



Universidad Tecnológica

Nuestro Compromiso es la Innovación

Título de la investigación:

Política energética: obtención de hidrógeno mediante electrólisis del agua con energía solar. Una aproximación teórica

Investigador

Jorge Alberto Basagoitia García

La presente investigación fue subvencionada por la Universidad Tecnológica de El Salvador. Las solicitudes de información, separatas y otros documentos relativos al presente estudio pueden hacerse a la dirección postal: calle Arce, 1020, Universidad Tecnológica de El Salvador, Vicerrectoría de Investigación, Dirección de Investigaciones, calle Arce y 17ª. Av. Norte, edificio *José Martí*, 2ª. planta, o al correo electrónico: infoutec@utec.edu.sv

San Salvador, 2011

ISBN 978-99923-21-75-1

Derechos Reservados

© Copyright

Universidad Tecnológica de El Salvador

Índice

	Pág.
Resumen.....	3
Introducción y marco teórico.....	3
Planteamiento del problema.....	5
Objetivo.....	8
Metodología.....	8
Esquemas de solución.....	10
Estructura I: producción heliohidroeléctrica de hidrógeno.....	13
Resultados, potencialidades y evaluación de la estructura I.....	19
Estructura II: producción heliotermoeléctrica de hidrógeno.....	22
Resultados, potencialidades e implicaciones de la estructura II.....	30
Seguridad.....	32
Usos del hidrógeno.....	32
Conclusiones.....	34
Referencias.....	38

Resumen

De forma conceptual, y a nivel introductorio, se abordan dos estructuras basadas en la circulación de corriente eléctrica en un flujo de agua, a fin de lograr la separación química del hidrógeno y del oxígeno que componen la molécula del agua.

Primero, a temperatura ambiente, se considera un sistema de celdas solares fotovoltaicas interactuando con reservorios superior e inferior de agua de una central eléctrica: un sistema *helio-hidroeléctrico* (interconexión de energías y tecnologías: solar, agua, electricidad). Luego, a medias y altas temperaturas, se valora una segunda estructura consistente en la presencia, en el interior de un reactor termoelectrolítico, de un caudal de vapor de agua producido en un campo de colectores concentradores solares atravesado por corriente eléctrica DC, dando lugar a la alternativa *helio-termoeléctrica* (sol-calor-electricidad).

Introducción

Está entre nosotros el hidrógeno que probablemente sea el elemento más abundante en el universo, un generoso gas que al combinarse con el oxígeno libera un alto poder energético, produciendo vapor de agua como subproducto y no gases de efecto invernadero, pudiendo utilizarse como combustible limpio.

Del conjunto de polos de desarrollo de tecnología del hidrógeno, se destacan varios de ellos. El primero (Nocera, 2009) busca efectuar modificaciones en la oblea fotoeléctrica elemental, a fin de liberar hidrógeno cuando inmersa en solución acuosa es cubierta con rayos de luz. El segundo consiste en la utilización del vapor de agua producido en el absorbedor de luz de alta densidad colocado en el vértice de un “cono de luz” generado por cientos de superficies reflectoras heliostáticas figura 16, (Solar Fuels from Concentrated Sunlight, 2009). Un tercero está relacionado con el almacenamiento de hidrógeno (Steward, 2010; Nrel, 2012).

Durante las últimas décadas, El Salvador desarrolló trabajos inconexos entre sí sobre investigación experimental comprendida en la esfera de producción de hidrógeno con base en energía solar: un grupo de investigadores, docentes y estudiantes pertenecientes al Departamento de Física de la Universidad de El Salvador, 1985, trabajó con obleas fotovoltaicas y crecimiento de cristales. Algunos medios informaron de una alumna de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas que llevó adelante un experimento de hidrógeno relacionado con el motor de un vehículo liviano de transporte.

El Fondo de la Iniciativa para las Américas El Salvador (Fiaes, 2008) respaldó financieramente a la unidad de Investigación y Desarrollo de Tecnología de una institución de educación superior, que resultó en un sistema constituido por una plataforma de seguimiento en dos ejes al disco solar, cuya superficie especular llevó adelante la redirección de los rayos solares paralelos e incidentes, normales a ella, hacia un único punto, dando lugar a un cono de luz en el vértice del cual se colocó la ventana de un fotogenerador de vapor, como en figura 14.

Simultáneamente, la unidad de Investigación de la empresa estatal geotérmica salvadoreña La Geo experimentó, en Ahuachapán, con un conjunto de canales parabólicos de superficie reflectiva con un sistema de seguimiento en un solo eje y un tubo absorbedor en el vértice del sector parabólico sólido de luz. De forma similar, en la misma empresa, se llevaron adelante pruebas con electrólisis de agua para obtener hidrógeno. Seguramente, en los temas de energía solar e hidrógeno, hay otras importantes contribuciones en El Salvador y la región. Al parecer los esfuerzos, aunque meritorios, nacieron y se desarrollaron entre sí de forma aislada, no estuvieron vinculados a una estrategia de política estatal de desarrollo científico-tecnológico, a un plan nacional de desarrollo energético y, probablemente, tampoco a escala centroamericana. Se busca, entonces, la integración conceptual de bloques funcionales (energía solar, agua, hidrógeno), sistemas y esfuerzos que propicien la posibilidad estratégica regional de aportar elementos que puedan formar la agenda salvadoreña y centroamericana de investigación para la producción de hidrógeno, a partir fundamentalmente de dos fuentes de insumos: el agua y la energía solar. Se asocian

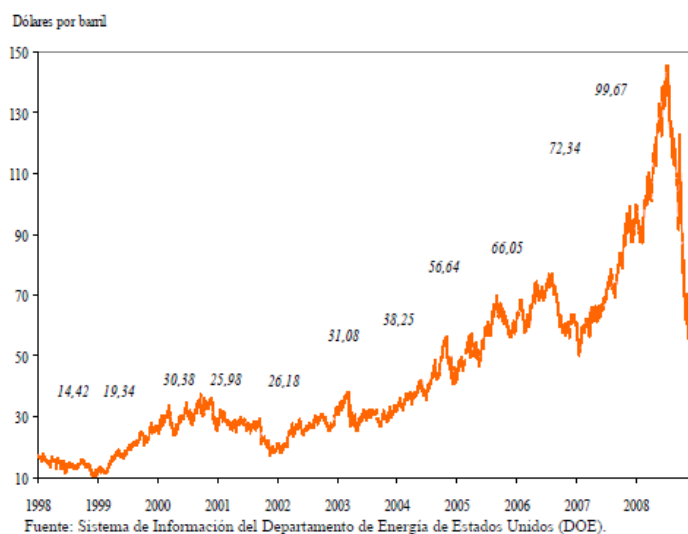
ingredientes teóricos y experimentales locales e internacionales, a fin de llevar adelante un ejercicio de organización de ideas en un contexto de prospección tecnológica.

Planteamiento del problema

El Salvador presenta una aguda dependencia de combustibles fósiles en su estructura energética y tecnológica: importa a altos precios, contaminación e inflación, alcanzándose un máximo para 2008, durante el cual se pagaron 1.647.4 millones de dólares en concepto de compra de hidrocarburos (Banco Interamericano de Desarrollo, 2011). Parte de esa cifra se destinó a hidrocarburos para activar centrales termoeléctricas estacionarias.

Figura 1. Alzas agudas e inestabilidad en la evolución histórica de los precios del petróleo

PRECIOS SPOT Y PRECIOS PROMEDIO ANUALES DEL CRUDO MARCADOR WEST TEXAS INTERMEDIATE (WTI) EN EL PERÍODO 1999-2008



*Referencia:
Centroamérica:
impactos de los choques
petroleros y eficiencia
de los mercados de
hidrocarburos; Cepal,
Interamerican Dialogue
y Banco Interamericano
de Desarrollo BID,
2011, p. 8.*

2. Indicadores de vulnerabilidad petrolera de los países centroamericanos

He aquí una de las profundas raíces del subdesarrollo. El costo del subdesarrollo tiene un alto e insostenible precio; en el caso de la dependencia tecnológica y energética salvadoreña respecto a hidrocarburos en nueve años (1990, 1995, 2000, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010), asciende a 8.287 millones de dólares (ocho mil doscientos ochenta y

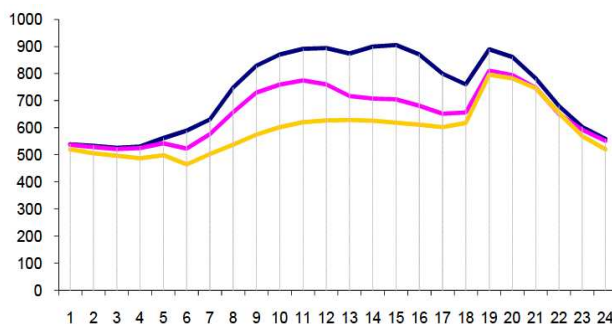
siete millones) en concepto de importación de combustibles en ese ramo, Cepal (2011), p. 7. Con base a la misma fuente, tal concepto extendido a Centroamérica alcanza la suma de 54.753 millones de dólares, (cincuenta y cuatro mil setecientos cincuenta y tres millones).

Los procesos contamina-dependientes e inflacionarios de los hidrocarburos hacen blanco preferencial sobre los precios de la oferta alimentaria, constituyendo un golpe demoledor en los estratos sociales más pobres, expresándose en forma de hambre en esos amplios sectores de la población.

Muchos aspectos altamente sensibles de la vida nacional y centroamericana son severamente afectados con la actual estructura energética: soberanía alimentaria, salud, transporte, ambiente, producción, industria y otros. El impacto sobre la industria puede verse en el Informe Económico Industrial 2010, Gerencia de Inteligencia Industrial, ASI (2011). Un fuerte asidero para evidenciar la conexión entre los problemas energético y alimentario puede encontrarse en el “Informe sobre Desarrollo Humano El Salvador 2010. De la pobreza y el consumismo al bienestar de la gente, propuestas para un nuevo modelo de desarrollo” (p.115). Está vigente el riesgo climático del arco de la sequía, el cual afecta la producción de energía hidroeléctrica, de biomasa y aumenta la dependencia de hidrocarburos; en el terreno de insuficiencia alimentaria propicia hambruna a 8.6 millones de centroamericanos (Global Water Partnership, BID e Inwap, 2005. Páginas 10, 21, y 22). También se requiere en este caso, por tanto, estrategias y tecnologías energéticas centroamericanas de adaptación al cambio climático.

La siguiente figura ilustra una de las demandas energéticas que, teórica y prospectivamente, puede ser suplida parcial o totalmente con hidrógeno. Se trata de la carga de energía eléctrica en El Salvador, según los registros correspondientes a la época seca del año 2010.

Figura 2. Curva de carga de energía eléctrica. Estación seca, El Salvador 2010.
Eje horizontal: tiempo en horas. Eje vertical: potencia en MW. Curva superior, tiempo laboral; intermedia: sábados; inferior: domingos. Referencia: *Unidad de Transacciones El Salvador, 2010.*

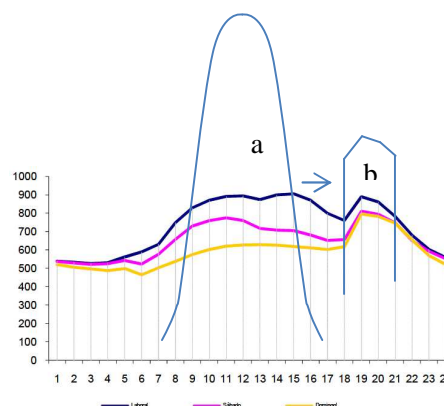


Dada la abundancia, disponibilidad y limpieza de las fuentes de energía constituidas por agua y radiación solar, ¿cómo puede aprovecharse, almacenarse y recuperarse esa potencialidad para usos en transporte, industria y hogares en armonía con el ambiente?, ¿cómo integrar conocimientos de esfuerzos previos de manera sostenible para obtener y controlar la energía contenida en abundantes recursos en la región (la radiación solar y el agua), sin entrar en conflicto con los ciclos naturales de la vida y estabilidad geológica?

La figura 3 indica el rumbo de la discusión que llevará el presente trabajo. De tal manera que en la ojiva (a) de la energía solar incidente, de significativa contribución entre 9am-3pm, se activan varios procesos de conversión, electrólisis, almacenamiento, recuperación de energía, y otros que pueden desplazar en el tiempo el uso de una porción de la energía solar, como en el caso del sistema helio-hidroeléctrico o estructura I. Caso similar ocurre con el sistema de formación de vapor; generación solar de energía eléctrica (para el consumo simultáneo y para aportar corriente DC al proceso de electrólisis); producción y almacenamiento de hidrógeno por varias horas lo cual constituye sistema helio-termoeléctrico o estructura II. La curva (b) indica la forma de liberar la energía del hidrógeno para servir la demanda con desplazamiento en el tiempo a través de turbogeneración a gas u otros sistemas como celdas de combustible, calor, etc.

Figura 3. Curva de carga de energía eléctrica presentada en la figura 2. Sobre esa curva se han dibujado dos siluetas de trazo fino sin escala interpretadas en el texto.

Trazos finos propios sobre curva de carga procedente de la siguiente referencia: UT, 2010.



El problema que se debe abordar puede sintetizarse diciendo que consiste en la aportación de elementos de solución en cuanto a la organización conceptual, interconexión e interrelación de sistemas, eslabonamiento de fases a fin de coleccionar, procesar energía de procedencia solar para separar el hidrógeno del agua, almacenamiento y utilización como

combustible para contribuir a servir la curva de demanda, tanto en forma simultánea como con dilación en el tiempo respecto a las horas soleadas.

Objetivo

General:

Incidir en la política energética, a fin que se favorezcan las investigaciones relacionadas con el hidrógeno.

Específicos

1. Presentar la interconexión de bloques conceptuales de un sistema helio-hidroeléctrico de producción de hidrógeno, relacionado con una central hidráulica con base en la electrólisis del agua a temperatura ambiente.
2. Estructurar la organización conceptual de un sistema helio-termoeléctrico de producción de hidrógeno con fundamento en la electrólisis del vapor de agua.

Metodología

Con referencia a metodología de investigación (Hernández, Fernández y Baptista, 2003), se tienen los siguientes rasgos metodológicos:

Exploratorios

Desde el punto de vista del abordaje en los polos investigativos del mundo, desde hace varias décadas existe una febril actividad en el tema en estudio, a la cual El Salvador y Centroamérica deben incorporarse. Aunque ha habido algunos esfuerzos aislados en la región aludida, tal actitud es sustantivamente menor, por lo que se requiere, por tanto, más trabajo y dedicación en la interconexión de sistemas, la contextualización de ellos a la intensidad de radiación solar, la referencia a la curva de carga, los materiales, la fotosíntesis y otros aspectos del tema, como motivar a las instancias encargadas de llevar la política energética hacia el sustantivo apoyo de la tecnología del hidrógeno.

Descriptivos

En este aspecto están comprendidos elementos de la insostenible problemática de la economía energética salvadoreña; y se recurre a breves elementos descriptivos de ella, a fin de justificar el estudio. Otros componentes descriptivos aparecen en los métodos para la producción de hidrógeno y su mercado. De manera similar, se pasa a describir el funcionamiento de las estructuras propuestas.

Correlacionales

Se pone de relevancia cómo la electrólisis, a partir del vapor a elevadas temperaturas, presenta ventajas energéticas respecto a la realización del trabajo a temperatura ambiente. Se tabulan relaciones de dependencia de producción de hidrógeno respecto al área cubierta por los dispositivos de colección, así como respecto al índice de radiación solar.

Explicativos

La causa del porqué la electrólisis del vapor a alta temperatura posee ventajas energéticas puede apreciarse en la composición de la energía total demandada, la energía eléctrica y el calor. Una síntesis procedimental de ingeniería para cada estructura es la siguiente:

Estructura I. La búsqueda e interconexión de información de los bloques constructivos sobre varios aspectos constitutivos de la producción de hidrógeno mediante electrólisis helio-hidroeléctrica: la producción de energía de corriente directa de origen solar mediante dispositivos fotoeléctricos o maneras alternativas; sistemas de almacenamiento de energía en forma potencial y/o electroquímica; recuperación de energía acumulada; descomposición del agua mediante electrólisis a temperatura ambiente, en un contexto de medidas de adaptación de infraestructura energética al cambio climático (alteración no predictiva de caudales); la organización conceptual de un sistema hipotético dirigido a ser un valioso complemento energético para plantas y centrales hidroeléctricas.

Estructura II. Acopio de información e interrelación de los componentes que forman los procesos de electrólisis helio-termoeléctricos: identificación de variables fundamentales e insumos de los cuales depende el proceso de termoelectrólisis del agua y aspectos energéticos requeridos para el proceso; conceptualización de un sistema cíclico desintegración-integración del agua mediante la disociación electrolítica de sus elementos y la consiguiente recombinación oxígeno-hidrógeno, para la recomposición de la molécula de agua. En cada ciclo de ejecución del proceso ocurre una liberación de energía útil.

Esquemas de solución

Entre los métodos existentes para la obtención del hidrógeno, probablemente el reformado del metano sea el más utilizado en la industria de los hidrocarburos. La presente discusión se orienta hacia un acercamiento a la obtención de hidrógeno a partir del agua inducida con energía solar. En términos sencillos, el problema tecnológico se puede plantear diciendo que consiste en separar el hidrógeno del agua facilitada por una corriente eléctrica o electrólisis (Fuel Cells and Hydrogen Energy Association, 1999).

De acuerdo con la tabla 1, los sistemas que se deben considerar pertenecen a una familia de métodos que podrían ser clasificados para la estructura I helio-hidroeléctrica: en relación con el método primario es electromecánico; el proceso es electrólisis; la materia prima es agua a temperatura ambiente; la energía es hídrica convertida a electricidad mediante turbogenerador hidráulico. En cuanto a las emisiones, se producen en el embalse como producto de la central hidroeléctrica previamente existente y no durante la electrólisis. La estructura II termo-helioeléctrica aplica como térmica respecto al método primario; electrólisis respecto a proceso; materia prima que hay que utilizar, agua; energía, de procedencia solar. En relación con las emisiones, no se producen.

Un interesante método de reciente publicación que se apoya en nanotecnología mejora las expectativas (Sun *et al*, 2011).

Tabla 1. Consolidación de los principales métodos para a producción de hidrógeno

Método primario	Procesos	Materia prima	Energía	Emisiones
	Reformado con vapor	Gas natural	Vapor a alta temperatura	Algunas emisiones. El secuestro de carbono puede mitigar su efecto.
	Partición termo-química del agua	Agua	Calor a alta temperatura proveniente de avanzado enfriamiento a gas de reactores nucleares	Sin emisiones.
Térmico	Gasificación	Carbón, biomasa	Vapor y oxígeno a alta presión y temperatura	Algunas emisiones. El secuestro del carbono puede mitigar su efecto.
	Pirólisis	Biomasa	Vapor a temperatura moderadamente alta	Algunas emisiones. El secuestro del carbono puede mitigar su efecto.
	Electrólisis	Agua	Electricidad a partir de viento, solar, hídrica y nuclear	No emisiones.
Electro-Mecánico	Electrólisis	Agua	Electricidad a partir de carbón y gas natural	Algunas emisiones de la producción de electricidad.
	Foto-electro-químico.	Agua	Luz solar directa	No emisiones.
Biológico	Foto-biológico	Agua y cepas de algas	Luz solar directa	No emisiones.
	Digestión anaeróbica	Biomasa	Calor a alta temperatura	Algunas emisiones.
	Micro-organismos fermentativos	Biomasa	Calor a alta temperatura	Algunas emisiones.

Referencia: Fuel Cells and Hydrogen Energy Association, 2010.

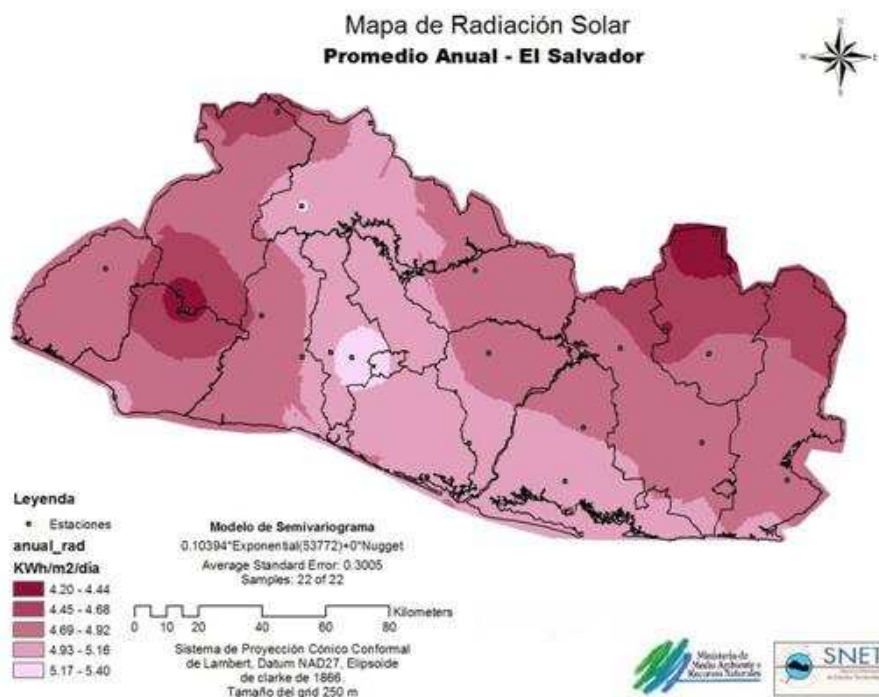
El Instituto Tecnológico de Massachusetts está muy activo en el estudio del dopaje catalítico para la organización de flujos electrónicos en procesos de fotosíntesis y separación del hidrógeno del agua como medio de almacenamiento de energía solar, la fotosíntesis artificial y otros (Mershin, 2011; Nocera, 2009).

Es oportuno mencionar que la aplicación de calor para elevar la temperatura del agua necesita menos energía eléctrica por unidad de masa de hidrógeno producido (Brady, 2003). A igualdad de cantidad y unidad de medición energética (por ejemplo 1kwh), el calor es de menor costo que la energía eléctrica. El calor puede ser obtenido mediante procesos de concentración de energía solar sobre una aproximación práctica de cuerpo

negro de forma tubular (figura 12), cuya superficie exterior se expone a la luz de alta densidad, en el interior del cual fluye una corriente de agua (Montes, Abánades y Martínez-Val, 1998).

La distribución de la radiación solar anual promedio de la zona de trabajo, como lo muestra la figura 4 (Programa SWERA, 2011), en el territorio de El Salvador (aproximadamente 21.000 Km²), puede apoyar la selección del lugar adecuado. A escala centroamericana, la extensión preferentemente soleada es la vertiente hidrológica del sur, coincidente con la zona donde se alojan las más grandes concentraciones humanas en una extensión del orden de 80.000 Km², desde el lago de Managua hasta la frontera sur de México con Guatemala. De forma similar es la zona en la región de más alta demanda de energía para cubrir las actividades económicas.

Figura 4. Radiación promedio anual Kwh/m² por día en El Salvador



Referencia: Proyecto SWERA, 2010.

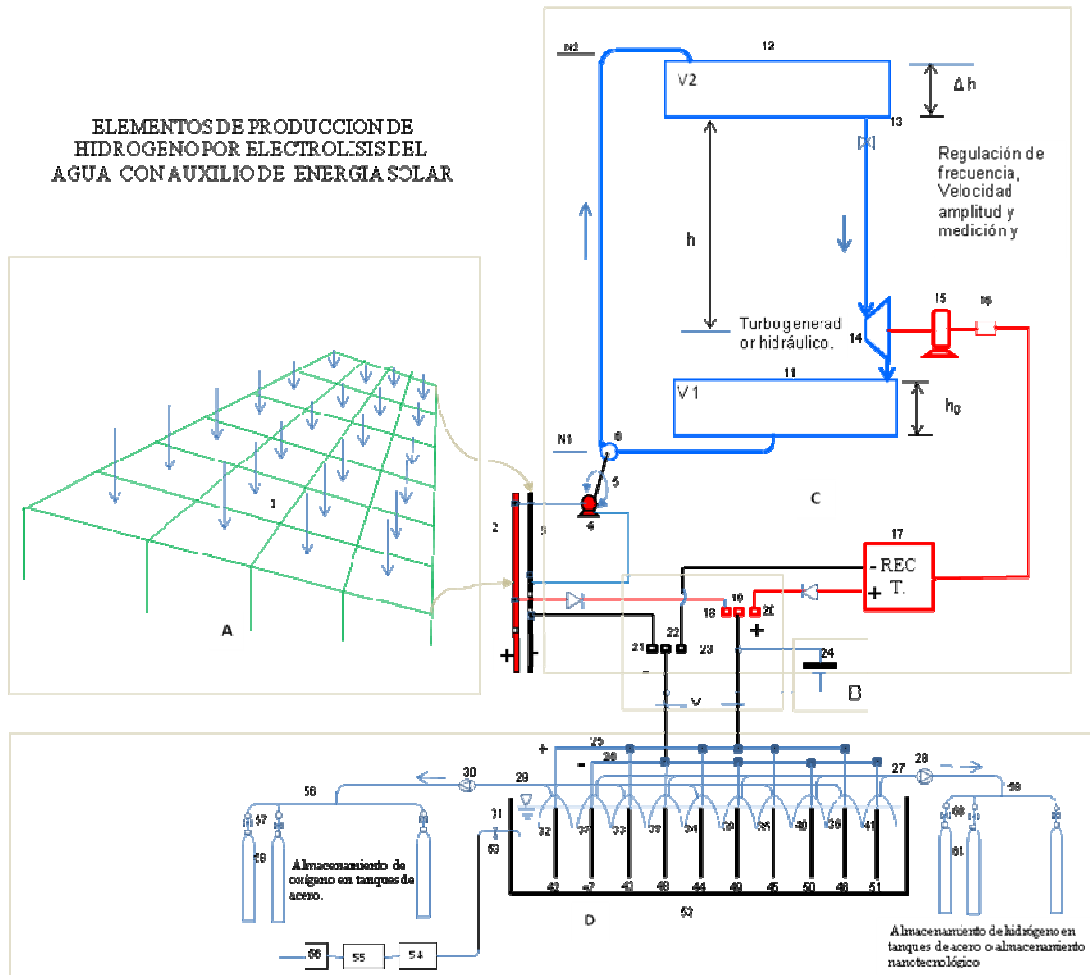
Estructura I: producción helio-hidroeléctrica de hidrógeno

En atención a figura 5, las flechas hacia abajo, en el recuadro A, indican la dirección de propagación de la radiación solar incidente sobre la superficie de un campo de paneles fotovoltaicos (1). Para un elevado aprovechamiento (máxima conversión de energía solar disponible en energía eléctrica de corriente directa), idealmente la superficie de los paneles expuesta a la luz del sol debe estar libre de impurezas y formando (en cada instante del baño solar) un ángulo recto respecto a la dirección de propagación de los rayos incidentes (Lee, Chou, Chiang y Feng, 2009; Ganesh, Maniprakash, Chandrasekaran y Srinivasan, 2005).

Basados en procedimientos nanotecnológicos, próximamente estarán disponibles paneles fotovoltaicos livianos de alta eficiencia (Velásquez, 2011; Focer, Pnud, GEF, Bunca, 2002; Castellanos, Flores, Heredia y Reysancho, 2009; Julio Fernández, 2005; Knol a unit of knowledge, 1999).

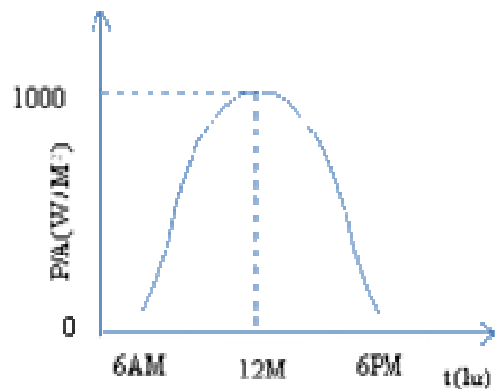
Con respecto a figura 5, el rectángulo A indica la colección y conversión a energía eléctrica de la radiación solar en un campo de celdas fotoeléctricas (1); el B está relacionado con el almacenamiento de energía en un sistema de baterías convencionales o nanotecnológico de acumulación; el C se asocia con el almacenamiento de energía en forma potencial mediante elevación de una masa de agua desde un nivel inferior (N_1) hasta otro superior (N_2). El sistema en el interior del rectángulo D está relacionado con el proceso de electrólisis del agua (separación físico-química del hidrógeno y oxígeno), con auxilio de energía de corriente directa proveniente de paneles fotovoltaicos durante las horas de disponibilidad de insolación y en horas de no sol, mediante la energía almacenada en baterías o potencial convertida a eléctrica en el alternador (15) impulsado por la turbina hidráulica (14), y luego convertida a corriente directa con ayuda del rectificador (17).

Figura 5. Esquema de principio helio-hidroeléctrico de la producción elemental de hidrógeno mediante sucesivas transformaciones de energía compuesta por cuatro subsistemas encerrados en los rectángulos de trazo tenue A, B, C y D descritos en el texto



Referencias: Kroposki, Levene, Harrison, Sen y Novachek, 2006; Morse, 1984; Brady, 2003; Lozano, 2009; Flores, 2001; Rashid, 2004; Manuales sobre energía fotovoltaica, 2002.

Figura 6. En general y con las respectivas restricciones climáticas, la distribución típica de insolación solar directa (potencia en watts sobre unidad de área en metros cuadrados) en función del tiempo en horas, tiene forma de ojiva con el valor teórico máximo a las 12 m.



Referencia: Morillo, 1985; Passamai, 2003.

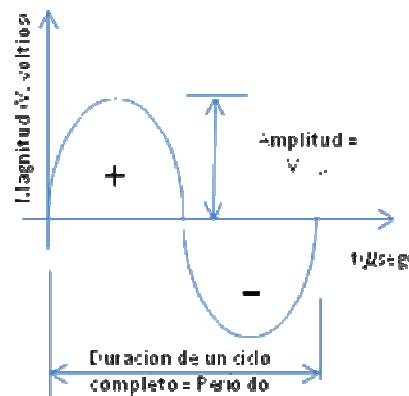
Continuando con la figura 5, el terminal positivo de los paneles se conecta a la barra (2), en tanto el negativo lo hace en la (3), que conduce hacia los bornes (18 y 21) del conmutador, respectivamente.

Durante las horas soleadas, el campo solar (1) del rectángulo A tiene la capacidad para alimentar simultáneamente con corriente directa tres sistemas. El primero: electrólisis del agua, del recuadro D, en donde el conmutador mostrado da paso a la corriente uniendo los bornes (18) con (19) para la polaridad positiva (25) y (21) con (22) para la polaridad negativa (26). El segundo recuadro, B, un sistema de acumulación de energía (24). El tercero, en el recuadro C, que constituye el sistema de almacenamiento hidráulico de energía, compuesto por varios elementos: un motor de corriente directa (4) que a través del eje (5) impulsa la bomba (6), de tal manera que la masa de agua en el contenedor inferior (11), ubicada en el nivel N_1 , pueda ser elevada hasta el contenedor (12), a una elevación N_2 . Durante operaciones de carga, la válvula (13) se encontrará cerrada.

En horas de no disposición de radiación solar (noche, lluvia, nubes...), la producción de hidrógeno puede continuar gracias a la energía almacenada durante el día en el depósito superior (12) y/o en (24). Se abre la válvula (13), dando lugar a un flujo de agua que impulsa el sistema hidroeléctrico compuesto por la turbina (14) y el alternador (15). Esta última máquina presenta en los bornes de salida una señal de potencia eléctrica de corriente alterna. La máquina se resguarda mediante los dispositivos de protección (16).

Las figuras 7 y 8 hacen alusión a los términos *corriente alterna* y *corriente directa*.

Figura 7. Señal sinusoidal elemental



Referencia: Edminister, 1981.

Generalmente se toma como modelo la frecuencia de corriente alterna industrial que se repite sesenta veces en un segundo (60Hz), período T (1/60 seg. y amplitud V_{\max}). Nótese que la corriente asociada a esa señal de voltaje circulará en un sentido en el semiciclo positivo y en sentido contrario en el semiciclo negativo. Por intercambiar su polaridad con el paso del tiempo, se denomina *señal alterna*. Una forma de onda de potencia como la presente se encuentra fasorialmente equidistante en cada uno de los tres bornes de salida de la máquina (15) de la figura 5.

El rectificador (17) convierte la energía eléctrica alterna en corriente continua para ser utilizada en el proceso de electrólisis del agua, induciendo la producción de hidrógeno. La batería (24) forma un sistema de almacenamiento químico de energía, cuya aportación es regular el flujo de energía eléctrica hacia las cubas electrolíticas D, guardando energía en tanto se tengan excedentes en horas de abundante luz solar, y cederla al proceso cuando la radiación reduzca su intensidad.

Según Bansal (2009), para almacenamiento de energía mediante procedimientos de nanotecnología se tienen significativos avances y desafíos en nanoestructuras de carbono y modelado. El Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) continúa el desarrollo de su plan de actitud ante el hidrógeno (Hydrogen Posture Plan, 2006). Como objetivos a mediano plazo para la densidad de energía almacenada por unidad de masa y volumen el DOE presenta una proyección hacia 2015, de acuerdo con la tabla 2 (Rivas, Ganzer y Cosme, 2007).

Tabla 2. Expectativa del DOE. Indicadores de almacenamiento de hidrógeno

	Año 2010	Año 2015
Energía específica	2 kwh/kg	2.7 kwh/L
Energía por volumen	1.5 kwh/L	2.7 kwh/L
Precio de la energía	\$4.00 kwh	\$2.00 kwh

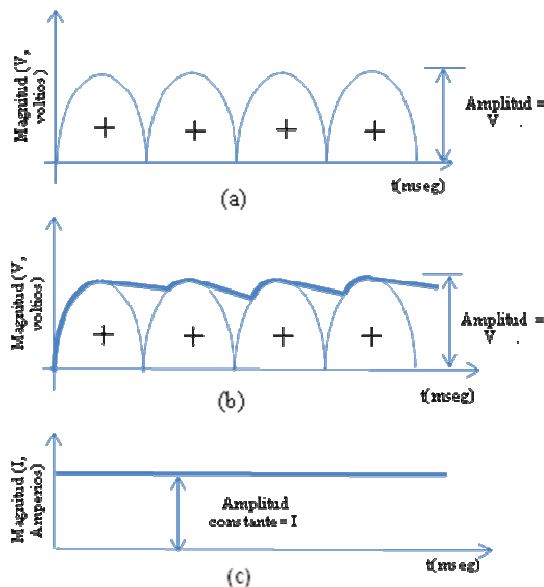
Referencia: Rivas et al. (2007).

Estos procedimientos pueden utilizarse para almacenamiento de energía en forma de hidrógeno (Hydrogen Posture Plan, 2006).

En atención al contenido del recuadro C, y con referencia a Brady (2003): la solución conductora contenida en la celda (52) está compuesta por electrolitos diluidos en agua en donde se encuentran iones OH^- y H^+ . La capacidad de conducción puede aumentarse con la adición de un ácido, y el proceso puede mejorarse mediante la aplicación de calor. Intervenciones catalíticas van en la misma dirección, y una complementación de ambos factores ofrece mejores perspectivas. La estructura de la corriente eléctrica, magnitud y forma en función del tiempo puede derivar en un efecto electrocatalítico.

En relación con la figura 8, la corriente eléctrica necesaria para producir la electrólisis se corresponde con la descrita por el voltaje que la impulsa; es decir, su magnitud posee polaridad constante, como la señal (a), resultante del proceso de rectificación de la onda. La ondulación de la señal en (b) se produce durante sucesivas cargas y descargas del sistema de almacenamiento (posición 24 en la figura 5), cuando la alimentación posee la forma de onda de (a). Idealmente, y con el paso del tiempo, la corriente deberá describir una línea recta horizontal respecto al eje del tiempo como en (c) de la figura 8.

Figura 8. La forma de corriente directa utilizada en procesos electrolíticos



Referencias: Boylestad y Nashelsky, (2003); Rashid, (2004).

El rectángulo D de la figura 5 muestra un esquema de la cuba en la que se realiza la separación de los elementos que forman el agua, la cual se produce al circular la corriente eléctrica en el sentido convencional desde el electrodo positivo hacia el negativo. El hidrógeno disociado se acumula en las proximidades del electrodo negativo, y el oxígeno lo hace en las cercanías del electrodo positivo, en la superficie, manifestándose en forma de burbujas. Siendo menor la densidad de los gases que la del líquido, las burbujas suben hasta el interior de la cúpula de la ojiva colectora desde (37) hasta (41) para el hidrógeno, y desde (32) hasta (36) para el oxígeno. Las barras inmersas de polaridad positiva desde (42) hasta (46), y de polaridad negativa desde (47) hasta (51).

Con ayuda del tubo colector múltiple (27) y cuidando que no ingrese aire ni agua, el hidrógeno es succionado desde las cúpulas por el compresor (28), a fin de inyectarlo en el sistema de almacenamiento formado por el múltiple (59), el juego válvula-manómetro (60) y la sucesión de tanques (61). Con auxilio de estructura nanotecnológicas de grafeno, los procesos de almacenamiento actualmente en desarrollo evolucionan a fin de acumular masa de gas en un volumen por un tiempo prolongado y de forma segura (Bansal, 2009).

Mediante un proceso de colección y compresión, se produce la carga de los tanques de oxígeno partiendo de las cúpulas de ojivas (32) a (36) y canalizando el fluido con auxilio del múltiple (29) y el compresor (30).

Durante el proceso, se intentará mantener regulado el nivel de la cuba (21) y el voltaje de corriente directa V_{DC} . La alimentación de agua se provee a partir de un manantial cercano. La línea de suministro de agua posee, entre otros, varios elementos: válvula hidráulica (53), supervisión de temperatura (54), acidificación (55) y depuración (56).

Resultados, potencialidades y evaluación de la estructura I

Desventajas: alto costo, el cual descansa sobre las celdas fotoeléctricas importadas. Con base en procedimientos experimentales, deben resolverse problemas de caracterización del comportamiento de materiales como electrodos, diseño de reactores, estabilidad, eficiencia y larga vida; en referencia a la figura 5, el atractivo de capitalizar y retener energía de procedencia solar durante horas de luz natural para ser utilizada en momentos donde la radiación directa no es posible, tiene un precio en eficiencia: durante la carga del reservorio superior aparecen varios bloques en serie con el flujo principal de energía disponible en bornes del campo solar, que en una central hidroeléctrica convencional no existen: motor (4), bomba (6), instalación hidráulica para superar la altura de carga desde el nivel N_1 hasta el N_2 ; el rectificador (17). Según Flynn, Bellaby y Ricci (2006), el riesgo está permanentemente presente y se deben tomar las precauciones y medidas requeridas.

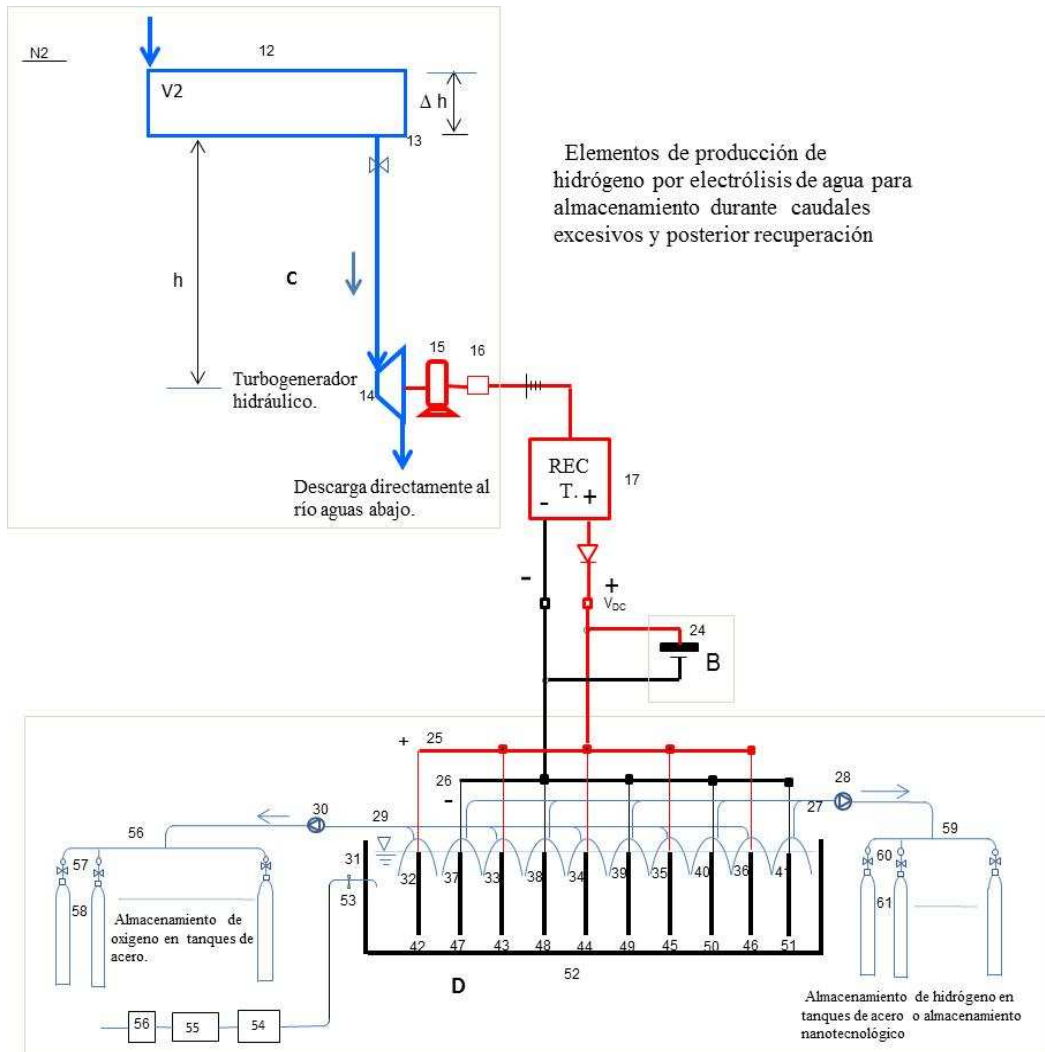
Ventajas: tecnología renovable, limpia; aprovechamiento de recursos endógenos: la energía solar y el agua; alto grado de independencia de las existencias, de los precios internacionales y de la carga de contaminación ambiental de la actual energía y tecnología de los hidrocarburos; posee un sistema de almacenamiento de energía potenciando la producción diurna y nocturna con razonable continuidad. Un concepto que puede ser económicamente importante y sustantivo es recuperar, volviendo productiva, la capacidad holgada de embalses e infraestructura de turbogeneración hidroeléctrica durante la época

seca, que en esos meses se encuentra subutilizada, cobrando la estructura I la forma de un sistema de compensación a las centrales hidroeléctricas durante los meses holgados.

En época de declinación de la producción de la central hidroeléctrica convencional la lluvia y nubosidad es mínima, siendo la radiación solar más efectiva; el agua utilizada, salvo pérdidas, es sustancialmente recirculable. Las fugas pueden ser restringidas; pueden volverse productivos los excedentes de agua que durante copiosos inviernos sobrepasan la capacidad de almacenamiento y producción de los embalses, que actualmente deben descargarse sin ninguna utilidad, perdiendo el potencial energético. El sistema provee un medio de regulación al respecto. Con la presente propuesta puede aprovecharse esa energía, almacenándose en forma de hidrógeno durante temporadas de generosas lluvias y llevar adelante un aprovechamiento planificado para diferir el consumo respecto a la producción, cuando sea necesario suplir demandas respecto a producción convencional insuficiente. El resultado neto es un beneficioso efecto de regulación. Para este último propósito, existe una ventaja adicional consistente en que los elevados costos de las celdas fotoeléctricas pueden ser totalmente suprimidos.

Reestructurando la figura 5 como un sistema de almacenamiento y recuperación energéticos de excedentes para aplicación con afanes de regulación y uso posterior, se tiene la figura 9.

Figura 9. Modificación de la figura 5 para responder exclusivamente a necesidades de aprovechar las actualmente infructuosas descargas por rebalse en momentos de superávit de lluvias. Nótese que la presente versión puede prestar su servicio sin incurrir en costos del campo de celdas fotoeléctricas, las que han sido suprimidas. En otros términos, una fracción de la curva correspondiente a la oferta puede trasladarse en el tiempo para hacerla coincidir con una fracción de la curva de demanda.



Estructura II: producción helio-termoeléctrica de hidrógeno

Se presenta en esta sección una forma alternativa de electrólisis, aplicando calor solar (heliotérmico) al agua hasta llevarla a forma de vapor para liberar hidrógeno con menos cantidad de energía eléctrica DC.

Con referencia a figura 10, se muestran tres regiones encerradas en rectángulos de trazo tenue: la función esencial del rectángulo A es producir un caudal másico a una temperatura estable, que facilite la ruptura de los enlaces moleculares de una sustancia portadora de hidrógeno (agua vaporizada con energía solar) para propiciar la separación del hidrógeno en el rectángulo C. La región A contiene en su interior varios procesos, como son: alimentación, depuración, calentamiento, vaporización de agua, almacenamiento de hidrógeno, recombinación de hidrógeno con oxígeno en el combustor de una máquina a gas (o celda de combustible o motor de combustión) entregando energía al exterior, mecánica, eléctrica u otros usos. Finalmente, la realimentación a la ruta de la masa de agua (vapor) y el calor relacionado, producto de la recombinación, para reiniciar el proceso.

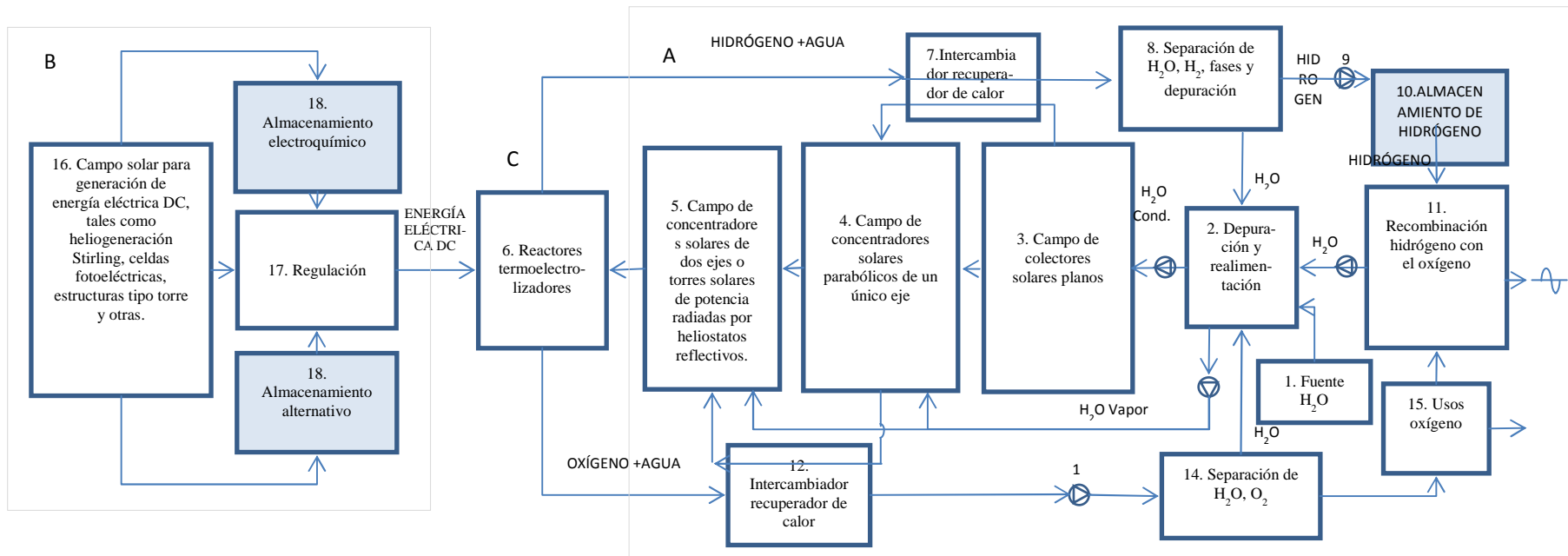
El suministro agua deberá asegurar una fuente constante (1) con su correspondiente tratamiento (2). El condensado proveniente del bloque (2) es conducido mediante un dispositivo de impelencia hidráulica hacia el campo de colectores solares planos (3) en donde absorbe calor proveniente de radiación solar (Çengel, 2007), y se lleva hasta las proximidades de las condiciones termodinámicas de cambio de estado desde el punto “a” unos 30 °C, de la figura 11, del cual se desplaza por la línea inclinada, acercándose por la izquierda al punto de ebullición “b”.

En esas condiciones, el condensado hace ingreso a la entrada del campo de concentradores parabólicos de un único eje (4 en la figura 10), los cuales generan un sector parabólico sólido de luz (Vidriales, 2007), en cuyo vértice se coloca el dispositivo de absorción, según detalle (b) de figura 12; por su interior circula el fluido, recibiendo suficiente calor a varios cientos de grados centígrados, como para tocar rápidamente la línea vertical en el punto “c” correspondiente a 100 °C, entrando en ebullición. A partir de

este momento (segmento c-d), se requerirá menos cantidad de calor por unidad de masa, pero a una mayor temperatura para continuar la marcha de ascenso de temperatura de la corriente del fluido por la pendiente del calor demandado por el proceso $Q = T\Delta S$ de la figura 11.

Los concentradores solares parabólicos de un único eje de seguimiento (figura12), bloque 4 en la figura10, acompañan el proceso desde unos 85 °C (punto “b” figura 11) hasta unos 250 °C (punto “e” figura 11). A partir de esta terminal térmica del canal parabólico, se requiere mayor temperatura y, por consiguiente, una nueva estructura de más elevado poder de concentración de radiación solar para lograrlo.

Figura 10. Elementos de helio-termoelectrólisis del agua, para la producción de hidrógeno y oxígeno con potencia eléctrica y calor de procedencia solar. El rectángulo A contiene en su interior los bloques de producción solar de vapor de agua. El rectángulo B posee en su interior un campo de celdas fotoeléctricas, equipo de almacenamiento y regulación para el suministro de energía de corriente directa. El bloque C constituye el proceso de termoelectrólisis en donde, en virtud de la alta temperatura, se requiere menos energía eléctrica para desintegrar la molécula de agua.



Indicador

1. Provisión de agua a temperatura ambiente.
2. Depuración y separación de fases de agua.
3. Campo de colectores solares planos. Condensado.
4. Campo de concentradores solares parabólicos; seguimiento de un único eje.
5. Campo de concentradores solares torres, heliostatos; seguimiento de dos ejes.
6. Reactores termo-electrolizadores.
7. Intercambiador recuperador de calor insertado en la línea del hidrógeno.

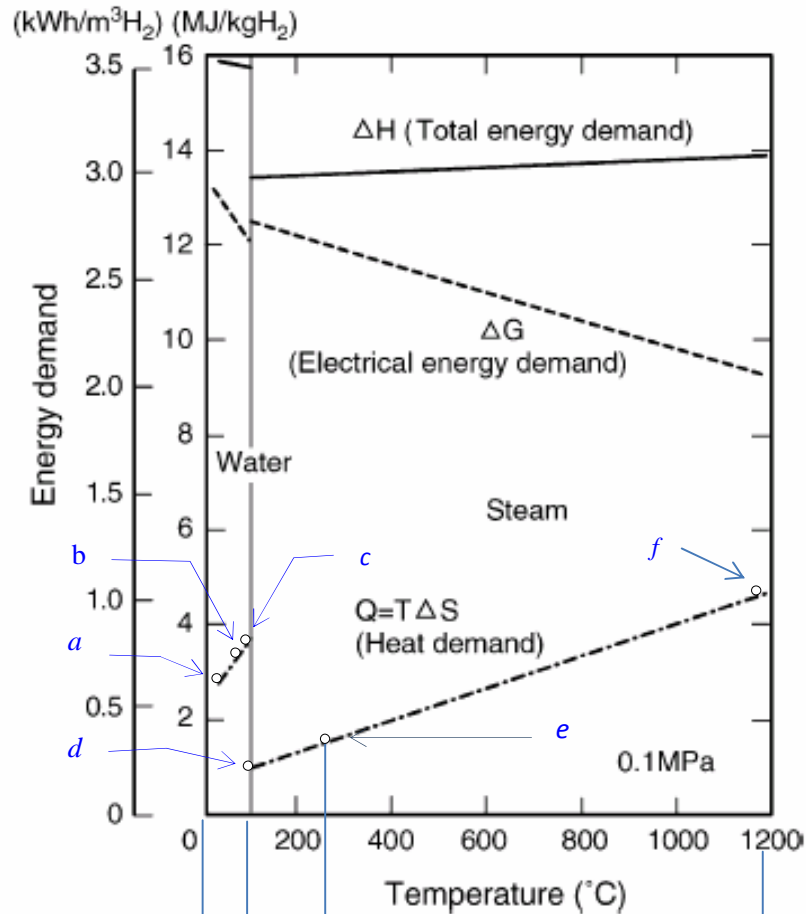
8. Separación de agua e hidrógeno.
9. Dispositivo de elevación de presión de hidrógeno.
10. Almacenamiento de hidrógeno.
11. Usos del hidrógeno; recombinación con oxígeno.
12. Intercambiador recuperador de calor en la línea del oxígeno.
13. Dispositivo de elevación de presión de oxígeno.
14. Separación de oxígeno y H₂O. Depuración.
15. Usos del oxígeno.
16. Campos de celdas fotoeléctricas para la provisión de energía de corriente directa.

17. Regulación.
18. Almacenamiento de energía en medios electroquímicos.
19. Fotogenerador de vapor colocado en el foco de un concentrador solar de dos ejes diseñado y construido en El Salvador bajo auspicios financieros del Fondo para la Iniciativa de las Américas El Salvador, Fiaes, 2001-2008.
20. Silueta de tres posiciones heliostáticas típicas de la proyección en un plano vertical del sistema de generación de vapor con auxilio de energía solar.

Referencias descritas en el texto.

Figura 11. Energías en forma de calor y eléctrica de procedencia solar demandadas por el reactor de hidrógeno por unidad de volumen y masa de hidrógeno producido. Distribución de dispositivos por zona de calentamiento de agua en función de rangos de temperatura y ruta seguida por el condensado hacia vaporización (a, b, c, d, e, f).

Referencia: Holladay, Hu, King y Wang (2008). Cotas, notas, rotulación en cursivas y la relación teórica con los conceptos de la figura 10 son del autor.



Región de temperatura correspondiente al campo de colectores solares planos fijos, o con seguimiento en uno o dos ejes (Çengel, 2007).

Región de temperatura correspondiente al campo de concentradores solares (torre-heliostatos) con seguimiento de dos ejes como figuras 13, 14, y 15.

Región de temperatura correspondiente al campo de concentradores solares parabólicos con seguimiento de un eje, figura 12.

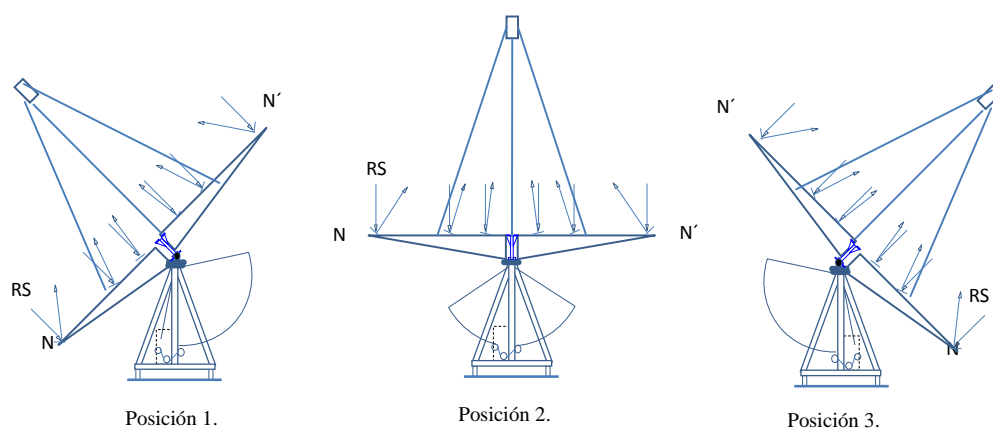
Se ha llegado al campo de concentradores con seguimiento de dos ejes de las figuras 13, 14 y 15, que corresponde al bloque 5 en la figura 10, los cuales generan un cono de luz (Kribus, Huleihil, Timinger y Ben-Mair, 2000), en cuyo vértice se encuentra una muy elevada densidad de radiación, punto en el cual se coloca la ventana de un dispositivo elevador de la temperatura del vapor proveniente del campo (4). Los dispositivos absorbedores poseen variados diseños, según su aplicación (Meierl, Steinfeld, 2010). Una

expresión de la investigación tecnológica salvadoreña de estos dispositivos se encuentra en la figura 14.

El caudal de vapor a varios cientos de grados centígrados de temperatura a la salida del concentrador de dos ejes (o tipo torre) se conduce hacia el sistema de reactores termo-electrolizadores, el cual se encuentra representado por el rectángulo C, bloque 6 (figura 10). Con base a calor y energía eléctrica de corriente continua, se produce aquí la ruptura de los enlaces de la molécula del agua con los productos hidrógeno y oxígeno (figura 16). El proceso no es perfecto y no se logra la división en sus elementos constitutivos de la totalidad del flujo másico del vapor; de tal suerte que, cuando cada una de las corrientes de esos gases salen del reactor, arrastra una porción de “vapor crudo” constituido por moléculas de agua no fraccionadas sobre la cual la electrólisis no fue efectiva.

Los gases y el vapor abandonan el reactor, según la figura 10, por ramales diferentes: una mezcla de hidrógeno y vapor de agua por un camino (7 y 8), oxígeno y vapor por otro (12 y 14), salen del dispositivo de reacción hacia el intercambiador recuperador de calor a la temperatura en el interior del reactor; es decir, contiene una apreciable cantidad de energía calorífica que es necesario rescatar a través de un intercambiador (7) para la línea de hidrógeno y (12) para la línea del oxígeno.

Figura 13. Silueta de tres posiciones heliostáticas típicas de la proyección en un plano vertical del sistema con potencialidades de elevación de temperatura del vapor con energía solar más allá de las posibilidades de los concentradores de un solo eje.



Indicación: Posición 1: 9AM; posición 2: 12M; posición 3: 3PM.

En todo momento de la jornada soleada, el ángulo que forma la dirección de propagación de los rayos solares (RS) debe ser perpendicular a la superficie ideal N-N'. Bajo esa circunstancia y gracias a la inclinación individual de cada elemento especular colocados en forma de capas concéntricas, se forma el cono de luz, en cuyo vértice se puede localizar un motogenerador Stirling, un foto-generador de vapor o un electrolizador para la liberación del hidrógeno.

Referencia: Fiaes (2008).

Figura 14. Fotogenerador de vapor colocado en el foco de un concentrador solar de dos ejes diseñado y construido en El Salvador bajo auspicios financieros del Fondo para la Iniciativa de las Américas El Salvador.

Referencia: Fiaes El Salvado (2008).



Retirado el calor, surge la presencia de condensado, vapor residual y necesidad de depuración de los gases, conceptos representados en los bloques (8) para el hidrógeno y (14) para el oxígeno.

Figura 15. Población de heliostatos concentradores de energía solar con el absorbedor colocado en la parte superior de las torres. PS10 y PS20 en Sanlucar, Sevilla España. Construidas por la española Abengoa, entre 2006 y 2009.

Referencia: Solar Fuels from Concentrated Sunlight, (2009).



Luego de la correspondiente depuración (2), con auxilio de dispositivos de impelencia y/o compresión, el condensado será realimentado en el campo de colectores planos (3), y los vapores residuales se dirigen según las condiciones termodinámicas, hacia las etapas (4) o (5) de figura (10).

A partir de los reservorios de gases de la figura 10 (bloque 10 para hidrógeno y 15 para oxígeno), se suministran flujos en proporción de 2 a 1, respectivamente, para ser recombinados en el interior del combustor de un turbogenerador a gas o celda de combustible (11). En ese lugar, la reconstrucción de la molécula de agua, a partir de ambos gases, libera abundante energía en forma de calor. El proceso en discusión está en amistad con el medio ambiente: no emisión de gases efecto invernadero, el principal subproducto de la re-asociación de ambos gases es vapor de agua no contaminante, con la ventaja adicional de que tanto esta masa como la energía calorífica de la cual es portador se pueden realimentar al sistema, tal como lo establece la interconexión de bloques (11) y (2) de la figura 10 (véase conclusión del numeral 6).

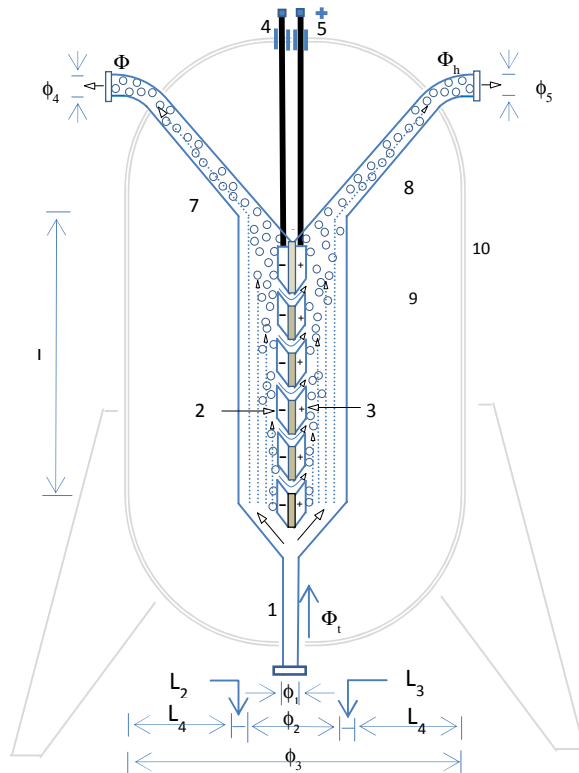
La principal función de los elementos constitutivos en el interior del rectángulo B (figura 10) es proveer la energía libre de Gibbs ΔG , que el proceso demanda de acuerdo con la línea entrecortada superior de la figura 11 (Holladay *et al.*, 2008). Sin importar la fuente primaria y la tecnología de la energía eléctrica utilizada, nótese, en la figura 11, que la tendencia de trabajar en regiones de altas temperaturas tiene una valiosa compensación en una interesante y benéfica reducción, en ese aspecto, de la demanda de ΔG , lo cual, a su vez, disminuye retos tecnológicos y, por supuesto, costos. En la zona B de la figura 10 se mencionan varias probables formas de obtener la energía eléctrica de DC requerida (Romero, 2007).

La función del bloque 6, asociado con la zona C de la figura 10, se aborda brevemente en torno al esquema de la figura 16. La entrada de una corriente ascendente de vapor de agua Φ_1 , representado por las líneas entrecortadas, se produce en el tubo de alimentación inferior (1) de diámetro ϕ_1 ; en su ruta, el vapor ocupa la cavidad tubular ensanchada, en la cual se encuentra una estructura perforada de tres capas formada por una placa izquierda o electrodo negativo (2), la placa derecha (3) o electrodo positivo (5) y una placa central como bastidor y aislamiento, presentándose la conducción eléctrica a través de la masa de vapor que ocupan las ventanas de la placa. Dada la impedancia eléctrica que ofrece el vapor, aquí es evidente la necesidad de vectores catalíticos que faciliten el proceso (Holladay *et al.*, 2008; Sakaba, Kasahara, Onuki y Kunitomi, 2007). La cavidad

proporciona varias condiciones favorables para la realización de termoelectrólisis: una corriente eléctrica DC a voltaje V denotada por las flechas curvas, la existencia de un flujo de vapor a rangos de temperatura y presión según los datos indicados por la figura 11.

Figura 16. Ensayo de celda elemental para la disociación termoeléctrica del vapor de agua en oxígeno e hidrógeno.

Conceptualizado a partir de las referencias: Brady, (2003); Steinfeld (2004).



Los electrodos (4) y (5) van conectados a los bornes de una fuente externa de potencia eléctrica DC.

Bajo condiciones adecuadas, se produce la ruptura de los enlaces que atan la molécula del agua y los gases elementales constitutivos se acumulan en las proximidades de la polaridad de la placa correspondiente. Arrastrados por la corriente de vapor, los gases liberados son canalizados hacia el exterior del reactor por ramales tubulares diferentes, (7) para el oxígeno y (8) para el hidrógeno. La eficiencia real de separación hará que los flujos Φ_H y Φ_O , canalizados hacia afuera por cada ducto, estén compuestos por una porción de gas y otra de vapor. El dispositivo será tanto más eficiente cuanto menos energía requiera

para hacer su trabajo y menos vapor crudo aparezca en los tubos de salida (Ivy, 2004). La metodología de laboratorio de la estructura anterior sugiere un proceso de ensayos en los cuales se busca determinar, entre otros aspectos: 1. Los componentes de ciencia e ingeniería de materiales (Agrafiotis, Lorentzou, Kostoglou, Pagkoura, Konstandopoulos, 2007). Materiales electro conductores (2), (3), (4), (5), termoaislante (9). Estructura de la cápsula externa (10). Tubos de entrada (1), salida (2) desgaste y reemplazo de placas o barras. 2. El dimensionamiento de partes físicas sometidas a trabajo electroquímico, como los electrodos que forman las placas. Los diámetros tubulares de entrada y salida ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 . De forma similar, la estimación de medidas adecuadas para L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 . 3. El dimensionamiento, regulación (en función de caudal, temperatura y otros parámetros que varían a lo largo de la ojiva solar); medición, protección y control de aspectos eléctricos, como una fuente variable de tensión y corriente DC. Aislamiento termoeléctrico y otros. 4. Identificación, análisis de aspectos termoelectroquímicos secundarios y otros. 5. Aspectos de eficiencia y mejoras. 6. Seguridad.

Resultados, potencialidades e implicaciones de la estructura II

Las celdas fotoeléctricas activadas con energía solar aparecen tomadas en cuenta en el bloque 16 de la figura 10. Sin embargo, es tecnología que, aunque está en evolución por el momento, su valor agregado se queda sustantivamente fuera de Centroamérica; y optar por el masivo consumo de dispositivos importados de ella significa iniciar un renovado ciclo de dependencia. Otra manera de lograrlo es mediante un campo de concentradores solares de dos ejes, en cuyo foco se puedan colocar foto-termo-convertidores basados en los principios de la teoría de conversión a calor (Çengel, 2007) de concentración de luz reflejada; la transformación de la luz a calor relacionada con el cuerpo negro; heliostática; transferencia de calor, ciencia e ingeniería de materiales y otros aspectos (figuras 13 y 14).

En general, se puede suministrar energía eléctrica de cualquier fuente y tecnología relacionada: hidroeléctrica, biomásica, geotérmica, mareomotriz, viento, solar, nuclear y otras. Sus particulares características: la evaluación ambiental de seguridad, costos y de mercado; poseen potencialidades, limitaciones, usos preferenciales, ventajas y desventajas.

Cada una de ellas se encuentra en constante innovación tecnológica, y participan en una reñida y tenaz competencia por décadas y décadas entre sí, y todas a la vez, por desplazar los problemas e inconvenientes de los hidrocarburos, batalla al final de la cual se impondrán las que más se adapten a las circunstancias: la humanidad se encuentra en una penosa y turbulenta transición hacia un nuevo estadio de “estabilidad energética” en donde las energías solar, hidrógeno y nuclear se encuentran a la cabeza de las expectativas.

De forma breve se menciona que la estructura II (figura 10) puede funcionar por cuenta propia; es decir, no depende de la existencia de una central hidroeléctrica como la estructura I. Sin embargo, para fines de regulación, puede ser interesante el estudio de la interconexión de la estructura II con algunos aspectos de una central hidroeléctrica, termoeléctrica o geotérmica.

Dada la pequeña territorialidad del país, surge la cuestión de si hay suficiente espacio para plantas solares de hidrógeno en El Salvador. La tabla 4 está relacionada a esta inquietud: resume, agrupa y relaciona un extracto de estimaciones preliminares entre varios aspectos y condiciones asumidas: longitud del lado de un cuadrilátero hipotético de terreno que ocupará la instalación (columna 1); área o superficie construida (columna 2); espacios de sombras y circulación (4 veces el área construida, columna 3); un promedio de unas 4 horas diarias de trabajo, o sea 0.3 de efectividad del índice de radiación, en un intervalo representativo de la figura 4, cuya estimación es de: $0.3 * (4.92 + 4.69) / 2 \sim 1.44$ kWh/m²día, (columna 7). Aunque en algunos países se reportan mejores eficiencias; en el afán de destacar el tema del área requerida, se trabajó una modesta zona de eficiencia del sistema cuyo rango va desde 0.01 hasta 0.1, (columna 9). Los datos de producción teórica diaria (columna 11) y porcentaje del territorio salvadoreño utilizado por el proyecto (columna 16) concluyen la tabla. En general, con el respaldo financiero adecuado, con la inversión del orden del 1% del territorio salvadoreño, se pueden servir importantes cargas. Lo cual puede interpretarse que, a pesar de que la eficiencia sea baja, el problema puede ser resuelto y, de esa manera, sustentar varias cargas, entre ellas la de figura 2, necesitando para para alojar el sistema un 1% del territorio.

Seguridad

“Sobre la base de diferentes instalaciones técnicas (Derwent, 2004), concluyen que una economía del hidrógeno podría producir el 0,6% del impacto climático de la presente la economía de los combustibles fósiles” (Flynn, Bellaby e Ricci, 2006). Una colección de manuales y normas de seguridad puede encontrarse en H₂ Safety Best Practices (2011).

Usos del hidrógeno

De las muchas aplicaciones, se pueden mencionar el transporte público y privado, máquinas de combustión interna y turbogeneradores estacionarios en la producción masiva de energía eléctrica. Puede, en una extensa gama de aplicaciones, sustituir con ventajas a derivados del petróleo importado, como al diesel, a la gasolina, al propano y al *bunker*.

Como ilustración, un panorama prospectivo de la Iniciativa Tecnológica Conjunta, JTI, de Europa, a través del Séptimo Programa Marco, señala la necesidad de inversión en I+D, en el rubro hidrógeno, de al menos 250 millones de euros por año (H₂ Plataforma europea del hidrógeno y las pilas de combustible, 2005). En la tabla 3 se muestran expectativas del mercado del hidrógeno desplegadas hacia el año 2020.

Tabla 3. Mercado tecnológico del hidrógeno en el escenario de 2020

	Pilas de combustible para electrónica portátil	Generadores portátiles y nichos de mercado	Pilas de combustible estacionarias (cogeneración)	Transporte por carreteras
Unidades vendidas al año 2020 en UE	~ 250 millones	~100.000 (~1gwe)	100.000 a 200.000 (2.4gwe)	0.4 millones a 1.8 millones
Ventas acumuladas hasta 2020 en UE	n. d.	~600.000 (~6gwe)	400.000 a 800.000 (8-16 gwe)	1.5 millones
Mercado en UE en 2020	Establecido	Establecido	En crecimiento	Comienzo de mercado masivo
Potencia media en los sistemas de pilas de combustible	15kw	10kw	□ 100 kw (micro-cogeneración) >100kw (cogeneración) industrial)	

Objetivo de costo de los sistemas de pilas de combustible	1-2 €/kw	500 €/kw	2.000 €/kw (micro-cogeneración) 1.000-1.500 €/kw (cogeneración industrial)	□ 100 €/kw para 150.000 unidades al año.
---	----------	----------	--	--

Nota: gwe, giga watts eléctricos; Kw, kilowatts.

Referencia: H₂ Plataforma europea del hidrógeno y las pilas de combustible, visión estratégica de conjunto. Agenda de investigación estratégica y estrategia de despliegue (2005).

Tabla 4. Consideraciones de eficiencia, producción y área ocupada.

Lado del cuadrilátero de área total	Superficie construida	Superficie sombras y circulación	Superficie total	FC	A _{Tot.}	0.3*Radia-ción solar promedio anual. Figura 4	Energía incidente /día	Efi-cien-cia utili-taria asu-mida
Col.1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9
Km	Km ²	Km ²	Km ²	m ² /Km ²	m ²	KWh/m ² día	KWh/día	η
36.54	267	1068	1335	1.00E+06	1.34E+09	1.44	1.92E+09	0.01
25.88	134	536	670	1.00E+06	6.70E+08	1.44	9.66E+08	0.02
21.10	89	356	445	1.00E+06	4.45E+08	1.44	6.41E+08	0.03
18.30	67	268	335	1000000	3.35E+08	1.44	4.8E+08	0.04
16.43	54	216	270	1.00E+06	2.70E+08	1.44	3.89E+08	0.05
15.00	45	180	225	1.00E+06	2.25E+08	1.44	3.24E+08	0.06
13.96	39	156	195	1.00E+06	1.95E+08	1.44	2.81E+08	0.07
13.04	34	136	170	1.00E+06	1.70E+08	1.44	2.45E+08	0.08
12.25	30	120	150	1.00E+06	1.50E+08	1.44	2.16E+08	0.09
11.62	27	108	135	1.00E+06	1.35E+08	1.44	1.95E+08	0.10

Referencias: figuras 2 y 4.

Tabla 4. Continuación

Energía producida por día	Producción diaria	Demanda total diaria asumida. Figura 2	Porcentaje de la producción diaria respecto a la demanda total diaria	(Producción-Demanda total)/día	Superficie del territorio nacional	Porcentaje del territorio salvadoreño ocupado por el proyecto
Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13	Col. 15	Col. 15	Col. 16
KWh/día	MWh/día	MWh/día	%	MWh/día	Km ²	%
1.92E+07	1.92E+04	19200	100.23	4.40E+01	21000	6.36
1.93E+07	1.93E+04	19200	100.60	1.16E+02	21000	3.19
1.92E+07	1.92E+04	19200	100.23	4.40E+01	21000	2.12
1.93E+07	1.93E+04	19200	100.60	1.16E+01	21000	1.60
1.95E+07	1.95E+04	19200	101.36	2.60E+02	21000	1.29
1.95E+07	1.95E+04	19200	101.36	2.60E+02	21000	1.07
1.97E+07	1.97E+04	19200	102.48	4.76E+02	21000	0.93

1.96E+07	1.96E+04	19200	102.11	4.04E+02	21000	0.81
1.95E+07	1.95E+04	19200	101.36	2.60E+02	21000	0.71
1.95E+07	1.95E+04	19200	101.36	2.60E+02	21000	0.64

Una de las más agudamente perseguidas aplicaciones del hidrógeno es en el mercado del transporte (Arias, 2007). Varios manuales europeos ilustrativos se encuentran en *Hydrogen and Fuel Cells -A Handbook for Communities* (2007). Los retos para la presente década respecto a las estructuras tipo torre son reducir los costos en un 75% (Kolb, Ho, Mancini y Gary, 2011).

Conclusiones

Se ha pretendido establecer un panorama general de los problemas, desafíos de ingeniería, investigación e indicios de solución que presenta una amplia zona geográfica en donde coinciden aspiraciones de desarrollo sostenible; responsabilidad ambiental; de liberación tecnológica, energética y económica. Se puede apreciar que recursos y soluciones existen, pero que no son fáciles en términos de ingeniería e investigación, tampoco son inmediatas, mucho menos gratuitas, y cuyos exitosos resultados están reservados para un pueblo y organizaciones (universidades, Estado, empresas) que tengan un firme y sostenido propósito de progreso por un valioso grado de libertad, independencia energética e innovación tecnológica. ¿Somos ese pueblo? ¿Tenemos esas organizaciones?

La vertiente sur de cuatro países centroamericanos, Guatemala, Honduras, El Salvador y Nicaragua, coinciden en varios aspectos que favorecen la realización de proyectos como el presente en esa sub-zona: elevada concentración de actividad económica humana, la cual aporta la demanda; aceptable radiación solar, centrales de potencia para alimentar y relacionarse con el hidrógeno; demás infraestructura eléctrica de transformación y transmisión, como el sistema eléctrico de integración centroamericana, Siepac.

En la misma zona también se encuentra el potencial y riesgoso *arco de la sequía*, que abarca desde el lago de Managua hasta la zona centro sur de Guatemala, lo cual significa la potencial y permanente amenaza de drástica reducción de la energía producida por las centrales hidroeléctricas que se encuentran allí y, simultáneamente, la escasez alimentaria. En estas circunstancias de sol brillante, una planta de hidrógeno se encuentra en su mayor capacidad de producción y puede prestar un importante servicio de compensación y regulación de la oferta energética, sistemas de riego y otros. El planteamiento se considera como respetuoso del medio ambiente y compatible con la filosofía de desarrollo sostenible, que constituyen unos de sus elementos fundamentales.

El Salvador, y una significativa porción de la franja sur de Centroamérica, tienen los insumos naturales básicos (extensión territorial, sol y agua) para desarrollar en las próximas décadas una potente industria del hidrógeno, rompiendo progresiva y estratégicamente la profunda dependencia energética y tecnológica actual.

Tradicionalmente se ha dicho hasta la saciedad que no tenemos recursos, ni gran extensión territorial, ni petróleo. Esto no aplica a energía solar ni a hidrógeno. Recursos se tienen, unos no tecnologizados (un prodigioso baño solar, agua todavía suficiente) y otros erráticamente invertidos: por haber decidido no transitar caminos alternativos, El Salvador exportó en 2010, en concepto de pago por la compra de hidrocarburos, 1350 millones de dólares (Cepal, 2011) manteniéndose en zona de permanente crisis debido a los elevados costos, lo cual ha vulnerado a El Salvador y Centroamérica que sigue un patrón similar, social, ambiental y económico. A fin de superar la estrechez territorial, el beneficio debe extenderse a escala centroamericana.

La voluminosa, agobiante e inmanejable deuda pública salvadoreña, de 12 997.7 millones millones de dólares BCR (2012), indica que el camino de la dependencia tecnológica y energética es una inviable e insostenible hemorragia financiera que tiene tope, al cual se ha llegado ya. En tanto la economía energética de los hidrocarburos cruje de inestabilidad, insostenibilidad ecológica y sucesivos aumentos de precios, se impone la búsqueda de alternativas.

En general, las inversiones en energía renovable son elevadas, y la tecnología actual de celdas fotoeléctricas puede tener una vida útil de unos 25 años; luego de este lapso habrá que invertir nuevamente.

Para enfrentar con solvencia los desafíos de supervivencia digna, El Salvador y Centroamérica deben fortalecer sus capacidades endógenas de desarrollo destinando recursos a la investigación y fortalecer los elementos y estrategias que hagan posible crear sus propias soluciones tecnológicas.

Para capitalizar lo que significa la inversión y realimentación de recursos endógenos (radiación solar, agua, conocimiento humano), en un contexto de seguridad energética-ambiental y de desarrollo sostenible, se debe considerar que el insumo energético y la materia prima para la producción del “combustible” de la central de potencia bosquejada en la estructura II no depende de: de poseer o no hidrocarburos en el subsuelo; de costosas extracciones energéticas del fondo del mar o de pozos en tierra firme; de conflictos geopolíticos y ocupaciones militares de zonas productoras de hidrocarburos; cubrir grandes distancias para salvar la lejanía entre los centros de producción y consumo; de la prolongada y desgastante angustia del agotamiento de reservas energéticas; de la inflación de insumos en cuanto a materia prima; de la amistad o enemistad de una nación compradora con la empresa productora o comercializadora de combustibles.

Es decir, los ingredientes del desarrollo autógeno y la correspondiente innovación tecnológica de la economía energética están potencialmente presentes, los cuales pueden y deben ser estratégicamente y laboriosamente forjados. Aunque con una respetuosa y progresiva trayectoria de logros alcanzados, como solución energética de la actividad económico-productiva del planeta, la propuesta del hidrógeno, aún se trabaja en problemas como eficiencia, materiales y almacenamiento. En otro aspecto, se cuenta con la visceral detracción y confrontación de sus adversarios.

Se debe fomentar el trabajo conjunto de conocimiento transdisciplinario científico-tecnológico de los esfuerzos investigativos de las instituciones de educación superior y

diversos sectores sociales con potencialidades productivas, con el afán de organizar la batalla desde el flanco energético; de resistencia y superación de la depresión; por la supervivencia de la familia salvadoreña, las instituciones sociales y la revitalización de capacidades productivas a corto, mediano y largo plazos. De una manera estratégica, muy especial, planificar una nueva oferta académica orientada hacia la liberación del conocimiento como plataforma de sustentación a la generación de jóvenes centroamericanos con fundamentos científico-tecnológicos amantes de la libertad, el bienestar de la humanidad y del ambiente. Esta es la generación de la heliotecnología, de la nanotecnología y del hidrógeno.

Referencias

- Agrafiotis, Christos; Pagkoura, Chrysoula; Lorentzou, Souzana; Kostoglou, Margaritis; Konstandopoulos, Athanasios. 2007. Hydrogen production in solar reactors. Disponible en: www.sciencedirect.com; www.elsevier.com/locate/cattod.
- Banco Central de Reserva de El Salvador. 2012. <http://www.bcr.gob.sv/?x21=1>
- Boylestad, Robert; Nashelsky, Louis. 2003. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos. Página 77. Pearson Educación, México. ISBN: 970-26-0436-2.
- Bansal, Narottam. 2009. Fuel cells and hydrogen energy. Nanomaterials in solid state hydrogen storage. Nasa Glenn Research Center. Editorial Springer. ISBN: 978-0-387-77711-5. Disponible en: <http://es.scribd.com/Alexcs/z/d/37574868-Nanomaterials-for-Solid-State-Hydrogen-Storage-R-A-Varin-T-Czujko-Z-S-Wronski>.
- Brady, James. 2003. Química Básica Principios y Estructura, segunda edición, México. ISBN: 968-18-4875-6. Limusa Willey. Capítulos 18 y 22.
- Castellanos, Carlos; Flores, David; Heredia, Cristian y Reysancho, Iván. 2009. Una solución limpia y fiable de producción de energía. Los autores, son estudiantes de Ingeniería Eléctrica. Escuela Politécnica Nacional. Energías Alternativas Quito-Ecuador. Disponible en: Disponible en: <http://www.sallavor.org/resources/ENERGIA-SOLAR-Una-solucion-limpia-y-fiable-de-produccion-de-energia.pdf>.
- Celdas solares caseras. Knol a unit of knowledge, 1999. Disponible en: <http://knol.google.com/k/celdas-solares-caseras#>.
- Çengel, Yunus. 2007. Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico. Tercera edición, p. 709. McGraw-Hill México, ISBN: 978-97010-61-73.
- Cepal, 2011. Centroamérica: estadísticas de hidrocarburos, 2010. P.7. Disponible en: http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/44748/2011-059-Centroam%C3%A9rica_Hidrocarburos-2010-L.1037.pdf
- Cepal, Interamerican Dialogue & Banco Interamericano de Desarrollo BID, 2011, p. 8. Centroamérica: impactos de los choques petroleros y eficiencia de los mercados de hidrocarburos; Disponible en: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36294582>.
- Clean energy project analysis: retscreen® engineering & cases textbook. Solar water heating project análisis. ISBN: 0-622-35674-8. Nasa, Unep, GEF. Disponible en: www.retscreen.net.
- Fernández, Julio. 2009. Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivo Portátil. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/6037/1/PFC_Julio_Fernandez_Ferichola.pdf.

- Flynn, Rob; Bellaby, Paul y Ricci, Miriam, 2006. Risk Perception of an Emergent Technology: The Case of Hydrogen Energy. FORUM: QUALITATIVES OC IAL RES EARCH. FQS. Disponible en: <http://www.qualitative-research.net/index.php/fqs/article/view/58/120>.
- Fortalecimiento de la Capacidad en Energía Renovable para Centro América, FOCER. PNUD, GEF, BUNCA. Energía Solar, 200. Manuales sobre energía renovable. Energía fotovoltaica, Hidráulica a pequeña escala, Solar fotovoltaica, Eólica, Solar Térmica, Biomasa., San José Costa Rica. ISBN: 9968-9708-9-1. Disponible en: <http://www.bunca.org/publicaciones/FOTOVOLT.pdf>.
- Fuel Cells and Hydrogen Energy Association, 2010. Disponible en: http://www.fchea.org/core/import/PDFs/factsheets/Hydrogen%20Production%20Overview_NEW.pdf.
- Ganesh, N. Jeya; Maniprakash.S; Chandrasekaran, L; Srinivasan, S. 2005. Design and Development of a Sun Tracking mechanism using the Direct SMA actuation. Department of Applied Mechanics, Indian Institute of Technology Madras, Chennai-600 036. And Srinivasa, A.R. Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, College Station, TX, USA. Disponible en: <http://apm.iitm.ac.in/smlab/mss/download/63.pdf>.
- Global Water Partnership, BID e Inwap, 2005. Situación de los recursos hídricos en Centroamérica: hacia una gestión integrada. ISBN: 9968-934-01-1. Disponible en: http://www.gwp.org/Global/GWP-CAM_Files/SitRecHid2005.pdf.
- Hernández, Roberto; Fernández, Carlos; Baptista, Pilar. 2003. Metodología de Investigación. Capítulo 5. Páginas 113-136. Disponible en: <http://www.terras.edu.ar/aula/tecnatura/15/biblio/SAMPIERI-HERNANDEZ-R-Cap-1-El-proceso-de-investigacion.pdf>.
- H₂ Plataforma europea del hidrógeno y las pilas de combustible visión estratégica de conjunto. Agenda de investigación estratégica y estrategia de despliegue. 2005. Tabla 1. Disponible en: <http://aeh2.org/documentos/VisionEstrategica HFP.pdf>
- H₂ Safety Best Practices, 2011. Disponible en: <http://h2bestpractices.org/bibliography.asp>
- Holladay, J.; Hu, J.; King, D.L.; Wang, Y. 2008. Catalysis Today, p. 258. Disponible en: www.elsevier.com/locate/cattod.
- Hydrogen and Fuel Cells -A Handbook for Communities. 2007. Disponible en: http://www.roads2hy.com/r2h_Downloads/Roads2HyCom%20Communities%20Handbook%20Vol%20A.pdf
- Informe sobre Desarrollo Humano El Salvador 2010. De la pobreza y el consumismo al bienestar de la gente, propuestas para un nuevo modelo de desarrollo, p. 115. Disponible en: <http://www.pnud.org/sv/2007/idh/>

- Informe Económico Industrial 2010, Gerencia de Inteligencia industrial ASI, 2011. Disponible en: http://industriaelsalvador.com/attachments/article/111/informeeconomicoanual_ASI.pdf
- Ivy, Johanna. 2004. Summary of Electrolytic Hydrogen Production. Páginas 6 y 7. National Renewable Energy Laboratory Nrel. Disponible en: <http://www.osti.gov/bridge>.
- Kribus, A.; Huleihil, M.; Timinger, A. y Ben-Mair, R. 2000. Performance of a rectangular secondary concentrator with an asymmetric heliostat field. Environmental Sciences and Energy Research Department, Weizmann Institute of Science; Israel. Sektion Physik, Ludwig-Maximilians Universita't Mu'nchen, Amalienstr. Mu'nchen, Germany. Disponible en: <http://pointfocus.com/images/pdfs/recttest-se-00.pdf>.
- Kolb, Gregory; Ho, Clifford; Mancini Thomas y Gary Jesse, 2011. Power Tower Technology Roadmap and Cost Reduction Plan. Página 35. Sandia National Laboratories. Disponible en: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/112419.pdf>
- Kroposki, B; Levene J.; Harrison K.; Sen P.K.; Novachek ,F., 2006. Electrolysis: Information and Opportunities for Electric Power Utilities. National Renewable Energy Laboratory. Disponible en: <http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/40605.pdf>
- Lee Chia-Yen; Chou Po-Cheng; Chiang Che-Ming y Feng Chiu. 2009. Lin Sun Tracking Systems: A Review. Disponible en: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/5/3875/pdf>.
- Lozano, Oriol. 2009. Diseño de una planta solar fotovoltaica conectada a red. Departamento de Ingeniería electrónica, eléctrica y automática, Universidad Rovira i Virgili España. Disponible en: <http://cde05.etse.urv.es/pub/pdf/1381pub.pdf>.
- Mackelvey, John; P. Grotch, Howard. 1981. Física para Ciencias e Ingeniería, tomo II. Páginas 1060-1065. Editorial Harla. Primera edición. México. ISBN: 968-6034 09-9.
- Meier1 Anton; Steinfeld. Aldo, 2010. Solar Thermochemical Production of Fuels. Paul Scherrer Institute, Department of Mechanical and Process Engineering, Switzerland. Disponible en: [doi:10.4028/www.scientific.net/AST.74.303](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.74.303).
- Mershin, Andreas. 2011. Biophotovoltaic Research. Instituto Tecnológico de Massachusetts. Disponible en: <http://engineering.mit.edu/>.
- Morse, Frederick T. 1984. Centrales Eléctricas. Teoría y práctica de plantas eléctricas estacionarias. Traducción de la tercera edición. Página 9. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. Biblioteca de Ingeniería, edificio Benito Juárez primer nivel. Universidad Tecnológica de El Salvador Centroamérica.
- Montes, M^a; Abánades, A.; Martínez J. 1998. Producción de hidrógeno a partir de energía solar, Centro de Análisis de Desarrollo Energético Sostenible, FFII Grupo de Termotecnia, ETSII-UPM. Disponible en: <http://www.energiasostenible.net/DVD/H2solar.pdf>.

- Morillo, Ethelvina. 1985. Celdas fotovoltaicas, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de El Salvador.
- Nocera, Daniel. 2009. Energía personalizada, Pop!tech 2009. Instituto Tecnológico de Massachusetts. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=KTtmU2lD97o>.
- Nrel, 2012. National Renewable Energy Laboratories. Disponible en: http://www.nrel.gov/hydrogen/renew_electrolysis.html.
- Passamai V. 2003. Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo. Universidad de Salta Argentina. Disponible en: <http://www.unsa.edu.ar/~passamai/passam2.pdf>.
- Proyecto SWERA. 2005. Disponible en: <http://gis.uca.edu.sv/swera/mapas1.html>.
- Rashid Muhammad, 2004. Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones, tercera edición, página 207. Pearson Prentice Hall, México. ISBN: 970-26-0532-6.
- Rivas, María; Román, José; Cosme, María. 2007. Revista Informe de Vigilancia Tecnológica. Aplicaciones Actuales y futuras de los nanotubos de carbono. Disponible en: http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt11_nanotubos.pdf.
- Romero, Manuel. 2007. Producción de hidrógeno con energía solar. Director División Energías Renovables Ciemat España. Disponible en: <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/report07/ppts/I%20Manuel%20Romero%20CIEMAT.pdf>.
- Sakaba, Nariaki; Kasahara, Seiji; Onuki, Kaoru; Kunitomi, Kazuhiko. 2007. Conceptual design of hydrogen production system with thermochemical water-splitting iodine–sulphur process utilizing heat from the high-temperature gas-cooled reactor HTTR. Disponible en: www.elsevier.com/locate/ijhydene.
- Serway, Raymond; Jewett, John. 2005. Física para Ciencias e Ingenierías volumen II. Página 429. Editorial Thomson, México. Sexta edición. ISBN: 970-686-425-3.
- Solar Fuels from Concentrated Sunlight, 2009. Solar Power and Chemical Energy. Página 12. Systems Implementing Agreement of the International Energy Agency. Disponible en: http://www.solarpaces.org/Library/docs/Solar_Fuels.pdf.
- Steinfeld, Aldo. 2004. Solar thermochemical production of hydrogen—a review. Disponible en: www.elsevier.com/locate/solener.
- Steward, Darlene. 2010. Hydrogen for energy storage análisis overview. National Renewable Energy Laboratory Nrel. Disponible en: <http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/48360.pdf>.

Sun, Yan; Yan, Kangping; Wang, Guixin y Ma, Tingli. 2011. [Effect_of_Annealing_Temperature_on_the_Hydrogen_Production_of_TiO2_Nanotube_Arrays_in_a_Two-compartment_Photoelectrochemical_Cell.pdf](http://finechem.dlut.edu.cn/matingli/pdf/JPCC-) The Journal in Physical Chemistry C, School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China State Key Laboratory of Fine Chemicals, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China 201. Disponible en: <http://finechem.dlut.edu.cn/matingli/pdf/JPCC->.

Teoría y problemas de circuitos eléctricos. Joseph A. Edminister, 1981. Serie de compendios Schaum McGraw, p. 9, Colombia. ISBN: 968-451-012-3.

Turner, John A.; Deutsch, Todd; Wang, Heli; Yan, Yanfa; Al-Jassim, Mowafak; Le Chen. Start Date: 2005 Projected End Date: 2012. Semiconductor Materials for Photoelectrolysis. National Renewable Energy Laboratory. DOE. Disponible en: http://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress10/ii_g_4_turner.pdf.

Unidad de Transacciones UT, 2010. Disponible en: <http://www.ut.com.sv/web/guest>

Vidriales, Luis. 2007. Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para Calor de Proceso. Centro de Investigación en Energía. Programa de maestría y doctorado en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma, de México. UNAM. Disponible en: <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Tesis/1.pdf>.

Velázquez, Ignacio. 2011. Telefónica. Disponible en: <http://blogs.creamoselfuturo.com/nano->