

HIDRÓGENO DEL MAR

¹*Rafael Sánchez-Dirzo, ²Rodolfo Silva-Casarín, ³Edgar G. Mendoza-Baldwin y ⁴Rosa de Gpe. González-Huerta

¹Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, *Campus II*, UNAM. Batalla del 5 de mayo s/n esq. Fuerte de Loreto, Col. Ejército de Oriente, C.P. 09230, Deleg. Iztapalapa, México, D.F.

^{2,3}Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, México, D.F. ⁴ESIQIE-IPN, Unidad Zacatenco. México, D.F. E-mail: ¹rafaelsanchezdirzo@yahoo.com.mx, ²RSilvaC@ii.unam.mx,

³EMendozaB@ii.unam.mx, ⁴rosgonzalez_h@yahoo.com.mx

RESUMEN

El hidrógeno es un combustible capaz de sustituir a los hidrocarburos y al uranio para obtener, particularmente, energía eléctrica. Además de ser sustentable, el hidrógeno tiene la ventaja fundamental de ser reciclable. El proceso para su obtención más simple y que se conoce desde hace más de doscientos años se llama electrólisis del agua, esta técnica enfrenta el problema que su operación industrial mediante electricidad generada por sistemas fotovoltaicos, eólicos y océano-motrices, no está totalmente resuelta. Si bien los avances de las tecnologías solares y eólicas están bien documentados, las tecnologías océano-motrices empiezan a despuntar en sus fundamentos, conceptos y prototipos: en los recursos energéticos de los mares, islas y costas, se encuentran muchas de las soluciones al actual dilema de la energía de nuestra civilización. México, en especial, con doce mil kilómetros de costas, más de mil islas y abundantes recursos solares y eólicos, debe incluir a sus mares en sus proyectos de desarrollo energético. Este trabajo revisa propuestas de ingeniería que permitirían hibridar en costas a las fuentes de energía renovable y sintetiza soluciones planteadas de manera dispersa en la bibliografía internacional al problema fundamental de las energías alternas: su almacenamiento masivo, el cual podría hacerse en forma de hidrógeno.

Palabras Clave: Desarrollo sustentable, energía marina, hidrógeno.

ABSTRACT

Hydrogen is one fuel source able to substitute energy supplied by hydrocarbons and uranium and is particularly suitable for the generation of electricity. Besides being sustainable, hydrogen has also the fundamental advantage of being recyclable. The electrolysis process, the simplest process for hydrogen production, has been well known for more than two hundred years, but up to date the problem of using electricity generated from photovoltaic systems, from the wind or from ocean energy, on an industrial scale, has not been fully solved. While developments in wind and solar energy generation have been well documented in recent years, investigation into producing energy from the sea is just beginning. Mexico has more than twelve thousand kilometers of coastline and more than a thousand islands and should therefore look towards the sea in its search for developing sources of sustainable energy. This work reviews engineering projects which could hybridize renewable energy sources from the seas and evaluates the range of solutions offered internationally. While looking at the basic issue of renewable energy, it focuses on the fundamental problem of the storage of hydrogen for electricity generation.

Key Words: Sustainability development, ocean energy, hydrogen.

INTRODUCCIÓN

La inclusión histórica de los mares en el desarrollo sustentable de nuestra nación es un asunto aún insuficiente e insatisfactorio por parte de nuestra sociedad y sus gobiernos¹. El impacto de los mares en el desarrollo humano, en la biogeoquímica del planeta, circulación de sales, distribución de nutrientes, interacción con la atmósfera², la formación de nubes mediante la producción de DMS (*dimetilsulfuro*) por parte de algas³ y la regulación del clima de todo el planeta^{4,5}, se encuentra bajo investigación permanente.

Los beneficios de los mares se han extendido a un área que hasta hace poco tiempo se consideraba excluida: la generación a gran escala de electricidad. La dinámica oceánica puede contribuir a reducir la presencia de los hidrocarburos como combustibles para la obtención de energía eléctrica. Para coordinar los esfuerzos internacionales en hacer de los mares fuentes alternas de energía, la *Agencia Internacional de Energía* (IEA, siglas en inglés) ha constituido desde inicios del siglo XXI una de sus secciones más promisorias: la OES (*Ocean Energy Systems*)⁶.

Se estima que un alto porcentaje de la electricidad mundial puede provenir de los océanos durante el transcurso del siglo, y los sistemas de ingeniería para su obtención son ingeniosos y diversos⁷, no existiendo un diseño que sobresalga, pero es de interés en este trabajo mostrar que esos sistemas pueden ser hibridados con el resto de las energías renovables, proponiendo simultáneamente mecanismos para su almacenamiento químico en forma de hidrógeno.

FLUJOS DE ENERGÍA DEL MAR Y SISTEMAS DE INGENIERÍA QUE LOS TRANSFORMAN EN ELECTRICIDAD

Son cinco los flujos de energía de los océanos de interés para generar electricidad: mareas, corrientes marinas, oscilaciones del nivel del mar, gradientes de temperaturas y gradientes salinos.

ENERGÍA DE MAREAS Y CORRIENTES MARINAS

La energía de mareas puede aprovecharse debido a una diferencia de alturas del nivel del mar (similar al funcionamiento de una hidroeléctrica) y las corrientes generadas por el movimiento de los océanos también son una reserva de energía a la espera de una razonable explotación. Con el ascenso y descenso de las mareas las centrales maremotrices utilizan estas diferencias en los niveles de agua y explotan también las corrientes de agua que se logran en ambas direcciones en los tiempos en que las mareas cumplen su ciclo. La diferencia de altura Δh da lugar al cambio de la energía potencial $\Delta E_p = \rho g \Delta h$, donde (g) y (ρ) son la aceleración de la gravedad y la densidad del agua respectivamente. La velocidad (v) del flujo y el área perpendicular del mismo (A) de las corrientes de agua da lugar a la potencia hidrodinámica $P = \frac{1}{2} \rho A v^3$. Las centrales de energía de este tipo captan y convierten ambos fenómenos en electricidad.

Los gradientes de altura y la velocidad de flujo de las mareas astronómicas son provocados por la fuerza gravitacional de la luna y el sol. En función de la carrera de marea (diferencia en el plano vertical entre la bajamar y pleamar), existen localizados en el planeta diversos lugares para construir centrales maremotrices. La más célebre y antigua central maremotriz se encuentra en el estuario de Rance, Francia, con una capacidad de 240 MW^{8,9} y opera desde hace más de 40 años. En México se tiene localizada una región promisoriosa en el alto Golfo de California^{10,11}, cuyo potencial energético ha sido evaluado en 26 GW y una potencial producción de 23,000 GWh/año, que es similar a la producción de electricidad de todas las hidroeléctricas del país¹², sin embargo, el reto ambiental es muy importante por la riqueza natural que existe en esta zona.

También hay otro tipo de corrientes aunque de naturaleza diferente a las provocadas por las mareas y se les conoce como corrientes oceánicas y son de escala planetaria. Estas corrientes recorren tanto la superficie del mar como sus profundidades y son generadas por la convección del agua debida a la radiación solar y los gradientes salinos. En virtud que las variaciones térmicas de largo periodo de estas corrientes están siendo utilizadas para estimar el cambio climático del planeta, actualmente se encuentran sujetas a muy diversas investigaciones¹³⁻¹⁸.

El potencial energético de las corrientes, tanto las provocadas por las mareas como las oceánicas, es elevado y diversos sistemas de ingeniería se han puesto a prueba para su explotación, por ejemplo los propuestos por *Marine Currents Turbines*¹⁹ (ver Figura 1), entre otras empresas dedicadas al diseño y construcción de turbinas marinas⁶. En México se tienen estudios sobre la corriente del canal de Yucatán²⁰, Baja California y el Pacífico.

ENERGÍA DE OLAS

El oleaje resulta de la acción del viento sobre la superficie del agua y, pese a su familiar imagen, es de una extraordinaria complejidad²¹. En el caso de México²², la energía concentrada promedio en una ola se encuentra entre los 20-30 kW/m. El desafío técnico de transformar esta inmensa energía disponible en electricidad ha tenido una respuesta positiva, como puede constatarse en las decenas de dispositivos concebidos y construidos⁶.

BUFADORA

El oleaje en las costas también causa uno de los efectos más atractivos del mar conocidos como "geiseres" o "bufadoras". Éstos se presentan cuando el oleaje se propaga sobre cavernas submarinas fracturadas natural o artificialmente, siendo sus canales los distribuidores de chorros de aire y agua que salen disparados varios metros sobre el nivel del mar. El más espectacular en México se halla en Ensenada, Baja California^{23,24} (Figura 2). La bufadora ha inspirado el diseño de un dispositivo que la

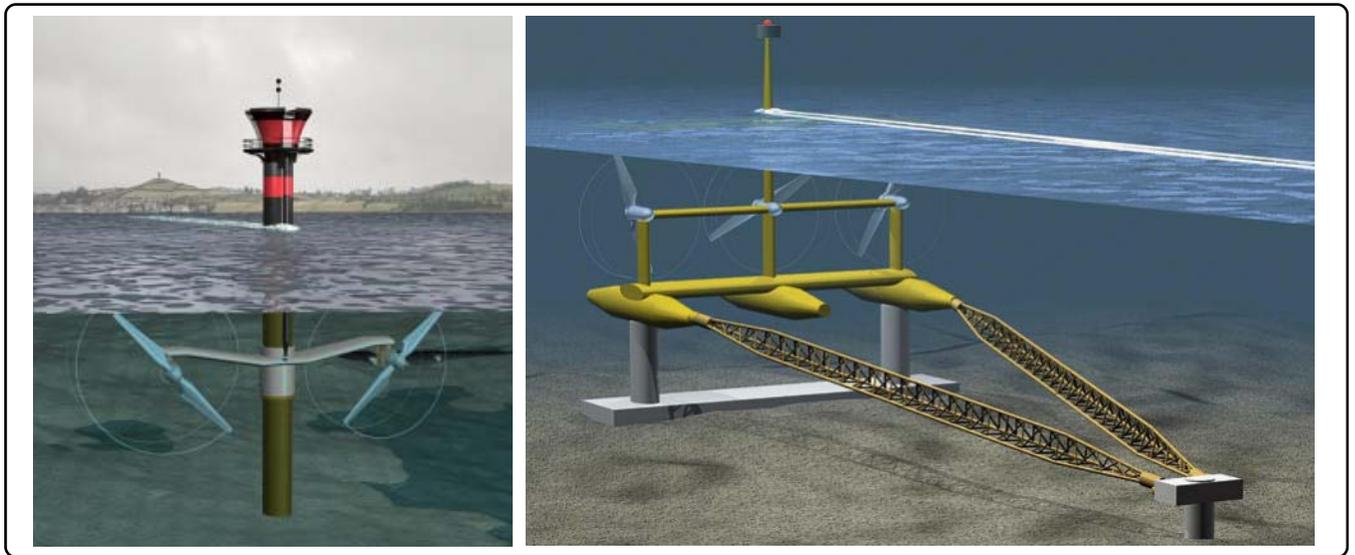


Figura 1. Turbinas marinas¹⁹. Transforman las corrientes superficiales del mar en electricidad.



Figura 2. La bufadora, Ensenada, Baja California, y el blowjet probándose en el canal de olas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

reproduce y que se encuentra en proceso de desarrollo para generar electricidad y almacenarla en forma de hidrógeno: el blowjet²⁵⁻²⁸.

La bufadora es una pequeña muestra del poder de las olas. En el transcurso de la historia humana, ese poder se ha manifestado de manera destructiva, ya sea en forma de tsunamis, huracanes y/o tormentas. Estas adversidades han obligado a que la ingeniería de la protección portuaria haya nacido hace miles de años levantando una de las más importantes infraestructuras de protección y símbolo de nuestra civilización: los rompeolas²⁹.

OBRAS DE ABRIGO Y PROTECCIÓN COSTERA

La protección de la infraestructura costera, muelles, casas, edificios, playas y el intercambio de personas y mercancías en los puertos ha estado concebida mediante el diseño y construcción, entre los más comunes, de diques marinos y rompeolas, reflejantes y mixtos³⁰. La concepción general para su construcción en forma de sistemas de escolleras, obra de los fenicios, sigue siendo la propuesta que predomina hasta nuestros días con algunas importantes innovaciones. El concepto que subyace en los diques protectores marinos es disipar la energía del oleaje con el fin de conservar un área de playa lo más serena posible para el intercambio de personas y mercancías sobre el puerto. Este concepto se encuentra en proceso de cambio concibiendo a las obras de protección costera como estructuras multipropósito que puedan servir también como centrales de energía de olas adaptando precisamente el perfil del blowjet al dique^{25-28,31}. La interacción ola-dique, ver Figura 3, es uno de los fenómenos más espectaculares y estudiados por la ciencia y la ingeniería^{30,32,33}.

GRADIENTES TÉRMICOS

La diferencia de temperaturas existentes entre la superficie y el fondo marino es suficiente para operar un ciclo termodinámico con el fin de obtener energía eléctrica. Al dispositivo marino

capaz de transformar ese pequeño gradiente térmico marino en electricidad se le conoce como *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC)^{34,35}.

La ingeniería subyacente en los sistemas OTEC se describe en la Figura 4.

El agua de la superficie marina a mayor temperatura (1) pasa por un evaporador (2) cuya presión se reduce a 0.03 atmósferas. Esto provoca que el agua hierva a 25°C, que es la temperatura promedio de la superficie del mar. El vapor generado a bajas presiones mueve un turbogenerador (3). Realizado su trabajo, el vapor pasa al condensador (4) donde circula el agua del mar profundo a menor temperatura (5). Esta propuesta además de generar electricidad puede suministrar agua dulce y salmueras marinas⁶.

GRADIENTES SALINOS

La experiencia de diluir sustancias como la sal de cocina o el azúcar en agua es de una cotidianidad y simplicidad que es difícil concebir de esta experiencia la obtención de energía eléctrica, sin embargo, la posibilidad existe. Por ejemplo diluir unos 35 gramos de cloruro de sodio en un litro de agua es sencillo, pero volver a separar los componentes para regresarlos a su estado original implica por ejemplo, transmitirle cierta cantidad de calor a la solución, para vaporizar el agua, que posteriormente se emitirá a los alrededores para condensarse separando mecánicamente a la sal. Éste es el proceso convencional usado y el calor transmitido para vaporizar el agua puede provenir de quemar hidrocarburos o directamente del sol. Existe otro proceso que hace uso de membranas semipermeables que sólo permiten el paso de las moléculas de agua impidiéndole el paso a los iones salinos. Éste es el proceso clásico usado por la naturaleza y que el hombre a últimas fechas está dominando, sin llegar a la perfección del riñón o las branquias, aunque su estado de desarrollo técnico es tal, que es aprovechado para desalar el agua

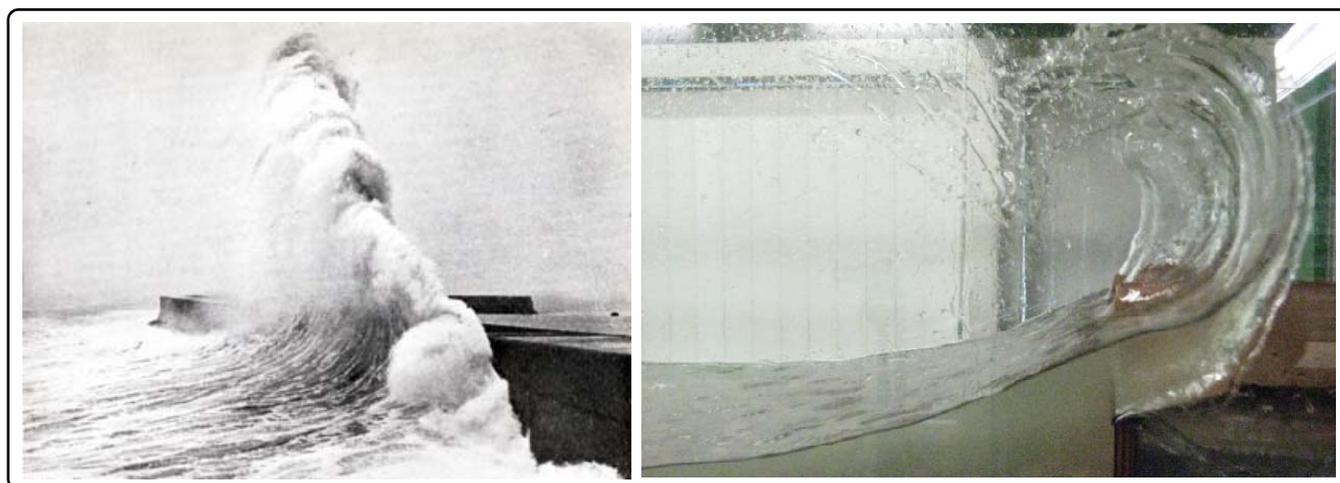


Figura 3. Interacción ola-dique en mar abierto y su estudio en el laboratorio³².

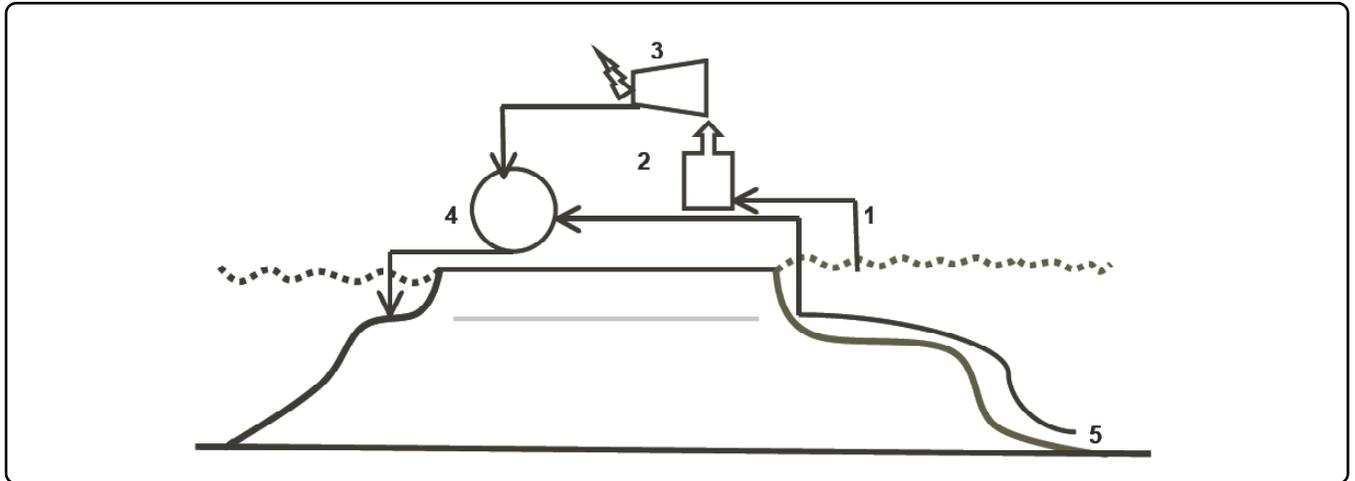


Figura 4. Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC).

del mar y se piensa seriamente en el mismo para obtener parte de la electricidad que se consumirá en el futuro, este proceso se le conoce como ósmosis. Teóricamente la ósmosis permitiría elevar el agua hasta una altura de 248 metros, una altura nada despreciable desde el punto de vista energético^{36,37}. La presión de esa altura hidrostática se llama Presión Osmótica y es el principio con el que la empresa Starkraft³⁸ (ver Figura 5) diseñó y construyó el primer prototipo de central osmo-motriz de 10kW de potencia inaugurado en Noruega en el año de 2009.

EL DILEMA DE LA ENERGÍA: ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Pese a todos estos avances en el desarrollo de las energías renovables, en especial las que provienen del mar, todas juntas

son fuentes minoritarias para satisfacer nuestros requerimientos de energía³⁹, en particular de energía eléctrica. El petróleo, gas natural, carbón, uranio y leña siguen predominando como las fuentes primarias, de las cuales se extraen las calorías para la cocción de alimentos, calentar agua, iluminar espacios, obtener electricidad y moverse por mar, cielo y tierra a través de barcos, aviones y autos. El confort de la humanidad se sostiene con la combustión de miles de millones de toneladas de hidrocarburos al año y todavía la mayoría de la población mundial no accede a los bienes básicos. No es posible aún proporcionar los bienes y el confort exigido por siete mil millones de seres mediante el actual modelo energético^{40,41}, menos aún para los diez mil millones que se espera seamos a finales del siglo XXI⁴². Otra consecuencia de la quema sin precedentes de hidrocarburos es el incremento

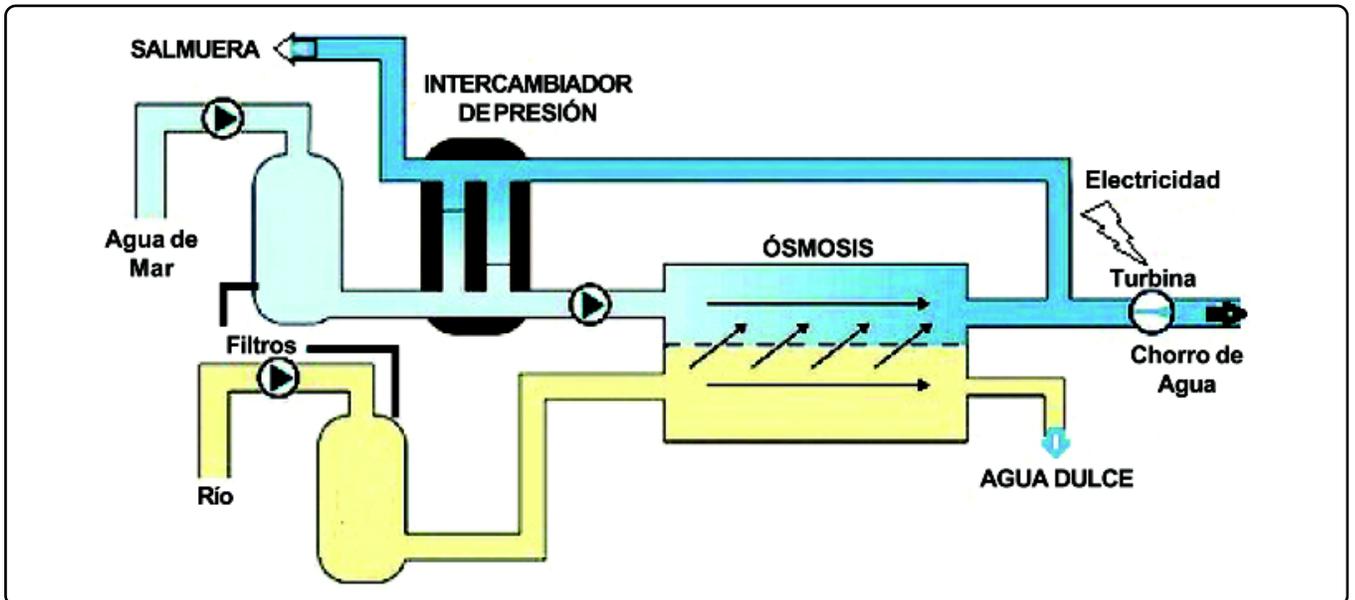


Figura 5. Central de energía osmo-motriz, Starkraft³⁸.

de la contaminación, la destrucción de los ecosistemas y su efecto sobre el clima del planeta⁴³. La infraestructura energética basada en los hidrocarburos lleva más de cien años construyéndose, sin embargo, es insuficiente. Disminuir la presencia de los hidrocarburos como combustibles y aumentar su presencia en la industria petroquímica, que es donde adquiere su verdadera riqueza y se generan los empleos, requerirá un esfuerzo concertado durante el resto del siglo XXI. Su transformación implica, no sólo incidir en el desarrollo de las energías renovables, sino también en los modos en que se consume la energía. En buena medida la problemática se encuentra, no en la oferta, sino en la demanda de energía y en los hábitos de consumo. En este sentido, se puede concebir y construir un futuro no para el automóvil de combustión interna, sino para el ciudadano de a pie y/o en bicicleta. No para el camión de carga, sino para el ferrocarril. No para gigantescas ciudades, sino para las pequeñas, recuperando y enriqueciendo los municipios rurales, transformándolos en ciudades bicicleteras^{44,45} y conectándolas con redes ferroviarias. No para el derroche, sino para el ahorro y la eficiencia energética en todos los procesos productivos. Entonces pasar de una infraestructura energética centralizada y sucia basada en la quema del petróleo, hacia otra infraestructura descentralizada y no tan contaminante basada en las fuentes de energía renovables, requerirá de una infraestructura de transición. Actualmente, ya existe el planteamiento para la creación de esta infraestructura y se les denomina *Centrales de Potencia Híbridas Costeras* (CPHC). Las *Centrales de Potencia Híbridas Costeras* pueden aprovechar de manera organizada los recursos solares, eólicos y océano-motrices, que conjunta y de manera natural existen en nuestros miles de kilómetros de costas, para que seleccionando algunas zonas que reúnan las características de mayor potencia energética, menor impacto ambiental y mayor

infraestructura física disponible, se inicie el diseño, construcción y operación de estas *Centrales*, primero, disponiendo del conocimiento universal que existe para las tecnologías maduras y comerciales y segundo, ser un espacio para la investigación científica y tecnológica de aquellas que requieren mayor desarrollo. La comparación de ambos sistemas para el caso de la generación de electricidad se muestra en la Figura 6.

La mayor parte de la electricidad en el mundo se genera a través de un proceso conocido como ciclo *Rankine*. Este ciclo consiste en el cambio de la fase líquida del agua a vapor dentro de una caldera (1) (ver Figura 6). El vapor es proyectado sobre un turbogenerador (2)(3) que produce la corriente eléctrica. El vapor exhausto se condensa (4) y ya líquido se bombea (5) de nueva cuenta a la caldera (1) y el ciclo vuelve a iniciarse. El problema actual es que la generación de vapor se realiza quemando hidrocarburos o fisionando el uranio: ambos producen contaminación. Los procesos para su obtención son abiertos y la emisión de sus contaminantes inevitables (ver Figura 6 lado izquierdo). Por el contrario, el ciclo fisicoquímico del agua en su modelo clásico de la forma $H_2O \leftrightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$, permite concebir un ciclo del combustible cerrado y sin emisiones como se describe en el esquema del lado derecho de la figura 6, donde el agua es descompuesta en sus elementos O_2 e H_2 utilizando energía proveniente de fuentes renovables en sistemas híbridos. Otra alternativa, adaptada a este último modelo, es el uso de las celdas de combustible, un dispositivo conocido desde el siglo XIX⁴⁷, aplicado inicialmente en la industria aeroespacial y con el potencial para hacer realidad que todo consumidor de electricidad se transforme en productor^{40,48}. Es posible concebir que en cada casa, barrio y colonia, sea construida una pequeña central de energía y que pueda compartir la energía generada como actualmente se comparte la información a través de Internet, lo

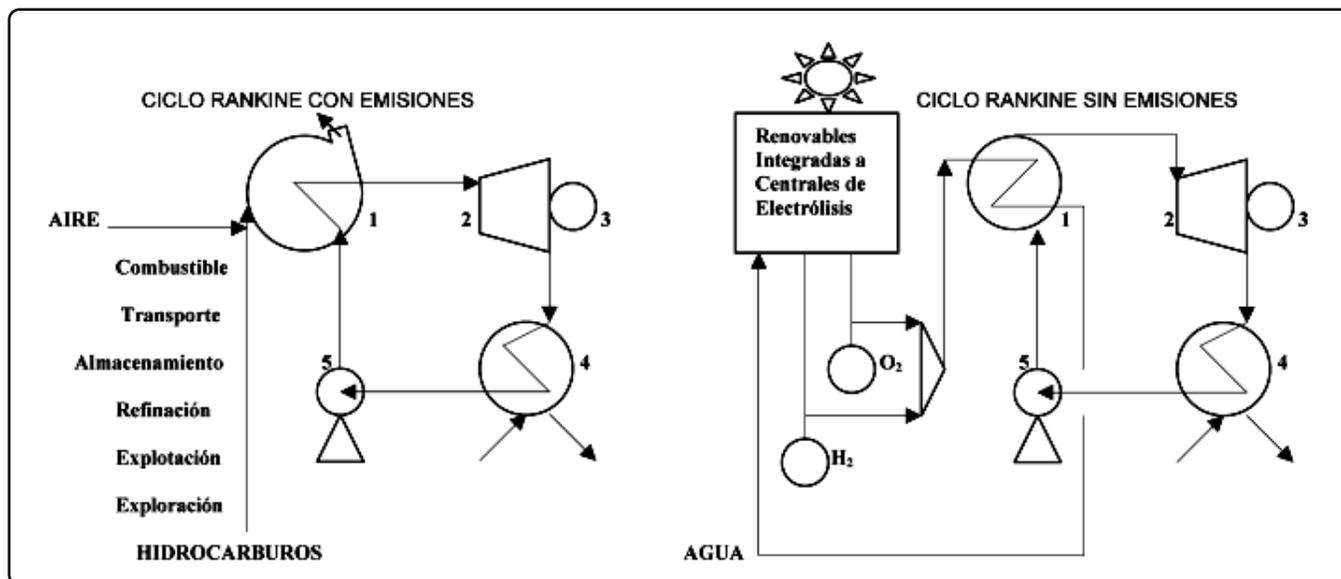


Figura 6. Comparación entre la generación de electricidad quemando hidrocarburos y la generada con agua⁴⁶.

que constituye una meta de red energética, sólo posible por medio del ciclo fisicoquímico del agua. Alcanzar esa meta será tarea de todos durante el siglo XXI, siempre y cuando se tomen hoy las decisiones políticas y educativas que la hagan posible. Entre las primeras, dos son trascendentes: 1. Difusión en la sociedad, en el sentido que sus necesidades energéticas pueden ser satisfechas en costo y calidad por medio de las energías alternas, y 2. Es crucial la participación de las comunidades para orientar a sus representantes políticos a elaborar iniciativas de ley que fomenten su uso⁴⁹. Entre las educativas, la actualización de planes de estudio, el desarrollo de tecnologías propias y la adaptación de sistemas desarrollados en otras latitudes, se considera imprescindible⁵⁰.

PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE HIDRÓGENO SOLAR

Para alcanzar el desarrollo sustentable de nuestra civilización se requiere que todas, o al menos las mercancías en circulación que más se consumen, tengan la capacidad de ser recicladas, en particular los combustibles. De ciclos vitales está estructurada la naturaleza⁵¹ y la respuesta básica a por qué la actividad humana tiene tan contaminado el planeta es porque sus procesos de producción de bienes y servicios son lineales, sobresaliendo sus procesos energéticos; miles de millones de toneladas de petróleo, gas natural, carbón, uranio y madera son quemados al año durante procesos abiertos, principales causantes del deterioro ambiental, emitiendo al ambiente sustancias que la naturaleza simplemente es incapaz de asimilar⁵². De acuerdo con toda la información disponible, esto no se puede seguir sosteniendo y una alternativa viable, como se observa en el lado derecho de la Figura 6, puede darse concibiendo los ciclos cerrados para los sistemas energéticos, específicamente considerando algunos combustibles alternos como es el hidrógeno, con el fin de generar electricidad^{53,54}. El hidrógeno es el único combustible con la capacidad de reciclarse como lo exige el requisito fundamental de la sustentabilidad, pero existe un problema: el 96% de los 65 millones de toneladas al año de hidrógeno (equivalente a 8 EJ, comparar con el suministro total de energía primaria mundial que asciende a los 450 EJ) se obtiene de la reformación del metano, petróleo y gasificación del carbón en las refinerías³⁹. En otras palabras, actualmente se obtiene hidrógeno a partir de la quema de hidrocarburos, lo cual es un paradoja insostenible.

Entre el modelo centralizado de energía, controlado por unas cuantas empresas y naciones^{55,56} construido a lo largo de todo el siglo XX y el modelo descentralizado deseado y posible a construir durante el siglo XXI (donde todo consumidor es a su vez productor), median diversas alternativas e incertidumbres que no es posible ignorarlas. Si bien la producción a baja escala de hidrógeno no presenta mayor dificultad, la carencia de tecnologías para su producción masiva usando la electricidad proveniente de fuentes renovables representa su talón de Aquiles como alternativa real frente al petróleo^{57,58}. Para dar solución a este problema central de las energías renovables no existen

consensos. Una alternativa es planteada en el resto de este trabajo y consiste en la hibridación de las energías fotovoltaicas, eólicas y océano-motrices en las zonas donde más abundan: las costas. El papel de vector energético que puede jugar el hidrógeno en el transcurso del siglo XXI, hace necesario que el proceso de su producción conocido como electrólisis empiece a buscar las llamadas economías de escala.

El desafío para la obtención masiva de hidrógeno electrolítico es imponente, sin embargo, se encuentra al alcance de la ingeniería contemporánea. Un *Diagrama de Ingeniería* que muestra la complejidad del proceso de electrólisis se muestra en la Figura 7. La electrólisis es una tecnología madura y comercial pero, como ya se dijo, se enfrenta al difícil 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. La Figura 8 ilustra el concepto, muestra el funcionamiento de una celda de electrólisis, una celda de combustible y proporciona una imagen de un dispositivo a escala de laboratorio que integra ambas celdas⁵⁹⁻⁶¹. La Figura 9 extiende el concepto a un Diagrama de Bloques más completo. En este sentido el desarrollo de sistemas que acoplan paneles fotovoltaicos con plantas de electrólisis tiene años de investigación y desarrollo⁶²⁻⁶⁵. Lo mismo se podría decir del acoplamiento de aerogeneradores y plantas de electrólisis^{66,67}. El acoplamiento de dispositivos océano-motrices con plantas de electrólisis apenas empieza a investigarse con prototipos de tipo flotante⁶⁸ y un dispositivo en fase de investigación en la UNAM: el blowjet^{25,26,27,28}. Las celdas de electrólisis tienen la ventaja de poder construirse modularmente, esto es, células típicas son acopladas una a una hasta alcanzar los niveles de producción planeados respondiendo positivamente a la intermitencia de los flujos eléctricos provenientes de las fuentes de energía renovables^{69,70}.

Estos avances escalados industrialmente, permiten concebir sistemas híbridos oceánicos como los mostrados en la Figura 10. Las propuestas son prometedoras pese a que reducen la hibridación de las energías renovables en las islas, tanto naturales como artificiales⁷¹⁻⁷³. Si bien los recursos de las islas son diversos, trascendentes y abundantes en vientos, sol y olas, los mismos son un complemento a un recurso muy superior y cercano: las costas y la infraestructura portuaria construida en ellas.

HIBRIDACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN COSTAS

La hibridación de los sistemas fotovoltaicos, térmicos y eólicos es una realidad a niveles de comercialización y mercado empresarial⁷⁴; el diseño, la arquitectura e ingeniería en general disponen de una amplia gama de posibilidades de aplicación que dan a los productos finales, sobre todo los vinculados a la vivienda, un sello de sustentabilidad al ahorrar y hacer eficiente el uso del agua y la energía, además de elevar la calidad de vida

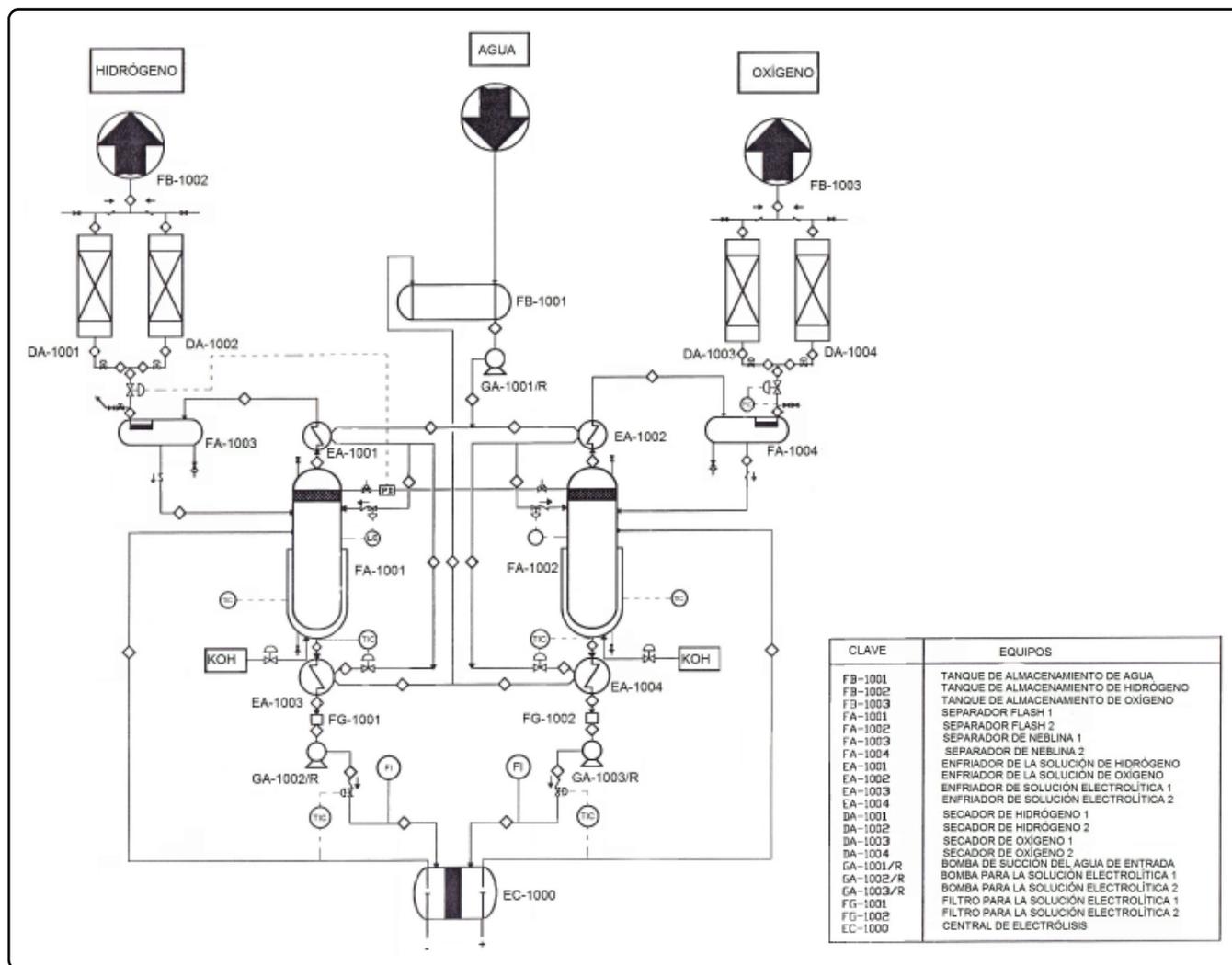


Figura 7. Diagrama de tubería e instrumentación de la electrólisis⁷⁵.

de sus usuarios, tanto en sus espacios de convivencia como el impacto estético que provocan los mismos. Su aplicación en la industria automotriz es sobresaliente y, por su extensión, está fuera del alcance del presente trabajo, pero al menos tiene que estar referido el esfuerzo por hacer del auto un dispositivo más amable con el ambiente, aunque una duda sustentada hace décadas sobre la viabilidad de seguir manteniendo la cultura del auto sigue vigente⁴⁴.

Los avances, tanto en la ciencia del sol como en la del viento, han hecho posible la hibridación en los sistemas de ingeniería referidos^{76,77}. Considerar a las energías marinas en estos procesos de hibridación potenciaría de manera exponencial la capacidad de las renovables de disminuir las emisiones de gases invernadero en la atmósfera, abatiría la quema de hidrocarburos, en particular la leña, que es el único combustible en las zonas rurales, y sobre todo, disminuiría la presencia de los hidrocarburos y el uranio como combustibles para la generación de electricidad. Un manejo

integral, sustentable y bien planeado de las costas⁷⁸ para la generación de electricidad por hibridación de las energías renovables que incluyera los mares, además de la obtención de hidrógeno y oxígeno, gases que por sí mismos tienen un alto valor agregado en la industria química, potenciaría la obtención de agua potable por desalinización^{79,80}, salmueras marinas que a su vez son productoras de materia prima para diversos bienes como fertilizantes⁸¹, cloro, sodio y otros productos de la química inorgánica y catalizaría el desarrollo sustentable de la acuicultura, las redes del ferrocarril eléctrico y los servicios para la industria eco-turística, entre otras. Un diagrama de procesos (extensión del concepto de la Figura 8) que sintetiza estos planteamientos mostrando las conversiones y equipos básicos se muestra en la Figura 9. La idea central sigue siendo la conversión fisicoquímica de $H_2O \leftrightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$ dinamizada con la hibridación de las energías renovables en las costas.

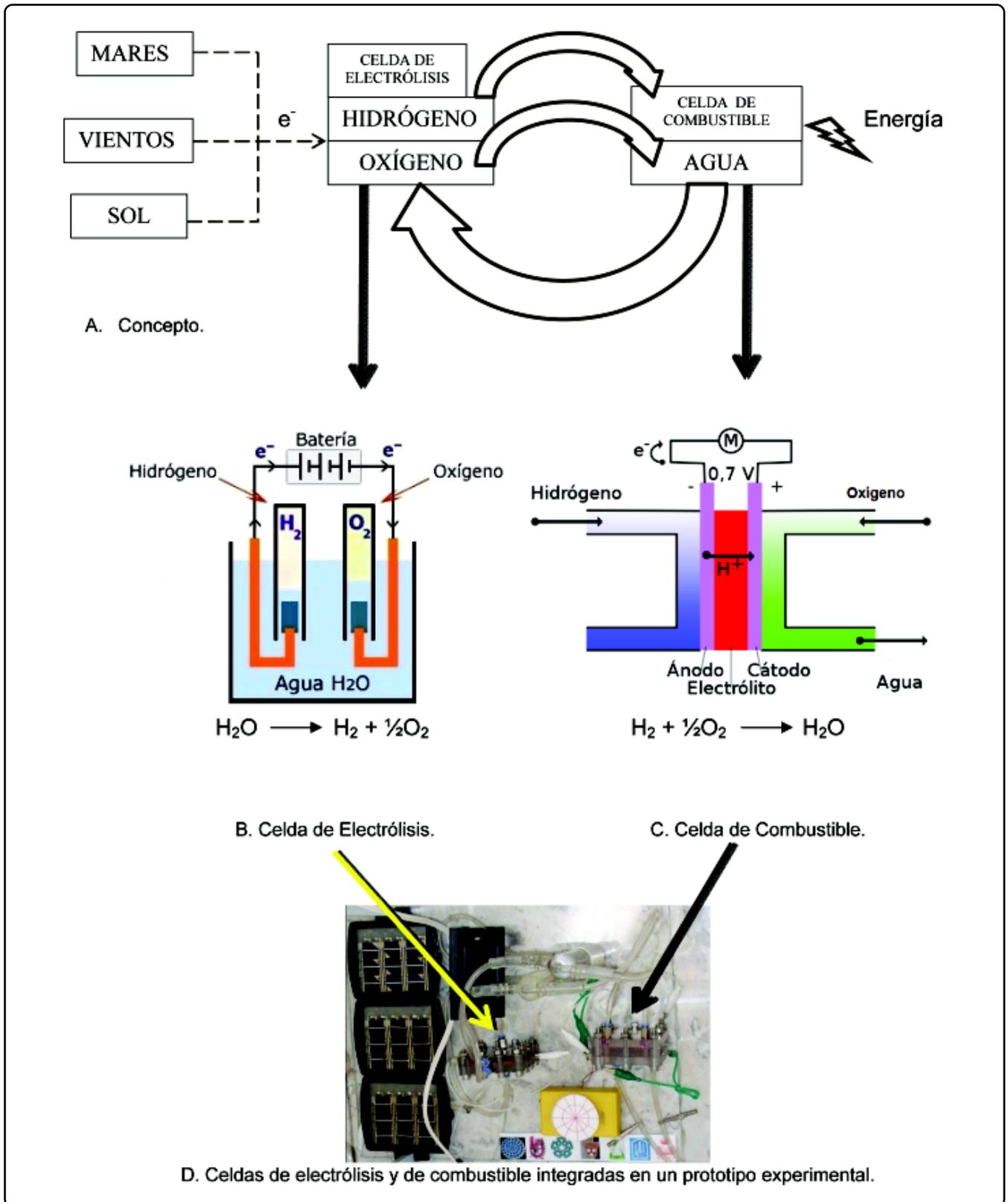


Figura 8. Concepto de integración (A) de energías renovables con sistemas integrados de celda de electrólisis (B) a celda de combustible (C) y un prototipo experimental (D)^{59-61,82}.

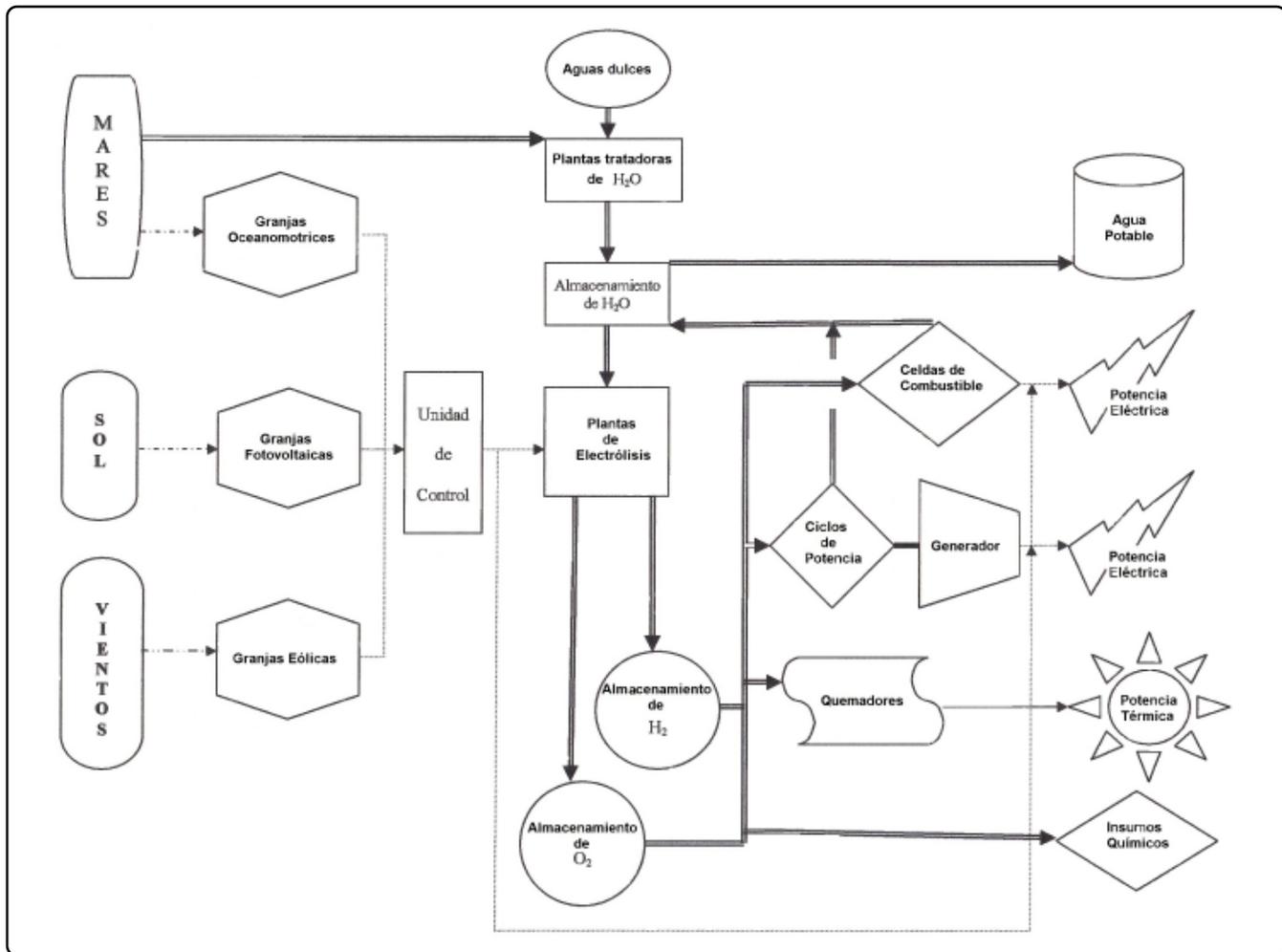


Figura 9. Modelo general de un nodo costero para la hibridación de las energías renovables, su almacenamiento químico y sus aplicaciones para obtener potencia eléctrica, potencia térmica, materias primas y agua potable⁸³.



Figura 10. Islas de la energía⁸⁴⁻⁸⁵.

CONCLUSIONES

1. La concepción, el diseño y la construcción de una civilización^{86,87} sostenida sobre una infraestructura energética basada en el hidrógeno, se presenta como una tarea imponente a largo plazo, pero plausible, factible y sobre todo la única con el sello de la sustentabilidad.

2. La producción de hidrógeno a baja escala forma parte de las actividades cotidianas de la actividad económica moderna. Su valor como vector energético y combustible obliga a producirlo masivamente por medio de centrales de electrólisis que operen con electricidad proveniente de las energías renovables: sol, vientos y mares.

3. La electrólisis actualmente operada por sistemas fotovoltaicos y eólicos a baja escala puede ser potenciada a niveles industriales (de escala) si se desarrollan tecnologías que permitan su hibridación en las costas donde se sumarían las energías marinas. Esto traería adicionales beneficios y ventajas, ya que no sólo se obtendría hidrógeno, oxígeno y electricidad, sino que éstos catalizarían la producción de agua potable, insumos de la industria química y fomentarían los servicios del eco-turismo y la infraestructura eléctrica para la movilidad sobre redes ferrocarrileras.

4. Por la naturaleza modular de la infraestructura energética basada en el hidrógeno⁸⁸, es posible concebir que los nodos centrales de un proyecto de ingeniería a largo plazo (transcurso del siglo XXI) fueran las costas, impulsando el desarrollo del país hacia la descentralización en dirección a las mismas. Esto permite aprovechar la infraestructura de carreteras, vías férreas, telecomunicaciones y, en general, la de tipo industrial, ya existente, planificar su innovación y reconstruirla montada en las nuevas tecnologías. Con esta orientación deben invertirse los recursos de la industria petrolera. En las últimas fases del uso de los hidrocarburos como combustibles, éstos deberán coadyuvar para construir la economía del hidrógeno.

5. Finalmente, los obstáculos más importantes para el desarrollo de estas tecnologías son en orden de importancia: políticos, educativos y tecnológicos. La falta de acuerdos para el desarrollo de México a largo plazo (de hecho todo el siglo XXI) es evidente en todos los rubros por parte de nuestra clase política. Una sociedad ignorante y desinformada tampoco permite avanzar en su propio desarrollo sustentable. La experiencia nacional resumida en las actividades, congresos y publicaciones de la Sociedad Mexicana de Hidrógeno⁸⁹, la Asociación Nacional de Energía Solar⁹⁰ el Centro de Investigación en Energía⁹¹⁻⁹³, la experiencia internacional dirigida por la International Association for Hydrogen Energy⁹⁴, los proyectos multinacionales para el desarrollo de las nuevas tecnologías para el uso de hidrógeno como combustible, donde sobresale el proyecto We Net del Japón⁹⁵, los informes de gobiernos como los europeos⁹⁶⁻⁹⁹ y de USA¹⁰⁰⁻¹⁰³, permiten que un proyecto nacional de ingeniería para

el uso de las energías renovables, su almacenamiento masivo en forma de hidrógeno (entre otras técnicas existentes), y que contemple todo el siglo XXI para impulsar el desarrollo de México, pueda ser diseñado sin partir de cero^{104,105}. Ésta es una tarea pendiente por parte del Estado y de la sociedad mexicana que no puede posponerse más si no se desea que otro ferrocarril del desarrollo se vuelva alejar sin poder ser alcanzado durante el resto del siglo XXI⁵⁹⁻⁶¹.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido del CONACyT a través del proyecto 130254: "Sistema de aprovechamiento energético del oleaje en canales en estrechamiento y su captación para la producción de hidrógeno", así como al PAPIME PE104312: "Producción de material didáctico interactivo y audiovisual en Físicoquímica y Termodinámica".

REFERENCIAS

1. Padilla, I. La isla de las tribus perdidas. La incógnita del mar latinoamericano (Debate, Barcelona, 2010). 208 págs.
2. Li, Z.X. Thermodynamic air-sea interactions and tropical atlantic SST dipole pattern. *Phys. Chem. Earth (B)* **26(2)**, 155-157 (2000).
3. Bonner-Knowles, D., Jones, G. & Gabric, A. Dimethylsulphide production in the Southern Ocean using a nitrogen-based flow network model and field measurements from ACE-1. *J. of Atmospheric and Ocean Science* **10(2)**, 95-122 (2005).
4. Bigg, G.R., Jickells, T.D., Liss, P.S. & Osborn, T.J. The role of the oceans in climate. *Int. J. of Climatology* **23**, 1127-1159 (2003).
5. Lovelock J. Homenaje a Gaia (Océano, España, 2005). 547 págs.
6. IEA/OES. www.iea-oceans.org. Última visita noviembre 2011.
7. Sánchez-Dirzo, R., Chávez, X.C., Mendoza, E.G.B. & Silva, R.C. Electricidad en el mar. *Revista de la Asociación Mexicana de Infraestructura Portuaria, Marítima y Costera* **6(20)**, 15-20 (2010).
8. Garret, C. & Cummins, P. Generating power from tidal currents. *Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering* © asce / may/june 114-118 (2004)
9. García, N.J.O. Diseño y construcción de un prototipo de una central mareomotriz (Tesis de Licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2011). 75 págs.
10. Marinone, S.G. Tidal currents in the Gulf of California. *Ciencias Marinas* **26(002)**, 275-301 (2000).
11. Silva, G.G. & Marinone, S.G. Caracterización dinámica y energética de la marea en el Golfo de México. *Ciencias Marinas* **26(002)**, 323-353 (2000).
12. López-González, J., Hiriart-Le Bert, G. & Silva-Casarín, R. Cuantificación de energía de una planta mareomotriz. *Ingeniería Investigación y Tecnología* **XI(2)**, 233-245 (2010).
13. Stommel, H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus* **13**, 224-230 (1961).
14. Williams, J.C. Modeling the oceanic general circulation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* **28**, 215-48 (1996).
15. Broecker, W.S. Thermohaline circulation, the achilles heel of our climate system: will man-made CO₂ upset the current balance? *Science* **278(5343)**, 1582-1588 (1997).
16. Technology White Paper on Ocean Current Energy Potential on the

- U.S. Outer Continental Shelf. Minerals Management Service. Renewable Energy and Alternate Use Program. U.S. Department of the Interior. Available for Downloading at <http://ocsenergy.anl.gov> (2006).
17. Rahmstorf, S. Thermohaline ocean circulation. In: *Encyclopedia of Quaternary Sciences* (ed. Elias, S.A.) (Elsevier, Amsterdam, 2006).
18. Rahmstorf, S. Ocean circulation and climate during the past 120.000 years. *Nature* **419**, 207-214 (2002).
19. www.marineturbines.com/. Última visita diciembre 2011.
20. Sheinbaum, J., Candelá, J., Badan, A. & Ochoa J. Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letter* (**29**), 1-6 (2002).
21. Silva-Casarín, R. Análisis y descripción estadística del oleaje (Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2005). 179 págs.
22. <mailto:http://www.noaa.gov/>. Última visita, diciembre 2011.
23. http://wn.com/la_bufadora_ensenada_baja_mexico, Última visita diciembre 2011.
24. <http://www.cicese.mx>. Última visita diciembre 2011.
25. Mendoza Baldwin, E., Silva Casarín, R., Sánchez Dirzo, R. & Chávez Cárdenas, X. Wave energy conversion using a blow-jet system. *Proceeding of 32nd International Conference on Coastal Engineering*, China (2010). Págs. 1-10.
26. Chávez Cárdenas, X., Sánchez Dirzo, R., Mendoza Baldwin, E., González Huerta, R.G., Anaíd Domínguez, M. & Silva Casarín R. Blow-jet: Enlace entre la energía undimotriz y la electrólisis. *Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Uruguay (2010). Clave 5e_115.
27. Sánchez Dirzo, R. Hidrodinámica y optimización de un dispositivo energético tipo TAPCHAN (Tesis de doctorado en desarrollo).
28. Chávez, C.X., Mendoza, B.E.G., Dirzo, R.S. & Silva, C.R. Diseño hidrodinámico y evaluación de un dispositivo marítimo energético, "blow-jet". *Memorias del XXI Congreso Nacional de Hidráulica Guadalajara Jalisco*, México, octubre 2010. Clave 019.
29. Charlier, R.H., Marie, C.P. & Chaineux, S.M. Panorama of the history of coastal protection. *Journal of Coastal Research* **21**, 70-111 (2005).
30. Iribarren, C.R. & Nogales, C.O. *Obras Marítimas* (Dossat, Madrid, 1954). 376 págs.
31. <http://www.caminospaisvasco.com/Profesion/Obras/central-oleaje-mutriku/central-oleaje>. Última visita enero del 2012.
32. Minikin, R.R. *Wind, waves and maritime structures*. 2a. ed. (Griffin, London, 1963). Ver también www.xbloc.com/projects/breakwater-portof-poti-georgia. Última visita abril 2012.
33. Oumeraci, H. *et al.* Probabilistic design tools for vertical breakwaters. (AA Balkema Publishers, 2001). 392 págs.
34. Postigo, L. *El mundo de la energía* (Ramón Sopena, Barcelona, 1965). 613 págs.
35. Perrot, J. *El mar al servicio del hombre* (Everest, España, 1978). 160 págs.
36. Levenspiel, O. *Fundamentos de termodinámica* (Prentice Hall, México, 1997). 362 págs.
37. Levenspiel, O. & Nevers, N. The osmotic pump. *Science* **183(4121)**, 157-160 (1974).
38. <http://www.statkraft.com/energy-sources/osmotic-power/>. Última visita diciembre 2011.
39. Ver documentos de la Agencia Internacional de Energía en <http://www.iea.org/>
40. Rifkin, J. *La economía del hidrógeno* (Paidós, Barcelona, 2002). 324 págs.
41. Meadows, D.H., Meadows, D.L. & Randers, J. *Más allá de los límites del crecimiento* (El País-Aguilar, España, 1993). 354 págs.
42. *World Population to 2300*, ONU. www.unpopulation.org. Última visita diciembre 2011.
43. Ver los reportes disponibles del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en <http://www.ipcc.ch/>. Última visita diciembre 2011.
44. Illich, I. *Energía y equidad* (Editorial Posada, Barcelona, 1978). 236 págs.
45. Sánchez Dirzo, R. *Ciudad Universitaria: ¿Ciudad bicicletera?* *Tendencias* **1**, 22-25 (1995).
46. Sánchez Dirzo, R. & Silva Casarín, R. Combustible hidrógeno para el ciclo Rankine. *Educación Química* **20(2)**, 176-181 (2009).
47. Grove, W.R. On the gas voltaic battery. Experiments made with a view ascertaining the rationale of its action and its application to the ascimetry. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **133**, 91-112 (1843).
48. Hoffman, P. *Tomorrow's energy: hydrogen, fuel cells, and the prospects for a cleaner planet* (MIT Press, Cambridge, 2001). 290 págs.
49. Bockris, J.O'M, Veziroglu, T.N. & Smith, D. *Hidrógeno solar, la energía limpia del futuro* (Editorial Cuatro Vientos, Chile, 1994). 158 págs.
50. Justi, E.W. *Hidrógeno solar: Energía para el futuro* (Marcombo Boixareu Editores, España, 1985). 374 págs.
51. Capra, F. *La trama de la vida: una nueva perspectiva de los sistemas vivos* (Anagrama, España, 1999). 358 págs.
52. Schumacher, E.F. *Lo pequeño es hermoso* (Tursen/Hermann Blume, 1994). 310 págs.
53. Sánchez Dirzo, R. Una propuesta de integración modular de las fuentes de energía renovables, vía hidrógeno, y el ciclo de potencia Rankine. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM, 2004. 125 págs.
54. Sánchez Dirzo, R., Martínez, J.R., Ramírez, B.M. Chan K'iin: Power cycles to generate electricity with hydrogen base. *Proceeding of the 13th World Hydrogen Energy Conference*, Beijing, China, 892-896 (2000).
55. Fisas Armengol, V. *Despilfarro y control de la energía. Serie El Viejo Topo* (Barcelona/Ediciones 2001, España, 1981). 127 págs.
56. Ruiz García, E. *La estrategia mundial del petróleo: una teoría del poder, una teoría de la dependencia* (Editorial Nueva Imagen, México, 1982). 231 págs.
57. Travis, W.W. Harnessing natural energy. *Chemical Engineering Progress* **104**, 23-28 (2008).
58. Lee, B.S. & Gushee, D.E. Electricity storage: the achilles' heel of renewable energy. *Chemical Engineering Progress* **104(3)**, 28 (2008).
59. Rodríguez Varela, F.J., Solorza Feria, O. & Hernández Pacheco, E. (eds.) *Celdas de combustible* (Createspace, USA, 2010). 248 págs.
60. González Huerta, R.G., López Chávez, E. & Velázquez Morales, B. (coords.). *Hidrógeno: Introducción a la energía limpia*. (Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México, 2009). 197 págs.
61. Ramírez Quintana, J.C. (comp.). *Tecnología solar-eólica-hidrógeno-pilas de combustible como fuentes de energía*. Libros de Ciencia y Tecnología No. 2 (Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, México, 2009). 319 págs. <http://www.relaq.mx/>

- RLQ/tutoriales/e-bookCyT2.pdf.
62. 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).
 63. Stahl, W., Voss, K. & Goetzberger, A. The self-sufficient solar house freiburg. *Applied Solar Energy* **31(1)**, 3-6 (1995).
 64. Abaoud, H. & Steeb, H. The german-saudi hysolar program. *Int. J. Hydrogen Energy* **23(6)**, 445-449 (1998).
 65. 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).
 66. 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).
 67. El-Shatter, T.F., Eskander, M.N. & El-Hagry, M.T. Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system. *Energy Conversion and Management* **47(9-10)**, 1264-1280 (2006).
 68. 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(2)**, 225-239 (2006).
 69. Wendt, H. Electrochemical hydrogen technologies: Electrochemical production and combustion of hydrogen (Elsevier Science Publishers, USA, 1990). 532 págs.
 70. Sørensen, B. Hydrogen and fuel cells: Emerging technologies and applications (Elsevier Academic Press, USA, 2005). 450 págs.
 71. <http://www.tendencias21.net/>. Última visita diciembre 2011.
 72. Towards, Z. & Barýs, B. Energy island. *Renewable Energy* **34**, 784-789 (2009).
 73. <http://www.tuverde.com/Dinamarca proyecta una isla de la energía>. Última visita diciembre 2011.
 74. <http://www.absolicon.com/>. Última visita diciembre 2011.
 75. Pérez, R.J.L. Diseño termodinámico de una celda electrónica con capacidad de 1 kW para uso en un prototipo para producir electricidad utilizando hidrógeno como combustible (Tesis UNAM, FES Zaragoza, 2001). 108 págs.
 76. Sahin, A.D. Progress and recent trend in wind energy. *Progress in Energy Combustion Science* **30(5)**, 501-543 (2004).
 77. Sen, Z. Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy Combustion Science* **30(4)**, 367-416 (2004).
 78. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and design coastal engineering manual (2003).
 79. Alcocer, S.M. & Hiriart, G. An applied research program on water desalination with renewable energies. *American Journal of Environmental Sciences* **4(3)**, 190-197 (2008).
 80. Desalación de agua de mar con energías renovables. <http://www.impulsa4.unam.mx/>. Última visita diciembre 2011.
 81. de Cserna, Z. Minerales para fertilizantes en México. *Biol. Soc. Geol. Mexicana* **XXX(2)**, 169-192 (1969).
 82. www.energiamadre.com. Última visita abril 2012.
 83. Sánchez Dirzo, R. Diagramas de procesos para la transformación de las energías renovables. *Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos* **46(5-6)**, 19-25 (2005).
 84. Verheij, F., de Boer, W. & Quist, A. The isle of energy: Storing power at sea. *Power Engineering International* Sep (2007).
 85. <http://www.livescience.com/3063-floating-energy-islands-power-future.html>. Última visita diciembre 2011.
 86. Ohta, T. Some thoughts about the hydrogen civilization and the culture development. *International Journal of Hydrogen Energy* **31**, 161-166 (2006).
 87. Goltsov, V.A., Veziroglu, T.N. & Goltsova, L.F. Hydrogen civilization of the future-A new conception of the IAHE. *International Journal of Hydrogen Energy* **31**, 153-159 (2006).
 88. Saetre, T.O. Hydrogen power: Theoretical and engineering solutions (Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1998). 630 págs.
 89. Sociedad Mexicana de Hidrógeno. <http://www.smh2.mx/>. Última visita diciembre 2011.
 90. Asociación Nacional de Energía Solar. www.anes.org. Última visita, diciembre 2011.
 91. Sebastian, P.J. The opportunity for a sustainable hydrogen program in Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy* **29(9)**, 905-906 (2004).
 92. Sebastian, P.J. Desarrollo de un sistema híbrido sustentable de fotovoltaica-hidrógeno-celda de combustible para la generación de energía eléctrica (CIE, UNAM, 2005). 20 págs.
 93. Centro de Investigación en Energía de la UNAM. <http://xml.cie.unam.mx/xml/>. Última visita diciembre 2011.
 94. Asociación Internacional de Hidrógeno. <http://www.iahe.org/>. Última visita diciembre 2011.
 95. Proyecto japonés para el desarrollo del hidrógeno. <http://www.ena.or.jp/WE-NET/>. Última visita diciembre 2011.
 96. Plataforma europea del hidrógeno y las pilas de combustible, visión estratégica de conjunto (2005). www.aeh2.org.
 97. International Energy Agency. Prospects for Hydrogen and Fuel Cell (OECD Publishing, París, 2005). 253 págs.
 98. Arxer, M.M. & Martínez Calleja, L.E. Hercules project: Contributing to the development of the hydrogen infrastructure. *Journal of Power Sources* **171(1)**, 224-227 (2007).
 99. Brey, J.J. Designing a gradual transition to a hydrogen economy in Spain. *Journal of Power Sources* **159**, 1231-1240 (2006).
 100. Electric Power Research Institute. Hydrogen Briefing. (2008). www.epri.com
 101. Department of Energy, USA. Basic Research Needs for the Hydrogen Economy. <http://www.sc.doe.gov/bes/hydrogen.pdf>. (2004).
 102. Department of Energy USA. Fuel Cell: Report to Congress (2003). http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fc_report_congress_feb2003.pdf
 103. U.S. Department of Energy. Hydrogen Posture Plan: An Integrated Research, Development and Demonstration Plan (2006).
 104. Estrada Gasca, C.A. & Islas Samperio, J. (coords.). Energías Alternas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México (Academia Mexicana de Ciencias, México, 2010). 136 págs.
 105. Acceder a las investigaciones del Electric Power Research Institute: http://my.epri.com/portal/server.pt?open=512&objID=210&mode=2&in_hi_userid=2&cached=true. Última visita diciembre 2011.