

01178



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

POSGRADO EN INGENIERIA

**FACTIBILIDAD TECNICA Y ECONOMICA DE UN
DISPOSITIVO PRODUCTOR DE ELECTRICIDAD EN
UNA CASA HABITACION A PARTIR DE HIDROGENO
OBTENIDO MEDIANTE ENERGIA SOLAR.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
P R E S E N T A :

JENNIFER LORENA PEREZ RAMOS

TUTOR: ING. AUGUSTO SANCHEZ CIFUENTES

MEXICO, D.F.

OCTUBRE 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ABSTRACT

Due to the limitless use of the energy sources used at the moment, the memento will arrive in that will be drained, this without mentioning the great damage that burns it of fuels causes in our planet. The climatic change will be the main environmental problem of the XXI century that is impelled by the continuous increase of the emissions of gases of effect hothouse. Reason why the concern arises of looking for new alternatives for the substitution of this energy sources. We know of the absolute presence that the petroleum exercises are, but we know that it is the moment to think of its substitution, stopping this way to stop to burn it absurdly in form of fuel and pass to only be input of the industries of petrochemical transformation.

The hydrogen has the potential of serving so much in means of energy storage and as an energy payee inside the system of renewable energy. Proposing as general objective a generating prototype of electric power, via hydrogen taken place starting from the solar energy, standing out the state of the art of the fuel cells to achieve a better understanding of the operation of the proposed prototype, the one which to have an operation type batch, it presents different cases that will happen along their operative life, with their respective analysis exergetic and exergoeconómico developed by doctors Valero and Tsatsaronis that allow to evaluate the true efficiency of the plant and of their individual teams, as well as to distribute the total inefficient. To look for a possible improvement and optimization in flows and teams determined by the analysis that could be developed in a future.

RESUMEN

Debido al uso desmedido de las fuentes de energía utilizadas actualmente, llegará el momento en que se agotarán, esto sin mencionar el gran daño que la quema de combustibles provoca en nuestro planeta. El cambio climático será el principal problema ambiental del siglo XXI, que está impulsado por el continuo aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂, CO, NO_x y CH_x. Al CO₂ se debe el 60% del efecto invernadero.

Por lo cual surge la preocupación de buscar nuevas tecnologías basadas en la utilización de las energías renovables. Estamos concientes de la presencia absoluta que el petróleo ejerce, pero sabemos que es el momento de pensar en su reemplazo, para así dejar de quemarlo absurdamente en forma de combustible y pase a ser únicamente insumo de las industrias de transformación petroquímica.

El hidrógeno tiene el potencial de servir tanto en medios de almacenamiento de energía, así como, portador de energía dentro del sistema de energías renovables.

Proponiendo como objetivo general un prototipo generador de energía eléctrica, vía hidrógeno producido a partir de la energía solar, para el abastecimiento de una casa habitación, al cual integra modularmente los adelantos en la captación de las fuentes de energía renovable y las tecnologías para el almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno, como una posible solución, apoyándose en las celdas de combustible como demostración de la efectividad de esta propuesta.

Resaltando el estado del arte de las celdas de combustible para lograr un mejor entendimiento del funcionamiento del prototipo propuesto, el cual tiene una operación tipo batch, presenta diferentes casos que sucederán a lo largo de su vida operativa, con su respectivo análisis exergético y exergoeconómico desarrollado por los doctores Valero y Tsatsaronis, que permiten evaluar la verdadera eficiencia de la planta y de sus equipos individuales, así como repartir la irreversibilidad total. Para buscar una posible mejora y optimización en flujos y/o equipos determinados por el análisis, que permitan abatir costos favoreciendo una posible implementación en el sector residencial en un futuro cercano.

INDICE

RESUMEN	I
INDICE	III
INTRODUCCIÓN	VI

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 ENERGÍAS RENOVABLES	1
1.1.1 Biomasa	2
1.1.2 Energía Eólica	5
1.1.3 Energía Geotérmica	7
1.1.4 Energía Hidráulica	9
1.1.5 Energía Solar	11
1.2 EL HIDRÓGENO COMO ELEMENTO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR	20
1.2.1 Hidrógeno Solar	21
1.2.2 Obtención del Hidrógeno	23
Conclusiones	26

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

2.1 FUNCIONAMIENTO	27
2.2 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SUS PRINCIPALES DIFERENCIAS	31
2.2.1 Celdas de Ácido Fosfórico (PAFC)	33
2.2.2 Celdas de Carbonatos Fundidos (MCFC)	34
2.2.3 Celdas de Óxido Sólido (SOFC)	34
2.2.4 Celda de Polímero Sólido o Membrana de Intercambio Protónico PEM	35
2.2.5 Celdas Alcalinas	39
2.2.6 Otras Celdas de Combustible (DMFC)	40

2.3	BENEFICIOS DE LA TECNOLOGÍA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE	40
2.4	COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN CONVENCIONALES..	41
2.5	SITUACIÓN NACIONAL	44
	Conclusiones	47
 CAPITULO III. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS ENERGÉTICOS DEL DISPOSITIVO PRODUCTOR DE ELECTRICIDAD		
3.1	DISPOSITIVO PRODUCTOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA	48
3.2	DEFINICIÓN DEL MODELO	50
3.3	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	52
3.4	DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR	58
3.5	VARIACIONES DE ANÁLISIS	60
	3.5.1 Caso 1	60
	3.5.2 Caso 2	61
	3.5.3 Caso 3	62
3.6	ANÁLISIS ENERGÉTICO (Termodinámico)	66
	3.6.1 Balance de Materia	67
	3.6.2 Balance de Energía	70
	3.6.3 Balance de Exergía	74
	Conclusiones	76

CAPITULO IV. ANÁLISIS TERMOECONÓMICO

4.1 ESTADO DEL ARTE	77
4.2 BALANCE EXERGO ECONÓMICO	80
4.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	87
4.4 ANÁLISIS ECONÓMICO	91
4.5 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA	92
Conclusiones	94
CONCLUSIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	100
GLOSARIO	103
ABREVIATURAS	106
INDICE DE FIGURAS	108
ANEXO	111

INTRODUCCIÓN

Debido al uso desmedido de las fuentes de energía utilizadas actualmente como son el petróleo, el gas natural, el carbón y el uranio, siendo estas fuentes de energía no renovables, llegará el momento en que se agotarán, esto sin mencionar el gran daño que la quema de estos combustibles provoca en nuestro planeta pero también el gran beneficio que se tiene en el funcionamiento de las ciudades y pueblos tecnificados que consumen electricidad, comunicaciones y transporte, entre otros.

Entre las ventajas de las energías fósiles están su fácil almacenamiento y transportación, así como las tecnologías ya maduras para su explotación. Por lo cual la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón) cubre más del 80% de la demanda mundial. Sin embargo, todas ellas son extinguidas, fuertemente contaminantes, concentradas en pocas regiones de la Tierra, en las manos de multinacionales y utilizadas de forma ineficiente; su consumo se ha convertido en una fuerza destructiva.

Los ácidos sulfúrico, nítrico y carbónico en la lluvia, formados a partir de los óxidos correspondientes presentes en la atmósfera producto de la combustión de los combustibles fósiles, son responsables de daños considerables a lagos, ríos, océanos, bosques, plantaciones, edificaciones, animales y humanos. Se ha estimado que, de continuar el actual ritmo de crecimiento de la acidez de los océanos, a mitad del siglo, los sesenta metros superiores de agua no permitirán la vida de especies debido a su acidez.

La lluvia ácida origina la corrosión de la piedra de los edificios, incluyendo lugares como el Partenón en Grecia, el Coliseo en Roma, la Catedral de Nuestra Señora de París, etc.

Cientos de especies de animales y plantas desaparecen cada año por el aumento de la acidez del agua con que se alimentan. Esto también afecta a los humanos, al surgir cada vez más, mutaciones de virus y bacterias que originan nuevas enfermedades, así como la mayor frecuencia de daños a la salud debido a los efectos de las lluvias ácidas.

La acumulación de miles de millones de toneladas de CO₂ en la atmósfera ha provocado un incremento de la temperatura media de la Tierra de 0.6°C desde la revolución industrial hasta hoy. De continuarse utilizando las energías fósiles, la temperatura media al final del siglo XXI habrá aumentado en 5°C, lo cual significaría una verdadera catástrofe por el incremento del nivel del mar, el aumento de la frecuencia y severidad de los huracanes, los cambios climáticos anormales que originarían sequías en algunos lugares e inundaciones en otros, y los efectos de esta variación de temperatura sobre todos los organismos vivos.

Ya hoy, a pesar de ser pequeño el incremento de la temperatura media, sufrimos cambios climáticos anormales que han causado grandes problemas económicos y sociales. La situación del efecto invernadero se agrava cada día debido a que la radiación ultravioleta que pasa a través del agujero en la capa de ozono, en la estratosfera destruye el fitoplancton; éste y los bosques afectados por las lluvias ácidas son los mayores consumidores de CO₂ de la atmósfera.

Por otra parte, son graves los daños sociales derivados de la concentración y el monopolio de las energías fósiles, lo cual genera conflictos armados e injerencia extranjera. Todo esto obliga a volver la vista a las energías renovables con tecnologías que aún deben hacerse masivas y eficientes para que no resulten más costosas que las energías fósiles. Incluso, hoy serían más competitivas si se añadieran a los costos de las energías duras, el precio que todos pagamos a posteriori por daños ecológicos y sociales.

Puede pronosticarse un aumento de precios de las energías fósiles, debido a la disminución constante de las reservas, el incremento de las dificultades para extraer las que van quedando y los costos añadidos si se convirtiera el carbón en combustible líquido o gaseoso. Los países desarrollados se preparan para los cambios que se avecinan, es de esperarse una variación de la infraestructura del consumo energético, tanto del sector poblacional como industrial, propiciando la generación de energía cerca de donde se consume, evitando la forma concentrada de producción de energía como en las termoeléctricas, que se origina por la economía de escala en la utilización de combustibles fósiles.

Inversiones en estos momentos en grandes plantas generadoras de electricidad y redes de distribución por parte de los países en vías de desarrollo, pueden ser tardías y volverse obsoletas e incosteable su materia prima en un tiempo menor al necesario para recuperar dicha inversión. Todo lo anterior indica que se debe acelerar la introducción del uso de las energías renovables.

Del cual se hablará en el capítulo I, dando una breve descripción de los diferentes tipos de energías, entre las que se encuentra la energía solar, que servirá de fuente de combustible para el prototipo propuesto el cual se mencionará en el tercer capítulo, que se basa en la necesidad de obtener la electricidad en una casa habitación de forma cotidiana, o sea, en cualquier momento que esta sea requerida, pero obtenida de la energía solar.

Una posible solución, la cual se propone en este proyecto, es el almacenamiento de la energía solar en forma de hidrógeno, que posteriormente se utilizará como combustible para producir energía eléctrica, mediante celdas de combustible, cuando no se cuente con la radiación necesaria del sol. Hablando de trabajos precedentes (capítulo I), además de dar

una breve reseña de los diferentes equipos que componen el sistema, así como las celdas de combustible que se mencionará en el capítulo dos.

Este trabajo probará la factibilidad técnica y económica de la adopción de esta forma de generar energía eléctrica en el sector residencial, mediante un prototipo diseñado para cubrir las necesidades eléctricas promedio de una familia de clase media en la ciudad de México, el cual se alimentará únicamente de la radiación solar y aproximadamente dos litros de agua desmineralizada diariamente. A través de un análisis exergético y un análisis exergo-económico para los cuales previamente deben haberse realizado los balances de materia y energía correspondientes, siguiendo la metodología de Valero y Tsatsaronis [Tsatsaronis, 1985], esto ayudará a buscar soluciones para lograr la optimización de los diferentes equipos que componen el sistema, y/o en sí al propio sistema en general.

Capítulo I

A woman in a white dress stands on a beach at night, holding a glowing staff. The background features a house and palm trees under a starry sky. The scene is illuminated with a blue and white glow.

Este Capítulo, describe los diferentes tipos de fuentes alternativas de energía, tales como la biomasa, eólica, hidráulica y solar, en la cual se enfatiza debido a que será el suministro energético del prototipo propuesto en esta tesis.

Donde se muestra la existencia de nuevas tecnologías aprovechables para la generación eléctrica, que pueden ser implantadas en México debido al gran potencial que la naturaleza le ha brindado a nuestro país.

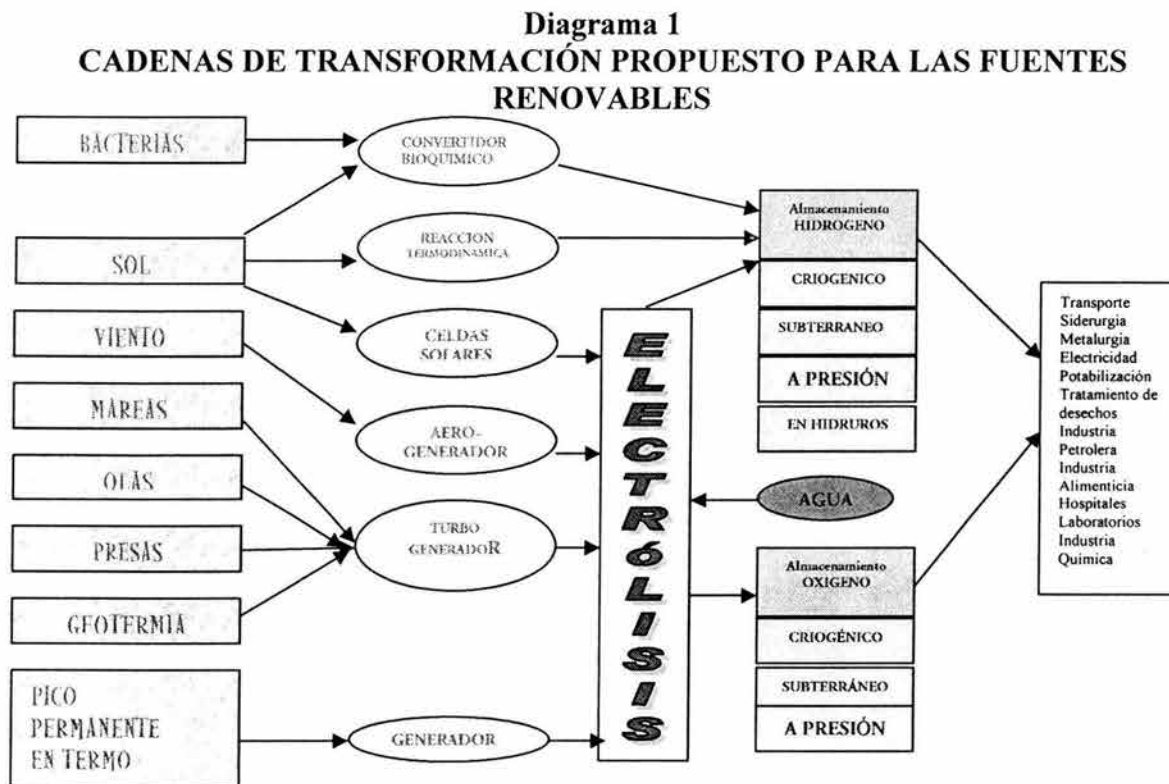
Estas energías alternas presentan el problema de ser energías difusas e intermitentes, por lo que se debe tener un sistema productor, el cual proporcione la electricidad necesaria de una forma continua. Una solución es la tecnología del hidrógeno solar, del cual se hablará en este capítulo.

I. ANTECEDENTES

1.1 ENERGÍAS RENOVABLES

Las fuentes alternas de energía tienen gran diversidad en su aplicación, pero una es la que nos interesa resaltar, su conversión a electricidad por medio de semiconductores para la energía solar, de aerogeneradores para la energía eólica y de turbogeneradores para la energía hidráulica y energía geotérmica.

Esto se muestra en la cadena de transformaciones de las fuentes renovables diagrama 1, que describe tales procesos como la captación y conversión a electricidad por parte de las fuentes alternas.



Diagrma 1. Cadena de Transformaciones de las Fuentes Renovables

1.1.1 Biomasa

La biomasa es la cuarta fuente más grande de energía del mundo y tiene una potencialidad que excede el consumo actual de energía a nivel mundial. Esta disponible en la mayoría de los países y representa un recurso valioso para mucha gente en especial indígena, principalmente en los países en desarrollo, donde se queman particularmente desechos generados por la agricultura y las industrias que procesan madera Fig. 1. Esta se quema para producir vapor que se usa para hacer girar una turbina.

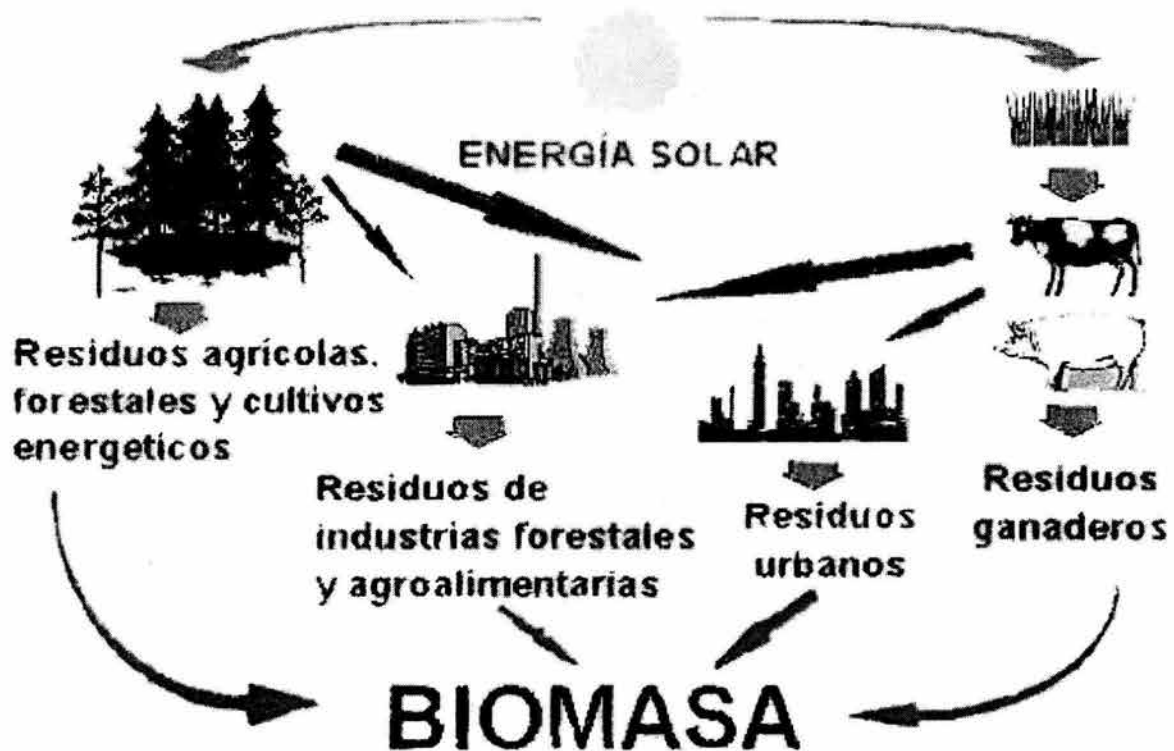


Fig 1. Recursos para la Biomasa, Cortesía Bigen

El giro de la turbina activa un generador, que produce electricidad. Muchas plantas de energía que queman carbón agregan biomasa a su proceso para reducir las emisiones producidas de la quema de carbón. Además de usarse para generar electricidad y calor, la biomasa puede incrementar la disponibilidad de recursos en todas las regiones con actividad agrícola Fig. 2.

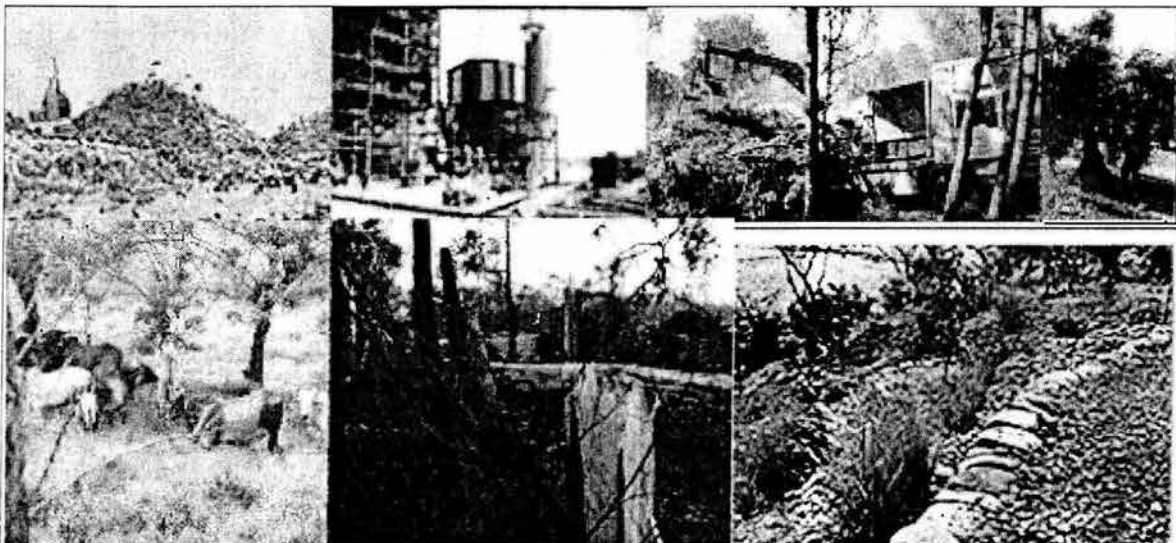


Fig. 2 Recursos generados por la agricultura e industrias que procesan madera

Toda la capacidad actual es basada en la tecnología de combustión directa, los futuros mejoramientos en cuanto a eficiencia incluirá la combustión de biomasa y carbono en calderas y la introducción de alta eficiencia de gasificación en sistemas de ciclo combinado, sistemas de celdas de combustible, y sistemas modulares.

Una gran variedad de combustibles puede obtenerse de los recursos de la biomasa, incluyendo los combustibles como el etanol líquido, metanol, biodiesel y diesel Fischer-Tropsch, y combustibles gaseosos tales como hidrógeno y metano Fig.3.

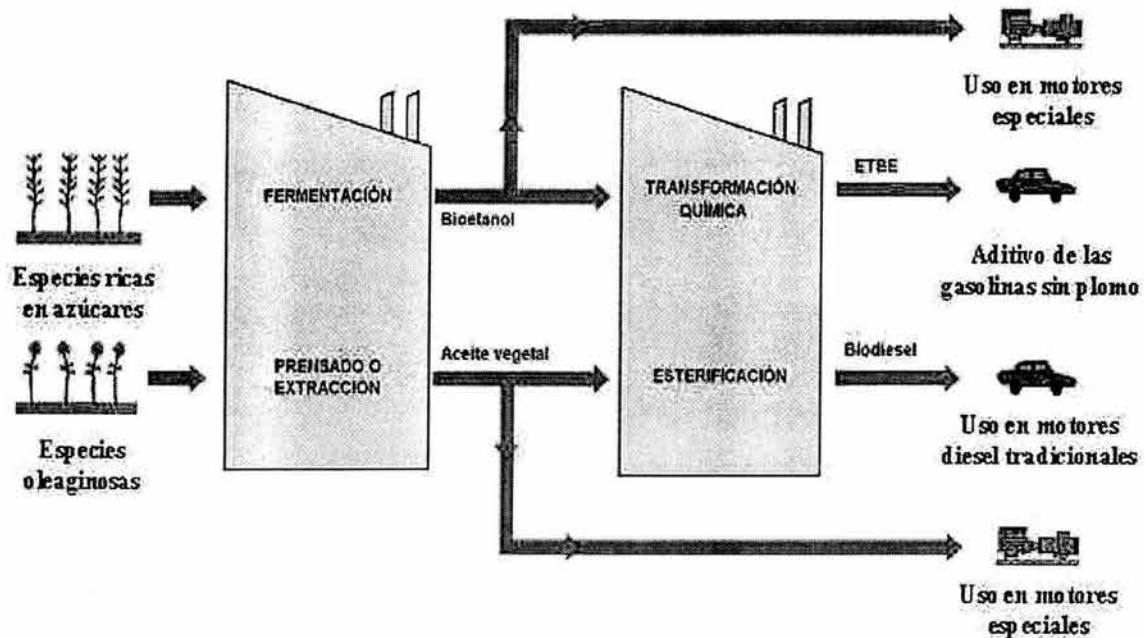


Fig. 3 Esquema de Producción de Biocombustibles

La producción de los combustibles, encontrar aplicaciones y usos de combustibles, y crear una infraestructura de distribución.

Los productos químicos y materiales basados en biomasa incluyen químicos verdes, plásticos renovables, fibras naturales y materiales estructurales naturales. Muchos de estos productos pueden reemplazar a los productos y materiales tradicionales derivados de la petroquímica, pero se requieren nuevas y mejores tecnologías.

1.1.2 Energía Eólica

La energía del viento está basada en aprovechar un flujo dinámico de duración cambiante y con desplazamiento horizontal. La cantidad de energía obtenida es proporcional al cubo de la velocidad del viento, lo que muestra la importancia de este factor. Una de las formas de aprovechar la energía del viento es convertirla en energía eléctrica a través del empleo de una aeroturbina (turbina de viento) fig. 4.

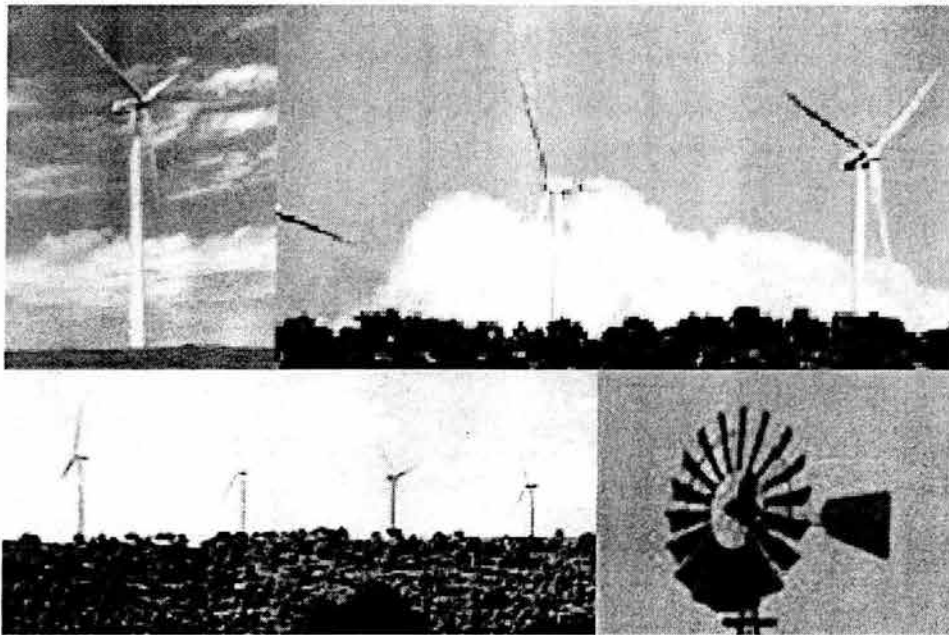


Fig. 4 Aerogeneradores localizados en Alto Baguales, Coyhaique, Chile

Las turbinas de viento operan sobre un principio simple, la energía del viento hace girar las aspas de la turbina que a su vez hace girar el rotor, el rotor se conecta al eje principal, que hace girar un generador. Cuando el viento sopla, se forma una bolsa de aire de baja presión a favor del viento del lado del aspa. Las bolsas de aire de baja presión empujan las aspas ocasionando que gire al rotor, esto es llamado elevación.

La fuerza de elevación es realmente mucho más potente que la fuerza del viento en contraste con el lado frontal del aspa, que se llama draga. La combinación de elevación y la draga es lo que ocasiona que el rotor gire.

Los recursos del viento pueden ser explotados principalmente en áreas donde la densidad de la energía del viento es por lo menos de 400W/m^2 a 30m sobre el nivel del piso (o cercanos a 500W/m^2 a 50m).

El conocimiento del recurso energético eólico en México esta a nivel exploratorio y de reconocimiento, sin embargo, las mediciones puntuales o de pequeñas redes anemométricas, realizadas principalmente por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y algunas otras entidades o empresas, han servido para confirmar a nivel de prefactibilidad, la existencia de vientos técnicamente aprovechables y económicamente viables en las siguientes regiones:

1. Sur del Istmo de Tehuantepec
2. Guerrero Negro
3. Península de Baja California
4. Península de Yucatán
5. Altiplano Norte
6. Región Central
7. Las Costas del País

La generación eoloelectrica en gran escala de las regiones costeras, se pretende aplicar la producción de hidrógeno para centrales de turbogas, lo que constituirá una de las principales aplicaciones a mediados de este siglo con 10 MW de capacidad instalada.

1.1.3 Energía Geotérmica

El calor de la tierra, llamado energía geotérmica, calienta el agua que se filtra a los depósitos subterráneos. Estos depósitos pueden explotar, además de que tiene una gran variedad de usos dependiendo de la temperatura del agua.

La energía de los depósitos de alta temperatura (107°C a 316°C) puede usarse para producir electricidad, la Fig. 5 muestra una planta de generación eléctrica a partir de la energía geotérmica.



Fig. 5 Central Geotérmica ubicada en Islandia

Actualmente hay tres tipos de planta que emplean energía geotérmica. Las que emplean vapor seco, las de vapor flash y las de ciclo binario:

1. Las plantas de generación que emplean vapor seco entuban el vapor de los pozos subterráneos a la planta de potencia, donde se usa para hacer rotar una turbina, que activa un generador para producir electricidad.
2. Las plantas de generación por flasheo de vapor, que emplean agua a temperaturas mayores de 182°C, son las más comunes. El vapor producto de la ebullición del agua del subsuelo se usa entonces para dar potencia a un generador. El agua remanente, así como el vapor condensado se inyecta en la superficie del terreno para ser recalentado.
3. Las plantas de generación de ciclo binario emplean el calor de los depósitos de menor temperatura (107°C a 182°C) para hacer hervir al fluido de trabajo, el cual se vaporiza en un intercambiador de calor el cual es usado para dar potencia al generador. El agua, que nunca está en contacto directo con el fluido de trabajo, una vez condensada se inyecta en la superficie del terreno para ser recalentado.

Los avances tecnológicos pueden ayudar a administrar los recursos geotérmicos para la producción de energía, mejorar la eficiencia de operación de las plantas y aprovechar nuevos recursos tales como la energía del calor de las rocas secas, recursos geopresurizados (agua caliente) y magma (roca fundida).

1.1.4 Energía Hidráulica

La hidroenergía es tal vez la forma más antigua de aprovechamiento de energía para el desarrollo de las actividades productivas de la humanidad. Las ruedas hidráulicas se utilizaron desde el tiempo de los antiguos romanos para actividades como la molienda de granos, en los aserraderos y para generar energía mecánica y eléctrica.

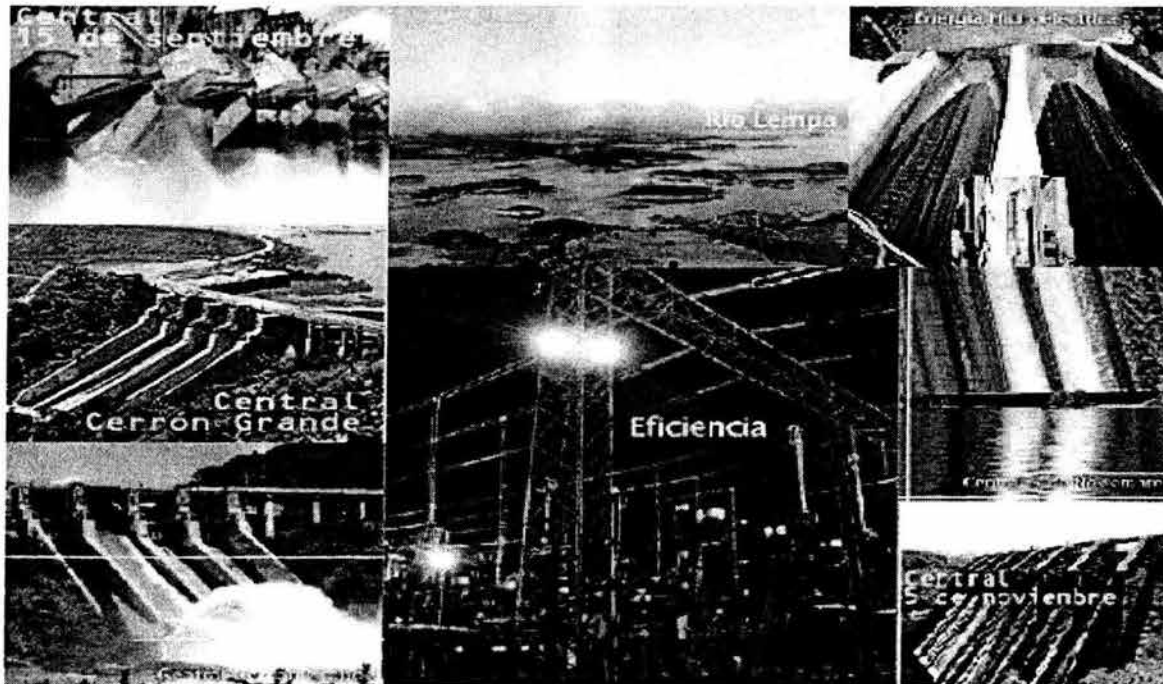


Fig. 6 Hidroeléctricas localizadas en El Salvador, Centrales Cerrón Grande, 15 de Septiembre, 5 Noviembre, Guajoyo.

Una vez que el agua de un caudal se confina en la tubería de alimentación, es inyectada sobre las aletas de la turbina y esta, a su vez, impulsa un generador que transforma la energía mecánica producida por la turbina en energía eléctrica Fig.7.

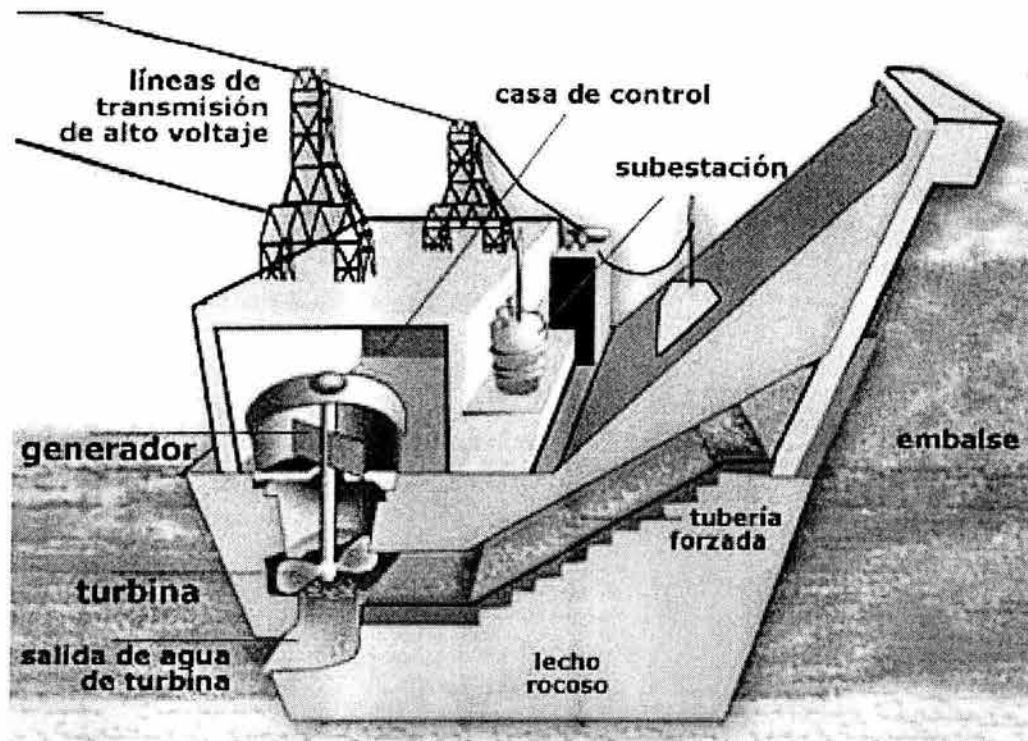


Fig. 7 Esquema de una Central Hidroeléctrica,
Cortesía: CEI, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica de Río Lempa (El Salvador)

Se tienen diferentes tipos de hidroeléctricas como las de almacenamiento, para grandes hidroeléctricas las cuales emplean un dique y un depósito para almacenar agua de un río, la que posteriormente puede liberarse para satisfacer la variación en las necesidades de generación eléctrica o para mantener un nivel constante en el depósito.

También tenemos las hidroeléctricas de desviación, algunas veces llamadas “al filo del agua”. Donde una porción de agua de un río se canalizan a través de un canal hacia la hidroeléctrica por lo que esta puede no requerir el uso de una presa. Y finalmente las de acumulación de energía o de rebombeo.

1.1.5 Energía Solar

El flujo total de energía solar interceptado por la tierra es 170 000TW, o sea más de 10 000 veces los requerimientos de consumo de energía anual del hombre. El promedio anual de radiación solar disponible en la superficie terrestre varía desde cerca de 1000kWh/m² en el norte de Europa a más de 2000kWh/m² al año en áreas desérticas.

El potencial del recurso de energía solar es más que suficiente para satisfacer toda la demanda de energía actual y para una oferta proyectada más allá del 2100 Fig 8. Así la contribución de la energía solar al abastecimiento global de energía no será limitada por la disponibilidad del recurso.

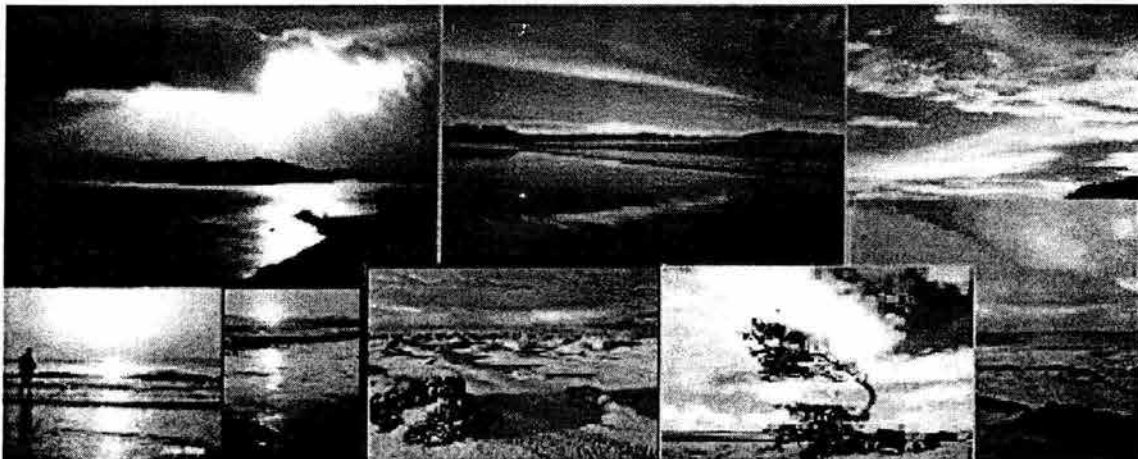


Fig. 8 Energía Solar Disponible

La energía solar es accesible a todos, es limpia, está descentralizada y es inagotable por millones de años, claro que no todos tenemos la misma accesibilidad, ya que ésta dependerá de cada sitio o lugar además de las diferentes épocas del año; una medida de la energía procedente del Sol la constituye la constante solar, se denomina así a la energía que por unidad de tiempo, se recibe fuera de la atmósfera terrestre sobre la unidad de superficie

perpendicular a la dirección de los rayos solares en su distancia media, el valor que se admite actualmente es de: $I=1354 \text{ W/m}^2$ que corresponde a un valor máximo en el perihelio de 1395 W/m^2 y un valor mínimo en el afelio de 1308 W/m^2 .

El modelo aplicado por Rafael Almanza, investigador del Instituto de Ingeniería, tiene desviaciones menores del 10 por ciento y fue desarrollado en la India, situación que hizo más confiable su aplicación en México, ya que tanto la latitud, como los climas en ambos países son semejantes. Actualmente este modelo es el más consultado en México para estimar las cantidades totales de radiación diarias sobre superficies horizontales.

La utilización de las imágenes satelitales representa una gran ventaja, ya que para generar modelos o predicciones con objeto de diseño, se podría prescindir de costosas redes solarimétricas terrestres. No obstante, la red solarimétrica existente en México puede servir como un importante punto de referencia para la interpretación de dichas imágenes.

El calor proveniente del sol se usa para calentar agua de uso doméstico o de piscinas, secar granos, generar vapor para mover turbinas generadoras de electricidad, destruir desechos peligrosos, también en procesos industriales como pasteurización, lavado de textiles, entre otros.

La generación fototérmica de electricidad es actualmente una de las aplicaciones más extensas de la energía solar en el mundo.

Las investigaciones iniciales de módulos fotovoltaicos se enfocaron al desarrollo de productos para aplicaciones espaciales, siendo su primera utilización exitosa en los satélites artificiales por sus principales características las hicieron ideales para el suministro de energía en el espacio exterior.

Actualmente se emplean en servicio de bombeo de agua, iluminación doméstica y pública en áreas rurales, telefonía, repetidores de microondas y sistemas para señales terrestres y marinas.

La tecnología para el aprovechamiento de la energía solar está constituida básicamente por los sistemas térmico-solares y los sistemas fotovoltaicos. De los cuales los sistemas térmico-solares Fig.9, se dividen en tres categorías:

1. Colectores de baja temperatura (Proveen calor útil a temperaturas menores de 65°C)
2. Colectores de temperatura media (Concentran la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura, usualmente entre los 100 y 300°C)
3. Colectores de alta temperatura (Se dividen en: Los colectores de plato parabólico, la nueva generación de canal parabólico y los sistemas de torre central: que operan a temperaturas mayores a los 500°C y son utilizados para generar electricidad)



Fig. 9 Colectores Solares, Cortesía: Laboratorios Sandia, Sheffler de México

La tecnología solar fotovoltaica es la conversión directa de la luz solar en electricidad. Algunos materiales exhiben una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico, en los cuales son absorbidos los fotones de luz y son liberados los electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, resultan en una corriente eléctrica que puede ser usada como electricidad

Los materiales necesarios para los paneles solares no solo comprenden a los materiales fotovoltaicos, sino también capas delgadas para los contactos, capas antirreflejantes, materiales poliméricos para la elaboración y encapsulado de los paneles etc. Sin embargo, el elemento clave donde se decide el costo del panel y la rentabilidad de la energía fotovoltaica es la celda solar.

Los materiales fotovoltaicos tradicionales son los semiconductores inorgánicos. El efecto fotovoltaico se reportó en 1839 por primera vez cuando Edmond Becquerel observó que la iluminación de un electrodo oxidado de platino, en un electrolito, provocaba un diferencial de potencial. En 1877 se observaron efectos similares en barras sólidas de selenio.

En 1914, celdas solares basadas en selenio presentaban una eficiencia del 1% [Fahrenbruch y Bube, 1983; L.D. Partain, 1995; Boschloo, 1996]. Las celdas solares de silicio monocristalino se fabricaron por primera vez en 1954, con una eficiencia del 6% [Chaplin et al., 1954].

Actualmente las celdas de silicio monocristalino obtenidas a nivel laboratorio han superado el 25% de eficiencia sin concentración de la luz solar [Boschloo, 1996; Swanson et al., 1992]. Las eficiencias más altas a nivel comercial de los paneles son del 20% o menos.

El desarrollo de materiales ha permitido reducir los costos con las celdas solares de silicio policristalino de granos grandes (multisilicio), Fig.11 y de silicio amorfo que también se comercializan, que a pesar de presentar eficiencias menores se justifica con sus costos más

bajos. La lucha por aumentar la eficiencia y reducir los costos también abarca otros materiales, como los compuestos de los grupos III-V (fundamentalmente el GaAs junto con la solución sólida (Al-Ga-As), los II-VI (CdS, CuInSe₂, CdTe).

Los valores más altos de eficiencias de conversión fotovoltaica reportados corresponden a las celdas basadas en GaAs y sus compuestos, pero también son más costosas.

Se han utilizado donde el factor relevante es la eficiencia y no los costos, por ejemplo en satélites y naves espaciales Fig 9.

Las celdas de II-VI se basan en capas delgadas policristalinas que se obtienen con tecnologías muy baratas, de las cuales se han obtenido ya eficiencias superiores al 15% (Fig.10), sin embargo se argumenta que desde el punto de vista ecológico no son una buena opción, por los componentes tóxicos que poseen [Moskowitz et al., 1990]. Por otra parte las reservas de indio, selenio y telurio no abundan en la naturaleza, y esto puede ser una dificultad para un uso en gran escala de paneles fotovoltaicos [E.A. Alsema y Engelenburg, 1992]. En la tabla 1 se resumen algunos datos de las eficiencias más altas alcanzadas, según el material [Green et al.,1997].



Fig. 10 Celda Policristalina

Tabla 1. EFICIENCIAS CONFIRMADAS PARA CELDAS SOLARES TERRESTRES MEDIDAS PARA EL ESPECTRO GLOBAL AM 1.5 (1kW/m^2) A 25°C

CLASIFICACIÓN	EFICIENCIA (%)	LUGAR DE MEDICIÓN (FECHA)
Silicio Monocristalino	24.0	Sandia (9/94)
Silicio Multicristalino	18.6	NREL (12/85)
Silicio Amorfo (resultados no estables)	12.7	Japan Quality Assurance (4/92)
Capa delgada de Silicio (60 nm de Si sobre SiO_2)	14.2	Japan Quality Assurance (3/93)
GaAs Monocristalino	25.1	NREL (3/90)
GaAs Multicristalino (sobre sustrato de Ge)	18.2	NREL (11/95)
Rtfgvb54 Capa Policristalina de CdTe	15.8	NREL (6/92)
Capa Policristalina de CuInGaSe_2 (CIGS)	16.4	NREL (11/94)
GaInP / GaAs	30.3	Japan Quality Assurance (4/96)
GaAs / CuInSe (CIS) (capa delgada)	25.8	NREL (11/89)

Datos de Green et al... 1997

Todas las celdas anteriormente descritas se basan en una barrera potencial originada por un campo eléctrico, que hace que no regresen a su estado inicial los electrones excitados por la luz en el semiconductor dado. Estas barreras están formadas por una unión $p-n$ (semiconductor tipo p – semiconductor tipo n), o una barrera Schottky (metal-semiconductor) o una estructura MIS (metal-aislante-semiconductor).

Se han reportado además las barreras sólido-líquido o electrolito-semiconductor, cuyo principio de funcionamiento también es la absorción de la radiación por el semiconductor y separación de carga por el campo eléctrico en la interfaz.

Estas son llamadas celdas fotoelectroquímicas, esta interfaz se ha investigado so sólo con el objetivo de obtener un dispositivo fotovoltaico, sino también para generar hidrógeno. Se han estudiado muchas diferentes combinaciones de electrolito y semiconductor. Utilizando el silicio, germanio, los semiconductores II-VI, los III-V, los óxidos semiconductores y otros compuestos [Chandra y Pendey, 1982]. Estas celdas presentan la dificultad de ser inestables ante el electrolito y aquellos semiconductores que son estables, como los óxidos, poseen una banda prohibida muy grande.

El valor de la energía de la banda prohibida que caracteriza a cada semiconductor determina la energía de los fotones que es capaz de absorber el semiconductor en cuestión. Así, los óxidos semiconductores solo absorben la radiación solar en el ultravioleta y parte del azul, esto representa un porcentaje muy pequeño de la energía del espectro de radiación solar y hace que la eficiencia de conversión sea extremadamente baja. Por otra parte, algunos de estos óxidos además de ser estables son costosos.

Con el objetivo de extender la absorción de la radiación a la zona visible del espectro, se han investigado celdas fotoelectroquímicas sensibilizadas mediante la unión al óxido que actúa como fotoelectrodo de otro semiconductor, con una energía de la banda prohibida menor o con un colorante, en este último caso el colorante puede también estar disuelto en el electrolito. El principio de funcionamiento de estas celdas fotoelectroquímicas sensibilizadas se basa en la absorción de los fotones por la sustancia sensibilizadora, la energía de los fotones es tomada por electrones que van a un estado excitado.

La energía de estado excitado coincide con la de algún estado vacío en la banda de conducción del óxido semiconductor, por lo que el electrón puede pasar sin dificultad al óxido semiconductor y después al circuito externo, donde su energía puede ser cedida y convertida en trabajo antes de regresar al otro electrodo de la celda. En el otro electrodo este electrón reduce especies oxidadas del electrolito. La sustancia sensibilizadora que cedió un electrón al semiconductor lo repone aceptando un electrón de las especies reducidas en el electrolito que pasan a oxidadas, completándose así el ciclo.

Lamentablemente pueden producirse otras reacciones que disminuyen la eficiencia de estas celdas, tales como, los electrones que se inyectan al semiconductor pueden reaccionar con especies oxidadas en el electrolito; pueden ir de nuevo al colorante, o puede que los electrones excitados en el colorante no lleguen a transferirse al semiconductor y se recombinen radiactivamente o no radiactivamente.

Como puede observarse, en este tipo de celdas, el efecto fotovoltaico se produce por una transferencia de carga y no por separación de carga por el campo eléctrico de la barrera [Bedja et al., 1990]. Se ha demostrado que éste no existe dadas las dimensiones nanométricas de los cristales. Para aumentar la eficiencia del proceso de transferencia de carga es necesario que la molécula del colorante esté próxima a la del semiconductor [Boschloo, 1996].

Como se puede apreciar, existe una investigación continua por encontrar el material y la tecnología de la celda solar que haga competitiva la energía fotovoltaica con los actuales precios de las energías fósiles. Ya habíamos mencionado que el elemento clave en el costo del sistema fotovoltaico es el da la celda solar. En la actualidad para lugares remotos donde no llega la red eléctrica, ya resulta más económica la alternativa fotovoltaica.

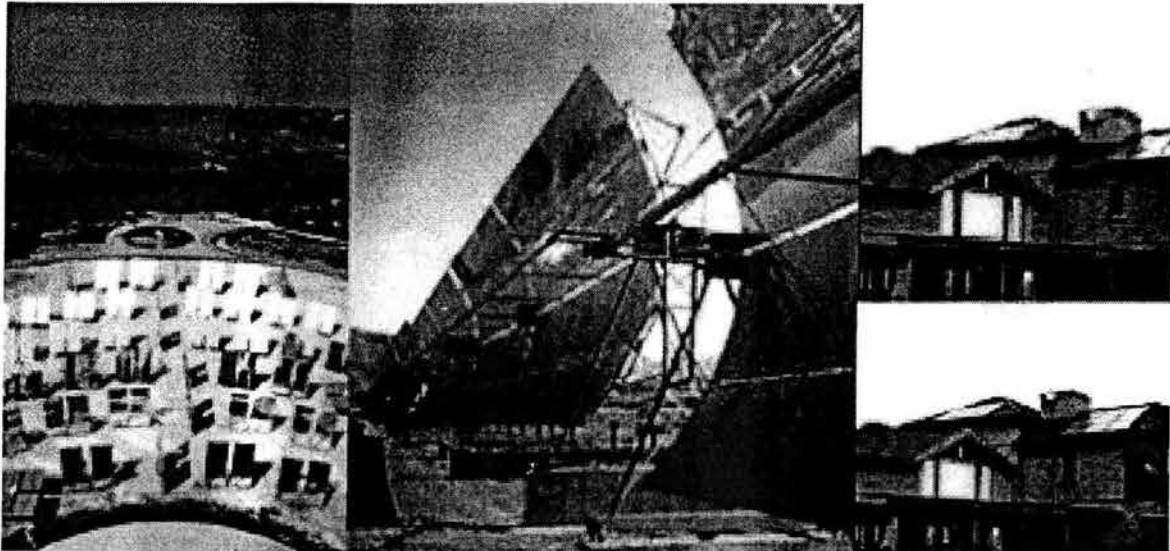


Fig. 11 Cortesía: Plataforma Solar de Israel, Plataforma Solar Almeria ZSW

El mercado fotovoltaico mundial ha ido en aumento, incremento que no ha sido uniforme en los diferentes países, destacándose Japón Fig 11. Se pronostica por el Canadian Centre for Mineral and Energy Technology CANMET, en uno de los estudios de mercado más minuciosos de la industria fotovoltaica que se haya realizado [Photovoltaic..., 1997], que las ventas de módulos en el año 2010 estarán en el rango de 800 a 1 000MW, o sea, del orden de diez veces mayor con respecto a 1996. Una parte apreciable de las ventas cubren necesidades en países subdesarrollados, donde las redes de sus sistemas energéticos no abarcan todo el territorio nacional. Sin embargo, los productores son los países más desarrollados, por lo cual es necesario cambiar esta situación si aspiramos a que los países en desarrollo no continúen siendo fundamentalmente exportadores de materia prima e importadores de productos elaborados con ella. De no cambiarse, habría que comprar energía fotovoltaica a pesar de tener sol.

1.2 EL HIDRÓGENO COMO ELEMENTO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR

Se calcula que las reservas conocidas y estimadas de petróleo y gas natural serán suficientes solo para la primera mitad del siglo considerando el actual ritmo de crecimiento en su uso, por lo que también los precios deben ir en aumento. Por otra parte, la explotación de los combustibles fósiles debe frenarse con urgencia por las afectaciones que origina al planeta. Por estas razones, grandes cambios en la infraestructura del sistema energético están llamados a ocurrir en un futuro no tan distante.

Dentro de este contexto, la energía solar debe desempeñar un papel preponderante. Para el aprovechamiento de la energía solar de forma directa se utilizan las conversiones térmicas y fotovoltaicas. Dado el carácter no permanente de la radiación solar originado por la noche y fenómenos climáticos no periódicos, se hace indispensable contar con formas eficientes de almacenamiento y transporte de energía. En este sentido, el almacenamiento y uso de hidrógeno como portador energético se avizora como solución óptima.

La energía fotovoltaica necesita almacenarse para tener disponibilidad de electricidad durante los períodos de "no sol". Puede almacenarse en aire comprimido, bombeando agua, en baterías, utilizando superconductividad o en forma de hidrógeno. Para los tres últimos, las investigaciones sobre materiales tienen gran importancia y actualidad.

La utilización de almacenamiento de energía en superconductores posibilita eficiencias de almacenamiento por encima de 90 %, mucho mayor que las eficiencias de las restantes posibilidades mencionadas [Hubbard, 1989], pero las investigaciones en estos materiales aún no han logrado que esta posibilidad pueda materializarse en la práctica.

El almacenamiento en baterías es hoy el más común y frecuente. Existen las baterías secas a las que no se les repone el electrolito, y las conocidas como acumuladores, el más conocido y utilizado es el de plomo ácido. Existen también diferentes tipos de baterías alcalinas con electrodos de Ni-Cd, Ni-Fe, Ag-Zn, Ag-Cd. Actualmente se trabaja en el desarrollo de los materiales de los electrodos con el objetivo de aumentar el número de watt-hora por unidad de peso de la batería (Wh/kg). En la actualidad los estudios de la batería de Zn-aire para los vehículos eléctricos, alcanzan valores de 200 Wh/kg, superiores a otras mencionadas, aunque no se recargan en el auto y necesitan cambiarse en las estaciones de servicio, en lugar de llenar el tanque con combustible. Las baterías basadas en elementos inorgánicos son las que se han utilizado ampliamente hasta el momento, pero se están desarrollando otras basadas en materiales poliméricos. Se han desarrollado los poliorganodisulfuros que pueden actuar como electrolito y electrodo redox al mismo tiempo, así como otros polímeros.

En este capítulo nos enfocaremos en las diferentes tecnologías existentes para la producción de hidrógeno a partir de energía solar. Donde el hidrógeno juega el papel de sistema almacenador de energía, que permitirá a las fuentes renovables de energía, competir ante las demandas de energía continua e intermitente que producen las fuentes de energía convencionales.

1.2.1 Hidrógeno Solar

En general, el almacenamiento en baterías es adecuado para valores de potencia almacenada relativamente pequeños. Para poder lograr sistemas autónomos descentralizados, no obstante, se necesita almacenar cantidades superiores de energía; el almacenamiento en hidrógeno se tiene en la perspectiva como el más promisorio por ofrecer muchas ventajas:

1. Se obtiene por descomposición del agua, que es abundante y asequible.
2. No influye en el medio ambiente y sólo genera de nuevo agua cuando cede la energía almacenada, o sea, es limpio y renovable.
3. Es adecuado para el uso doméstico e industrial.
4. Se transporta y almacena con pocas pérdidas.

En Alemania, en la Universidad de Stuttgart, se creó el Centro SFB 270 para las investigaciones interdisciplinarias orientadas a la utilización del hidrógeno como portador energético, abarca doce Institutos de la propia Universidad, además del Centro de Investigaciones Aeroespaciales alemán, el Instituto Max-Planck de Investigaciones de Metales y el Instituto Gubernamental de Prueba de Materiales, y aún existen muchos otros proyectos y grupos en este país, por ejemplo, el proyecto PHOEBUS de electrificación de la Biblioteca Central del Centro de Investigaciones Jülich basado en una instalación completamente autónoma que incluye energía fotovoltaica, hidrógeno electrolítico y celdas de combustible. Existe además el proyecto conjunto entre Alemania y Arabia Saudita HYSOLAR, para el desarrollo del Ciclo del Hidrógeno Solar.

También el Neunburg Vorm Wald, Alemania, con un fondo público de USD\$33 millones y USD\$38 millones por la empresa Solar Wasserstoff Bayern GmbH (SWB), para probar a escala industrial las diferentes componentes del ciclo del hidrógeno solar.

En el cual son instalados diferentes paneles fotovoltaicos tales como los monocristalinos como los amorfos con una capacidad de 371 kW; electrolizadores tanto a alta como a baja presión; así como celdas de combustible alcalinas que utilizan oxígeno puro y las de ácido fosfórico, y así podemos mencionar una gran cantidad más de proyectos en ese país que se están desarrollando.

La situación en Alemania no es la única, millones de dólares se invierten en esta investigación también en Estados Unidos, Japón Suiza, Suecia, España y Holanda entre otros. Estos datos señalan la necesidad de también priorizar en los países menos desarrollados las investigaciones para el aprovechamiento de la energía solar, así como las de los materiales de avanzada necesarios, es fundamental crear conciencia de esa necesidad, para ello, debe promoverse el acceso a información actualizada en estos temas por todas las vías, así como fomentar proyectos multidisciplinarios para el desarrollo de materiales y partes de los componentes que los utilicen, así como el apoyo por parte del gobierno e instituciones privadas para la instalación de sistemas que utilizan el ciclo del hidrógeno solar, para lograr un avance conjunto que beneficiará particularmente a nuestro país y al planeta en general.

Como ya se mencionó, existen en la actualidad un sin número de diferentes prototipos que producen electricidad a partir de las energías renovables, en este caso sólo mencionaré el propuesto desde mi formación profesional, el cual se intenta perfeccionar y adecuar a las condiciones actuales.

1.2.2 Obtención del Hidrógeno

El hidrógeno puede obtenerse de la energía térmica, eléctrica en electrolizadores ó de forma directa.

1.2.2.1 Obtención de Hidrógeno Utilizando Energía Térmica

Para la obtención del hidrógeno a partir del agua utilizando energía solar térmica pueden emplearse tanto la descomposición directa como el proceso termoquímico.

En el primer caso se necesita del desarrollo de materiales que puedan soportar mas de 2 000°C de temperatura para disociar la molécula del agua con calor. En el segundo caso puede usarse la descomposición termoquímica, mediante la búsqueda de materiales reciclables, eficientes y que puedan soportar muchos ciclos de oxido-reducción. Por ejemplo, vapor de agua a alta temperatura se hace circular a través de polvo de hierro: este se oxidará tomando el oxígeno del vapor de agua, quedando libre el hidrógeno. Para lo cual es necesario que el óxido de hierro pueda reducirse de nuevo, para reiniciar el ciclo, sin embargo esta tecnología todavía no se encuentra desarrollada.

1.2.2.2 Obtención de Hidrógeno Utilizando Energía Eléctrica

La electricidad necesaria en la electrólisis puede obtenerse por diversas vías, a partir de la conversión térmica, la energía solar, la energía eólica, la hidroenergía entre otras fuentes renovables.

Cabe mencionar que por ser este proceso, una de las partes claves en el desarrollo del prototipo, se dedicará especial atención al estado del arte de la electrólisis del agua.

1.2.2.3 Celdas Electrolíticas

A los sistemas en que se aplica externamente un potencial eléctrico con el objeto de generar una reacción química de oxido-reducción, se le conoce como celdas electrolíticas, Apéndice I.

1.2.2.4 Obtención Directa del Hidrógeno

Aunque el hidrógeno puede obtenerse según las variantes analizadas, en la descomposición directa, solo hay una transformación de energía y por lo tanto energéticamente es el mejor camino. El agua se puede descomponer fotoquímicamente utilizando biofotólisis y fotólisis.

Las plantas y bacterias han logrado de manera eficiente descomponer el agua, mediante el proceso denominado biofotólisis que forma parte de la fotosíntesis. La planta utiliza los quantum de luz para obtener oxígeno e hidrógeno, aunque el último no se obtiene en su forma molecular, sino que pasa por otras reacciones a formar parte de la biomasa que la planta sintetiza utilizando también el CO_2 del aire. Algunas algas en condiciones especiales pueden producir hidrógeno molecular, y su cultivo es una vía para la producción de hidrógeno utilizando la biofotólisis [Podestá y Piatti].

La fotólisis es el procedimiento empleado por el hombre para descomponer directamente la molécula del agua mediante radiación luminosa, en lugar de utilizar la energía eléctrica. Este procedimiento está en desarrollo, aún no se aplica en la práctica y se trabaja en los materiales para lograrlo. Los sistemas utilizados hasta el momento se basan en la interfase del electrolito semiconductor al igual que las celdas fotovoltaicas electroquímicas descritas anteriormente. Al principio de la década de los setentas, [Fujishima y Honda, 1971] demostraron el uso de fotoelectrodos semiconductores para la descomposición foto-asistida de la molécula del agua. Estos autores emplearon dióxido de titanio como semiconductor, el elemento clave para poder introducir en la práctica este tipo de celda es el material del fotoelectrodo. Su eficiencia de conversión fotoquímica de la energía del espectro solar y su estabilidad en el tiempo son factores críticos para determinar el buen comportamiento y eficiencia de la celda.

CONCLUSIONES

Se debe tener en cuenta la importancia de las energías renovables, como nuevas alternativas energéticas, que ayuden a satisfacer las demandas de energía eléctrica nacional, además de contribuir al desarrollo sustentable que en un futuro cercano será de tipo obligatorio en el mundo.

El análisis de los diferentes proyectos que utilizan fuentes renovables, muestra que ya se ha dado el primer paso en México, sin embargo estamos a décadas de desarrollo, de los países enfocados a estas tecnologías, tales como: Alemania, Japón, EEUU y España entre otros.

El potencial existente en el país, en general es grande, solo se necesita la consceintización tanto de la población como de los gobernantes e industrias privadas, para poder iniciar nuevos proyectos que motiven la inversión tanto pública como privada, la cual dará como resultado un México sustentable, con mejores oportunidades de vida.

Existen en la actualidad un sin número de proyectos en desarrollo, basados en la tecnología del hidrógeno como sistema de almacenamiento para las fuentes de energía renovables, sin embargo la investigación en ésta área, en México, aún no está al nivel de países enfocados a la investigación de este tipo de tecnologías. Por lo que es urgente lograr un entendimiento, primeramente, tanto de sistema total, como de cada una de las etapas de transformación.

Tenemos el potencial que nos brinda la naturaleza, la tecnología existe, es sólo cuestión de conocerla y adaptarla a nuestras condiciones climáticas, con respecto a nuestras necesidades de suministro eléctrico, ¿entonces que nos impide implantar estas tecnologías en nuestro país?



Capítulo II

Este Capítulo describe el estado del arte de las celdas de combustible, siendo el equipo una parte clave del prototipo propuesto en la tesis.

Se describe el funcionamiento, los diferentes tipos de celdas existentes, así como, sus diferencias principales.

Así mismo se señalan los beneficios de esta tecnología, y se presenta una comparación con las tecnologías convencionales, para finalizar con una breve reseña de la situación nacional.

II. ESTADO DEL ARTE DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

La primera celda de combustible fue construida en 1839 por William Grove, un juez y científico galés que demostró que la combinación de hidrógeno y oxígeno generaba electricidad además de agua y calor. El verdadero interés en celdas de combustible como un generador práctico fue a principios de los años sesenta del siglo XX, cuando el programa espacial de los Estados Unidos seleccionó las celdas de combustible para proporcionar electricidad y agua a las naves espaciales *Géminis* y *Apollo*. Hoy en día, la aplicación espacial ya no es la única de tipo práctico, puesto que las celdas de combustible están atravesando por un gran momento, al haber alcanzado una etapa tecnológica que les permite estar en posición de competir cada día más con las tecnologías convencionales de generación eléctrica, ofreciendo enormes ventajas sobre ellas [Hirschenhofer J.H., *et al.*, 1998].

2.1 FUNCIONAMIENTO

Una celda de combustible es una generadora de electricidad que utiliza procesos electroquímicos, en este caso para producir energía a partir de hidrógeno y oxígeno; donde el hidrógeno es el elemento combustible, y el oxígeno puede obtenerse mediante almacenamiento ó simplemente tomarse del aire. La celda de combustible produce corriente directa como una batería, por lo cual su eficiencia puede ser muy elevada pero al contrario de una batería, nunca se descarga; la celda sigue produciendo energía mientras se disponga de combustible.

La celda de combustible que utiliza hidrógeno opera de la forma inversa al proceso conocido como electrólisis del agua, en donde el agua es desdoblada en hidrógeno y oxígeno.

La reacción se produce en la celda misma, la producción de agua toma lugar en distintas partes de la celda, dependiendo del electrolito utilizado. El hidrógeno fluye hacia el ánodo de la celda, una cubierta de platino ayuda a quitarle los electrones a los átomos de hidrógeno, dejándolo ionizado (protones). La membrana electrolítica permite el paso sólo de los protones hacia el cátodo. Debido a que los electrones no pueden pasar a través de la membrana, se ven forzados a salir del ánodo por un circuito externo en forma de corriente eléctrica, y esta corriente eléctrica es la utilizada. A medida que pasa el oxígeno por el cátodo, este permite que los protones y electrones del oxígeno se combinen con los del hidrógeno formando agua 100% pura Fig.12.

Las celdas de combustible pueden ser conectadas entre sí, de manera similar a lo que se hace con las baterías comunes, con el fin de obtener condiciones de voltaje o corriente deseados Fig. 13.

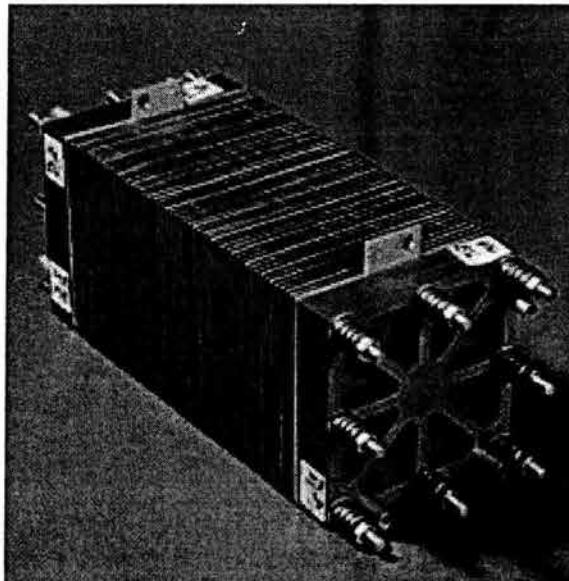


Fig. 13 Celdas de Combustible Conectadas en Serie

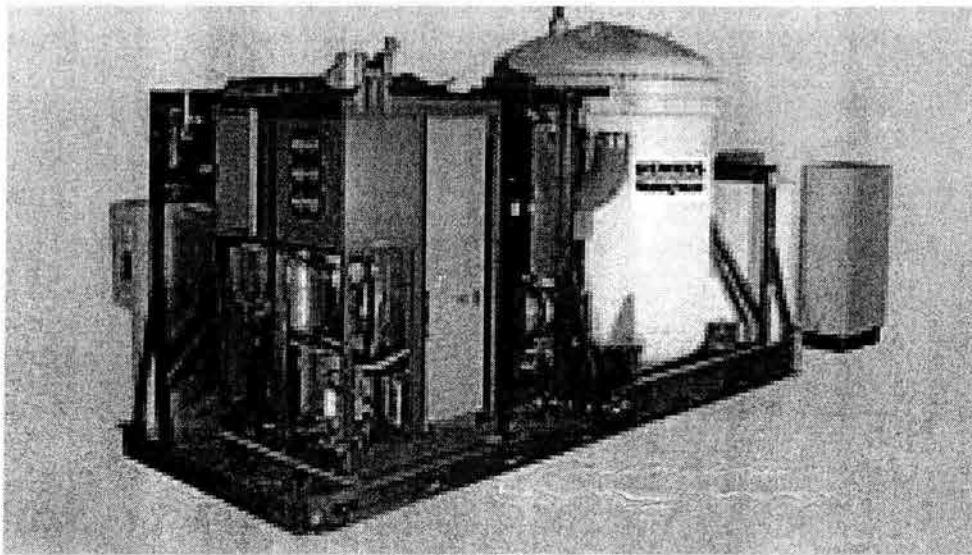
En la práctica, la corrosión y la degradación de materiales así como los componentes de la celda pueden limitar su vida útil.

A diferencia de las máquinas de combustión cuya eficiencia está regida por el ciclo de Carnot y limitada por la temperatura, la eficiencia teórica de las celdas de combustible está dada por las leyes de Faraday, que relacionan directamente la corriente producida en una reacción electroquímica con la cantidad de material reactivo, es decir, con la cantidad de combustible. La mayor ventaja de las celdas de combustible descansa realmente en el hecho de que no están limitadas por la temperatura, lo cual les otorga el gran beneficio de alcanzar altas eficiencias. Así, en teoría, cada molécula de hidrógeno gas producirá dos electrones libres y junto con un átomo de oxígeno reducido se generará una molécula de agua. Tal reacción electroquímica es exotérmica, por lo que además el calor desprendido puede ser utilizado como sistema de cogeneración y así aumentar la eficiencia de las celdas de combustible.

Estas características de lograr alta eficiencia durante la generación de electricidad y la ventaja de presentar cero emisiones contaminantes cuando el combustible es hidrógeno, el cual se puede producir sin contaminación utilizando la energía solar, así como otras fuentes de energía renovables, hacen de las celdas de combustible los mejores candidatos para la generación de energía eléctrica. Por otra parte, también ofrecen la posibilidad de utilizar casi cualquier combustible que contenga hidrógeno, aunque hidrocarburos como el gas natural, metanol, etanol, biogás y propano, así como el diesel y la gasolina son los que mayor atención han recibido por razones de tipo práctico, aunque las celdas de combustible normalmente funcionan con hidrógeno en estado gaseoso puro.

2.2 TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y SUS PRINCIPALES DIFERENCIAS

Las celdas de combustible son en realidad una familia de tecnologías que usan diferentes electrolitos y que operan a diferentes temperaturas. Por ello se puede hablar de celdas de combustible de alta temperatura Fig. 14, las cuales operan a temperaturas mayores a 200 °C y las de baja temperatura, cuya operación puede llegar sólo hasta los 200 °C.



*Fig. 14 Celda de Combustible
Cortesía: Siemens AG, Planta de Alta Temperatura*

Una variación derivada de la temperatura de operación es el empleo de diferentes materiales, principalmente electrolitos ya que a temperaturas elevadas deben ser utilizados electrolitos no acuosos. La clasificación de alta y baja temperatura es quizá la más adecuada, debido a las aplicaciones que unas y otras celdas tienen.

En general, las celdas de combustible de alta temperatura tienen como objetivo principal la generación de energía eléctrica para una potencia mayor a 1 MW Fig. 14, mientras que las de baja temperatura se están diseñando para salidas menores a 1 MW.

La razón por la que las celdas de combustible de alta temperatura están diseñadas para aplicaciones de generación de alta potencia es su mayor eficiencia, comparada con la eficiencia de las de baja temperatura.

Ello se debe parcialmente a que las reacciones de oxidación y de reducción no requieren de materiales electrocatalizadores, ya que ocurren con mayor facilidad. Los electrocatalizadores son necesarios cuando las reacciones ocurren a baja temperatura y generalmente son materiales costosos basados en metales nobles como el platino.

Por otra parte, la generación de vapor de alta temperatura con suficiente energía calorífica en las celdas de alta temperatura favorece la cogeneración mediante el empleo, por ejemplo, de turbinas de gas, ciclos convencionales de vapor o ambos, incrementando así la eficiencia.

En la actualidad, el estado de la tecnología de las diferentes celdas de combustible puede describirse en la Tabla 2, la cual muestra algunas características de las celdas y las temperaturas a las cuales operan.

Tabla 2. TIPOS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE Y CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

TIPO DE CELDA	ELECTRO-LITO	APLICACIÓN INMEDIATA	(MW)	DISPONIBLE COMERCIALMENTE	EFICIENCIA CONV. ELÉCTRICO (COGENERACIÓN)	TEMP. DE OPERACIÓN/ELECTROCATALIZADOR
PEM	Membrana de intercambio protónico	Generación distribuida, transporte y aplic. móviles	Hasta 0.25	1997 (-1 kW) 2002 (transp.) 2001 (250 kW)	>40% (>70%)	80°C/Pt
PAFC	Ácido fosfórico	Generación distribuida, cogeneración y transporte	0.2 - 10	1996 (200 kW) 1992 (transp.)	40% (80%)	200°C/Pt
MCFC	Carbonato fundido (sal fundida "inmóvil")	Generación distribuida, cogeneración, poten. central	0.25 - 100 (y mayor)	1997 2000	45% (70%)	650°C/Ni
SOFC	Óxido sólido (cerámico)	G. distrib. poten. central	1 - 10 50 (y mayor)	2000	> 50% (> 80%)	1000°C/ perovskitas
ALCALINAS	Hidróxido de Potasio	Generación distribuida, transporte y aplic. móviles			>70% (85%)	

Fuente: Boletín IIE, septiembre de 1999.

2.2.1 Celdas de Ácido Fosfórico (PAFC)

Este tipo de celda es el más desarrollado comercialmente y ya se encuentra en uso en aplicaciones tan diversas como clínicas y hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y varias terminales aeroportuarias; también puede utilizarse en vehículos grandes como autobuses, de los que ya existen proyectos demostrativos. Las celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad utilizando gas natural a más de 40% de eficiencia y cerca de 85% si el vapor que produce se emplea en cogeneración.

El uso de un electrolito corrosivo como el ácido fosfórico y potencialmente peligroso de manejar tiende a restar la preferencia sobre este tipo de celda por parte de algunos usuarios, sin embargo sus ventajas y beneficios han sido muy bien explotados y comercializados por compañías como ONSI.

2.2.2 Celdas de Carbonatos Fundidos (MCFC)

Las celdas de combustible de carbonatos fundidos utilizan sales fundidas como electrolito y prometen altas eficiencias combustible-electricidad, así como la habilidad para consumir combustibles base carbón, incluyendo CO y biocombustibles. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 650°C y permite la reformación del combustible (extracción del hidrógeno contenido en hidrocarburos) dentro de la propia celda, además de que no necesita electrocatalizadores de metales nobles. Ya se probó la primera celda de carbonato fundido a gran escala y se han preparado algunas unidades para demostración en California. Algunas desventajas son la corrosividad de las sales fundidas y la necesidad de reposición de CO₂ en el cátodo para recuperación y formación de iones carbonato.

2.2.3 Celdas de Óxido Sólido (SOFC)

Otra celda de combustible altamente prometedora por sus bajos costos de fabricación y su capacidad de operar a costos competitivos (principalmente en unidades pequeñas) es la celda de combustible de óxido sólido, la cual podría ser usada en aplicaciones de potencia, incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala e industrial. Este tipo de celda no utiliza electrolitos corrosivos sino electrolitos en estado sólido y presenta diversas ventajas técnicas, un sistema de óxido sólido normalmente utiliza un material sólido cerámico (zirconia estabilizada de ytrio) en lugar de un electrolito líquido, permitiendo que la temperatura de operación alcance los 1000°C.

Las eficiencias de generación de potencia pueden alcanzar un 60% sin cogeneración, al tiempo que la cinética de reacción en estas celdas es muy rápida y no requiere reposición de CO_2 en el cátodo.

Al igual que las MCFC, el hidrocarburo alimentado puede ser reformado dentro de la celda, este tipo de celda utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud, cuya disposición permite alcanzar mayores eficiencias (Unidad Siemens Westinghouse), mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido, semejando la parte superior de una lata de sopa y ofrecen ventajas potenciales de fabricación y eficiencia [Douglas, J., 1994].

Esta facilidad de morfología es producto de poder vaciar el material sólido en diferentes formas durante la fabricación haciéndolas, por ejemplo, laminares, tubulares o monolíticas. Su eficiencia es mayor a 80% cuando el calor producido es empleado en cogeneración. Ya se está terminando una prueba de 100kW en Europa, mientras que dos pequeñas unidades de 25kW ya se encuentran en línea en Japón.

2.2.4 Celda de Polímero Sólido o Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

Estas celdas utilizan como electrolito una membrana polimérica conductora de protones. Dicha membrana se encuentra entre dos electrodos porosos impregnados en el lado de la membrana con un electrocatalizador (usualmente Pt) y un material hidrofóbico del otro lado. Operan a temperaturas relativamente bajas aproximadamente 80°C , tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial alta Fig.15.

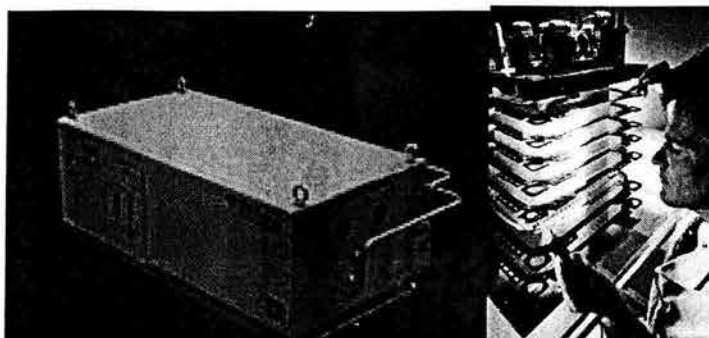


Fig. 15 Celdas de Combustible PEM 5kW Utilizadas en Naves Aeroespaciales por la NASA

El único líquido que maneja la celda PEM es agua, por lo que los efectos por corrosión son mínimos. La presente tecnología permite fabricarlas en un modo tan compacto que una celda puede tener el grosor de una hoja de papel y generar varios mA de corriente por centímetro cuadrado, esto es, densidades de corriente superiores a los otros tipos de celdas. Desarrollos recientes evitan que el combustible tenga que ser presurizado para aumentar la eficiencia del sistema [H. Dhar, 1999] y que el manejo del agua sea controlado para evitar la “inundación” de los electrodos porosos empleados manteniendo, al mismo tiempo, la necesaria humedad en la membrana para que ésta pueda conducir iónicamente las cargas positivas provenientes del ánodo.

Presiones actuales de operación se encuentran alrededor de valores de 30psi en potencias de hasta 285kW, sin embargo adecuados colectores de corriente y estructuras soporte pueden llevar a las celdas PEM a presiones de operación hasta de 3 000psi, lo cual incrementa principalmente el voltaje de la celda y la densidad de corriente. En general, el desempeño de las celdas PEM es muy variado, ya que éste depende de la presión, temperatura y calidad de los gases, entre otros parámetros.

El desempeño actual de las celdas PEM está representado por resultados del laboratorio nacional de Los Alamos, Estados Unidos, en donde se han mostrado valores de 0.78 V por celda a corrientes de $200\text{mA}/\text{cm}^2$ a presiones de 3atm de hidrógeno y 5atm de aire, usando cargas de Pt de $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$.

Este tipo de celda produce calor útil que no puede ser utilizado en cogeneración, pero que puede aprovecharse en sistemas de calefacción y agua caliente, por ejemplo para aplicaciones residenciales y de oficina. Gran parte del éxito mostrado por esta celda se debe a los avances en materiales con propiedades físicoquímicas más favorables para este sistema.

También es en el área de materiales en donde se esperan mejoras adicionales, las cuales están concentradas principalmente en los electrocatalizadores tanto en su sustitución por otros menos costosos como en el mejor diseño de electrodos porosos para así bajar la carga del electrocatalizador. Otros componentes como los colectores de corriente, los cuales también juegan el papel de distribuidores de gases y las placas finales de la celda, son objeto de investigación en Universidades e Instituciones Académicas, en donde se han convertido en principales contribuyentes y proveedores de los desarrollos tecnológicos clave para fabricantes de celdas.

El IIE se encuentra trabajando junto con otras Instituciones en esta dirección [Malo, T.J. et al., 1999] para mejorar componentes de este tipo de celdas de combustible tanto en el área de colectores de corriente como electrodos porosos.

Las celdas PEM son los principales candidatos para vehículos ligeros, como se ejemplifica en la Fig.16 y prácticamente todos los gigantes de la industria automotriz han prometido llevar sus autos, ya en demostración, en etapa comercial, en los primeros cinco años del 2000.



Fig. 16 Prototipos de autos que operan con Celdas de Combustible
Cortesía: GMeinHywireSacramento

Otra aplicación importante es en la generación distribuida y muestra de ello es que Ballard ha lanzado el plan de comercialización de su celda PEM de 250kW [J. Barrigh, 1999], la cual consume gas natural y cuya primera unidad debe ser comisionada este mismo año a un centro naval en Indiana, Estados Unidos. Otras aplicaciones mucho menores como la sustitución de baterías recargables en videocámaras, telefonía inalámbrica, además de aplicaciones residenciales, se encuentran entre los mercados potenciales de las celdas PEM Fig.17. Sin duda un tipo de celda que a corto plazo verá apertura de varios mercados que faciliten su comercialización y, por lo tanto, aumento en sus volúmenes de producción, con la consecuente disminución en sus costos iniciales.

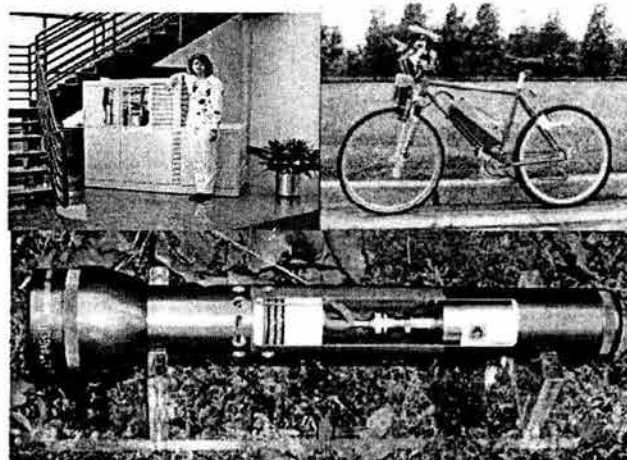


Fig. 17 Diferentes Aplicaciones de las Celdas de Combustible PEM
Casa Habitación, Bicicleta adaptada, Lámpara Maglite BZ a partir de ZSW

2.2.5 Celdas Alcalinas

Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales Fig. 18, este tipo de celdas pueden alcanza eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%.

Estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito y hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales, pero varias compañías están encontrando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación.

No requieren materiales nobles como catalizadores, ya que la dificultad de reducción de oxígeno presente en otras celdas de baja temperatura es mínima, por lo que pueden operar a temperaturas bajas.

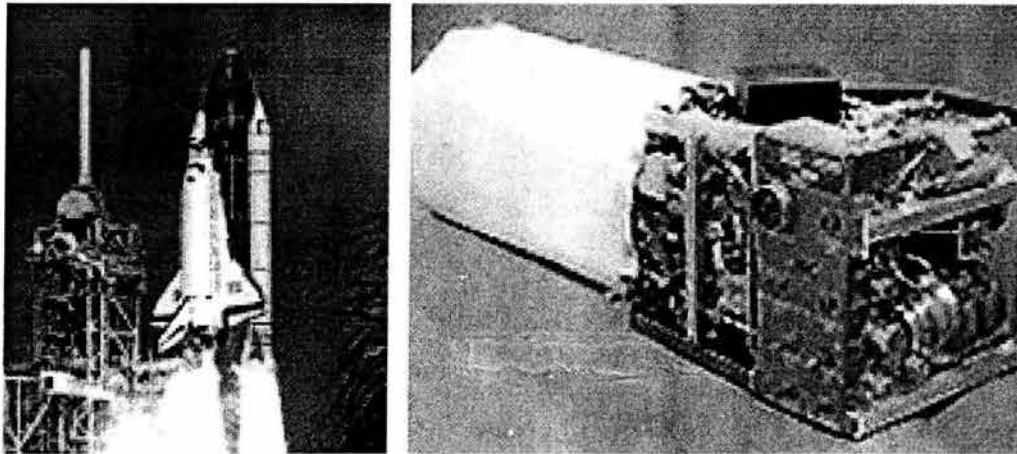


Fig. 18 Celdas Alcalinas, Cortesía: Space Shuttle

Un factor adverso de estas celdas es el efecto nocivo que el CO_2 produce al reaccionar con el hidróxido presente, lo que genera la necesidad de un combustible altamente puro, ya sea como hidrógeno puro o bien mediante sistemas caros de limpieza de combustible reformado capaz de reducir al máximo la concentración del gas carbónico en el flujo combustible.

2.2.6 Otras Celdas de Combustible (DMFC)

Nuevos miembros de la familia de celdas de combustible, tales como las DMFC, han surgido como resultado de la necesidad de llevar esta tecnología a terrenos prácticos. Por ejemplo, la compañía canadiense Ballard recientemente compró los derechos de la tecnología, seguramente para explotarla en aplicaciones de transporte, sector en donde Ballard concentra gran parte de sus esfuerzos de comercialización. Esta celda utiliza directamente metanol como combustible sin necesidad de reformación del mismo.

2.3 BENEFICIOS DE LA TECNOLOGÍA DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

En la práctica, las eficiencias en celdas de combustible pueden alcanzar valores entre 50% y 85%, y tienen la particularidad de ser modulares y compactas, por lo que pueden ser construidas de tal manera que satisfagan cualquier tipo de demanda y ser diseñadas “sobre pedido”. Dicha construcción puede realizarse para proveer el voltaje, la carga y la potencia deseada; su rango puede ir de <5 W hasta 100 MW, su potencia de operación es bastante flexible (5 a 100% de su potencia nominal). Cuando se usan en generación distribuida [Moore, T., 1997] se tendrían ahorros considerables al no requerir líneas de transmisión ofreciendo energía eléctrica donde es requerida, otorgando una calidad considerada como “Premium Power” y facilitando además independencia de la red. A la fecha, los costos por kW de esta tecnología disminuyen cada vez más hacia valores altamente competitivos, ubicándose hoy en día alrededor de los 1 500 dólares/kW, este costo tendrá una disminución adicional a medida que los volúmenes de producción aumenten.

Las diferentes tecnologías de celdas de combustible hacen que haya flexibilidad en el combustible a usarse, lo cual favorecería su pronto uso, al considerarse que la infraestructura existente, por ejemplo para transporte, podría soportar el manejo de combustibles como metanol, etanol, etano, metano, incluyendo el uso de la propia gasolina (oxidación parcial), diesel y gas natural, entre otros. Esta tecnología ha demostrado una disponibilidad mayor a 95% en todos los proyectos demostrativos actuales y vida útil de veinte mil a cuarenta mil horas en generación estacionaria y de cinco mil y diez mil horas para aplicaciones en transporte (autos y autobuses respectivamente). Las celdas de combustible son silenciosas (60 dB a 30 metros), ya que no contienen partes móviles, por lo que además no requieren sistemas de lubricación

Pueden ser independientes de la red de potencia o bien estar conectadas a ella con independencia en caso de falla. El control de sus principales variables se presta para hacer su operación completamente automática.

Sus costos de mantenimiento son menores y se ha estimado un ahorro en el costo de servicio eléctrico de un 20 a un 40% usando celdas de combustible, comparado con generación por combustión interna [Departamento de Energía de Estados Unidos, 1998].

2.4 COMPARACIÓN CON TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN CONVENCIONALES

Los mayores avances en generación de energía eléctrica a partir de tecnologías convencionales están representados por aquellos surgidos del programa ATS (Advanced Turbine Systems), sistemas modernos de turbina (del Departamento de Energía de los Estados Unidos) para sistemas de generación de ciclo combinado.

Dichos avances han alcanzado límites históricos al conseguir diseños de sistemas de turbinas a gas con eficiencias que prometen mejoras de 15% en sistemas industriales, mientras que centrales de potencia utilizando sistemas de ciclo combinado (sistemas con dos o más fuentes de electricidad a partir del mismo combustible) podrán alcanzar valores alrededor de 55% de eficiencia térmica neta.

Estos sistemas operarán a costos 10% menores que los actuales sistemas y reducirán los niveles de NOx , CO₂ , CO, e hidrocarburos no quemados según proyecciones del mismo ATS.

A pesar de esto, dichos avances están alcanzando los límites de temperatura de operación de los materiales actuales debido a que la eficiencia del sistema a turbina depende de la temperatura de entrada de los gases, limitada por el daño potencial de las hojas de la turbina misma. A diferencia de estos sistemas avanzados, la eficiencia en las celdas de combustible no está limitada por la temperatura.

Desde la perspectiva de gases de efecto invernadero, las celdas de combustible representan un desarrollo potencialmente revolucionario, ya que en lugar de utilizar combustión para generar electricidad utilizan la reacción electroquímica entre el hidrógeno del combustible y el oxígeno del aire para producir electricidad, agua y calor. Es también cierto que cuando una celda de combustible utiliza hidrocarburos como fuente de hidrógeno (gas natural, metanol, etc) generalmente requerirá una etapa de reformación para extraer el hidrógeno, lapso durante el cual producirá CO₂.

No obstante, gracias a su capacidad de obtener altas eficiencias de conversión combustible/electricidad, las celdas de combustible producen la menor cantidad de CO₂ de cualquier tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar electricidad, por lo

que las emisiones de este gas por kWh producido son mucho menores en las celdas de combustible, que los valores prometidos, por ejemplo, por los sistemas avanzados de turbina tanto en los sistemas actuales como en los sistemas proyectados en los próximos años de ambas tecnologías [Boosting Powerplant Efficiency, 1998] (Tabla 3).

Otra diferencia fundamental es la alta flexibilidad que tienen las celdas para aceptar una gran diversidad de combustibles, lo cual las ubica como una tecnología que permite una transición hacia tecnologías limpias y el uso de fuentes de energía renovables.

Las celdas de combustible ya se consideran como elementos clave para sistemas híbridos que las integran, junto con tecnologías avanzadas de turbinas, en donde se espera que para el año 2010 operen a eficiencias del 80%. No sólo son las tecnologías convencionales las que pueden beneficiarse de las ventajas de las celdas de combustible, también otros sistemas basados en fuentes renovables de energía pueden integrarlas en sistemas híbridos en donde, por ejemplo, biogás sea alimentado a la celda o bien celdas fotovoltaicas alimenten un electrolizador (celda electroquímica comercial de generación de hidrógeno y de eficiencias entre 60 y 85%) para generar hidrógeno y alimentar la celda de combustible.

Estos sistemas híbridos mantendrían relaciones costo/beneficio en niveles interesantes gracias a las altas eficiencias de conversión de las celdas de combustible, lo cual significaría otro atractivo para impulsar un mayor desarrollo de tecnologías como la solar, la biomasa, la eólica, etc, que desafortunadamente pocas veces se consideran soluciones para demandas crecientes, limpias y eficientes de energía eléctrica.

Tabla 3. COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS AVANZADAS DE TURBINA Y LAS TECNOLOGÍAS DE CELDAS DE COMBUSTIBLE

Tecnología Avanzada	PRIMERA GENERACIÓN (2000-2010)		GENERACIÓN AVANZADA (POSTERIOR 2010)	
	Eficiencia combustible/electricidad (LHV)	Reducciones en CO ₂	Eficiencia combustible/electricidad (LHV)	Reducciones en CO ₂
Sistemas avanzados de turbina	60%	19%	65%	18%
Celdas de combustible	70%	32%	70%	27%

- LHV: (Lower Heating Value). No se considera condensación del agua (10.54 kcal/mol).
 - Las reducciones de CO₂ son comparadas con tecnologías convencionales usadas en plantas que queman gas natural (2.2 kg CO₂ /kWh en 2004 y 2.03 kg CO₂ /kWh en el 2010).
 - Las reducciones relativamente menores posteriores al 2010 se deben a que las tecnologías avanzadas están siendo comparadas con proyecciones de mejora en tecnologías convencionales a gas natural en el mismo marco de tiempo.
- Fuente: Boosting Power Plant Efficiency, Departamento de Energía de los Estados Unidos, Energía de Origen Fósil, 1998.

2.5 SITUACIÓN NACIONAL

Los beneficios descritos a lo largo de este trabajo son claramente aplicables en cualquier parte del mundo. México, como país en desarrollo, presenta uno de los crecimientos en demanda de energía eléctrica más altos del orbe con valores de 5.8 a 6% anual. Las estrategias energéticas actuales requieren un mejor uso de combustibles (tecnologías más eficientes). Las políticas ambientales cada vez más estrictas en todo el planeta exigen pronta solución a los problemas de contaminación y demandan niveles de emisiones cada vez más bajos.

La inestabilidad de los precios del petróleo están forzando a países como el nuestro a estimular una economía menos dependiente de este energético, mientras que, a su vez, países compradores del petróleo ven en las celdas de combustible una solución a la búsqueda de independencia energética a corto y mediano plazos.

Por ejemplo, el Departamento de Energía de los Estados Unidos proyecta que si 10% de los autos de ese país usaran celdas de combustible, se reducirían unos 800 mil barriles diarios de las importaciones de petróleo (alrededor del 13% del total que ese país importa).

Sabiendo que en 1998 México exportó cerca de 1.4 millones de barriles diariamente y considerando un precio de 20 dólares por barril, el uso de celdas de combustibles en Estados Unidos implicaría que nuestro país estaría perdiendo 28 millones de dólares diarios. México tiene a los Estados Unidos como su principal comprador del hidrocarburo, el cual destina millones de dólares anuales en la tecnología de celdas de combustible buscando tanto su independencia energética como, obviamente, conservar su liderazgo tecnológico.

Las reservas oficiales mexicanas de petróleo son de alrededor de 24 mil millones de barriles, esto es, petróleo para 32.8 años y se podría duplicar su duración al emplear una tecnología como las celdas de combustible al disminuir el consumo nacional actual de casi dos millones de barriles diarios reportado para 1998, en la generación de energía eléctrica, así como en nuestros autos e industria (si se considera que estos son los sectores principales de consumo del hidrocarburo).

Por otra parte, el uso más eficiente de gas natural puede ayudar a reducir las importaciones del mismo. En relación con los beneficios ambientales y por lo tanto de salud, en Estados Unidos se proyecta que si tan sólo 10% de los autos de ese país fueran movidos por celdas

de combustibles, se reduciría un millón de toneladas al año de contaminantes, y 60 millones de toneladas de dióxido de carbono (uno de los gases causantes del efecto invernadero) serían completamente eliminados.

Nuestro país tiene en urbes como la ciudad de México la mayor concentración de autos movidos por motores de combustión interna, y todo indica que la quema de combustibles como la gasolina seguirá en aumento, al igual que las concentraciones de emisiones. Así, programas como el de “no circula” tendrán que ir en aumento al mismo tiempo que el número de vehículos se incrementa.

Aunque se está promoviendo el uso de gas natural en vehículos automotores, la próxima entrada de autos movidos por celdas de combustible podría desplazar a los primeros, al ofrecer mejor rendimiento en el combustible por la alta eficiencia de las celdas. El impulso del uso de gas natural en México no sólo en vehículos sino en la generación de energía eléctrica y como combustible en la industria, podrá obtener un mejor beneficio al alargar las reservas de este gas mediante su eficiente aprovechamiento en las celdas de combustible.

Finalmente, el empleo del hidrógeno directamente en las celdas de combustible aún presenta retos relacionados con la generación de este gas y con su almacenamiento; sin embargo, las celdas de combustible, además de ofrecer el medio para generar electricidad con cero emisiones contaminantes a futuro, hoy en día permiten tener a nuestra disposición una alternativa altamente flexible que puede adecuarse a prácticamente cualquier necesidad energética a corto, mediano y, desde luego, largo plazos.

CONCLUSIONES

Una posible solución al gran caos que se ve venir en el sector eléctrico, no sólo en México, sino en todo el mundo, son las celdas de combustible que debido a sus altas eficiencias, así como la gran versatilidad en la utilización de casi cualquier combustible que contenga hidrógeno, aunque generalmente funcionan con gas hidrógeno puro, para lograr una eficiencia mayor. Las emisiones contaminantes son nulas o casi nulas (dependiendo de cómo se suministre el oxígeno, ya sea puro o tomado del aire), además del impulso a un mayor desarrollo de las tecnologías base energías renovables que contribuirán grandemente a mejorar no sólo el medio ambiente sino nuestro hábitat, sin mencionar el gran beneficio en el sector salud que ocasionaría.

En relación a los costos, cabe mencionar, el costo por kW de esta tecnología cada vez disminuye más hacia valores altamente competitivos, ubicándose en 1500 dls/kW, que continuará disminuyendo al aumentar los volúmenes de producción.

Finalmente es preciso mencionar, el empleo del hidrógeno directamente en las celdas de combustible aún presenta retos relacionados con la generación de este gas y con su almacenamiento; sin embargo, las celdas de combustible, además de ofrecer el medio para generar electricidad con cero emisiones contaminantes a futuro, hoy en día permiten tener a nuestra disposición una alternativa altamente flexible que puede adecuarse a prácticamente cualquier necesidad energética a corto, mediano y, desde luego, largo plazo.

Capítulo III

A woman in a blue dress is shown from the waist up, holding a glowing, ethereal orb in her hands. She is looking upwards against a dark blue night sky filled with stars and a bright light source in the upper right corner. The overall scene is magical and ethereal.

Después del intentar adentrar o justificar el tema central de la tesis a través de los dos primeros capítulos.

Podemos continuar con la descripción técnica del prototipo propuesto para generar electricidad vía hidrógeno solar, en una casa habitación de la ciudad de México. Así como el funcionamiento básico de cada uno de los componentes y flujos tanto másicos como energéticos.

Donde se mencionan los diferentes casos de estudio plenamente justificados, para terminar realizando un estudio de factibilidad energética del sistema, basado en el método de análisis de Valero y Tsatsaronis, llamado "Análisis exergo económico".

III. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS ENERGÉTICOS DEL DISPOSITIVO PRODUCTOR DE ELECTRICIDAD

3.1 DISPOSITIVO PRODUCTOR DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El llamado ciclo del hidrógeno solar consta como muestra el Diagrama 2 de:

1. Una energía renovable con su dispositivo convertidor correspondiente, en este caso un panel fotovoltaico que aprovecha la energía solar.
2. Un regulador de voltaje.
3. Una unidad electrolítica.
4. Un sistema de almacenamiento tanto para el hidrógeno como para el oxígeno, o el almacenamiento solo para el hidrógeno y tomando el oxígeno del aire.
5. Una celda de combustible, alcalina particularmente para esta aplicación.
6. Un convertidor CD a CA.

Este es un prototipo generador de electricidad vía hidrógeno, en el cual se integra modularmente los adelantos en la captación de las fuentes de energía renovables (en este caso la solar) y las tecnologías para el almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno, como una posible solución, apoyándose en los ciclos termodinámicos y en las celdas de combustible como demostración de la efectividad de esta propuesta.

Diagrama 2

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO

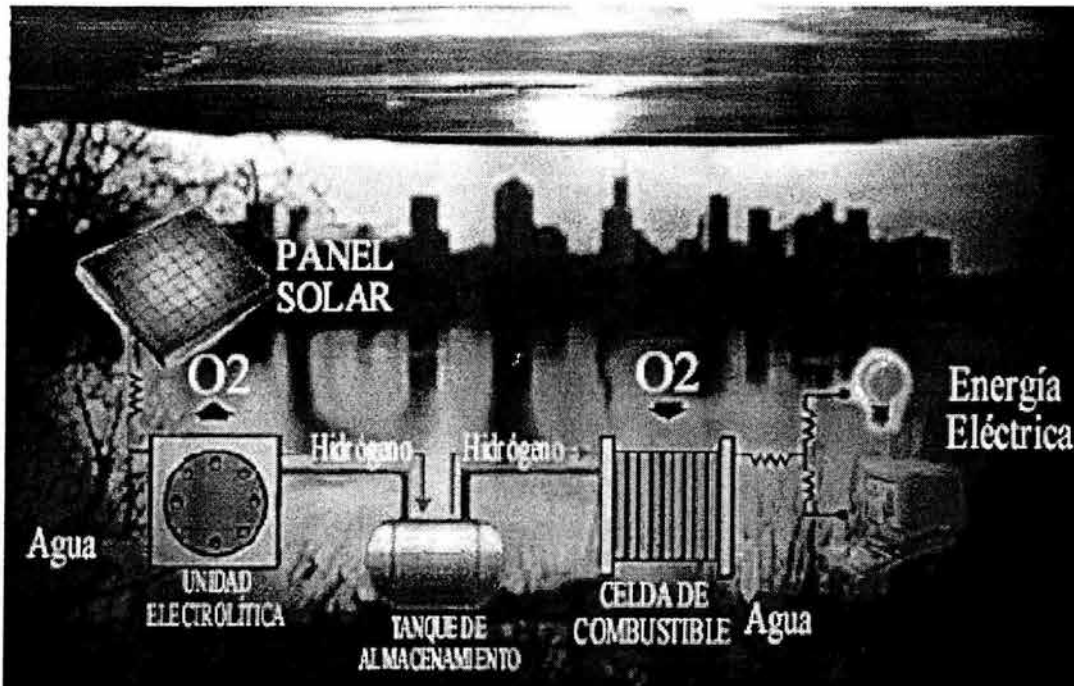


Diagrama 2 Diagrama de bloques del Ciclo de Hidrógeno que consta de:
a) Arreglo fotovoltaico, b) Electrolizador,
c) Almacenamiento de Hidrógeno, d) Celda de Combustible, e) Usos.

El Diagrama 2, muestra como la energía eléctrica que sale del arreglo fotovoltaico es usado para la electrólisis del agua. El Hidrógeno producido es almacenado en un pequeño tanque a presión en forma de gas y utilizado en una celda de combustible para transformarlo en electricidad de acuerdo a los requerimientos de energía de los usuarios.

Los requerimiento anuales promedio de energía eléctrica de una familia se calcularan a través de un sondeo de los habitantes de la zona, en este caso en México D.F., el cual es aproximadamente 2 000 kWh/año.

3.2 DEFINICIÓN DEL MODELO

Como ya mencionó el sistema consta de los siguientes equipos con su función respectiva
Tabla 4:

Tabla 4. EQUIPOS Y FUNCION QUE DESEMPEÑAN EN EL PROTOTIPO

	EQUIPO	FUNCIÓN
1	Panel Solar	Capta la radiación solar y la transforma a energía eléctrica
2	Regulador de Voltaje	Debido a que la salida del panel solar es difusa e intermitente, el equipo se encarga de regular el voltaje de salida de una forma constante
3	Celda Electrolítica	Se encarga de reducir el agua que entra al equipo en hidrógeno y oxígeno gaseoso, al hacer pasar un flujo de corriente eléctrica a través de el
4	Almacenamiento de Hidrógeno	Contiene al hidrógeno producido en la celda electrolítica, mientras no sea requerido
5	Almacenamiento de Oxígeno	Contiene al oxígeno producido en la celda electrolítica, mientras no sea requerido
6	Celda de Combustible (Alcalina)	Actuará de forma inversa al electrolizador, para producir energía eléctrica a partir de la reacción química del hidrógeno y el oxígeno para producir agua
7	Cambiador CD/CA	Como la electricidad que utilizamos actualmente para satisfacer las necesidades eléctricas cotidianas se requiere en forma de corriente alterna, es necesario transformar la corriente directa producida en el proceso
8	Válvula de Almac. del Hidrógeno	Esta se encuentra localizada a la salida del tanque de almacenamiento, la cual regulará el flujo másico del hidrógeno requerido en la celda de combustible
9	Válvula De Almac. del Oxígeno	Esta se encuentra localizada a la salida del tanque de almacenamiento, la cual regulará el flujo másico del oxígeno requerido en la celda de combustible

Y sus corrientes o flujos principales se describen en la Tabla 5.

Tabla 5. CORRIENTES Y FUNCIÓN QUE DESEMPEÑAN EN EL PROTOTIPO

CORRIENTE	FUNCIÓN	CORRIENTE	FUNCIÓN
1	Flujo de radiación solar	11	Flujo de oxígeno que no es almacenado y entra a la celda de combustible
2	Flujo eléctrico que sale del panel solar	12	Flujo eléctrico obtenido de la reacción del hidrógeno y el oxígeno
4	Flujo eléctrico que se utiliza directamente, después del cambio a CA, en la casa	13	Electricidad en forma de corriente alterna obtenida por la suma de las corrientes 4 y 12
5	Flujo eléctrico necesario para la electrolisis del agua	14	Flujo másico de agua necesario para la electrólisis
6	Flujo másico de hidrógeno	16	Flujo másico de agua, producto de la reacción entre el oxígeno y el hidrógeno
7	Flujo másico de oxígeno	5p	Pérdidas de masa y energía generadas en el electrolizador
8	Flujo másico de hidrógeno que pasa por el tanque de almacenamiento	6p	Pérdidas de masa y energía generadas en el tanque de almacenamiento del hidrógeno
9	Flujo de hidrógeno que no es almacenado y entra a la celda de combustible	7p	Pérdidas de masa y energía generadas en el tanque de almacenamiento del oxígeno
10	Flujo másico de hidrógeno que pasa por el tanque de almacenamiento	D6 y D7	Cantidad de hidrógeno y oxígeno respectivamente almacenados

3.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A partir de la descripción básica del sistema, se puede mencionar que el prototipo propuesto teóricamente (aún no se construye), consta de un panel solar el cual capta la energía solar en forma de radiación, que para la Cd. de México es de 1 795 kWh/m²-año, [J.L.F. Sayas, 1992] de aquí llegamos a:

$$E = R * A * e \quad (2)$$

donde:

R= Radiación solar promedio

A= Área del arreglo solar

E= Requerimientos anuales de energía

e= Eficiencia total del sistema

El arreglo solar fue calculado para cubrir las necesidades promedio de una casa habitación que satisfaga los requerimientos cotidianos de energía eléctrica, que a través de un sondeo de los habitantes de la zona se consideran de 2 000 kWh/año. Utilizando los valores presentados en el diagrama 3, donde se mencionan las eficiencias individuales, de aquí la eficiencia total *e* se calcula con:

$$e = e_{ph} * e_c * e_{ec} * e_s * e_{fc} * e_{dc} \quad (3)$$

$$e = (0.15 * 0.95 * 0.88 * 0.95 * 0.65 * 0.91) = 0.0705 \quad (3a)$$

Por lo tanto despejando la ec. 2:

$$A = \frac{E}{R * e} \quad (4)$$

con:

$$E = 2\,000 \text{ kWh año}^{-1} = 0.913 \text{ kWm}^{-2} [\text{Ver Diagrama 4}]$$

$$R = 1\,795 \text{ kWhm}^{-2}\text{año}^{-1} = 0.819 \text{ kWm}^{-2} [\text{Ver Diagrama 4}]$$

$$A = \frac{2000 \text{ kWh/año}}{1795 \text{ kWh/año} \cdot \text{m}^2 (0.0705)} = 15.80 \text{ m}^2 \quad (4a)$$

Diagrama 3
EFICIENCIAS DE CADA EQUIPO DEL SISTEMA

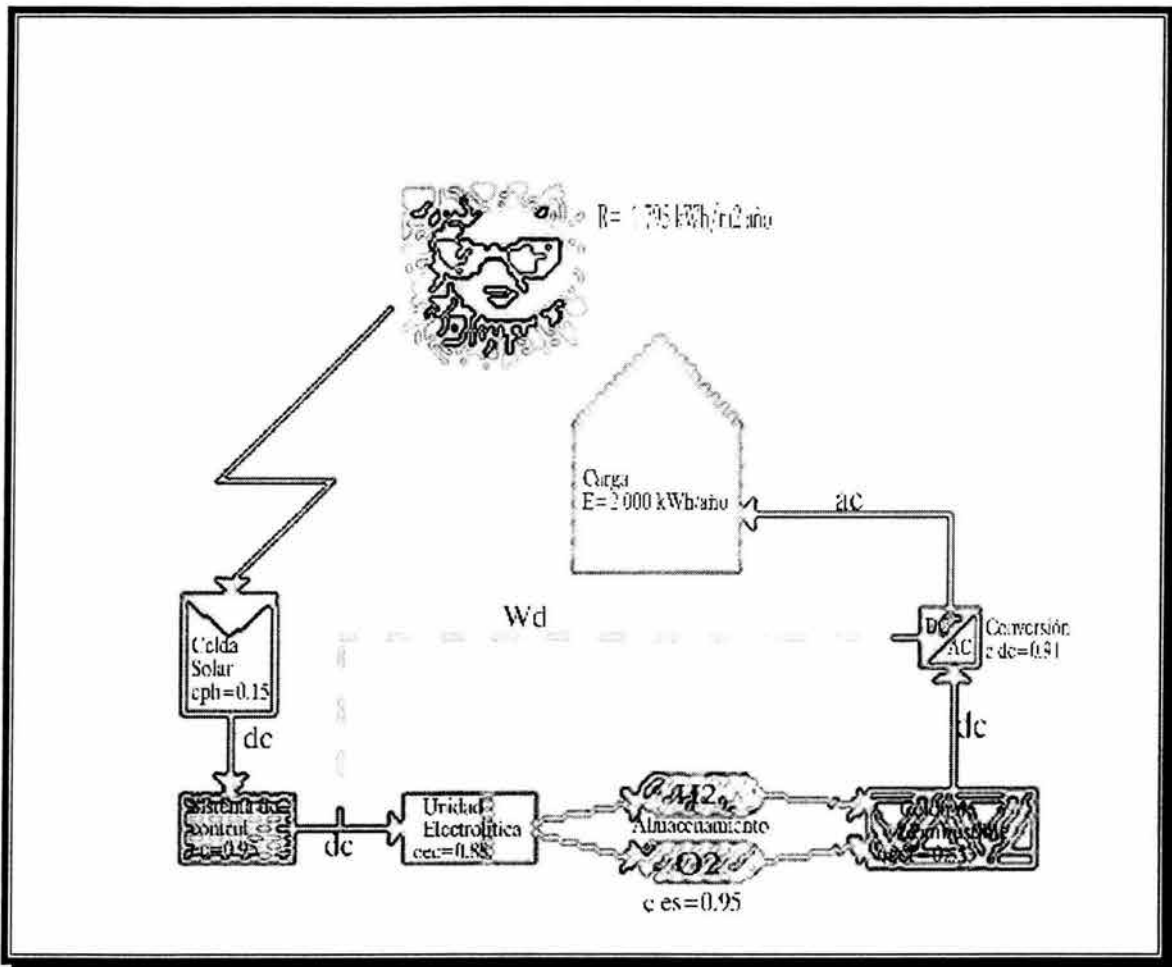


Diagrama 3 Eficiencias de Cada Equipo del Sistema
R = Radiación solar total en México promedio
e = Eficiencia
 W_d = Energía utilizada directamente

Por lo tanto con una eficiencia del sistema total de 7.05% se obtiene un área de los paneles receptores de 15.81 m^2 .

La energía captada por las celdas solares pasa a un regulador de voltaje a 12 V, el cual se encarga de mandar directamente en forma de CD un porcentaje de la energía eléctrica que sale del panel fotovoltaico a un transformador para obtener CA, para su utilización cotidiana en el hogar, y el porcentaje restante (el cual variará según las condiciones climáticas y la cantidad de electricidad requerida por la casa habitación en ese momento), pasa a la celda electrolítica.

La celda electrolítica es alimentada con un flujo de agua calculado estequiométricamente de 2.04 l/día, que con un voltaje necesario de 1.9V enviado del regulador de voltaje y con base en las especificaciones técnicas del proveedor, tales como la potencia por celda igual a 239W y la densidad de corriente que es de 840 mA/cm², haciendo uso de las leyes de Ohm y de Faraday. Se calcula primero la máxima exergía de entrada al electrolizador, que es la exergía de la corriente 5 en los diagramas 5,6,7 (ec. 5)

$$B_5 = R(kW / m^2) * A(m^2) * e_{ph} * e_c \quad (5)$$

$$B_5 = 0.8196kW / m^2(15.8121m^2)(0.15)(0.95) = 1.8468kW \quad (5a)$$

Como necesitamos una exergía total = 1846.8W, y contamos con una potencia por celda de 239W. El número de celdas necesarias (n) es:

$$n = \frac{B_5}{P_{cell}} = \frac{1846.8}{239} = 8celdas \quad (6)$$

De la ley de Ohm:

$$P = VI \quad (7)$$

Despejando I:

$$I = \frac{239}{1.9} = 125.79A \quad (7a)$$

Sabiendo que necesitamos 8 celdas y que el arreglo de las celdas será en forma bipolar, debido a que es un electrolizador a presión:

$$I_T = 125.79A * 8 = 1006.32A \quad (8)$$

Con una densidad de corriente $\rho_c = 840mAcm^{-2}$, y como:

$$\rho_c = \frac{I}{A} \quad (9)$$

Por lo tanto:

$$I = A * \rho_c \quad (9a)$$

Ya que el electrolizador es cilíndrico, el diámetro se calcula:

$$I = \frac{\pi}{4} D^2 \rho_c \quad (9b)$$

Y despejando el diámetro (D).

$$D = \sqrt{\frac{4I}{\pi(\rho_c)}} \quad (10)$$

$$D = \sqrt{\frac{4(125.79mA)}{3.1416(840mA/cm^2)}} = 13.81cm \quad (10a)$$

Se obtiene que el diámetro de cada una de las 8 celdas necesarias es de 13.81cm (suponiendo que la celda es de forma circular).

Calculando los flujos másicos por celda, con un equivalente electroquímico $E=0.0376g/Ah$.

De la 2ª Ley de Faraday:

$$W_{H_2} = \frac{I * E}{1000} = \frac{125.79A * 0.0376g/Ah}{1000g/kg} = 0.0047kg/h \quad (11)$$

Estequiométricamente:



Con pesos moleculares

$$H_2 = 2kg/kgmol$$

$$O_2 = 32kg/kgmol$$

$$H_2O = 18kg/kgmol$$

Se obtienen los siguientes flujos másicos por celda:

$$W_{H_2} = 0.0047kg/h$$

$$W_{O_2} = 0.0378kg/h$$

$$W_{H_2O} = .04257kg/h$$

El flujo másico del agua para 8 celdas es de $0.3405kg/h$, y ahora suponiendo que se cuenta con 6 horas disponibles de sol a estas condiciones, el flujo másico por día de agua es de $2.04kg/día$ cuando se transforma toda la radiación captada en el panel solar a hidrógeno.

Como producto del proceso electroquímico, se tienen hidrógeno y oxígeno gaseoso a 30 bar los cuales, son almacenados en un tanque a presión de 0.4401 y $0.1651m^3$ respectivamente, (que fue diseñado para el almacenamiento de 4 días, suponiendo que toda la energía solar es utilizada para la transformación a hidrógeno [Diagrama 4], mientras estos no sean requeridos.

El flujo necesario es controlado por una válvula reguladora del flujo ubicada a la salida de cada uno de los tanques de almacenamiento. Los flujos de hidrógeno y oxígeno que pasan a través de las válvulas reguladoras, pasan a la celda de combustible, en donde al reaccionar entre sí, nos dan electricidad y como subproducto agua y calor, la energía eléctrica obtenida en forma de CD, pasa al convertidor de CD a CA, que junto con la energía eléctrica que se envió directamente del regulador de voltaje, satisface las necesidades eléctricas de la casa habitación para quien fue diseñado el sistema [Diagrama5].

3.4 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

Para la automatización de los cálculos en este trabajo se realizaron hojas de cálculo, que servirán como simulador, para el cálculo a partir de la radiación solar promedio de cada lugar (corriente 1) y de las horas de insolación. Primeramente la eficiencia total del sistema, con la cual se obtiene el tamaño del panel solar necesario para obtener la energía que satisfaga los requerimientos energéticos de la casa habitación. Al introducir los datos de operación de los posibles paneles existentes en el mercado, dará como resultado la cantidad de celdas fotovoltaicas necesarias para el requerimiento exergético (Diagrama 4).

El regulador de voltaje, como su nombre lo indica, mantendrá el voltaje de salida de la corriente 4 a 12V y el de la corriente 5 a 1.9V, además de contener un actuador el cual regula el flujo de la corriente que irá por la corriente 4 y el que irá por la corriente 5, dependiendo de los requerimientos energéticos que se tengan y de las condiciones climáticas en ese momento.

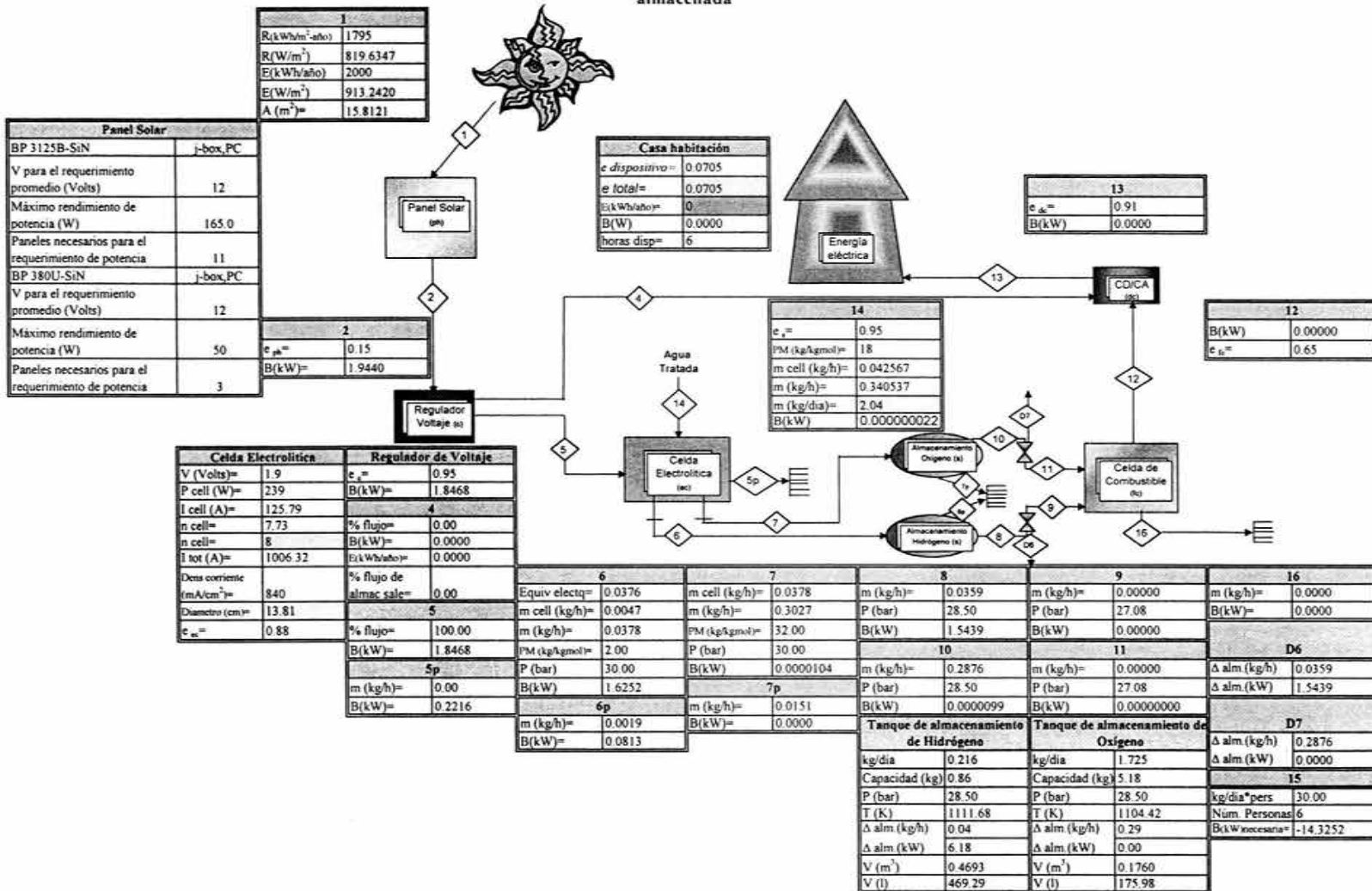
Calculará el diámetro de las celdas electrolíticas y la cantidad necesaria para el suministro del hidrógeno requerido, así como el flujo de agua necesario.

Obtendrá el volumen necesario de los tanques de almacenamiento, en este caso para almacenar el hidrógeno y el oxígeno producido en un período de 4 días, que servirá para suministrar de energía eléctrica en el período de no sol, ya sea por las condiciones climáticas o por el periodo de utilización nocturna.

Además de calcular la cantidad de energía térmica que se necesita para el calentamiento de agua por habitante, y el flujo en forma de calor que se obtiene de la reacción exotérmica que se produce en la celda de combustible, para un posible proceso de cogeneración.

Diagrama 4 Balance de masa, energía y exergía de un dispositivo productor de electricidad

Cuando toda la electricidad captada por el panel solar es convertida a hidrógeno y almacenada



Este patrón sólo se utiliza para el cálculo de los tanques de almacenamiento

3.5 VARIACIONES DE ANÁLISIS

En este trabajo se manejaron tres casos especiales:

1. Cuando toda la electricidad es suministrada por el dispositivo.
2. Cuando una parte de la electricidad es suministrada por el dispositivo y la otra directamente salida del panel solar (Uso cuando existe un día soleado).
3. Cuando la electricidad necesaria es suministrada por la energía almacenada en forma de hidrogeno en el dispositivo (Uso nocturno, cuando no hay energía solar).

3.5.1 CASO 1. Cuando Toda la Electricidad es Suministrada por el Dispositivo

En donde toda la energía captada por el panel fotovoltaico es transformada a hidrógeno y utilizada para satisfacer las necesidades energéticas de la casa habitación. Este es un caso extremo, el cual no tiene caso su aplicación, ya que es absurdo que si tenemos el sol disponible, se deba transformar toda la energía captada por el panel solar a hidrógeno y por lo tanto pasar por todas las etapas de transformación del sistema, disminuyendo así la eficiencia total. Pudiendo evitar la transformación total a hidrógeno, y un gran porcentaje ser mandado directamente del regulador de voltaje al cambiador de corriente directa a alterna, sin embargo este caso es de gran importancia para poder calcular el volumen necesario en los tanques de almacenamiento tanto de hidrógeno como de oxígeno, los cuales fueron calculados para almacenar el hidrógeno y el oxígeno producidos bajo este caso en un período de cuatro días [Diagrama 4]. Otro análisis importante que se pudo evaluar, fue la posible utilización de cogeneración a partir del calor que es desechado por la celda de combustible, para poder satisfacer de energía térmica para el uso en el calentamiento del agua. Pero debido a que es un sistema relativamente pequeño y partiendo de que por persona se necesita un flujo másico diario de 30 kg de agua caliente (a una temperatura de 40°C), suponiendo un solo habitante se

requerirán 4 veces la energía obtenida como calor en la celda de combustible, por lo que los costos de instalación, operación y mantenimiento serían mayores que la energía térmica aprovechable, otra aplicación es cerrando las válvulas que controlan los flujos de hidrógeno y oxígeno, para en el sistema de arranque dejar que los tanques sean llenados inicialmente [Diagrama 7].

3.5.2 CASO 2. Cuando una Parte de la Electricidad es Suministrada por el Dispositivo y la Otra Directamente Salida del Panel Solar (Uso Cuando Existe un Día Soleado)

La energía transformada en el panel fotovoltaico después de pasar por el regulador de voltaje, divide sus flujos dependiendo de las necesidades eléctricas en ese momento requeridas en la casa habitación, este es el sistema que trabajará durante el mayor tiempo de sol, en el cual la mayor parte de la energía eléctrica pasa directamente del regulador de voltaje al convertidor de corriente directa a corriente alterna, disminuyendo las pérdidas de eficiencia, al no tener que pasar por todo el sistema, o sea aumentando la eficiencia del sistema total. El flujo restante pasa a la celda electrolítica la cual es alimentada con agua previamente tratada o en su mejor caso destilada, en donde ocurre una reacción electroquímica, la cual separa la molécula del agua en hidrogeno y oxigeno gaseoso. Cada uno de ellos pasa a un tanque de almacenamiento, en donde un 90% es almacenado (para el período en el que no se dispone de sol) y el 10% restante es alimentado a la celda de combustible, la cual producirá energía eléctrica como producto en forma de corriente directa CD, mas agua y calor como subproductos los cuales son desechados. El flujo eléctrico entra al convertidor CD/CA, y junto con el flujo eléctrico que pasó del regulador de voltaje, satisficará las necesidades de energía eléctrica demandada en ese momento por la casa habitación [Diagrama 5].

3.5.3 CASO 3. Cuando la Electricidad Necesaria es Suministrada por la Energía Almacenada en Forma de Hidrogeno por el Dispositivo (Uso Nocturno, Cuando No Hay Energía Solar)

En este caso la energía almacenada en forma de hidrógeno se utilizará para satisfacer de la electricidad necesaria a la casa habitación, comenzando el proceso a partir de los tanques de almacenamiento de hidrógeno y oxígeno, donde las válvulas controladoras del flujo, permitirán el paso en forma estequiométrica a las corrientes de hidrógeno y oxígeno las cuales entran a la celda de combustible, obteniendo un flujo de corriente directa la cual se transforma en el convertidor a corriente alterna, que es la requerida en la casa habitación [Diagrama 6].

Diagrama 5
Balaceo de masa, energía y exergía de un dispositivo productor de electricidad

Cuando una Parte de la Electricidad es Suministrada por el Dispositivo y la otra Directamente Salida del Panel Solar (Uso cuando existe un día soleado)

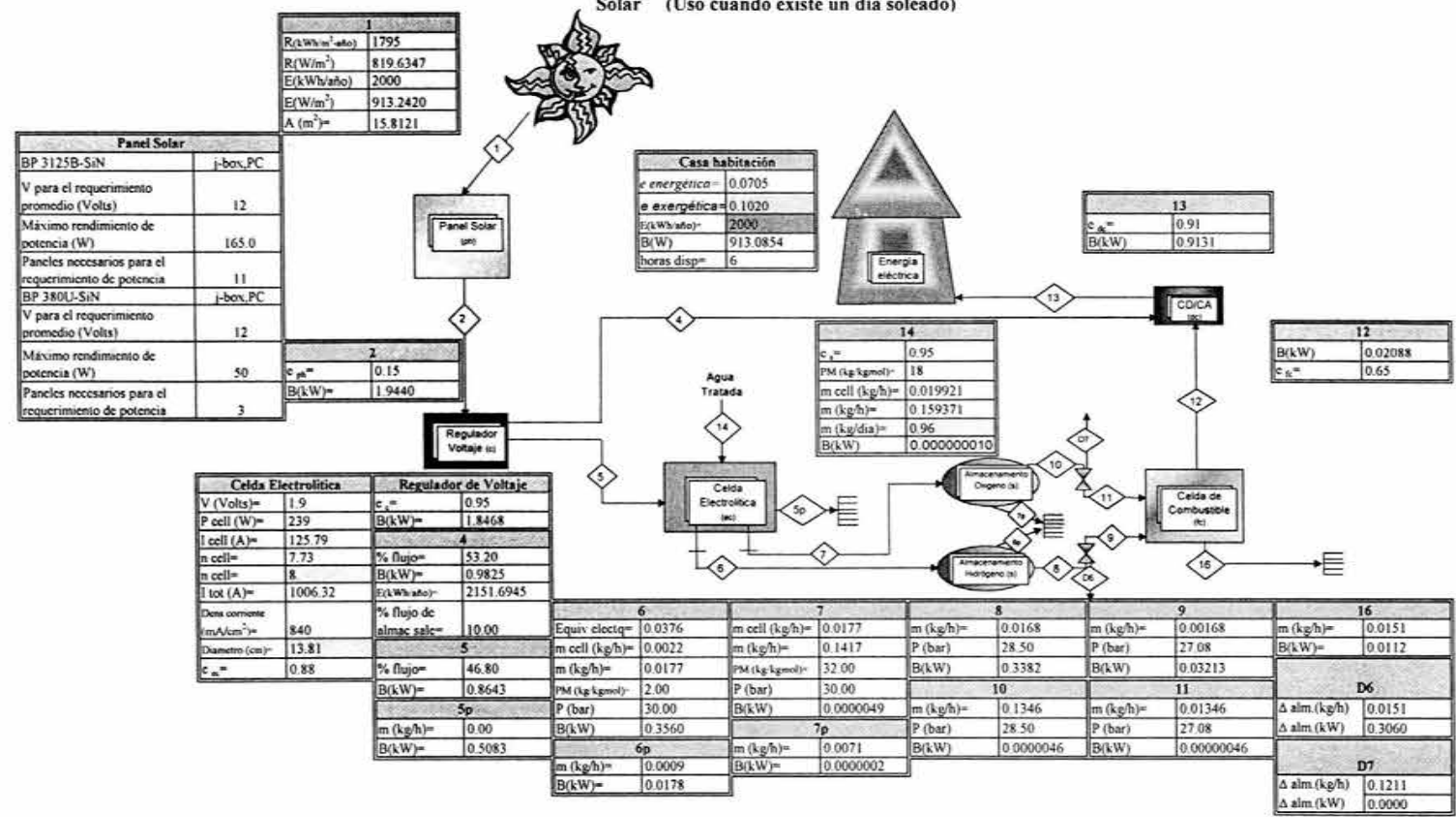


Diagrama 6 Balance de masa, energía y exergía de un dispositivo productor de electricidad

Cuando la Electricidad Necesaria es Suministrada por la Energía Almacenada en Forma de Hidrogeno por el Dispositivo (Uso Nocturno, Cuando No Hay Energía Solar)

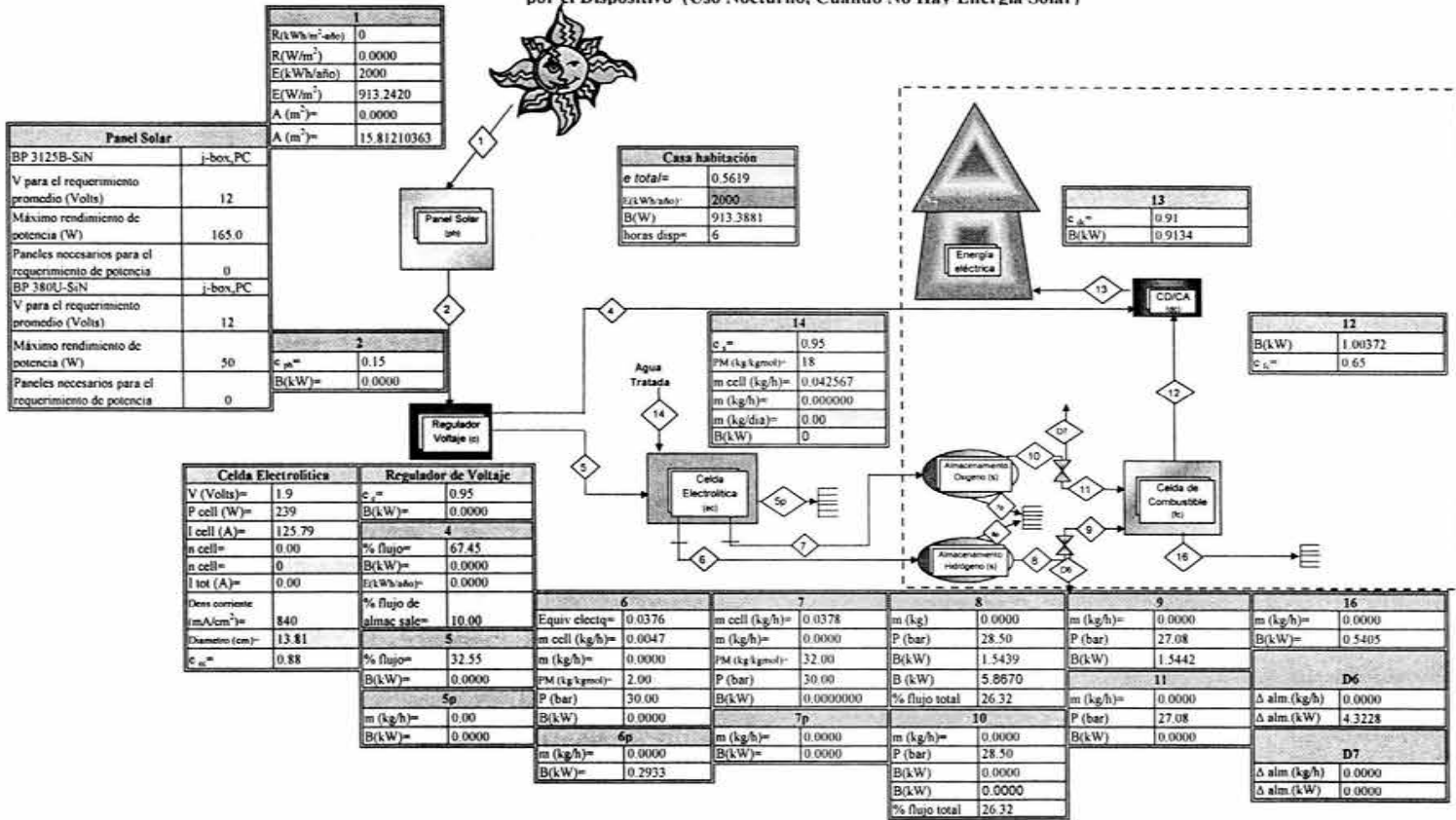
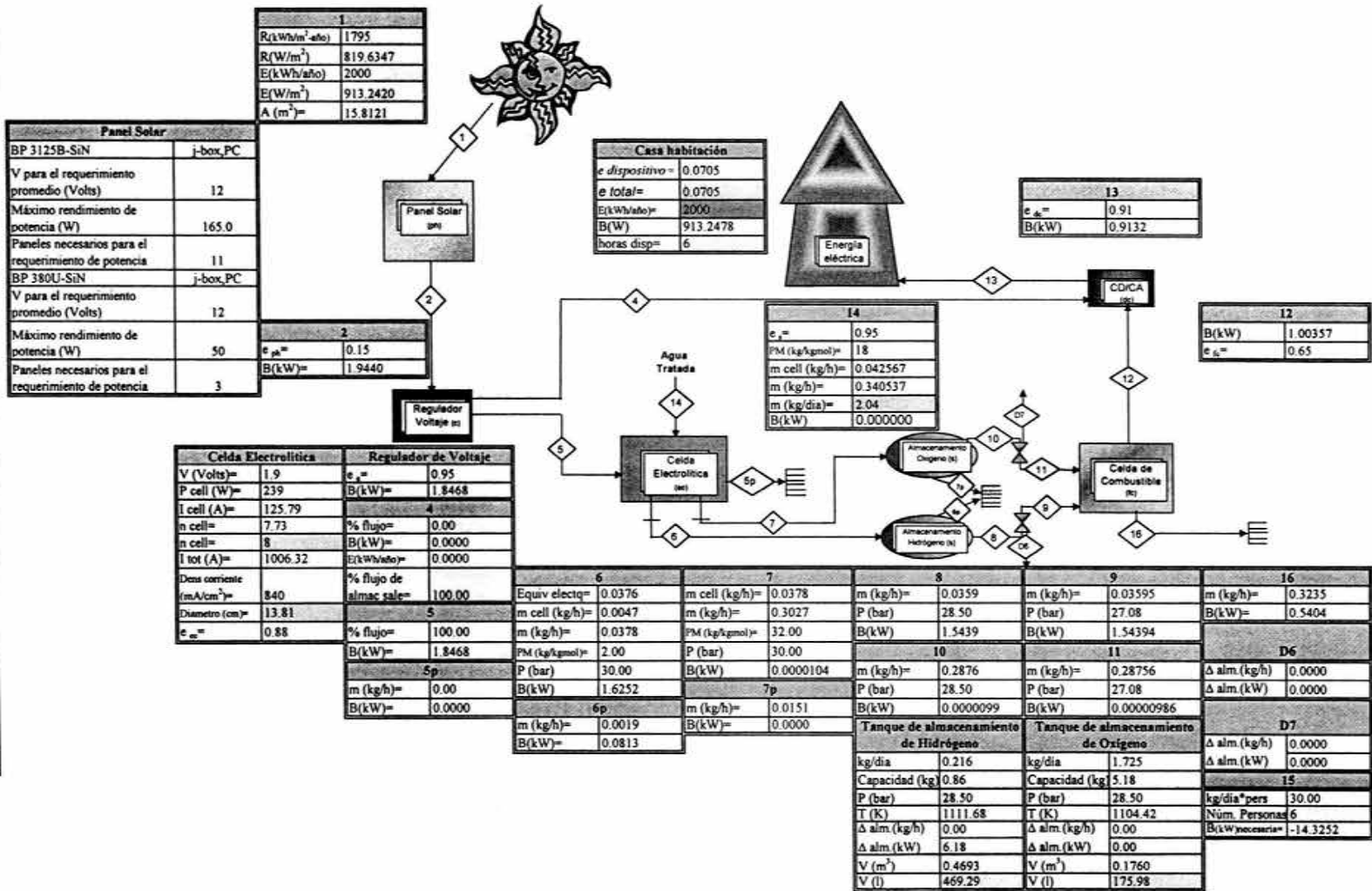


Diagrama 7 Balance de masa, energía y exergía de un dispositivo productor de electricidad

Cuando toda la electricidad es suministrada por el dispositivo



3.6 ANÁLISIS ENERGÉTICO (Termodinámico)

Para realizar el análisis termodinámico de una planta o proceso, esta deberá definirse previamente como un conjunto de equipos o subsistemas, tal que la suma de todos ellos constituyan la planta total, y de otro conjunto de flujos de materia, calor y trabajo a través de los cuales se relacionan o conectan másica y energéticamente los equipos entre si y con el entorno de la planta, que básicamente constituye el Diagrama 4.

Donde la relación entre los flujos y subsistemas se establece mediante la matriz de incidencia $A (n,m)$ siendo n el número de subsistemas y m el número de flujos en la Tabla 6 se presenta esta matriz para el sistema a evaluar. Como se puede observar los elementos de la matriz a_{ij} toman el valor de +1 si el flujo j entra al subsistema i , el de -1 si lo abandona y el de 0 si no existe relación física entre ellos.

En caso de funcionamiento en estado estacionario los balances de materia, energía y exergía podrán plantearse como:

$$A \times M = 0 \quad A \times E = 0 \quad A \times B = D \quad (13)$$

Donde M , E y B son vectores columna de dimensión m cuyos elementos corresponden a la masa, energía y exergía de los flujos y D es la destrucción de exergía.

Por lo cual el análisis energético consta básicamente de:

1. Balance de materia
2. Balance de energía por primera ley
3. Balance de exergía por segunda ley
4. Comparación de los resultados de energía y exergía

3.6.1 Balance de materia

El caso 2, es el que se eligió para aplicar los análisis tanto energéticos como exergéticos y exergoeconómicos, debido a que será el generalmente aplicado durante el mayor tiempo de operación.

La realización del balance de masa del sistema, consta de formar una matriz de incidencia A multiplicada por un vector columna M, como se puede ver en la Tabla 6.

Una forma más de realizar el análisis es, dividir los flujos en recursos (A_F), productos (A_P), y pérdidas (A_L), como lo muestra el anexo 2a. donde:

$$A = A_F - A_P - A_L \quad (14)$$

En forma matricial la definición F-P-L del conjunto de los equipos deberá cumplir la condición:

$$F - P - L = D \quad (15)$$

Donde, D será la destrucción del flujo que se maneje.

La Tabla 7, muestra la F-P-L más conveniente que hemos considerado para los equipos que forman parte del prototipo propuesto.

Después de cumplir lo estipulado en la ec. 14, se continuará con la multiplicación de la matriz A por el vector columna M, donde obtenemos un resultado final igual a cero, el cual cumple con la ec. 13. Por lo cual se puede continuar con la realización del balance de energía.

Tabla 7. MATRIZ DE LA FORMA A= A_F-A_P-A_L

Recursos (A _F)																			
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	5p	6p	7p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Productos (A _P)																			
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	5p	6p	7p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Pérdidas (A _L)																			
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	5p	6p	7p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Matriz A = (Recursos - Productos - Pérdidas)

Recursos - Productos - Pérdidas																			
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	5p	6p	7p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	1	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

3.6.2 Balance de Energía

A partir de la matriz de incidencia A, y multiplicada por el vector columna E, llegamos a que $A \times E = 0$ Tabla 8. Al multiplicar las submatrices A_F , A_P y A_L , por el vector columna E, se obtienen los vectores columna (F) y (P), que son la energía utilizada en forma de recurso y la utilizada como producto, respectivamente, mostrado en la Tabla 9.

Para obtener la eficiencia energética utilizamos la ec. 16, donde el calor suministrado (Q_{sum}) es la radiación solar que entra al sistema fotovoltaico, y el trabajo (W), será la exergía disponible en la casa habitación, en forma de energía eléctrica.

$$\eta_{energ} = \frac{W}{Q_{sum}} = \frac{B_{13}}{B_1} \quad (16)$$

$$\eta_{energ} = \frac{0.913kW}{12.96kW} = 0.075 \quad (16a)$$

Obteniendo una eficiencia energético del 7.05%, utilizando los datos de la Tabla 10.

Balance por equipos (Pérdidas de Energía)	
0.0	
0.0	
0.0	
0.0	
0.0	
0.0	
0.0	
0.0	
0.0	
0.0	
0.0	

=

Corriente	Flujo energía (kg/h)
1	12.9601
2	1.9440
4	0.9825
5	0.8543
6	0.6978
7	0.0000
8	0.6629
9	0.0331
10	0.0000
11	0.0000
12	0.0561
13	0.9131
14	0.0000
16	0.0229
1p	11.0161
2p	0.0972
5p	0.1665
6p	0.0349
7p	0.0000
12p	0.1255
D6	0.6298
D7	0.0000

x

Tabla 8. BALANCE DE ENERGÍA

Flujos de energía por equipos (A)																							
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	1p	2p	5p	6p	7p	12p	D6	D7	
1.- PANEL SOLAR	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLÍTICA	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXÍGENO	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXÍGENO	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
TOTAL	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
AMBIENTE	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 9. MATRIZ DE LA FORMA $A = A_F - A_P - A_L$

Recursos (A_F)																						
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	1p	2p	5p	6p	7p	12p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Recurso (F)
12.9601
1.9440
0.8643
0.6978
4.86E-06
0.0331
1.0386
0.6629
4.61E-06

Productos (A_P)																						
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	1p	2p	5p	6p	7p	12p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Producto (P)
1.9440
1.8468
0.6978
0.6629
4.61E-06
0.0561
0.9131
0.6629
4.61E-06

Pérdidas (A_L)																						
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	1p	2p	5p	6p	7p	12p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Matriz $A = (\text{Recursos} - \text{Productos} - \text{Pérdidas})$

Recursos - Productos - Pérdidas																						
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	1p	2p	5p	6p	7p	12p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
8.- VALVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
9.- VALVULA DE ALMAC. OXIGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Tabla 10. Propiedades del Sistema Cuando una Parte de la Electricidad es Suministrada por el Dispositivo y la otra Directamente Salida del Panel Solar (Uso cuando existe un día soleado)

Tabla 10.1 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL SISTEMA						
Corriente	Presión P (bar)	Temperatura T (°C)	Temperatura T (K)	Voltaje V (W)	Energía E (kW)	Exergía B (kW)
1					12.960	12.960
2				12.0	1.944	1.944
4				12.0	0.983	0.983
5				1.9	0.864	0.864
6	30.00	105	378.15		0.698	0.356
7	30.00	105	378.15		0.000	0.000
8	28.50	99.75	372.9		0.663	0.338
9	27.08	99.75	372.9		0.033	0.032
10	28.50	99.75	372.9		0.000	0.000
11	27.08	99.75	372.9		0.000	0.000
12				12.0	0.056	0.021
13				110	0.913	0.913
14	1	25	298.15		0.000	0.000
16	1	40	313.15		0.023	0.011
5p					0.167	0.508
6p	1	99.75	372.9		0.035	0.018
7p	1	99.75	372.9		0.000	0.000
D6	28.50				0.63	0.306
D7	28.50				0.00	0.000

Flujo másico de Hidrógeno almacenado por día	0.010	kg/día
Flujo másico de Oxígeno almacenado por día	0.081	kg/día

Cálculo de la exergía química del agua de entrada

$$b_a = \mu_a - \mu_{a,0}$$

$$\mu_a \text{ (cal/kg mol)} = -73309$$

$$\mu_{a,0} \text{ (cal/kg mol)} = -73310$$

$$b_a \text{ (cal/kg mol)} = 1$$

$$b_a \text{ (kW)} = 0.00000010$$

Cálculo de la exergía química del oxígeno

$$b_o = \mu_o - \mu_{o,0}$$

$$\mu_o \text{ (cal/kg mol)} = -14611$$

$$\mu_{o,0} \text{ (cal/kg mol)} = -15554$$

$$b_o \text{ (cal/kg mol)} = 943$$

$$b_o \text{ (kW)} = 0.00000049$$

Tabla 10.2 Balance de exergía por equipos		
Equipos	Bd (kW)	Bd (%)
PANEL SOLAR	11.02	98.17%
SISTEMA DE CONTROL	0.10	0.87%
CELDA ELECTROLÍTICA	0.00	0.00%
SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	0.02	0.16%
CELDA DE COMBUSTIBLE	0.00	0.00%
CD/CA	0.09	0.80%
VÁLVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0.03	0.29%
VÁLVULA DE ALMAC. OXÍGENO	0.00	0.00%
Total	11.22	100.00%

$$\eta_{\text{dis}} = W_{\text{net}} / Q_{\text{in}}$$

$$\eta_{\text{dis}} = 0.1020$$

$$\eta_{\text{dis}} = 10.20\%$$

$$\eta_{\text{exergía}} = 0.0705$$

$$\eta_{\text{exergía}} = 7.05\%$$

3.6.3 Balance de Exergía

La exergía es una función de estado, por lo que, una vez definido el estado de referencia, que refleja la mínima cantidad de trabajo técnico necesario para constituir un producto funcional a partir del ambiente de referencia, donde este representa formalmente a aquellos recursos ambientales disponibles en cantidades ilimitadas y con un valor termodinámico nulo, por lo que la exergía es independiente del proceso utilizado para fabricar un producto, y por otra parte representa el costo mínimo necesario, evaluado con respecto a dicha propiedad.

Para la realización del balance exergético, se realizará la multiplicación de la matriz de incidencia A por el vector columna B, de la cual como, $A \times B = D$, obtenemos las submatrices: A_F A_P A_L , definidas por:

$$A_F \times B = F \quad A_P \times B = P \quad A_L \times B = L \quad (17)$$

Los resultados de la multiplicación de la matriz A por el vector columna B, nos da el vector columna de destrucción exergética D, en cada equipo del sistema, como se muestra en la Tabla 11.

Mostrando una mayor destrucción de exergía en el panel fotovoltaico, obteniendo una eficiencia exergética del 10.20%, mayor a la eficiencia energética del 7.05% que solo considera la entrada y la salida general del sistema.

Exergía Destruída por equipos (Bd)
11.02
0.10
0.00
0.00
0.00
0.00
0.00
0.09
0.31
0.00

II

Corriente	Flujo exergía (kg/h)
1	12.96015
2	1.94402
4	0.98251
5	0.86431
6	0.35596
7	0.00000
8	0.33816
9	0.03213
10	0.00000
11	0.00000
12	0.02088
13	0.91309
14	0.00000
16	0.01124
5p	0.50835
6p	0.01780
7p	0.00000
D6	0.30604
D7	0.00000

X

Tabla 11. BALANCE DE EXERGÍA

Equipos	Flujos de exergía por equipos (A)																			
	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	5p	6p	7p	D6	D7	
1.- PANEL SOLAR	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLÍTICA	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXÍGENO	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
8.- VÁLVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.- VÁLVULA DE ALMAC. OXÍGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
AMBIENTE	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

CONCLUSIONES

Definido tanto el volumen de control, como el nivel de agregación del prototipo, se tomaron algunas consideraciones útiles para los balances de masa energía y exergía, donde los balances de masa y energía describen la continuidad del proceso, o sea, que este se encuentra en estado permanente.

Se dimensionó la celda electrolítica y se determinó un flujo másico de 2.04 l/día de agua, necesario para la obtención del flujo de hidrógeno requerido para generar los 2000 kWh/año de energía calculados para el abastecimiento de la casa habitación.

El análisis exergético nos dice que el equipo más ineficiente del sistema es el panel fotovoltaico, sin embargo, para la determinación final, es necesario aplicar el análisis exergo económico, el cual mostrará con más precisión los puntos o flujos que generan una mayor destrucción de exergía, para así buscar una posible solución al problema.

Capítulo III

A woman with long, flowing hair and a glowing aura, holding a glowing orb, set against a starry background.

Para el mejor entendimiento del análisis exergo económico que se realizará, se da una breve introducción al trabajo realizado por los creadores de este, que son Valero y Tsatsaronis.

Para poder entrar finalmente al análisis exergo económico del prototipo, realizando un análisis de sensibilidad para conocer el comportamiento en diferentes momentos clave, que delimitaran las condiciones de operación.

Continuando con un análisis económico del sistema que se ha analizado, para finalizar con algunas recomendaciones de optimización.

IV. ANÁLISIS TERMOECONÓMICO

4.1 ESTADO DEL ARTE

Debido a que el objetivo final del ahorro de energía consiste en sentar las bases teóricas que expliquen de manera racional el proceso de formación de los costos de los productos de los procesos y proporcionar procedimientos eficaces para el análisis, diagnóstico y optimización tanto del diseño como del funcionamiento real de dichos procesos.

El concepto de eficiencia o rendimiento es central en toda teoría de la producción, para lo cual primeramente se debe definir el diseño del sistema y su estructura funcional, adecuado al objetivo de utilizar de forma eficiente los recursos disponibles (capital, materias primas, financiamiento etc).

Con base en el Segundo Principio de la Termodinámica, el cual nos dice que no existe ningún proceso natural que se desarrolle reversiblemente, además de permitirnos cuantificar la mayor o menor irreversibilidad y eficiencia de los procesos a través de la función exergía. La exergía de un sistema termodinámico es la mínima cantidad de trabajo técnico necesario para constituirlo a partir de un ambiente estable de referencia.

La exergía es la función termodinámica de estado que permite formular la relación de equivalencia entre diversos flujos de materia y energía de una planta.

Sea P la producción de un proceso (Producto) y F los recursos disponibles consumidos (Combustible), ambos valorados por su exergía se cumplirá que:

$$F - P = I \geq 0 \quad (18)$$

Siendo $I = T_0 * S_g$ (teorema de Gouy-Stodola) la cuantificación en términos de exergía destruida de la irreversibilidad del proceso. Su verdadera eficiencia termodinámica vendrá dada por:

$$\eta_b = \frac{P}{F} \leq 1 \quad (19)$$

La inversa de la función eficiencia representará el costo exergético unitario del producto:

$$k = \frac{1}{\eta_b} = \frac{F}{P} \geq 1 \quad (20)$$

El objetivo de la optimización energética es minimizar el costo exergético unitario de los productos funcionales. Una vez estipulada la relación conceptual entre Segundo Principio, Eficiencia y Costo Exergético, la aplicación de la teoría General de Sistemas nos permitirá no solo desglosar la irreversibilidad o ineficiencia de un sistema, por complejo que sea, por equipos (Análisis Exergético); sino también, el calcular los costos energéticos de sus flujos internos y productos finales (Control de Costos), y establecer valoraciones precisas de la repercusión en consumo del combustible ocasionado por el mal funcionamiento de cualquiera de los equipos que componen la estructura del sistema (Auditoria Energética).

No obstante, la evaluación finales de cualquier proceso debe realizarse en términos monetarios incorporando el costo de lo flujos internos y productos finales, además de los recursos utilizados; cuando se analiza el proceso de formación del costo de los flujos internos y productos de un sistema, la variable relevante es su costo exergético, el cual informa la cantidad real de exergía que ha sido necesaria para producirlos, esta dependerá tanto de la estructura del sistema (relación funcional entre equipos y flujos), como de la calidad del funcionamiento (rendimiento exergético) de los equipos. Una mejora de la estructura o de la eficiencia de los equipos implicará siempre un menor consumo de recursos.

Cuando se considera además el ámbito económico, la perspectiva se ampliará al introducir los recursos energéticos y de materias primas que tendrán una escala de costos o precios de mercado no ligada necesariamente a sus exergías respectivas.

Por otra parte deberán contabilizarse los costos de amortización y mantenimiento de la instalación, lo cual vuelve mucho más complejo su análisis, así normalmente, la mejora de su estructura o incremento de la eficiencia de los equipos implicará menos consumo de combustible, pero llevará consigo un incremento en los costos de capital.

La función a minimizar ahora será el costo económico de los productos finales. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto puede definirse como costo exergo económico de un flujo o producto a la suma de dos contribuciones:

1. La procedente del costo monetario de la exergía de entrada a la planta necesaria para producir dicho flujo (Costo Exergético).
2. La que engloba el resto de los costos originados en el proceso productivo asociado a su obtención (Amortización del capital, operación, mantenimiento, etc).

Las técnicas de análisis exergético han sido utilizadas frecuentemente para determinar y evaluar numéricamente las causas de ineficiencia de los procesos industriales. El mensaje de que lo que se pierde es la utilidad de la energía y no la energía misma, ha sido lanzado al mundo industrial desde el académico en múltiples ocasiones, desgraciadamente a sido utilizado parcialmente hasta en las dos últimas décadas.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

4.2 BALANCE EXERGO ECONÓMICO

Ya que la exergía es independiente del proceso utilizado, y como los procesos reales son irreversibles, o sea que existen tanto pérdidas como destrucción de exergía, resultará siempre que la exergía necesaria para obtener un producto funcional, llamado costo exergético (B^*), si será función del proceso utilizado.

El objetivo de la optimización energética va encaminado a hacer mínimo/máximo los cocientes:

$$k = \frac{B^*}{B} \quad \text{ó} \quad \eta = \frac{B}{B^*} \quad (21)$$

donde k , es el costo exergético unitario.

En base al procedimiento de asignación de costos basados únicamente en la termodinámica [Valero et al], debido a que el número de ecuaciones que tenemos (n) es menor a nuestro número de incógnitas (m), obtenemos las siguientes ecuaciones complementarias necesarias

en la matriz A , para formar la matriz $\frac{A}{\alpha}$, Tabla 12.

Tabla 12. ECUACIONES COMPLEMENTARIAS (α)

1	$B_1^* = B_1$	7	$\frac{B_4^*}{B_4} - \frac{B_5^*}{B_5} = 0$
2	$B_{14}^* = B_{14}$	8	$\frac{B_6^*}{B_6} - \frac{B_7^*}{B_7} = 0$
3	$B_{3p}^* = 0$	9	$\frac{B_7^*}{B_7} - \frac{B_{11}^* + B_{D7}^*}{B_{11} + B_{D7}} = 0$
4	$B_{7p}^* = 0$	10	$\frac{B_6^*}{B_6} - \frac{B_9^* + B_{D6}^*}{B_9 + B_{D6}} = 0$
5	$B_{6p}^* = 0$	11	$\frac{B_9^* + B_{11}^*}{B_9 + B_{11}} - \frac{B_{12}^*}{B_{12}} = 0$
6	$B_{..}^* = 0$		

Después de agregar las ecuaciones complementarias a la matriz A, para formar la matriz $\frac{A}{\alpha}$, como lo muestra la Tabla 13 partiendo de:

$$[A]x[B^*] = 0 \quad (19)$$

y

$$[A]x[\Pi] = -Z \quad (20)$$

donde:

B^* = Costo exergético

Π = Costo exergoeconómico de todos los flujos

Z = Costos de Inversión, operación y mantenimiento

Utilizando la nueva matriz de incidencia $\frac{A}{\alpha}$, la cual tiene el mismo número de incógnitas (n) y de ecuaciones (m), la ecuación 19 se transforma en la ec. 21 y la 20 en la 22, como se muestra a continuación.

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} x [B^*] = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} = Y \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} x [\Pi] = - \begin{bmatrix} Z \\ \omega \end{bmatrix} = Z \quad (22)$$

donde: ω es una valoración externa de los flujos, y Z son los costos de inversión, operación y mantenimiento en (dls/s) Tabla 13.

Despejando B^* y Π de las ecuaciones 21 y 22 respectivamente obtenemos:

$$B^* = \begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix}^{-1} X \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix}^{-1} X \begin{bmatrix} -Z \\ \omega \end{bmatrix} \quad (24)$$

Tabla 13. SUPUESTOS ECONÓMICOS

1. Costos de Capital:				
Equipos	Costo Total (dls)	Costo Anual (dls/año)	Costo (dls/s)	Porcentaje del costo
PANEL SOLAR	11020.00	443.20	2.174E-05	59.73%
REGULADOR DE VOLTAJE	800.00	44.79	1.578E-06	4.34%
CELDA ELECTROLÍTICA	2397.10	108.54	4.729E-06	12.99%
ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	1381.66	55.56	2.726E-06	7.49%
ALMACENAMIENTO OXÍGENO	615.92	24.77	1.215E-07	3.34%
CELDA DE COMBUSTIBLE*	1505.34	60.54	3.847E-06	10.57%
CD/CA	166.47	6.73	1.381E-07	0.90%
VÁLVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	70.00	2.82	9.864E-08	0.38%
VÁLVULA DE ALMAC. OXÍGENO	50.00	2.01	1.642E-08	0.27%
INSTALACIÓN	83.23	3.35	1.642E-07	0.45%
Total	184451.14	1037.79	3.656-05	100.00%
2.	Costos de Operación y Mantenimiento total (dls):			922.56
3.	Costos de Operación y Mantenimiento anual (dls/año):			46.13
4.	Horas de Servicio:			7884
5.	Costo Unitario del Combustible (dls/año):			0.00
6.	Costo Unitario del Agua (dls/año):			174.51
7.	Años de Vida Util:			20
8.	TREMA:			10

* El costo total presentado, es la suma de 3 celdas de combustible, debido a que la vida útil de cada celda alcalina es aproximadamente de 50 000h

Realizando primeramente la matriz inversa de la matriz $\frac{A}{\alpha}$ y multiplicándola por los vectores

Υ y Ξ obtenemos tanto el costo exergético como los costos exergo económicos de todos los flujos del sistema productor Tabla 14, resumiéndose en la Tabla 16.

Tabla 15. MATRIZ DE LA FORMA A= A_F-A_P-A_L

Recursos (A _F)																			
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	5p	6p	7p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXÍGENO	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
8.- VÁLVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9.- VÁLVULA DE ALMAC. OXÍGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Productos (A _P)																			
Equipos	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	5p	6p	7p	D6	D7
1.- PANEL SOLAR	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.- CELDA ELECTROLITICA	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.- ALMACENAMIENTO OXÍGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
7.- CAMBIADOR CD/CA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8.- VÁLVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9.- VÁLVULA DE ALMAC. OXÍGENO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Costo Exergético (B*)
1.084
1.084
0.576
0.507
0.507
0.000
0.507
0.507
0.507
0.000
0.000
1.084
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
-0.048
0.000

X

F*
1.084
1.084
0.507
0.507
0.000
0.507
1.084
0.507
0.000

=

Costo Exergético (B*)
1.084
1.084
0.576
0.507
0.507
0.000
0.507
0.507
0.000
0.000
1.084
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
-0.048
0.000

X

P*
1.0836
1.0836
0.5071
0.5071
0.0000
0.5071
1.0836
0.4588
0.0000

=

Ahora con las exergías (B) y los costos exergéticos (B^*) por corriente, podemos calcular los costos exergéticos unitarios (k) de cada flujo (Tabla 16), o también clasificados en términos de combustible (F) o productos (P) ver Tabla 15, para resumirse en la Tabla 17.

El análisis exergo económico muestra que los costos por unidad de energía se incrementan considerablemente al hacer pasar la energía capturada por la celda fotovoltaica a través de todo el sistema, debido a las pérdidas que se generan en cada etapa de transformación y a que estos últimos equipos (celda electrolítica, tanques de almacenamiento con sus respectivas válvulas de salida, y la celda de combustible), no trabajan a su capacidad de diseño mientras exista como fuente de abastecimiento, la energía solar. Y como muestra este caso los costos se incrementan grandemente en la salida de la celda de combustible, debido a que el flujo utilizado es mínimo (un 4.6% de su capacidad) lo cual aparentemente lo hace muy costoso. Sin embargo al considerar los costos de combustible, los cuales son nulos, obtenemos un costo por kWh de 0.28 dólares.

Tabla 16. PROPIEDADES DEL SISTEMA POR CORRIENTE

Corriente	PROPIEDADES TERMODINÁMICAS					COSTOS EXERGÉTICOS		COSTOS EXERGEOCONÓMICOS		
	m (kg/s)	P (bar)	T (K)	E (kW)	B (kW)	B* (kW)	k* (kW)	II (dls/s)	c (dls/kJ)	c (dls/kWh)
1				12.9601	12.9601	1.0836	0.0836	0.00000	0.0000	0.00
2				1.9440	1.9440	1.0836	0.5574	0.00002	0.0000	0.04
4				0.9825	0.9825	0.5765	0.5868	0.00001	0.0000	0.05
5				0.8643	0.8643	0.5071	0.5868	0.00001	0.0000	0.05
6	4.91887E-06	30	378.15	0.6978	0.3560	0.5071	1.4247	0.00002	0.0000	0.16
7	3.9351E-05	30	378.15	0.0000	0.0000	0.0000	1.4247	0.00000	0.0000	0.16
8	4.67293E-06	28.5	372.9	0.6629	0.3382	0.5071	1.4997	0.00002	0.0001	0.20
9	4.67293E-07	27.075	372.9	0.0331	0.0321	0.5071	15.7860	0.00002	0.0006	2.07
10	3.73834E-05	28.5	372.9	0.0000	0.0000	0.0000	1.4997	0.00000	0.2635	948.55
11	3.73834E-06	27.075	372.9	0.0000	0.0000	0.0000	1.4997	0.00000	0.2849	1025.54
12		0	0	0.0561	0.0209	0.5071	24.2861	0.00002	0.0011	4.08
13		0	0	0.9131	0.9131	1.0836	1.1868	0.00004	0.0000	0.14
14	4.42698E-05	1	298.15	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.00000	0.0000	0.00
16	4.20564E-06	1	313.15	0.0229	0.0112	0.0000	0.0000	0.00000	0.0000	0.00
5p		0	0	0.1665	0.5083	0.0000	0.0000	0.00000	0.0000	0.00
6p	2.45944E-07	1	372.9	0.0349	0.0178	0.0000	0.0000	0.00000	0.0000	0.00
7p	1.96755E-06	1	372.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00000	0.0000	0.00
D6	4.20564E-06	28.5	0	0.6298	0.3060	-0.0483	-0.1578	-0.00001	0.0000	-0.08
D7	3.36451E-05	28.5	0	0.0000	0.0000	0.0000	1.3497	0.00000	0.2634	948.24

Tabla 17. PROPIEDADES DEL SISTEMA POR EQUIPOS

Equipos	PROPIEDADES DEL COMBUSTIBLE						
	F (kW)	F* (kW)	k* (kW)	c (dls/MJ)	c (dls/kWh)	c (dls/s)	c (dls/año)
1.- PANEL SOLAR	12.9601	1.0836	0.0836	2.01E-02	7.22E-02	3.90E-05	1106.97
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	1.9440	1.0836	0.5574	1.46E-03	5.24E-03	2.69E-06	76.34
3.- CELDA ELECTROLÍTICA	0.8643	0.5071	0.5868	9.32E-03	3.36E-02	3.32E-06	94.21
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0.6978	0.5071	0.7268	5.37E-03	1.93E-02	1.82E-06	51.59
5.- ALMACENAMIENTO OXÍGENO	4.86E-06	0.0000	1.4247	1.76E+02	6.32E+02	8.10E-07	4.50
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0.0331	0.5071	15.3003	7.59E-03	2.73E-02	1.58E-07	7.85
7.- CAMBIADOR CD/CA	1.0386	1.0836	1.0434	3.03E-04	1.09E-03	2.77E-07	0.25
8.- VÁLVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0.6629	0.5071	0.7650	2.72E-04	9.80E-04	8.75E-09	1.87
9.- VÁLVULA DE ALMAC. OXÍGENO	4.61E-06	0.0000	1.4997	1.43E+01	5.13E+01	6.58E-08	1.87

Equipos	PROPIEDADES DEL PRODUCTO						
	P (kW)	P* (kW)	k* (kW)	c (dls/MJ)	c (dls/kWh)	c (dls/s)	c (dls/año)
1.- PANEL SOLAR	1.9440	1.0836	0.5574	2.01E-02	7.22E-02	3.90E-05	1106.97
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	1.8468	1.0836	0.5868	1.46E-03	5.24E-03	2.69E-06	76.34
3.- CELDA ELECTROLÍTICA	0.6978	0.5071	0.7268	9.32E-03	3.36E-02	3.32E-06	94.21
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	0.6629	0.5071	0.7650	5.37E-03	1.93E-02	1.82E-06	51.59
5.- ALMACENAMIENTO OXÍGENO	4.61E-06	0.0000	1.4997	1.76E+02	6.32E+02	8.10E-07	23.00
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	0.0561	0.5071	9.0439	7.59E-03	2.73E-02	1.58E-07	4.50
7.- CAMBIADOR CD/CA	0.9131	1.0836	1.1868	3.03E-04	1.09E-03	2.77E-07	7.85
8.- VÁLVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	0.6629	0.4588	0.6921	3.01E-04	1.08E-03	9.67E-09	0.27
9.- VÁLVULA DE ALMAC. OXÍGENO	0.0000	0.0000	2.8494	7.51E+00	2.70E+01	3.46E-08	0.98

4.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis comparativo, variando las condiciones de operación por las cuales pasará el sistema a lo largo de su operación. El primero de los análisis se realizó variando el flujo que se utiliza directamente saliendo del panel solar, además de variar la cantidad de hidrógeno y oxígeno almacenado y por lo tanto del flujo de hidrógeno que se convierte en energía eléctrica (Tabla 18).

El caso 1 es el que generalmente se utilizará en un día soleado (10% del flujo de hidrógeno es transformado a electricidad) ver diagrama 5 y Tabla 16, en el caso 2 el 30% del hidrógeno producido en la celda electrolítica es convertido a energía eléctrica y el 70% restante se almacena para ser utilizado en la noche o en un día nublado (Tabla 21), y el caso 3 convierte a electricidad el 50% de hidrógeno (Tabla 22). En los tres casos el costo final por unidad de energía es de 0.14 dls/kWh, variando los costos asignados a cada corriente dependiendo de la utilización que se le esté dando al prototipo en ese momento (Tabla 18).

Las mismas condiciones del análisis anterior se utilizaron para la siguiente comparación (Tabla 19), pero ahora enfocado en los costos por equipo y no por corriente. En los tres casos el comportamiento es similar ocupando el primer lugar en costos el panel, seguido por la celda electrolítica.

Otro análisis hecho fue al variar la radiación absorbida por la celda fotovoltaica, en donde el primer caso utiliza la radiación solar promedio que es de 1 795 Wh/m²-año, que fue la utilizada para el dimensionamiento total del sistema (Diagrama 5), en el caso 2 la radiación disminuye a 1 000 Wh/m²-año, que equivaldría a un día no muy despejado, y el caso 3 con una radiación solar igual a cero, o sea en la noche (Diagrama 6). Sin embargo como el costo de la electricidad de salida, es dependiente directo del costo del sistema fotovoltaico, y este tendrá un costo fijo sin importar el valor puntual de radiación, los costos finales de la energía eléctrica disponible en la casa habitación permanecerán constantes a 0.14 dls/kWh.

Tabla 18. VARIANDO EL FLUJO DE ELECTRICIDAD QUE SE CONVIERTE A HIDRÓGENO, Y EL PORCENTAJE DE ESTE QUE ALMACENA (Por corriente)

Corriente	CASO 1		CASO 2		CASO 3	
	% flujo (4)=	53.20	% flujo (4)=	50.55	% flujo (4)=	47.12
	% flujo de almac sale=	10.00	% flujo de almac sale=	30.00	% flujo de almac sale=	50.00
	% flujo (5)=	46.80	% flujo (5)=	49.45	% flujo (5)=	52.88
	c (dils/kWh)		c (dils/kWh)		c (dils/kWh)	
1	0.00		0.00		0.00	
2	0.04		0.04		0.04	
4	0.05		0.05		0.05	
5	0.05		0.05		0.05	
6	0.16		0.15		0.14	
7	0.16		0.15		0.14	
8	0.20		0.18		0.16	
9	2.07		0.19		0.17	
10	948.55		897.72		839.49	
11	1025.54		970.58		907.62	
12	4.08		1.25		0.68	
13	0.14		0.14		0.14	
14	0.00		0.00		0.00	
16	0.00		0.00		0.00	
5p	0.00		0.00		0.00	
6p	0.00		0.00		0.00	
7p	0.00		0.00		0.00	
D6	-0.08		0.09		0.07	
D7	948.24		897.42		839.21	

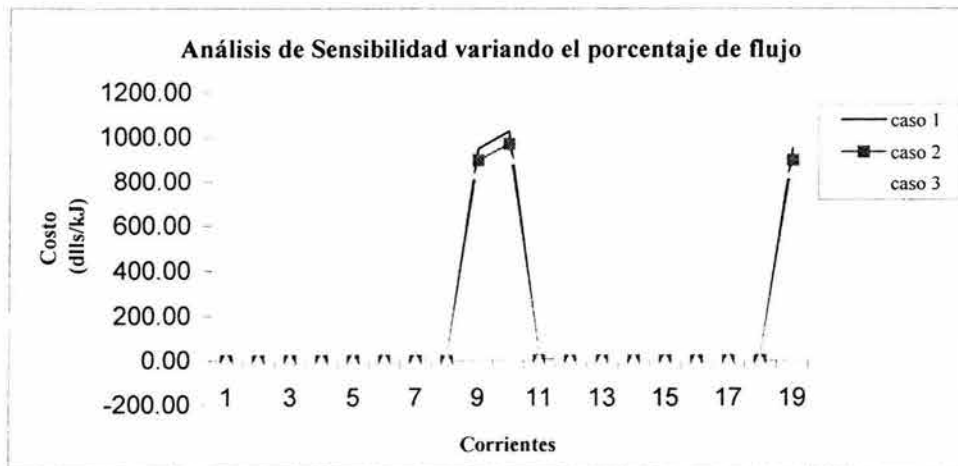
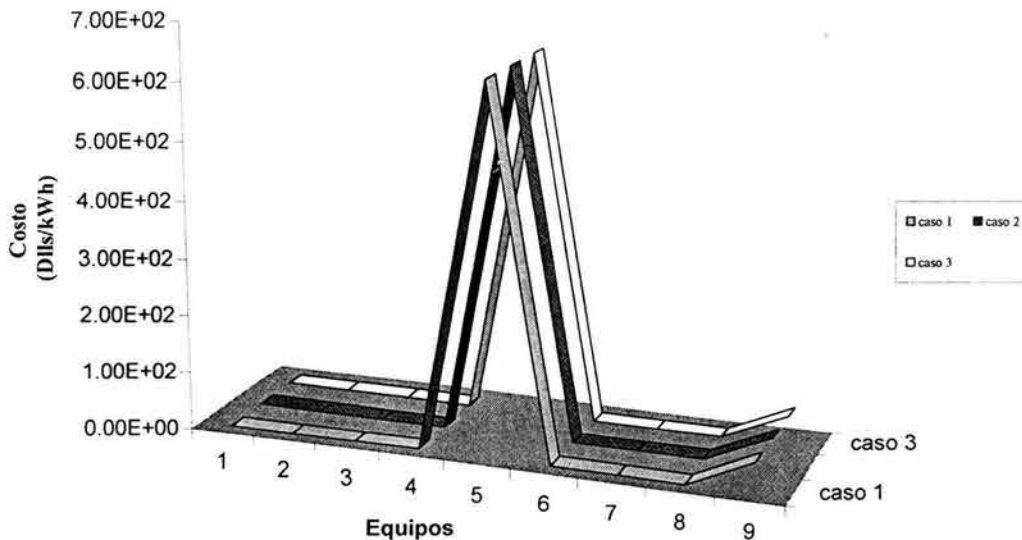


Tabla 19. VARIANDO EL FLUJO DE ELECTRICIDAD QUE SE CONVIERTE A HIDRÓGENO, Y EL PORCENTAJE DE ESTE QUE SE ALMACENA (Por equipos)

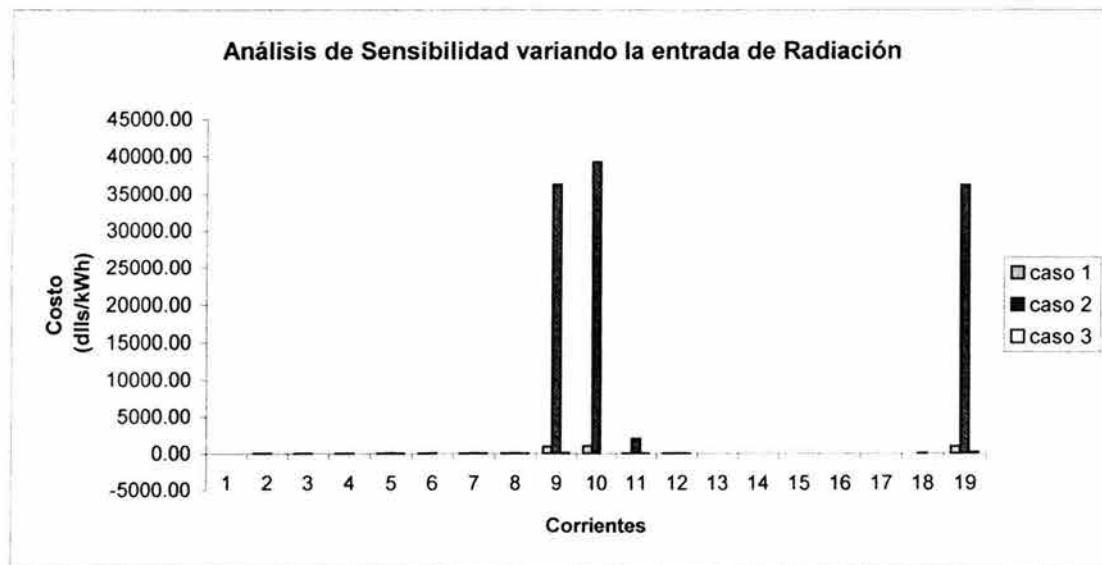
Equipos	CASO 1			CASO 2			CASO 3		
	% flujo (4)=			% flujo (4)=			% flujo (4)=		
	53.20			50.55			47.12		
	% flujo de almac sale=			% flujo de almac sale=			% flujo de almac sale=		
	10.00			30.00			50.00		
	% flujo (5)=			% flujo (5)=			% flujo (5)=		
	46.80			49.45			52.88		
	c (dlis/MJ)	c (dlis/kWh)	c (dlis/s)	c (dlis/MJ)	c (dlis/kWh)	c (dlis/s)	c (dlis/MJ)	c (dlis/kWh)	c (dlis/s)
1.- PANEL SOLAR	2.01E-02	7.22E-02	3.90E-05	2.01E-02	7.22E-02	3.90E-05	2.01E-02	7.22E-02	3.90E-05
2.- REGULADOR DE VOLTAJE	1.46E-03	5.24E-03	2.69E-06	1.46E-03	5.24E-03	2.69E-06	1.46E-03	5.24E-03	2.69E-06
3.- CELDA ELECTROLÍTICA	9.32E-03	3.36E-02	3.32E-06	8.83E-03	3.18E-02	3.51E-06	8.25E-03	2.97E-02	3.75E-06
4.- ALMACENAMIENTO HIDRÓGENO	5.37E-03	1.93E-02	1.82E-06	5.09E-03	1.83E-02	1.92E-06	4.76E-03	1.71E-02	2.05E-06
5.- ALMACENAMIENTO OXIGENO	1.76E+02	6.32E+02	8.10E-07	1.76E+02	6.32E+02	8.56E-07	1.76E+02	6.32E+02	9.15E-07
6.- CELDA DE COMBUSTIBLE	7.59E-03	2.73E-02	1.58E-07	7.18E-03	2.58E-02	5.02E-07	6.71E-03	2.42E-02	8.95E-07
7.- CAMBIADOR CD/CA	3.03E-04	1.09E-03	2.77E-07	3.03E-04	1.09E-03	2.77E-07	3.03E-04	1.09E-03	2.77E-07
8.- VÁLVULA DE ALMAC. HIDRÓGENO	2.72E-04	9.80E-04	8.75E-09	2.58E-04	9.28E-04	9.24E-08	2.41E-04	8.68E-04	9.88E-08
9.- VÁLVULA DE ALMAC. OXIGENO	1.43E+01	5.13E+01	6.58E-08	1.43E+01	5.13E+01	6.95E-08	1.43E+01	5.13E+01	7.43E-08

Análisis de Sensibilidad



**Tabla 20. VARIANDO EL FLUJO DE RADIACIÓN
(Por corriente)**

Corriente	CASO 1		CASO 2		CASO 3	
	R(kWh/m ² -año)	1795.00	R(kWh/m ² -año)	1000.00	R(kWh/m ² -año)	0.00
	E(kWh/año)	2000.00	E(kWh/año)	2000.00	E(kWh/año)	2000.00
	A (m ²)=	15.81	A (m ²)=	15.81	A (m ²)=	15.81
	c (dils/kWh)		c (dils/kWh)		c (dils/kWh)	
1	0.00		0.00		0.00	
2	0.04		0.10		0.00	
4	0.05		0.11		0.00	
5	0.05		0.11		0.00	
6	0.16		46.80		0.01	
7	0.16		46.80		0.00	
8	0.20		74.60		0.01	
9	2.07		79.88		0.04	
10	948.55		36281.47		116.82	
11	1025.54		39222.77		0.00	
12	4.08		2005.46		0.08	
13	0.14		0.19		0.14	
14	0.00		0.00		0.00	
16	0.00		0.00		0.00	
5p	0.00		0.00		0.00	
6p	0.00		0.00		0.00	
7p	0.00		0.00		0.00	
D6	-0.08		13.85		-0.01	
D7	948.24		36187.87		158.50	



4.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

Los costos estimados por kWh presentan algunas dificultades por la alta dependencia en los costos de inversión, los cuales dependen de las condiciones aplicadas a cada caso. Para una primera aproximación supondremos una TREMA del 10% para una vida útil del sistema de 20 años, por lo que algunos equipos como la celda de combustible deberá considerar la compra de tres equipos para satisfacer la vida útil del prototipo en general (Tabla 13).

El interés anual por dollar instalado es:

$$R = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} = \frac{0.1}{1 - (1.1^{-10})} = 0.1627 \text{ dls} \text{ cap} \quad (16)$$

donde:

R= Interés total por dollar instalado

i= Tasa de interés anual o TREMA

n= Años de vida útil

I_T= Inversión Total

A= Costo Anual

Por lo cual los costos anuales se calculan:

$$A = \frac{[I_T + (R * I_T)]}{n} = \frac{1.1175 * 17740.14}{20} = 1030.92 \text{ dls} \text{ año} \quad (17)$$

Desglosando la inversión se muestra en la tabla 13:

La unidad puede operar con una pequeña cantidad en los costos de operación y mantenimiento, debido a que las partes de este dispositivo requieren un mínimo de servicios, se supone un 0.5% del costo total, para un total de energía de salida de 2000kWh/año, por lo tanto los costos se calculan con el resultado total de la Tabla 13, debido a que estos costos

incluyen costos adicionales como los de operación y mantenimiento, instalación, además del costo del agua requerida en el electrolizador, los cuales pueden ser por kWh o por kW:

$$C = \frac{1032.92}{913.46} = 1.13 \text{dlls/W} \quad (18)$$

ó

$$C = \frac{1030.92}{2000} = 0.51 \text{dlls/kWh} \quad (19)$$

Obteniendo un costo económico de energía a través de la tecnología del hidrógeno solar de 0.51 dlls/kWh, o lo que equivale a 1.13 dlls/W.

4.5 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA

Realizado el análisis exergoeconómico, notamos que el equipo mas costoso además de ser el mayor destructor de exergía es el sistema solar, sin embargo, la literatura señala que la tecnología de las celdas fotovoltaicas no puede aumentar en mucho su eficiencia, a la alcanzada actualmente, ya que todos los procesos solares tienen una eficiencia teórica limitada, impuesta por la naturaleza del proceso de conversión. Los procesos termosolares se encuentran limitados por la eficiencia de Carnot, y los procesos fotónicosolares están limitados por las consideraciones fundamentales asociadas a la excitación de los electrones.

Por lo que no se puede hacer mucho para disminuir la destrucción de exergía en este equipo, que como ya se mencionó además de ser el más costoso es el que muestra una mayor ineficiencia. Una posible solución, la cual no disminuye la destrucción de exergía, pero si abate los costos es la sustitución de los paneles por colectores solares; los cuales son más económicos a pesar de tener un rango de eficiencia similar a las celdas fotovoltaicas.

La utilización de una celda electrolítica a presión, evita la necesidad de instalar un compresor en cada una de las salidas tanto del hidrógeno como del oxígeno, para su almacenamiento. A pesar de ser más costosos los electrolizadores a presión, por la necesidad de utilizar materiales mas resistentes a las condiciones de operación, vale la pena su utilización ya que su eficiencia es mayor comparada con los electrolizadores que operan a presión atmosférica, además de con esto poder evitar la instalación de compresores, que tienen un alto costo y son de los equipos que más destrucción de exergía generan.

El sistema de almacenamiento para el hidrógeno, es uno de los principales problemas a resolver en la utilización de este combustible debido a su baja densidad, es necesario almacenarlo a altas presiones; para disminuir el volumen del tanque que lo contendrá incrementando el costo de los materiales de construcción.

Las celdas de combustible cuentan con altas eficiencias, porque no están limitadas por las eficiencias de Carnot, sino por las leyes de Faraday, sin embargo las eficiencias varían dependiendo del tipo de celda o sea del combustible que pueden utilizar y del comburente, en este caso el oxígeno necesario en la reacción se administra en forma directa, o sea, no es tomado del aire sino almacenado y utilizado en forma pura, lo que vuelve más eficiente al sistema. Su costo es relativamente accesible, como lo muestra la Tabla 13, equivale sólo a un 10.57% de costo total de inversión (Considerando que tienen una vida útil de 55 000h, por lo que se esta tomando en cuenta la suma del precio de 3 celdas de combustible).

También se analizó la posibilidad de utilizar la cogeneración, sin embargo el calor desechado por la celda de combustible es muy poco, y no cubriría las necesidades mínimas (agua caliente), por lo cual para este caso en particular no se consideró factible su utilización.

CONCLUSIONES

Después de realizar el análisis exergético podemos concluir que debido a la gran destrucción de exergía y su elevado costo, se propone como una posible solución, la sustitución de los paneles fotovoltaicos, por colectores solares, en especial los pétalos solares, por sus bajos costos. La cogeneración no es factible para este prototipo debido a que la cantidad de energía de desecho de la celda de combustible es muy pequeña y no alcanzaría para calentar el agua requerida por una sola persona.

El análisis exergo económico muestra el subsistema el cual sería más costoso por unidad de energía, es el sistema de almacenamiento de oxígeno, por lo cual tal vez se puede evitar el almacenamiento de oxígeno al utilizar una celda de combustible que pueda utilizar al aire como comburente, sin embargo la eficiencia de operación de esta celda disminuirá.

El análisis económico suponiendo una TREMA del 10% con una vida útil de 20 años, dará un costo por Watt de 1.13 dls, que equivale a 0.51 dls/kWh, lo cual demuestra que económicamente a pesar de ser mas costoso que las tecnologías convencionales, puede competir con la energía eléctrica obtenida de los reactores nucleares. Sin embargo en este análisis no se están considerando las externalidades, que por ser mínimas en las tecnologías no convencionales (utilizan energías renovables), demostrarían una mayor rentabilidad y por lo tanto una mayor competitividad con las demás tecnologías existentes. Además de tener la ventaja que el combustible suministrado es gratis, que al ser considerado nos da en el análisis exergo económico un costo de la energía total de 0.14 dls/kWh. El cual es un costo demasiado competitivo.

Se puede concluir que, la aplicación de las técnicas de análisis basadas en la segunda Ley de la Termodinámica, en combinación con la Teoría General de Sistemas, proporciona potentes herramientas para el diagnostico del funcionamiento de los sistemas energéticos, los cuales:

- Permiten evaluar la verdadera eficiencia de la planta y de sus equipos individuales, así como repartir la irreversibilidad total, (Ahorro Termodinámico del Combustible entre ellos).
- El cálculo de los costos exergéticos de los flujos permite valorar la repercusión en consumo de combustible de la instalación que puede conseguirse al mejorar la eficiencia de un equipo específico hasta su valor de diseño.

Es importante mencionar en lo que se refiere a los costos termodinámicos y económicos, que estos, reflejan que el paso de unos a otros solo proviene de modificar las unidades en que se expresa, ya sea en unidades de energía o en unidades monetarias, los factores de producción repercutidos como costos. Quedando manifestada la conexión entre termodinámica y económica.

Esta metodología resuelve de manera inequívoca los interrogantes de donde, como y que parte de la energía consumida por el proceso puede ahorrarse manteniendo constantes la cantidad y las especificaciones de los productos finales de un proceso, con ella se pueden detectar las posibles alternativas de ahorro, cuantificarlas y realizar una primera ordenación de las mismas.

Con las técnicas desarrolladas por la exergoeconomía se abre la puerta para una nueva perspectiva de la simulación, mejora, optimización y síntesis de los sistemas energéticos que en el futuro podría ser desarrollada.

CONCLUSIONES

Debido al uso desmedido de las fuentes de energía no renovables, llegará el momento en que se agotarán, esto sin mencionar el gran daño que la quema de combustibles provoca en nuestro planeta, pero a la vez, el gran beneficio que se tiene en el funcionamiento de las comunidades tecnificadas.

Estamos concientes de la presencia absoluta que el petróleo ejerce, pero sabemos que es el momento de pensar en su reemplazo, para así dejar de quemarlo absurdamente en forma de combustible y para ser únicamente insumo de las industrias de transformación petroquímica.

Por lo cual se debe acelerar la introducción del uso de energías renovables, que tienen la desventaja ser difusas e intermitentes. Este trabajo propone la utilización de las energías renovables para producir hidrógeno, proceso conocido como tecnología del hidrógeno solar, aplicado a una celda de combustible, de la cual se obtiene la energía que cubra las necesidades eléctricas de una familia promedio en México D.F., de manera cotidiana.

Realizado el análisis exergético, podemos concluir que la mayor cantidad de exergía destruida ocurre en las celdas fotovoltaicas, sin embargo este no es un equipo el cual se puede mejorar mucho, debido a que todos los procesos solares están limitados por la naturaleza del proceso de conversión, en este caso asociados a la excitación de los electrones.

Una posible solución para análisis posteriores, los cuales no se consideran en este trabajo, es la utilización de pétalos solares, que a pesar de estar limitados por las eficiencias de Carnot, son económicamente más factibles que las celdas fotovoltaicas. Otro posible caso de estudio es la utilización alterna de los procesos solares y eólicos, dependiendo de las condiciones climáticas del sitio en el cual sea instalado.

La utilización de una celda electrolítica a presión, evita la utilización de un compresor en cada una de las salidas de los gases, disminuyendo el costo de inversión, además de evitar la utilización de estos equipos que son grandes generadores de destrucción exergética.

Las eficiencias de las celdas de combustible utilizadas en este trabajo son altas (65%) debido a la utilización de celdas que utilizan al hidrógeno relativamente puro (evitando la reformación necesaria para otros combustibles, el cual es aproximadamente el 40% del costo total de la celda), además de utilizar el oxígeno de forma directa, o sea obtenido del aire, lo cual aumenta la eficiencia de las celdas de combustible.

Sin embargo el análisis exergo económico nos da costos demasiado elevados en el sistema de almacenamiento del oxígeno, pudiendo eliminarse si utilizamos al aire como agente comburente en el prototipo, que también es un posible caso de análisis para trabajos posteriores.

La cogeneración, fue una consideración inicial que se tuvo en cuenta, pero los balances exergéticos arrojaron como resultado que la cantidad de calor de desecho de las celdas de combustible, es muy pequeña, y no cubriría ni las necesidades mínimas de energía de suministro para calentar el agua que generalmente utiliza una persona (30 l de agua caliente a 40°C diarios).

Por lo cual en este caso en particular no se consideró factible su utilización, sin embargo en sistemas que generan una mayor potencia, la cogeneración aumentaría grandemente la eficiencia de la celda de combustible y por lo tanto la eficiencia global del sistema.

En el análisis exergo económico se muestra que los costos se incrementan grandemente en la salida de la celda de combustible, ya que el flujo utilizado en este caso es mínimo (4.6% de su capacidad total), cuyo costo se reduce al incrementar el flujo utilizado en la celda de combustible.

El análisis económico suponiendo una TREMA del 10% con una vida útil del sistema de 20 años, dará un costo por Watt de 1.13 dlls, que equivale a 0.51 dlls/kWh, lo cual demuestra que económicamente a pesar de ser mas costoso que las tecnologías convencionales, puede competir con la energía eléctrica obtenida de los reactores nucleares.

Sin embargo en este análisis no se están considerando las externalidades, que por ser mínimas en las tecnologías no convencionales (utilizan energías renovables), demostrarían una mayor rentabilidad y por lo tanto una mayor competitividad con las demás tecnologías existentes. Además de tener la ventaja que el combustible suministrado es gratis, que al ser considerado nos da en el análisis exergo económico un costo de la energía total de 0.14 dlls/kWh, siendo este función del combustible y de los costos de inversión del panel fotovoltaico. El cual es un costo muy competitivo frente a otras alternativas.

Finalmente se puede concluir que, la aplicación de las técnicas de análisis basadas en la segunda Ley de la Termodinámica, en combinación con la Teoría General de Sistemas, proporciona potentes herramientas para el diagnostico del funcionamiento de los sistemas energéticos.

Esta metodología resuelve de manera inequívoca los interrogantes de donde, como y que parte de la energía consumida por el proceso puede ahorrarse manteniendo constantes la cantidad y las especificaciones de los productos finales de un proceso, con ella se pueden detectar las posibles alternativas de ahorro, cuantificarlas y realizar una primera ordenación de las mismas.

Haciendo un énfasis “Las nuevas tecnologías basadas en las energías renovables, no están en lucha con las tecnologías convencionales, no se pretende sustituir completamente a la energías fósiles, sino de encontrar un punto óptimo en el cual sean utilizadas todo tipo de tecnologías, sin apostar a una en particular, que permitan formar una economía sustentable con un equilibrio, económico, social y ambiental”.

Por lo que todavía hay mucho por hacer, por estudiar, analizar y descubrir, existiendo un gran campo por desarrollar. El cual toca descubrir a las nuevas generaciones que tengan inquietudes por construir un planeta sustentable, en armonía con la naturaleza.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alsema E. A., B. Van Engelenburg C. W., "Proceedings of the Eleventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, Switzerland, October, 1992, pp.995-998.
2. Barrigh J., "Comunicación Personal", Ballard Generation System, octubre, 1999.
3. Bedja I., Hotchandani S., Kamat P. V., **Physic Chemical**, Vol.98, 1994, p.4133.
4. Bejan Adrián, Tsatsaronics G., Moran,"*Thermal Design and Optimization*", Willey
5. Bolton James R., "Solar Photoproduction of Hydrogen: A Review",**Solar Energy**, Vol 57, No.1, 1996, pp 37-50.
6. Bockris, J. O'M., Veziroglu T. N, Smith D., "Solar Hydrogen Energy: The Power to Save the Earth", London: Macdonald & Co. Ltd., 1991.
7. Boschloo, "Solar Energy Conversion by Porphyrin-Sensitized Titanium Dioxide", Tesis Doctoral, Universidad Técnica de Delft, Dic, 1996.
8. "Boosting Power Plant Efficiency", Departamento de Energía de los Estados Unidos, 1998.
9. Cano Ulises, "Las Celdas de Combustible: Verdades sobre la Generación de Electricidad Limpia y Eficiente Vía Electroquímica", Boletín IIE, 1999.
10. Castellan Gilbert William, "Physical Chemistry", Ed 2. SITESA, 1924.
11. Chandra S., Pandey R. K., "Phys. Stat. Sol. (a) ", Vol.72, pp.415-439 (1982).
12. Chaplin D. M., Fueller C. S., Pearson G. L., "Application Physics", Vol.25, 1954, pp.676-677.
13. Collin García, Sherer Leopoldo, "Introducción a la Termodinámica Clásica", TRILLAS, 1970.
14. Dhar H., "Comunicación Personal", BCS Technology Inc, septiembre, 1999.
15. Dinga Gustav P., "Hydrogen: The Ultimate Fuel and Energy Carrier", **Hydrogen Energy**, Vol.14, No.11, 1989, pp 777-784.
16. Dini D., "Hydrogen Production Through Solar Energy Water Electrolysis", **Hydrogen Energy**, Vol.8, No.11/12, 1983, pp 897-903.
17. Energy Efficiency Policies an Indicator for the Tokyo Conference, WEC, 1998.
18. Fahrenbruch A. L., Bube R.H., "Fundamentals of Solar Cells, New York: Academic Press", 1983.
19. Fujishima A., Honda K, Bull., "Chemical Society Japan", Vol. 44, 1971, p. 1148
20. Fujishima A., Honda K., Nature, Vol. 238, No. 37, 1972.
21. Green M. A., Emery K., Bücher K., King D. L., Igari S., "Progress in Photovoltaics: Research and Applications", Vol.5, 1997. pp. 51-54.
22. Goetberger A., "Solar Energy, the Key to Sustainable World", **Applied Solar Energy**, Vol 31, No.1,3-6,1995.
23. Goc J., Tien H. T., **Hydrogen Energy**, Vol. 18, 1993, pp.5-8.
24. Hirschenhofer J.H., Stauffer D.B., Engleman R.R., Klett M.G., "Fuel Cell Handbook", Parson Corporation, Department of Energy, Edición 4, November, 1998.
25. Hubbard H. M, **Science**, Vol. 244, Abril, 1989, pp.297-304.
26. Kotas T.J, "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis",

27. Kunstreich S., Sterlini J., "Theoretical Efficiency Limit of Water Electrolysis and Practical Means to Approach it in Hydrogen Energy System" Vol.5, 1979.
28. LeRoy R.L. , "Industrial Water Electrlysis: Present and Future", **Hydrogen Energy**, Vol. 8 No. 6, 1983, pp 401-417.
29. Lin G.H., Carlson D.E., "Photovolatics in the years 2023", **International Journal of Hydrogen Energy**,No. 25, 2000, pp 807-811.
30. Malo T.J., Cano C.U., "La Tecnología de las Celdas de Combustible como Alternativa de Generación Eléctrica", Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE/15/10902/1 01/P, enero, 1999.
31. Maron & Proutton, "Fisicoquímica", LIMUSA,1996.
32. Moran, Shaphiro, "Fundamentals of Engeneering Thermodynamics", Ed. 2.
33. Morgan Daniel and Sissine Fred, "Hydrogen: Technology and Policy",**Congressional Research Servive**, The Committee for the National Institute for the Enviroment, Washington DC, 1995.
34. Moritaka Kato, Shouji Mezawa, Kouchi Sato,"Polymer-Electrolite Water Electrolysis", **Applied Energy**, Vol.59, No.4, 1998, pp 261-271.
35. Moore T., "Market Potential for Fuel Cells", **EPRI Journal**, mayo-junio, 1997, pp. 7-17.
36. Moring FairesVirgi, "Thermodynamics", Ed.4,Mc row Hill, 1897.
37. Moskowitz P., Zweibel K., Fthenakis V., "Health, Safety and Environmental Issues Relating to Cadmium Usage in Photovoltaic Energy Systems", **SERI/TR-211-3621**, 1990.
38. "Natural Gas Fuel Cells:Technology for improving Energy Efficiency while Reducing Enviromental emisións", **Federal Technology Alerts del Departamento de Energía de los Estados Unidos**, 1998.
39. Nejat T., Veziroglu, "Hydrogen Technology for Energy Needs of Human Settlements", **Hydrogen Energy**, Vol 12, No. 2, 1987, pp 99-129.
40. Partain L.D., "Solar Cells and Their Application", Editor. John Wiley and Sons, New York: 1995.
41. "Photovoltaic Insider's Report", Vol. XVI, No. 2, Ed. R.Curry , Feb., 1997.
42. Sandia National Laboratorios, "Energía Fotovoltaica para Proyectos de Desarrollo", **DOE** ,1994.
43. Sandia Technology, "Developing the Energy Resources for the New Era", Vol. 3, No.1, 2000.
44. Sandia Technology, "Sandia Promotes Renewable Energy Technologies in México", Vol. 3, No.1, 2001, pp 15-16.
45. Sayas J.L.F., Cajigal V.E., "Cálculo de la Irradiación Instantánea en la República Mexicana", Series del Instituto de Ingeniería, No. 543, 1992.
46. Schucan T., "International Energy Agency Hidrogen Implementing Agreement", **Paul Shherrer Institute Switzerland**, No. 11,2000,
47. Stah W. I, K. Voss, and Goetzberger, " The Self-Sufficient Solar House Freiburg", **Applied Solar Energy**, Vol. 31, No.1, 1995, pp 32-52.
48. Swanson R, Verlinden P., Crane R., Sinton R., Tilford C., "Proceedings of the Eleventh E.C" **Photovoltaic Solar Energy Conference** ", Switzerland, October, 1992, pp.35-40.
49. Tsatsaronis G., Winhold M., "Exergoeconomic Análisis and Evaluation of Energy Conversión Plants", **Energy**, Vol.10, 1985, pp. 69-94.
50. Tsatsaronis G., "A Review of Exergoeconomic Methodologies", **Second Law Analysis of Thermal Systems**, ASME Book 100236, 1987, pp. 81-87.
51. Turrini, "E. O Caminho do Sol", Editora Vozes Ltda., Brasil, 1993.
52. Ureta Barrón Ernesto, "El Equilibrio Químico", LIMUSA, 1975.
53. Valero A., Lozano M.A., Muñoz M., "A General Theory of Exergy Saving", **ASME**, WAM 1986, AES-Vol.2.3, pp. 1-21.

54. Valero A., Guallar JM Muñoz., M., "*The Exergetic Cost and Related Concepts, an Application to Simple Cogeneration Plant*", Second Law Analysis of Thermal Systems, ASME Book 100236, 1987, pp. 123-130.
55. Vanhanen J.P., Kauranen P.S., Lund P.D. and Manninen L.M., "*Simulation of Solar Hydrogen Energy System*", *Solar Energy*, Vol.53, No.3, 1994, pp 267-278.
56. Viñas Elisa, "*Tesis de Licenciatura, Propuesta de Diversificación Energética en la Generación de Electricidad Empleando Fuentes Renovables de Energía como Estrategia para el desarrollo Sostenido de México a Largo Plazo*", UNAM México, 2000, pp 28-78.

GLOSARIO

<i>Ánodo</i>	Electrodo conectado al polo positivo de un generador. En la electrolisis se depositan en el los aniones
<i>Cátodo</i>	Electrodo negativo del que parten los electrones. En la electrolisis se depositan en el los cationes
<i>Catalizador</i>	Sustancia con capacidad de acelerar o disminuir la velocidad de reacción química, sin que esta misma sufra alteración
<i>Cogeneración</i>	Conjunto de equipos interconectados, que permiten generar secuencialmente energía eléctrica o mecánica, y energía térmica, útiles a los procesos industriales, a partir de una misma fuente de energía primaria
<i>Combustibles Fósiles</i>	Carbón, petróleo y gas natural. Se les llama así porque su origen son los restos de plantas y animales prehistóricos
<i>Corriente Alterna (CA)</i>	Corriente eléctrica en la cual la dirección del flujo es invertida a intervalos frecuentes; 60 ciclos por segundo, es usado generalmente en una toma eléctrica de una casa o negocio
<i>Corriente Directa (CD)</i>	Corriente eléctrica en la cual el flujo de electrones circula solamente en una dirección. Este es el tipo de corriente producida por un sistema fotovoltaico
<i>Corrosión</i>	Capacidad de destruir las superficies al hacer contacto con ellas
<i>Desarrollo Sustentable</i>	Aquel tipo de desarrollo económico que satisface las necesidades de la presente generación, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades
<i>Ecosistema</i>	Unidad estructural, funcional y de organización que incluye a todos los organismos y las variables ambientales bióticas y abióticas que interactúan en un área determinada

<i>Efecto Invernadero</i>	Alteración climatológica causada por el aumento del bióxido de carbono y otros gases en la atmósfera. Su principal característica es el aumento de la temperatura atmosférica cerca de la superficie terrestre
<i>Electrólisis</i>	Proceso químico en el cual, por medio de la electricidad, la molécula del agua es separada en hidrógeno y oxígeno
<i>Electrolito</i>	Cualquier sustancia que en disolución se disocia en iones y, por lo tanto, es capaz de conducir la corriente eléctrica
<i>Energía</i>	Capacidad de un cuerpo de producir un efecto
<i>Energía Renovable</i>	Flujos de energía regenerables o virtualmente inagotables. Los que incluyen la energía solar (eléctrica y termal), biomasa geotérmica, eólica, mareas y fuentes de energía hidráulica
<i>Equilibrio Ecológico</i>	El que existe cuando los componentes bióticos de un ecosistema mantienen su número relativo en un nivel más o menos constante y, por lo tanto, el ecosistema se encuentra estable
<i>Hábitat</i>	Suma total de las condiciones y los factores ambientales de un lugar específico que es ocupado por un organismo, población o comunidad
<i>Hidrocarburo</i>	Sustancia orgánica en cuya estructura intervienen exclusivamente átomos de carbono e hidrógeno
<i>Ión</i>	Átomo u otra partícula con carga eléctrica positiva (catión) o negativa (anión), como los existentes en una disolución
<i>kW</i>	Medida de velocidad con que se ejecuta un trabajo, igual a la proporción de flujo (Amperios) multiplicado por el voltaje de ese flujo (Volts)
<i>kWh</i>	Medida de electricidad (energía) igual a la potencia eléctrica multiplicada por la cantidad de tiempo en horas

<i>Nafión</i>	Membrana semipermeable que permite el paso de las moléculas del disolvente (protones de hidrógeno), pero no las del soluto (electrones)
<i>Oxidación</i>	Reacción en la que la partícula de la sustancia oxidada (átomo o ión) pierde electrones
<i>Proceso Fotoquímico</i>	Conjunto de reacciones químicas que ocurren por influencia de una energía radiante, ya sea del sol o de otra fuente
<i>Protón</i>	Partícula fundamental del átomo con carga eléctrica positiva y masa de 1 836 veces mayor que la del electrón, el número de protones (número atómico) determina la naturaleza de cada elemento
<i>Radiación</i>	Emisión o transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas
<i>Reducción</i>	Parte de una reacción en la que una sustancia oxidante absorbe los electrones que la sustancia oxidada pierde

ABREVIATURAS

<i>A</i>	Área
A	Anualidad (Costo Anual)
<i>A</i>	Matriz de Incidencia
<i>A_F</i>	Matriz de Recursos
<i>A_P</i>	Matriz de Productos
<i>A_L</i>	Matriz de Pérdidas
B	Exergía
B₅	Exergía de la Corriente 5
B*	Costo Exergético
C	Costos
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
D	Diámetro
<i>D</i>	Destrucción de Exergía
ρ_c	Densidad de Corriente
E	Requerimiento Anual de Energía
E	Potencial del Metal
<i>E</i>	Vector Columna Energético
e	Equivalente Electroquímico
<i>e</i>	Eficiencia Total del sistema
<i>e_c</i>	Eficiencia del Regulador Eléctrico
<i>e_{dc}</i>	Eficiencia de la conversión de CD a CA
<i>e_{ec}</i>	Eficiencia de la Celda Electrolítica
<i>e_{fc}</i>	Eficiencia de la Celda de Combustible
<i>e_{ph}</i>	Eficiencia de la Celda Fotovoltaica
<i>e_s</i>	Eficiencia del Sistema de Almacenamiento
F	Combustible
<i>F</i>	Recurso
k	Costo Exergético
I	Irreversibilidades
I	Intensidad de Corriente por Celda

I_T	Intensidad de Corriente Total
I_T	Inversión Total
i	Tasa de Interés Anual
L	Longitud
L	Pérdidas Exergéticas
m	Masa
M	Vector Columna Másico
n	Número de Celdas
n	Años de Financiamiento
η_b	Eficiencia Exergética
η_{energ}	Eficiencia Energética
P	Potencia
P	Producto
PM	Peso Molecular
PTFE	Poli-tetra-fluoro-etileno
Π	Costo Exergo económico de Todos los Flujos
Q_{sum}	Calor Suministrado
R	Radiación Solar Total
R	Interés Total de la Inversión
t	Tiempo
t_E	Espesor de Electrodo
U_{cell}	Voltaje Generado por Celda
V	Voltaje
W	Flujo Másico
W_d	Energía Utilizada Directamente
W_{H_2}	Flujo Másico de Hidrógeno
W_{H_2O}	Flujo Másico de Agua
W_{O_2}	Flujo Másico de Oxígeno
$Wt\%$	Por Ciento en Peso
Z	Costos de Inversión, Operación y Mantenimiento

INDICE DE FIGURAS

DIAGRAMAS

Diagrama 1.	Cadenas de Transformación Propuesto para las Fuentes Renovables.....	1
Diagrama 2.	Diagrama de Bloques del Proceso	49
Diagrama 3.	Eficiencias de Cada Equipo del Sistema	53
Diagrama 4.	Balance de Masa, Energía y Exergía de un Dispositivo Productor de Electricidad (Cuando Toda la Electricidad Captada por el Panel Solar es Convertida a Hidrógeno y Almacenada).....	59
Diagrama 5.	Balance de Masa, Energía y Exergía de un Dispositivo Productor de Electricidad (Cuando una Parte de la Electricidad es Suministrada por el Dispositivo y la Otra Directamente Salida del Panel Solar.....	63
Diagrama 6.	Balance de Masa, Energía y Exergía de un Dispositivo Productor de Electricidad (Cuando la Electricidad Necesaria es Suministrada por la Energía Almacenada en Forma de Hidrógeno por el Dispositivo.....	64
Diagrama 7.	Balance de Masa, Energía y Exergía de un Dispositivo Productor de Electricidad (Cuando Toda la Electricidad Necesaria es Suministrada por la el Dispositivo.....	65

FIGURAS

Fig.1	Recursos para la biomasa, cortesía Bigen	2
Fig.2	Recursos generados por la agricultura e industrias que procesan madera	3
Fig.3	Esquema de Producción de Biocarburantes	4
Fig.4	Aerogeneradores localizados en Alto Baguales, Coyhaique, Chile	5
Fig.5	Central Geotérmica ubicada en Islandia	7
Fig.6	Hidroeléctricas localizadas en El Salvador, Centrales Cerrón Grande, 15 de Septiembre, 5 Noviembre, Guajoyo	9
Fig.7	CEI, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica de Río Lempa (El Salvador)	10
Fig.8	Energía Solar Disponible	11
Fig.9	Colectores Solares, Cortesía: Laboratorios Sandia, Sheffler de México	13
Fig.10	Celda Policristalina	15
Fig.11	Plataforma Solar de Israel, Plataforma Solar Almeria ZSW	19
Fig.12	Componentes y Funcionamiento de una Celda de Combustible	28
Fig.13	Celdas de Combustible Conectas en Serie	29
Fig.14	Celda de Combustible Cortesía: Siemens AG, Planta de Alta Temperatura	31
Fig.15	Celdas de Combustible PEM 5kW Utilizadas en Naves Aeroespaciales por la NASA	36
Fig.16	Prototipos de autos que operan con Celdas de Combustible Cortesía: GMein Hywire Sacramento	38
Fig.17	Diferentes Aplicaciones de las Celdas de Combustible PEM Casa Habitación, Bicicleta adaptada, Lámpara Maglite BZ a partir de ZSW.....	38
Fig.18	Celdas Alcalinas, Cortesía: Space Shuttle	39

TABLAS

Tabla 1	Eficiencias Confirmadas para Celdas Solares Terrestres Medidas Para el Espectro Global Am 1.5 (1kw/M ²) A 25°C	10
Tabla 2	Tipos de Celdas de Combustible y Características Principales.....	33
Tabla 3	Comparación Entre Tecnologías Avanzadas de Turbina y las Tecnologías de Celdas de Combustible	44
Tabla 4	Equipos y Función que Desempeñan en el Prototipo	50
Tabla 5	Corrientes y Función que Desempeñan en el Prototipo	51
Tabla 6	Balance de Materia	68

Tabla 7	Matriz de la Forma $A=A_F-A_P-A_L$	69
Tabla 8	Balance de Energía	71
Tabla 9	Matriz de la Forma $A=A_F-A_P-A_L$	72
Tabla 10	Propiedades del sistema Cuando una Parte de Electricidad es Suministrada por el Dispositivo y la otra Directamente Salida del Panel Solar	73
Tabla 11	Balance de Exergía	75
Tabla 12	Ecuaciones Complementarias	80
Tabla 13	Supuestos Económicos	82
Tabla 14	Matrices de Incidencia (A/a) y $(A/a)^{-1}$	83
Tabla 15	Matrices de la Forma $A=A_F-A_P-A_L$	84
Tabla 16	Propiedades del Sistema por Corriente	86
Tabla 17	Propiedades del Sistema por Equipos	86
Tabla 18	Variando el Flujo de Electricidad que se Convierte a Hidrógeno, y el Porcentaje de este que se Almacena (Por Corriente)	88
Tabla 19	Variando el Flujo de Electricidad que se Convierte a Hidrógeno, y el Porcentaje de este que se Almacena (Por Equipos)	89
Tabla 20	Variando el Flujo de Radiación	90

Anexo I. IRRADIACIÓN SOLAR DE DIFERENTES ESTADOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA (W/m²)

ESTADO	CIUDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MIN	MAX	MED
Sonora	Hermosillo	4.0	4.6	5.4	6.6	8.3	8.6	6.9	6.6	6.7	6.0	4.7	3.9	3.9	8.6	6.0
Sonora	Guaymas	4.5	5.7	6.5	7.2	7.3	6.8	5.9	5.8	6.3	5.9	5.1	5.6	4.5	7.3	6.0
Chihuahua	Chihuahua	4.1	4.9	6.0	7.4	8.2	8.1	6.8	6.2	5.7	5.2	4.6	3.8	3.8	8.2	5.9
Coahuila	Piedras Negras	3.1	3.6	4.2	4.5	4.8	6.0	6.7	6.3	4.9	4.1	3.3	2.9	2.9	6.7	4.5
Coahuila	Saltillo	3.8	4.2	4.8	5.1	5.6	5.9	5.9	5.6	5.2	4.4	3.6	3.3	3.3	5.9	4.8
Nuevo León	Monterrey	3.2	3.6	4.1	4.3	4.8	5.5	6.1	5.6	5.0	3.8	3.3	3.0	3.0	6.1	4.4
San Luis Potosí	Río Verde	3.6	4.0	4.6	4.9	5.4	5.6	5.8	5.8	5.1	4.3	3.7	3.3	3.3	5.8	4.7
San Luis Potosí	San Luis Potosí	4.3	5.3	5.8	6.4	6.3	6.1	6.4	6.0	5.5	4.7	4.2	3.7	3.7	6.4	5.4
Zacatecas	Zacatecas(la bufa)	4.9	5.7	6.6	7.5	7.8	6.2	6.2	5.9	5.4	4.8	4.8	4.1	4.1	7.8	5.8
Campeche	Campeche	4.0	4.1	5.5	5.8	5.5	4.9	4.9	5.1	4.7	4.4	4.2	3.7	3.7	5.8	4.7
Guanajuato	Guanajuato	4.4	5.1	6.1	6.3	6.6	6.0	6.0	5.9	5.8	5.2	4.8	4.6	4.4	6.6	5.6
Colima	Colima	4.4	5.1	5.3	5.8	6.0	5.2	4.9	5.0	4.6	4.4	4.4	3.9	3.9	6.0	4.9
Colima	Manzanillo*	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Aguascalientes	Aguascalientes	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	6.3	6.1	5.9	5.7	5.1	4.8	4.0	4.0	7.2	5.6
Guerrero	Chilpancingo	4.1	4.5	4.9	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	4.7	4.4	4.1	3.8	3.8	5.2	4.7
Guerrero	Acapulco	4.8	5.3	6.1	5.9	5.6	5.1	5.3	5.4	4.9	5.2	5.0	4.7	4.7	6.1	5.3
Nayarit	Tepic	3.9	4.3	4.8	5.5	6.1	5.3	4.9	5.3	4.4	4.4	4.0	4.8	3.9	6.1	4.8
Veracruz	Tuxpan	3.1	3.8	4.4	4.8	4.7	4.4	4.7	5.5	4.4	4.1	3.4	3.1	3.1	5.5	4.2
Veracruz	Córdoba	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.5	4.1	3.5	3.1	2.8	2.8	4.6	3.7
Veracruz	Orizaba	3.3	3.5	3.9	4.2	4.9	4.4	4.5	4.6	4.3	3.6	3.3	3.1	3.1	4.9	4.0
Veracruz	Jalapa	3.2	3.5	3.8	4.3	4.6	4.4	4.9	5.0	4.4	3.7	3.3	3.0	3.0	5.0	4.0
Veracruz	Veracruz	3.7	4.5	4.9	5.1	5.1	4.8	4.7	5.1	4.6	4.8	4.1	3.6	3.6	5.1	4.6
Chiapas	Comitán	4.1	4.4	4.8	4.9	5.1	4.8	5.5	5.5	4.8	4.0	4.0	3.7	3.7	5.5	4.6
Chiapas	Arriaga	5.1	5.4	5.5	5.9	5.6	5.2	5.9	5.5	5.1	5.3	5.1	4.7	4.7	5.9	5.4
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	3.8	4.4	4.6	4.8	5.3	5.1	5.4	5.3	4.9	4.4	4.1	3.7	3.7	5.4	4.7
Chiapas	San Cristóbal	4.0	4.3	4.5	4.5	4.8	4.7	5.4	5.3	4.6	4.2	3.9	3.7	3.7	5.4	4.5
Chiapas	Tapachula	5.4	4.9	4.8	4.6	4.7	4.7	5.2	5.1	4.6	4.1	4.3	4.1	4.1	5.4	4.7
Quintana Roo	Chetumal	3.9	4.7	5.4	5.7	5.3	4.7	4.9	5.0	4.5	4.4	4.0	3.7	3.7	5.7	4.7
Quintana Roo	Cozumel	3.9	4.6	5.3	5.7	5.2	4.8	4.9	4.9	4.6	4.4	4.0	3.8	3.8	5.7	4.7
Oaxaca	Salina Cruz	5.4	6.3	6.6	6.4	6.1	5.0	5.6	5.9	5.2	5.9	5.7	5.2	5.0	6.6	5.8

Oaxaca	Oaxaca	4.9	5.7	5.8	5.5	6.0	5.4	5.9	5.6	5.0	4.9	4.8	4.4	4.4	6.0	5.3
Jalisco	Colotlán	4.6	5.7	6.5	7.5	8.2	6.6	5.8	5.6	5.8	5.3	4.9	4.1	4.1	8.2	5.9
Jalisco	Lagos de Moreno	4.5	5.3	6.1	6.7	7.2	6.1	5.8	5.6	5.5	5.0	4.7	4.0	4.0	7.2	5.5
Jalisco	Guadalajara	4.6	5.5	6.3	7.4	7.7	5.9	5.3	5.3	5.2	4.9	4.8	4.0	4.0	7.7	5.6
Durango	Durango	4.4	5.4	6.5	7.0	7.5	6.8	6.0	5.6	5.7	5.1	4.8	3.9	3.9	7.5	5.7
Tamaulipas	Soto la Marina	3.4	4.2	4.9	4.9	5.1	5.3	5.4	5.4	4.9	4.6	3.7	3.2	3.2	5.4	4.6
Tamaulipas	Tampico	3.3	4.1	4.7	6.4	5.0	4.9	4.9	4.9	4.6	4.6	3.7	3.2	3.2	6.4	4.5
Yucatán	Progreso	4.1	4.9	5.4	5.5	5.3	5.1	5.3	5.3	5.0	5.0	4.4	4.0	4.0	5.5	4.9
Yucatán	Valladolid	3.7	4.1	3.1	5.4	5.7	5.3	5.4	5.4	4.9	4.2	3.8	3.5	3.1	5.7	4.5
Yucatán	Mérida	3.7	4.0	4.6	5.2	5.7	5.5	5.7	5.5	5.0	4.2	3.8	3.4	3.4	5.7	4.7
Baja California	La Paz	4.4	5.5	6.0	6.6	6.5	6.6	6.3	6.2	5.9	5.8	4.9	4.2	4.2	6.6	5.7
Baja California	San Javier	4.2	4.6	5.3	6.2	6.5	7.1	6.4	6.3	6.4	5.1	4.7	3.7	3.7	7.1	5.5
Baja California	Mexicali	4.1	4.4	5.0	5.6	6.6	7.3	7.0	6.1	6.1	5.5	4.5	3.9	3.9	7.3	5.5
Sinaloa	Mazatlan	3.9	4.8	5.4	5.7	5.7	5.6	4.8	4.9	4.7	5.0	4.5	3.9	3.9	5.7	4.9
Sinaloa	Culiacán	3.6	4.2	4.8	5.4	6.2	6.2	5.4	5.1	5.2	4.6	4.2	3.4	3.4	6.2	4.9
Querétaro	Querétaro	5.0	5.7	6.4	6.8	6.9	6.4	6.4	6.4	6.3	5.4	5.0	4.4	4.4	6.9	5.9
D.F.	Tacubaya	4.4	5.2	5.8	5.8	5.7	5.1	4.9	4.9	4.7	4.4	4.2	3.8	3.8	5.8	4.9
México	Toluca	4.4	4.9	5.3	5.4	5.2	5.2	4.9	4.9	4.6	4.4	4.2	3.9	3.9	5.4	4.8
México	Chapingo	4.5	5.1	5.6	5.8	5.9	5.4	5.2	5.2	5.0	4.7	4.6	3.9	3.9	5.9	5.1
Tlaxcala	Tlaxcala	4.6	5.1	5.5	5.4	5.6	5.2	5.3	5.2	5.1	4.9	4.7	4.0	4.0	5.6	5.1
Puebla	Puebla	4.9	5.5	6.2	6.4	6.1	5.7	5.8	5.8	5.2	5.0	4.7	4.4	4.4	6.4	5.5
Hidalgo	Pachuca	4.6	5.1	5.6	6.8	6.0	5.7	5.9	5.8	5.3	4.9	4.6	4.2	4.2	6.8	5.4
Michoacán	Morelia	4.2	4.9	5.5	5.8	5.9	5.2	5.0	5.1	4.9	4.6	4.3	3.7	3.7	5.9	4.9

Fuente: CONAE (Comisión Nacional de Energía, 2004)

A TODOS MIS PROFESORES

Gracias por dejar parte de ustedes en mí, por su amor a la enseñanza, por su paciencia y ética... pero sobre todo por su profesionalismo.

Al Profesor Augusto:

Por su tiempo y dedicación en este proyecto, por todo su apoyo y ayuda que recibí estos dos años, por su empeño en lograr que seamos mejores profesionistas, por la confianza que depositó en mí, además de ser una gran persona no sólo intelectual sino internamente... Gracias.

Al Profesor Dirzo:

Por seguirme ayudando y apoyando aún cuando no debía hacerlo más, por como antes le dije, dedicarme su tiempo, esfuerzo y dedicación.

Por ser una persona tan dedicada y contribuir constantemente a formar un mundo mejor... Gracias.

A todos mis profesores de la Maestría:

Gracias por todo, y gracias por hacerme ver la ingeniería de otra manera: Ing. Augusto Sánchez, Ing. Eduardo Buendía, Dr. Victor Padilla, Dr. Arturo Rainking y Rubén Ortega.

A todos mis Sinodales:

Por todo su tiempo y dedicación a la mejora de ésta tesis, por todos los percances que les ocasioné, pero sobre todo por su ayuda... Gracias.
Ing. Augusto Sánchez Cifuentes, Dr. Víctor Rodríguez Padilla, Dr. Jaime Cervantes de Gortari, M.I. Eduardo Medina, Dr. Gabriel León.

A TODOS MIS AMIGOS

Elisa

Gracias por ser mi amiga, por apoyarme y ayudarme en cada momento difícil de mi vida, además de compartir conmigo mis logros y momentos felices... Te quiero mucho.

Ollie

Como ya lo había escrito antes, porque por ti hoy estoy aquí.
Porque me ayudaste y me guiaste al camino de la ingeniería, a la búsqueda de... siempre algo más.

Porque aunque no estes físicamente a mi lado en los momentos felices, se que siempre estarás ahí... haciéndome sentir más fuerte de lo que soy.

Al club Motopsyco

Por ser mis amigos, por todos los días felices que hemos compartido, porque nos une una una pasión muy grande y muy intensa por la motocicleta... gracias por su cariño y amistad Adrián, Juan, Carlos, Jaime, Juan mamey, Israel trailer, Memo, Gustavo, Dany, Andy, Jan, Carlitos, Oskar y Germán.

Rodolfo

Gracias por compartir conmigo esta etapa de la vida, en la cual fuimos creciendo intelectualmente juntos... pero principalmente gracias por ser mi amigo.

Guillermo

Por ser alguien realmente especial en mi vida, por estar en cada momento feliz y difícil, apoyándome y confiando en mí incondicionalmente, sin importar cual sea mi decisión.

Por contribuir a mis conocimientos con todas esas pláticas llenas de saber.

A MI FAMILIA

A mis Papás:

Porque por ustedes existo, y hoy soy lo que soy, porque siempre han estado ahí para ayudarme y apoyarme, porque siempre creyeron en mí, porque por ustedes he tenido siempre lo mejor haciendo mi vida más fácil, por la gran imagen que son para mí y simplemente porque no existen padres mejores que los que yo tengo, y porque por ustedes soy lo máximo . . .

Gracias por hacerme tan perfecta papitos queridos!

A Ricky:

Por ser un niño tan lindo, noble y cariñoso, por aguantarme y quererme.

Y aunque estas algo desubicado, se que un día tu también me dedicarás un espacio en tus logros... Te quiero un buen.

A Maya:

Por ser la perrita más bonita, inteligente, noble, tierna y cariñosa del mundo.

A Nancy:

Por ser mi mejor amiga y la mejor de las hermanas, por quererme y apoyarme siempre, por ser mi inconsciente... pero sobre todo por ser como eres, alguien realmente especial.

A Juan:

Por ser mi nuevo hermanito ideal, por tu cariño, por tu espontaneidad y nobleza... gracias.

A ISRAEL

Gracias por existir, por haber nacido justo para mí, por ser la persona más especial y perfecta que puede existir, pero sobre todo por ser mío.

Por ser la motivación para querer ser mejor a cada instante, por motivarme a sobresalir en todo, por darme esa felicidad que sólo el amor te puede dar, por estar ahí siempre, amándome y apoyándome, por dar sentido a mi vida y por muchísimas cosas más.....Siempre te amaré.

REALMENTE SOY MUY AFORTUNADA POR ESTAR RODEADA DE LAS PERSONAS MÁS ESPECIALES DEL MUNDO

... TAL VEZ POR ESO SOY LO MÁXIMO, NO??