el hidrógeno puede jugar en el transcurso del siglo XXI hace necesario que el proceso de electrólisis empiece a buscar las economías de escala. Aunque la electrólisis es una tecnología madura y comercial se enfrenta al complejo problema de alimentarse de electricidad que no provenga de la quema de los hidrocarburos sino de la

generada por las energías renovables: sol, vientos y mares. Tal problema está siendo resuelto con éxito en los diversos frentes de la innovación tecnológica. Así el desarrollo de sistemas que acoplen paneles fotovoltaicos con plantas de electrólisis tiene años de investigación y desarrollo (Koukovinos *et al.*, 1982; Stahl *et al.*, 1995; Abaoud *et al.*, 1998; Meurer *et al.*, 2000). Lo mismo se podría decir del acoplamiento de aerogeneradores y plantas de electrólisis (Bechrakis *et al.*, 2006; Thanaa *et al.*, 2006). El acoplamiento de dispositivos océanomotrices con plantas de electrólisis empieza a investigarse con prototipos de tipo flotante (Temeev *et al.*, 2006). Todo está dispuesto para el desarrollo de los sistemas híbridos a escala industrial donde el acoplamiento de las diversas fuentes alternas con los sistemas de electrólisis pueda generar al menos el 20% del suministro total de energía requerida por el mundo, concentrada en el hidrógeno para los próximos 50 años. El reto de transformar las corrientes, olas y ondas marinas, el flujo de fotones solares y las corrientes de aire en la electricidad que alimente a las centrales de electrólisis es una tarea con respuestas positivas y que deben ser abiertamente apoyadas por la sociedad. El problema está pasando de la escala de la investigación básica a los niveles de investigación de la ingeniería básica y de detalle.

Se requiere también una difusión masiva de los logros hasta ahora alcanzados en la sustitución de los hidrocarburos como combustibles para conocimiento de nuestras sociedades que, a final de cuentas, son las que decidirán qué futuro construir: uno donde los hidrocarburos sigan predominando como energéticos u otro, donde las renovables tengan una mayor participación. Describir en este breve espacio los frutos de la ingeniería para resolver este problema no es posible, la bibliografía crece (Sørensen, 2004; Volker, 2005) y los prototipos en ideas, diseños, pruebas y comercialización se cuentan por decenas, considerándose entre los más ingeniosos que el hombre ha concebido para desplazar a los hidrocarburos como combustibles.

Las plantas de electrólisis no sólo son una tecnología madura y comercial sino que sus innovaciones como plantas de proceso se equiparan a las de la industria petroquímica e incluso las superan por la expectativa futura que se ha depositado en ellas. Estas plantas se diseñan y construyen desde escala de laboratorio, pasando por planta piloto hasta niveles industriales y su diseño es versátil y modular. Por desgracia existen pocas empresas dedicadas a su innovación, diseño, construcción, operación y mantenimiento. En el futuro esto va a ser muy costoso para los países en desarrollo, ya que se tendrán que importar como actualmente se importan las plantas petroquímicas. Las centrales de electrólisis modernas son capaces de trabajar con agua en fase vapor lo que incrementa su eficiencia (Kreuter, 1998; Sigurvinnsson, 2007). Puede ser simulado su comportamiento como planta de proceso (Vanhanen, 1994; Rzaeva, 2001) y se reportan también aspectos de optimización (Kothari, 2006). A estas alturas se puede cuestionar: "Si ya produce la electricidad con energías renovables, ¿no sería mejor utilizarla para satisfacer otras ne-

cesidades en lugar de emplearla en producir hidrógeno para volver a producir electricidad?" La respuesta se está encontrando en la investigación simultánea de ambas tareas. Como arriba se afirmó, la naturaleza de las energías renovables es intermitente (aleatorio y "caprichoso", no responden en el momento preciso en que requerimos su energía) y difusa (su potencia en la unidad de área es baja) lo que obliga a disponer de algún tipo de almacenamiento. El almacenamiento más adecuado lo es sin duda el almacenamiento químico en forma de hidrógeno por medio de la electrólisis de agua. Las plantas de electrólisis pueden responder a tal naturaleza de las renovables logrando concentrar su energía ya que el calor de combustión del hidrógeno es tres veces mayor que el de cualquier hidrocarburo y, adicionalmente, su producto es agua que puede volverse a reciclar rompiendo su molécula por medio de las energías renovables. De un ciclo del combustible se puede hablar. En escenarios que favorezcan la generación de electricidad proveniente de las renovables, parte de la energía de éstas deberá ser almacenada y el resto, en efecto, podrá consumirse directamente y en el momento en que se produce.

### Integración del ciclo del combustible hidrógeno al ciclo Rankine

Teniendo disponible el combustible hidrógeno a partir de la energía híbrida del sol, vientos y mares, el segundo problema a resolver es cómo utilizarlo para operar el ciclo Rankine. El proceso clásico del ciclo Rankine se muestra en el diagrama 1. Su descripción es la siguiente: la caldera es alimentada con agua líquida por medio de una bomba. El agua se vaporiza en la caldera al recibir el calor de combustión de algún combustible particular obtenido del petróleo, gas natural y/o carbón, y pese a que los productos de la combustión son tratados, las emisiones no pueden evitarse. El vapor que sale de la caldera se lanza en forma de chorro hacia la turbina a la que se le acopla un generador eléctrico. El vapor luego de realizar su trabajo se envía al condensador donde retorna a su fase líquida y ésta se vuelve a bombear hacia la caldera, donde el ciclo se reinicia. No existe proceso fisicoquímico más simple y que más haya contribuido a elevar el bienestar de la humanidad que el ciclo Rankine. Sus innovaciones, en el caso del tratamiento a las emisiones inevitables al ambiente se han concentrado en la instalación de filtros, lavadoras para desulfurar el gas de chimenea, reactores catalíticos para disminuir las emisiones de los compuestos de nitrógeno, precipitadores electrostáticos y captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (Beér, 2007; Hawkins *et al.*, 2006; IEA, 2007). Considerables inversiones se llevan a cabo para modernizar las centrales de potencia, incrementar su eficiencia y disminuir sus emisiones. Esto es plausible y deberá seguirse haciendo pero mostremos los diagramas que describen cómo hacer uso del ciclo hidrógeno como combustible, para operar el ciclo Rankine.

Mostremos dos posibilidades de integrar el ciclo del combustible hidrógeno al ciclo Rankine. Esto se muestra en los diagramas de proceso 2 y 3; las diferencias entre éstos son las operaciones unitarias de las figuras 4a y 4b.

Elegir una o ambas opciones es un problema que la ingeniería básica en curso está investigando. Nos encontramos en una de las fronteras del conocimiento en ingeniería energética más interesantes y pertinentes toda vez que resolviendo cuál proceso elegir (que podrían ser ambos), los sistemas de energía renovables particularmente el sol, vientos y mares, podrían competir con las centrales de energía basadas en los hidrocarburos y en la fisión del uranio. Siendo optimistas también podrían disputar los millonarios recursos que actualmente se están invirtiendo en la fusión nuclear.

Las razones cualitativas para afirmar esto son las siguientes:

1. Comparando el diagrama 1 con el 2 y 3, resalta la diferencia más importante: no hay emisiones en estos últimos. El ciclo fisicoquímico del agua descrito en la elemental reacción  $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$  así lo permite.
2. En el diagrama 1 las etapas de transformación para obtener el combustible que opera al ciclo Rankine se originan en la exploración y explotación de miles de pozos en los cuales menos del 40% del petróleo contenido en ellos es extraído; de aquí pasa a las refinerías, donde diversos combustibles son obtenidos para ser usados en automóviles, aviones, barcos y centrales de energía convencionales. Hay que hacer referencia al transporte de los diversos combustibles en forma de miles de kilómetros de ductos, buques, carros-tanque y los gigantescos sistemas de almacenamiento de los mismos. Esta red de exploración, explotación, transformación, transporte, almacenamiento y quema de los hidrocarburos es mundial. Se ha construido en el transcurso de más de 100 años y seguirá acompañando a las futuras generaciones durante muchos años más. Pero los diagramas 2 y 3 muestran otra manera de concebir, diseñar y construir nuestras futuras centrales de potencia de nuevo tipo. Éstas se levantarían en áreas donde el sol, vientos y mares abundan. Son zonas costeras las que llenan tales exigencias y México está rodeado de las mismas.

Las razones cuantitativas son:

1. En los primeros resultados numéricos utilizando el diagrama 2 para una central de 1 GW de capacidad (Dirzo, 2007), resulta que si bien producir hidrógeno es más caro que los hidrocarburos, se requiere en menor cantidad para producir los mismos kWh de electricidad, con la ventaja insuperable de que se puede reciclar.
2. La reacción  $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$  genera de dos a tres veces más energía que cualquier combustible hidrocarburo. En principio es posible llevarla a cabo durante un proceso adiabático, lo que conllevaría a elevar el gradiente de temperatura y con el mismo al incremento en la eficiencia del ciclo Rankine. En el ejemplo numérico citado un ciclo Rankine simple sin hacer uso de todos los adelantos tecnológicos con los que cuentan las modernas centrales de potencia y con la simplificación de que todos

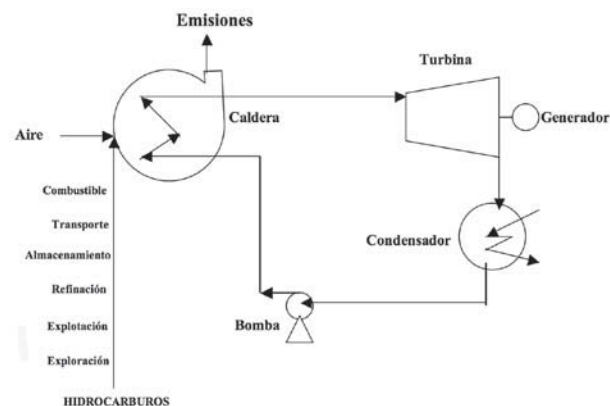


Diagrama 1. Ciclo Rankine.

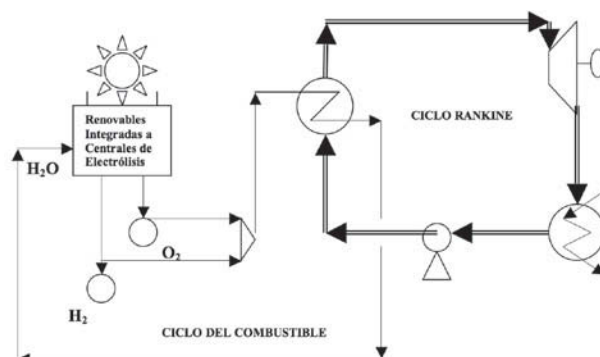


Diagrama 2. Central de potencia operada con renovables.

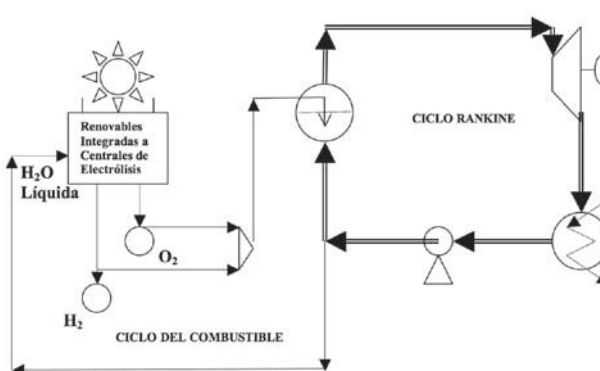


Diagrama 3. Central de potencia operada con renovables.

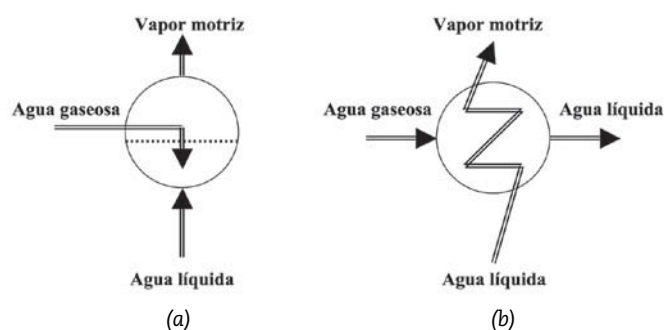


Diagrama 4. (a) Combustión sumergida, y (b) Intercambiador de calor.

sus procesos fueran reversibles, alcanzó la eficiencia de 50%, muy por encima del 34% que es la eficiencia promedio de las plantas instaladas actualmente.

3. El manejo de la reacción adiabática del hidrógeno se encuentra al alcance de la tecnología moderna. Si bien relativamente alta (dentro de magnitudes de los miles de grados) representan temperaturas mucho más bajas que las necesarias para dominar la fusión nuclear cuyas magnitudes son de millones de grados. Esto es sobresaliente, ya que en la química del hidrógeno para formar agua es donde se pueden encontrar soluciones más adecuadas al dilema de la energía que en la física de sus isótopos, el deuterio y el tritio, para formar helio. Esto deberían considerarlo los gobiernos que han apostado más por la fusión de los núcleos de hidrógeno que por el elemental intercambio de su solitario electrón.

Los diagramas 2 y 3 ilustran una metodología de ingeniería que permite el desarrollo sistemático de las energías renovables, su almacenamiento químico y su valoración técnico-económico respecto a los hidrocarburos como combustibles. Esta investigación forma parte de la frontera del conocimiento de la ingeniería en su área energética y se encuentra en marcha junto al desarrollo de tecnologías para hacer de las renovables la fuente principal del suministro mundial de electricidad durante el transcurso del siglo XXI, (Goltsov *et al.*, 2005; Verheij, 2007; Zweibel *et al.*, 2008; Dirzo, 2008).

## Conclusiones

La infraestructura energética de la sociedad actual está sustentada en los hidrocarburos y lleva más de cien años construyéndose. La presencia de los hidrocarburos como energéticos seguirá siendo fundamental a lo largo del siglo XXI. Sería trivial pensar que de un día para otro se pudiera sustituirla con las renovables pese a que se tiene el conocimiento básico para hacerlo. El asunto es más complejo de lo que estas líneas pudieran transmitir. El dilema energético no admite soluciones únicas, económicas y a corto plazo. Todo lo contrario: cualquier desarrollo tecnológico que se proponga será caro, a largo plazo y, en caso de ser exitoso, seguramente sólo formará parte de un universo de soluciones necesarias. Pero entre más proyectos se abran y tengan el apoyo suficiente, mejor estaremos preparados para disminuir la presencia de los hidrocarburos como energéticos aumentando su presencia en la industria petroquímica donde adquieren su máximo valor. En el caso de la generación de energía eléctrica dos propuestas de ingeniería de procesos fueron presentadas y sus principales fortalezas consisten en: (a) carecen de emisiones al ambiente, y (b) revierten las desventajas de intermitencia y difusión de las energías renovables por medio de técnicas de almacenamiento químico para obtener hidrógeno como combustible de una manera continua, segura y eficiente.

Las propuestas también permiten la valoración sistemática de las variables técnico-económicas que haría que las energías

renovables puedan sustituir, lenta pero ininterrumpidamente, a los hidrocarburos en su función de producir electricidad a lo largo del siglo XXI.

Esto forma parte de los proyectos de desarrollo que la ingeniería está realizando en la actualidad y requiere la participación creativa de jóvenes interesados en resolver uno de los problemas más acuciantes y apasionantes de nuestra era: el dilema energético.

## In Memoriam

Encontrándose en discusión este artículo llegó la noticia de la partida sin retorno de Leonardo Cabrera, ingeniero químico perito constructor de plantas de proceso. Hará mucha falta cuando empecemos a construir la primera central costera de potencia alimentada por el sol, vientos y mares. A su memoria se dedica este trabajo.

## Bibliografía

- Abaoud, H., Steeb, H., The German-Saudi Hysolar Program, *Int. J. Hydrogen Energy*, **23**(6), 445-449, 1998.
- Bechrakis, D.A., Mckeogh, E.J., Gallagher, P.D., Simulation and operational assessment for a small autonomous wind-hydrogen energy system, *Energy Conversion and Management*, **47**, 46-59, 2006.
- Beér, J.M., High efficiency electric power generation: The environmental role, *Progress in Energy and Combustion Science*, **33**, 107-134, 2007.
- Culp, W., Environmental impact of power plant operation. In *Principle of Energy Conversión*, McGraw-Hill, USA, 1991, pp. 318.
- Dirzo, S.R., Central de 1 GW de potencia basada en el ciclo químico-físico del agua, *Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos*, **48**(1-2), 15-18, 2007.
- Dirzo, S.R., Proyecto de doctorado, 2008.
- Goltsov, V.A., Veziroglu, T.N., Goltsova, L.F., Hydrogen civilization of the future-A new conception of the IAHE, *Int. J. Hydrogen Energy*, **31**, 153-159, 2006.
- Hawkins, D.G., Lashof, D.A., Williams, R.H., ¿Qué hacer con el carbón?, *Scientific American* en español, 34-41, noviembre 2006.
- IEA, por sus siglas en inglés. Página oficial de la Agencia Internacional de Energía. Consultada por última vez en marzo 21, 2008 en [www.iea.com](http://www.iea.com)
- IEA, Hydrogen Production & Distribution. April 2007. Consultar también CO<sub>2</sub> Capture&Storage, december 2006, [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Kothari, R., Buddhi, D., Sawhney, R.L., Optimization of electrolytic input power for the production of hydrogen, *Int. J. of Hydrogen Energy*, **31**, 2329-2336, 2006.
- Koukouvinos, A., Lygerov, V., Koumoutsos, N., Design of a System for Solar Energy Storage via Water Electrolysis, *J. Hydrogen Energy*, **7**(8), 645-650, 1982.
- Kreuter, K., Hofmann, H., Electrolysis: The Important Energy Transformer in a World of Sustainable Energy, *Int. J. Hydro-*

- gen Energy*, **23**(8), 661-666, 1998.
- Meurer, C., Barthels, H., Broche, W.A., Emonts, B., Groehn, H.G., Phoebus-An Autonomous Supply System with Renewable Energy: Six years of operational experience and advanced concepts, *Solar Energy*, **67**(1-3), 131-138, 2000.
- Rzayeva, M.P., Salamov, O.M., Kerimov, M.K., Modeling to get Hydrogen and Oxygen by Solar Water Electrolysis, *Int. J. Hydrogen Energy*, **26**, 195-201, 2001.
- Sørensen, B., Renewable Energy, *Elsevier*, UK, 2004.
- Stahl, W., Voss, K., Goetzberger, A., The Self-Sufficient Solar House Freiburg, *Applied Solar Energy*, **31**(1), 1995.
- Sigurvinsson, C.M.J., Bottoms, A., Marechal, A., Werkoff, F. Heat management for hydrogen production by high temperature steam electrolysis, *Energy*, **32**, 423-430, 2007.
- Temeev, A.A., Belokopytov, V.P., Temeev, S.A., An integred system of the floating wave energy converter and electrolytic hydrogen producer, *Renewables Energy*, **31**, 225-239, 2006.
- Thanaa, F., El-Shatter, M.N., Eskonder, M.T., El-Hafry, Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system, *Energy Conversion and Management*, **47**, 1264-1280, 2006.
- Vanhnen, J.P., Kauranen, P.S., Lund, P.D., Manninen, L.M., Simulation of Solar Hydrogen Energy Systems, *Solar Energy*, **53**(3), 267-278, 1994.
- Verheij, F., de Boer, W., Quist, A., The Isle of Energy: Storing Power at Sea, *Power Engineering International*, **15**(7) 48-50, 2007.
- Volker, Q., *Understanding renewable energy systems*, Earthscan, London, UK, 2005.
- Zweibel, K., Mason, J., Fthenakis, V., Un proyecto solar, *Investigación y Ciencia*, 22-31, marzo 2008.