

01178

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UNA PROPUESTA DE INTEGRACION MODULAR DE LAS FUENTES
DE ENERGIA RENOVABLES, VIA HIDROGENO, Y
EL CICLO DE POTENCIA RANKINE

T E S I S
Q U E P R E S E N T A
RAFAEL SANCHEZ DIRZO
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
(A R E A E N E R G E T I C A)

DIRECTOR DE TESIS: DR. VICTOR RODRIGUEZ PADILLA



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.

INDICE

Presentación	i
Abstract	1
Resumen	2
Generalidades	4
Capítulo 1. Hidrógeno solar: una alternativa al dilema energético del mundo.	10
1.1. El ciclo químico hidrógeno-agua.	12
1.2. La flama acuosa.	23
1.3. El hidrógeno como combustible.	25
1.4. Las energías renovables.	31
1.4.1. Energía solar.	32
1.4.2. Energía eólica.	33
1.4.3. Energía maremotriz.	35
1.5. Valoración y barreras al desarrollo de las renovables.	37
Capítulo 2. Los ciclos de potencia vía hidrógeno.	42
2.1. Electricidad: introducción física y económica.	44
2.2. El ciclo Rankine.	49
2.3. Ciclos de potencia utilizando las fuentes renovables	

vía hidrógeno.	54
Capítulo 3. El ciclo Rankine integrado al ciclo químico	
hidrógeno-agua.	61
3.1. Sistemas de transformación de las energías renovables.	64
3.2. Prototipo experimental de 800 W de potencia.	67
3.3. Prototipo industrial de 1 GW de potencia.	73
3.3.1. Memoria de cálculo.	81
Alegatos finales.	89
Conclusiones generales.	94
Bibliografía.	97
RESUMEN de costos comparativos entre el hidrógeno y los combustibles fósiles.	106
Apéndice A. Costos del hidrógeno en función del precio de la electricidad.	
Apéndice B. Costos del hidrógeno según diversas fuentes.	
Apéndice C. Precio de la eoloelectricidad.	
Apéndice D. Externalidades de los combustibles fósiles.	
Apéndice E. Diversos diagramas de proceso sobre el tema.	
Apéndice F. Producción de hidrógeno para el prototipo de 800 W.	
Portada de tesis: “El mundo cayendo en agua para su limpieza”.	

Portada capítulo 1: “Sunflower”, prototipo que transforma energía solar a electricidad por medio del ciclo stirling.

Portada capítulo 2: “Bombas de olas”, prototipo que transforma las ondas marítimas en electricidad por medio de su acoplamiento en turbogeneradores.

Portada capítulo 3: Prototipo de producción de hidrógeno a través de la energía eólica.

PRESENTACIÓN

Marco de desarrollo de la tesis

Fueron tres los autores que me iniciaron en la ecología: Rius, Ilich y Bahro. A ellos les debo mis primeros balbuceos en las energías renovables, aunque en realidad ellos no tuvieran la más mínima idea al respecto. Vinieron luego los verdes alemanes, la revista *Fusión* y la organización internacional Greenpeace. Los prototipos donde el sol, ríos, mares y viento son utilizados para generar electricidad, constituyen de los más admirables logros que la ingeniería moderna pone a disposición de las sociedades en su afán permanente de mejorar la calidad de vida, afectando lo menos posible el entorno. Pero las energías renovables requieren ser almacenadas si se quiere que sean competitivas. Su almacenamiento puede ser realizado a través de tecnologías donde la molécula de agua es rota para obtener sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno, las cuales, se conocen desde hace más de 200 años y sólo en los últimos treinta han logrado tal desarrollo, que las plantas de electrólisis de agua forman parte importante de las industrias de procesos químicos, donde la petroquímica sobresale. El marco de las energías renovables y su almacenamiento químico por medio de la electrólisis de agua, estaría incompleto sin el impresionante desarrollo que en el último lustro han tenido las celdas de combustible así como el ciclo de potencia Rankine, que tiene el indudable mérito de producir la mayoría de la electricidad consumida en todo el mundo. La valoración e integración de estos tres marcos del conocimiento (energías renovables, electrólisis de agua y ciclo Rankine), constituye los límites y el objeto de estudio de esta tesis.

Motivación

Sabemos que la quema de hidrocarburos junto a la fisión del núcleo de uranio son los mecanismos que actualmente se utilizan para generar el calor que a la postre vaporizará agua que a su vez moverá turbinas y generadores para producir potencia eléctrica. El efecto de sus respectivos procesos de combustión es actualmente catastrófico pero, por el momento, irresoluble, toda vez que el consumo energético no se puede detener so pena de paralizar nuestra actual civilización. Sin embargo, escenarios donde una transición lenta pero irreversible hacia el uso de las energías renovables y su almacenamiento químico en forma de hidrógeno, están ya construyéndose en EU, Alemania, Islandia, Japón y Australia, por citar sólo algunos países que han establecido políticas de gobierno claras (apoyadas en generosos presupuestos), para su tránsito a economías basadas en el hidrógeno y motivando a que el resto de los países, en forma particular México, elaboren una política que les permita transitar lo suficientemente rápido hacia una economía de hidrógeno pero lo suficientemente lento como para garantizar un tránsito seguro y confiable. Esta tesis está motivada por la intención de contribuir a que México elabore lo antes posible su propio escenario con el fin de convertir su economía sustentada en la energía de los hidrocarburos en una economía basada en las fuentes renovables, vía hidrógeno. La tarea de ninguna manera es fácil pero es momento de iniciarla lo antes posible.

Situación del problema

Los combustibles utilizados para la generación de electricidad en México son el carbón (12.91%), uranio (8.47%), diesel (0.99%), combustóleo (61.96%) y el gas natural los cuales, junto a las caídas de agua, la geotermia y el viento, sostienen una capacidad instalada de 38 GW, un crecimiento de la demanda entre 6 y 7% anual, una cobertura de más del 95% de la población, más de 180 centrales de potencia, 70 000 km de líneas de transmisión y subtransmisión y una calidad del servicio en voltaje, frecuencia y continuidad bastante satisfactorio (Prospectiva del sector eléctrico 2001-2010, S.E.).

Ante este buen panorama uno podría preguntar: ¿Qué tan pertinente es iniciar en México el uso de las energías renovables, vía hidrógeno, para sustituir a los hidrocarburos y al uranio en la generación de electricidad durante el transcurso del siglo XXI?

Las respuestas más convincentes se encuentran en consideraciones ambientales relacionadas con la producción, transporte, almacenamiento y combustión de los combustibles, actualmente utilizados para generar potencia eléctrica:

PETRÓLEO

- Contaminación del suelo, agua y aire debido a derrames durante su explotación, transporte, transformación y usos.
- Contaminación atmosférica por emisión de SO_x, NO_x, metales pesados y micro-partículas.

- Causa de efecto invernadero por emisión de CO₂.
- Producción de lluvia ácida.

CARBÓN

- Degradación del ecosistema donde la mina se sitúa.
- Contaminación de aguas subterráneas durante su almacenamiento.
- Producción de lluvia ácida.
- Contaminación por emisión de SO_x, NO_x y partículas.
- Efecto invernadero por emisión de CO₂.

URANIO

- Contaminación y degradación de terrenos donde las minas están situadas.
- Emisiones radioactivas de baja intensidad pero alto riesgo.
- Residuos de gran peligrosidad y de larga vida media.

Preguntas sobre la problemática

¿Es posible generar las actuales cantidades de electricidad sin emitir NO_x, SO_x, CO₂, metales pesados, plutonio, humos y partículas al ambiente?

¿Puede ser viable un modelo de desarrollo sustentable basado en las energías renovables, vía hidrógeno? ¿Puede México empezar a recorrerlo? ¿Cómo y en dónde iniciarlo?

¿Existen las condiciones políticas, sociales, científicas y tecnológicas en México, para que el hidrógeno sustituya, durante el transcurso del siglo XXI, a los hidrocarburos y al uranio para generar electricidad? ¿Cuánto costaría la

transición? ¿Es posible iniciarla mostrando su posibilidad teórica y práctica, diseñando y construyendo prototipos experimentales de menos de 1 kW y plantas piloto de 100 kW que preparen la construcción de plantas de Mega y Giga Watts de potencia sin tener el impacto que sobre el ambiente tienen las actuales plantas?

¿Cuál es la experiencia internacional al respecto? ¿Cuál es el actual estado del arte?

Presentación de trabajos precedentes sobre el tema

En 1874 Julio Verne escribía en *La Isla Misteriosa*: “Llegará el día en que el agua nos sirva de combustible, el hidrógeno y oxígeno, sus dos componentes, serán fuente inagotable de luz y calor, y desplegarán una fuerza muchísimo mayor de la que posee el carbón. Las bodegas de los buques y de las locomotoras llevarán en vez de carbón, estos dos gases condensados que arderán en las calderas produciendo un calor enorme. Y en nuestras casas también nos calentaremos con agua cuando se agoten las minas de carbón. El agua será el carbón del futuro”.

Desde entonces, la presencia del hidrógeno como combustible ha ido creciendo, iniciándose su uso masivo dentro de la industria aeroespacial. En los setenta del siglo pasado y como consecuencia del alza de los precios del petróleo, se analiza la posibilidad de construir economías sostenidas energéticamente sobre el hidrógeno. En 1975 aparece el primer libro sobre el tema titulado “Energy: The Solar Hydrogen Alternativa” de J O’M Bockris. Diez años después aparece en castellano el libro “Hidrógeno Solar: Energía para el Futuro” del alemán E. W. Justi. Años antes, el tema es abordado por

revistas del prestigio de Scientific American, Science y Chemical Engineering. En la actualidad además de journals especializados en el tema (J. Hydrogen Energy) y de 14 conferencias internacionales bianuales, la última de las cuales se llevó a cabo en Canadá, se tienen localizados más de 200 artículos publicados en revistas de la talla de Applied Energy, Applied Mathematical Modeling, Applied Solar Energy, Combustion and Flama, Solar Energy, Energy Convers, Solar Energy Engineering, Mechanical Engineering, Electrical Review, entre otras. La última revista en su volumen 231, número 16 del año 1998, anuncia que Islandia es el primer país del orbe en decidir basar su economía en el hidrógeno dentro de un programa de transición para los próximos veinte años. Un logro al que se le tiene que hacer seguimiento.

La referencia citada anteriormente informa también que Alemania es la nación que más proyectos ha desarrollado alrededor del hidrógeno, entre otros:

1. Construyó un electrolizador que se adapta a las variaciones de las fuentes de energía renovables.
2. Va por la cuarta generación de casas solares completamente autosuficientes.
3. Posee prototipos de autos, camiones y aviones funcionando con hidrógeno que en los próximos años estarán comercializándose masivamente.
4. Su aeropuerto de Munich funciona y opera con hidrógeno.
5. Bibliotecas operan también con hidrógeno y celdas de combustible.
6. Tiene a prueba calderas de nuevo tipo productoras de vapor, más eficientes y pequeñas que las convencionales y su combustible es el hidrógeno.
7. Tiene funcionando el hidroducto más antiguo del planeta.

8. Con Arabia Saudita ha construido plantas que les permitirá hacerse de un poco de sol saudí y serle enviado en forma de hidrógeno.

La información extraída de estas y otras fuentes nos permiten sustentar esquemas generales de ingeniería en circuitos cerrados mediante procesos continuos de captación, almacenamiento, distribución y generación de electricidad a partir de las fuentes de energía renovables desde escalas al nivel laboratorio hasta gigantescas plantas de gigawatts de potencia. Esta valoración tecnológica pone en una situación de privilegio a las renovables, toda vez que por primera vez en la historia, éstas pueden fundamentar un modelo de desarrollo sustentable y diferente a los, hasta el momento, modelos de desarrollo propuestos.

Presentación de los capítulos

Esta tesis se compone de tres capítulos. El primero se titula *Hidrógeno solar: una alternativa al problema energético del mundo*. Valora al hidrógeno como combustible, lo sitúa como uno de los más importantes insumos de la industria química en general, enfatiza sus propiedades químicas y físicas, da una idea de sus costos de producción y valora a las energías renovables, específicamente, la solar, eólica y maremotriz, desde la perspectiva de su almacenamiento en forma, precisamente, de hidrógeno, a través del rompimiento de la molécula de agua. El segundo capítulo titulado *Los ciclos de potencia vía hidrógeno*, describe cómo innovar el ciclo Rankine para su acoplamiento a las fuentes de energía renovables. El tercer capítulo titulado *El ciclo Rankine integrado al ciclo químico hidrógeno-agua*, propone un modelo general de análisis energético para valorar termodinámicamente a las renovables, vía hidrógeno,

en su meta de generar electricidad. Esta propuesta abre las puertas para una explotación masiva y racional de las renovables que las pone a competir con las plantas de energía contemporáneas sin las desventajas de sus peligrosas emisiones, siendo su valoración económica, proyecto de doctorado del sustentante de esta tesis.

UNA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN MODULAR DE LAS
FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES, VÍA HIDRÓGENO, Y EL
CICLO DE POTENCIA RANKINE

**UNA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN MODULAR DE LAS
FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES, VÍA HIDRÓGENO, Y EL
CICLO DE POTENCIA RANKINE
(Abstract)**

Esta tesis sintetiza el estado del arte del almacenamiento químico, vía hidrógeno, de las fuentes renovables de energía, particularmente la solar, eólica e hidrodinámica incluida la maremotriz. El almacenamiento es llevado a cabo mediante la electrólisis del agua, posibilita concebir un ciclo fisicoquímico cerrado y reversible para el combustible que, integrado modularmente al ciclo Rankine, da como resultado un nuevo ciclo de potencia sin las desventajas de quemar combustibles fósiles o fisionar al uranio y, sin los residuos resultantes de sus respectivos procesos de transformación.

**UNA PROPUESTA DE INTEGRACIÓN MODULAR DE LAS
FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES, VÍA HIDRÓGENO, Y EL
CICLO DE POTENCIA RANKINE
(Resumen)**

Esta tesis sintetiza el estado del arte de la integración modular de las fuentes de energía renovables y el ciclo de potencia Rankine. Esto es posible lograrlo debido al desarrollo de las tecnologías de producción de hidrógeno y con ello el almacenamiento químico de las energías solar, eólica y maremotriz, entre otras.

Es objetivo de esta tesis la valoración del hidrógeno como combustible, su obtención a través del rompimiento de la molécula del agua utilizando las energías renovables y el análisis termodinámico de dos prototipos para su conversión energética en electricidad a potencia, voltaje y frecuencia fijos: el primero a escala de laboratorio de 800 W y el segundo, a escala industrial de 1 GW de potencia.

Se incluye la síntesis de la creciente bibliografía sobre el desarrollo de las tecnologías de hidrógeno y las energías renovables, pasando por los balances de masa y energía en los ciclos de potencia hasta proponer, al nivel de Diagramas de Flujo de Proceso, los resultados de los prototipos propuestos.

Los productos muestran la posibilidad de construir y operar el prototipo experimental mientras que el análisis termodinámico sugiere que el prototipo

industrial es viable. El análisis económico de ambas propuestas forma parte de un proyecto de doctorado en proceso.

GENERALIDADES

La demanda mundial de energía primaria en el año 2000 ascendió a 400 EJ o 9.5 Gtep. Entre el 10 y 40% de la misma se transformó en electricidad dependiendo del nivel de desarrollo de una nación: entre menor desarrollo menos consumo de electricidad. El caso extremo lo viven 1 500 millones de habitantes de un total de 6 000 millones, que no saben lo que es “prender la luz”. Y es que poner en movimiento a los electrones en la cantidad, continuidad, frecuencia y voltajes requeridos, implica, invertir miles de millones de dólares y movilizar ejércitos de trabajadores, técnicos e ingenieros de todas las especialidades. No cualquier país es capaz de hacerlo.

La industria eléctrica surgió de los laboratorios de investigación científica y aunque de éstos sigue innovándose, su impacto es seguido por diversas disciplinas las que, unas y otras, se disputan el sector en sus primeros capítulos de interés.

Pese a la complejidad política, económica, social y ecológica de la industria eléctrica, ésta puede ser simplificada, desde la perspectiva científica, por medio de un proceso termodinámico conocido como ciclo Rankine.

El ciclo Rankine genera la mayoría de la electricidad consumida por el mundo y representa el proceso tecnológico mejor conocido para la elaboración del bien y servicio que más influencia tiene en eso de elevar el nivel de vida de las poblaciones: la electricidad.

Pero el ciclo Rankine tiene un defecto: en el mejor de los casos quema gas natural para vaporizar el agua y envía los productos de la combustión al ambiente y, en el peor, utiliza la fisión nuclear para el mismo objetivo. Nuestras sociedades, grandes consumidoras de energía eléctrica, aún se niegan a pagar sus verdaderos costos y a consumirla de manera racional. Quemar miles de millones de toneladas de petróleo, gas natural, carbón y cientos de toneladas de uranio al año con el fin de generar electricidad implica, al mismo tiempo, producir miles de millones de toneladas de CO₂, NO_x, SO_x, metales pesados, partículas contaminantes de la naturaleza más diversa y cientos de toneladas de plutonio (que no sabemos qué hacer con éste salvo confinarlo y dejárselo de herencia a las generaciones del futuro, violando con ello sus más elementales derechos de sobrevivencia), siendo producto directo de reacciones químicas y nucleares que, nuestro planeta, simplemente no puede asimilar.

Pese a la imponente presencia de los combustibles fósiles y el uranio, las fuentes solares, eólicas y maremotrices para producir electricidad al alcance de todos, empiezan a despuntar en el mundo y, aunque en México se les tiene marginadas, es necesario revertir esta desatención difundiendo y analizando los diversos proyectos existentes sobre el tema.

Tres son los inconvenientes reprochados a las fuentes renovables para generar electricidad:

1. Son difusas. Esto es, su potencia en la unidad de área es baja.
2. Son intermitentes. Esto es, casi nunca están a nuestra disposición en el momento y en el lugar donde se necesitan.
3. Son económicamente costosas.

Para responder a dichos inconvenientes (excepto el último que requiere trato especial aunque se incluye información de manera general) se ha optado por un proceso de almacenamiento químico al cual se le está dando especial atención: su acopio en forma de hidrógeno obtenido por medio de la electrólisis del agua.

La energía acumulada en 5 litros de agua diarios es la energía que una familia urbana de medianos recursos, consume para satisfacer sus requerimientos eléctricos que sustentan su calidad de vida (A. Koukouvinos et. al. 1982). El problema es cómo transformarla considerando todas las ineficiencias involucradas en cada etapa del proceso. Esta tesis analiza un proceso que permitiría disponer de tal energía utilizando las fuentes renovables, específicamente las solares. Por las ineficiencias involucradas, se deberán electrolizar 11 litros y no los 5 antes aludidos.

Romper la molécula de agua implica disponer entre 1.23 y 2 volts, dependiendo de las condiciones en que la electrólisis se lleve a cabo (H. Wendt, 1990). Este voltaje está al alcance de todas las difusas e intermitentes fuentes alternas y, la tecnología para el diseño, construcción, operación y mantenimiento de las plantas de electrólisis de agua, es una de las ramas más dinámicas y prioritarias de la ciencia y la tecnología contemporáneas.

El almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno es un problema resuelto por la ingeniería actual bajo especificaciones y normas de la más alta

exigencia que dan seguridad y confiabilidad a cualquier proyecto que involucre su manipulación.

El hidrógeno es uno de los insumos de mayor demanda en industrias tan diversas como la alimentaria, siderúrgica, petroquímica y aeroespacial. Su naturaleza química le permite poseer propiedades de combustible superiores a los hidrocarburos y el uranio, ya conocidas desde el siglo XIX. Esta tesis hace una valoración física, química, ambiental y económica de las tecnologías de hidrógeno con el objeto de evaluar su potencialidad como combustible en la generación de electricidad.

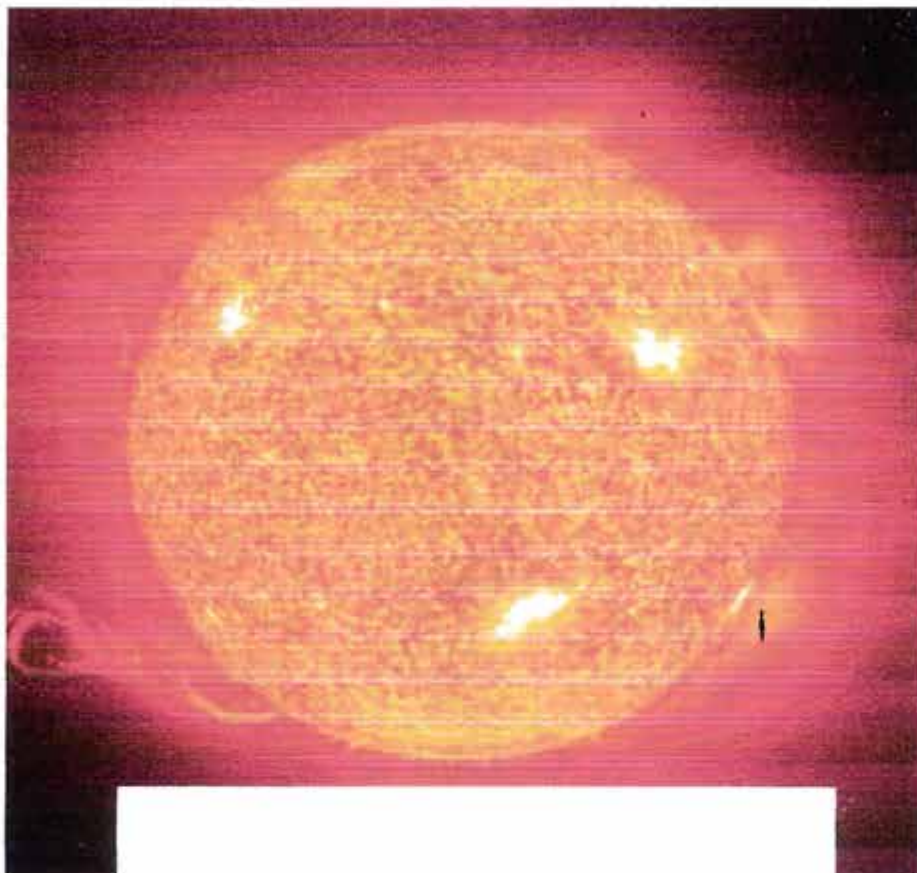
Este trabajo integra también la explotación de las fuentes renovables a las técnicas de producción de hidrógeno por electrólisis, haciendo referencia a otras tecnologías que actualmente están siendo sometidas a intensa investigación como son la fotólisis, termoquímica y biocatalítica.

Pero la integración de las renovables con la electrólisis no basta, a su vez deberá acoplarse al ciclo Rankine o a celdas de combustible para generar

potencia eléctrica con la continuidad, voltaje y frecuencia requeridos por el moderno consumidor.

Este acoplamiento generalizado y cristalizado en una propuesta de integración modular de todas estas tecnologías que permita un desarrollo continuo y controlado del sistema, es la propuesta central de esta tesis. Es una propuesta de diseño ingenieril que sólo abarca el análisis termodinámico al nivel de diagramas de flujo de proceso, balances de masa y energía y tabla de propiedades de dos prototipos. El primero a escala experimental de 800 W y el segundo a escala industrial de 1 GW de potencia. La metodología propuesta puede ser generalizada para el diseño de cualquier potencia requerida de antemano.

CAPÍTULO 1. HIDRÓGENO SOLAR: UNA ALTERNATIVA AL DILEMA ENERGÉTICO DEL MUNDO



CAPÍTULO UNO

La valoración del hidrógeno como combustible involucra diversos aspectos: físicos, químicos, económicos, ecológicos y de actitud que una nación pueda tener al proponérsele pasar de una economía basada en los combustibles fósiles a otra, basada en el hidrógeno.

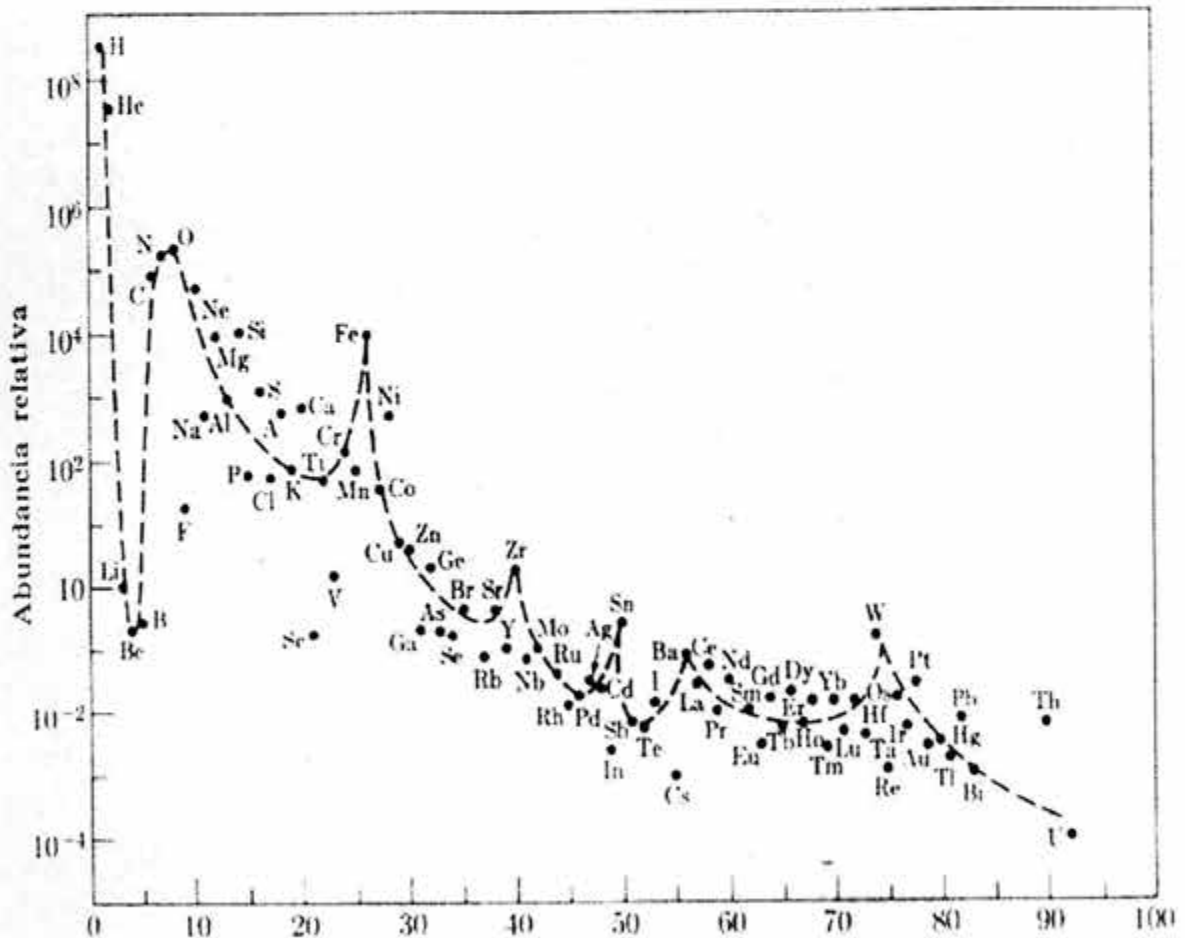
Este capítulo aborda todos estos aspectos, intentando sensibilizar al lector sobre las ventajas de construir una economía basada en el hidrógeno como las dificultades para hacerlo.

Este capítulo prepara el uso de las tecnologías de hidrógeno para el almacenamiento de las energías renovables y con ello la oportunidad de su uso masivo que permita sustituir a los hidrocarburos y al uranio para generar potencia eléctrica

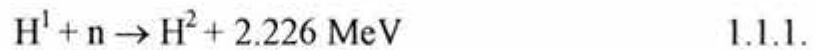
1.1. EL CICLO QUÍMICO HIDRÓGENO-AGUA

El hidrógeno no sólo constituye el 90% de todas las moléculas de nuestro actual Universo observable, también del mismo han surgido el resto de los demás átomos, formándose primero, y durante los tres primeros minutos de expansión del Universo, el deuterio, helio y litio a una temperatura de más de 10^9 K (M. Peimbert, 1984). La abundancia relativa de los elementos en el cosmos es ilustrada por la gráfica 1.1.A (H. Urey, 1952):

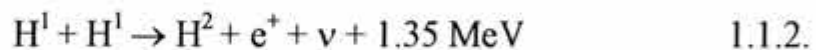
GRÁFICA 1.1.A. DISTRIBUCIÓN DE LOS ELEMENTOS EN EL COSMOS (H. Urey, 1952)



No hay teorías aceptables aún que expliquen esta composición de nuestro Universo. Lo que sí se sabe es que el hidrógeno es el combustible que las estrellas, incluido El Sol, utilizan como fuente de energía. La fusión es el mecanismo por el cual las estrellas generan su energía. El mecanismo de fusión más elemental es la captura de un neutrón (n) por parte del núcleo de hidrógeno (H^1) para formar un átomo de deuterio (H^2):



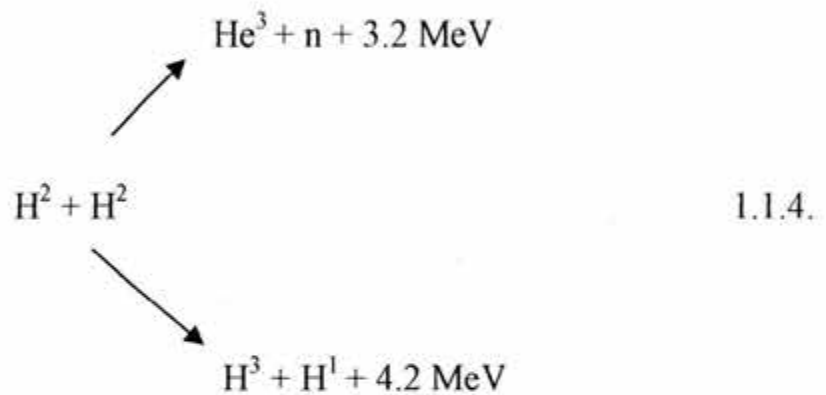
Otra reacción es la fusión de dos átomos de hidrógeno para dar deuterio emitiendo un positrón (e^+) y un neutrino (ν):



Una reacción adicional que involucra la producción de helio y la generación de gran cantidad de energía es:

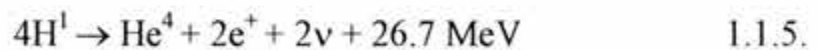


Ya que es difícil disponer de tritio H^3 , la reacción $H^2 + H^2$ resulta de la mayor importancia práctica toda vez que es la reacción en la cual está depositada la esperanza de que algún día llegue a dominarse sobre la Tierra y, con dicho dominio, disponer de energía ilimitada. Dicha reacción posee dos alternativas con la misma posibilidad de realizarse:



Esto equivale a 2×10^{14} J/kg de deuterio.

Se considera que en nuestro sol predomina la siguiente reacción:



Se estima que este mecanismo ocurre a razón de 5.64×10^{11} kg/s de hidrógeno que se fusiona para dar helio, liberando una energía de 3.7×10^{25} W. A la Tierra sólo llega 1.8×10^{14} W por medio de ondas electromagnéticas, equivalente a más de 10^5 veces la producida por el hombre.

Si bien las reacciones termonucleares del hidrógeno son objeto de gran investigación, este capítulo sólo las resume someramente y se centra en las reacciones que toman lugar en las capas electrónicas de su átomo a través del intercambio de sus electrones. Esto es, nos referimos a las reacciones químicas. Desde que Cavendish descubrió el hidrógeno en 1766, el mismo mostró su gran afinidad con el oxígeno para dar agua:



Generando 120 MJ por cada kilogramo de hidrógeno quemado. Esto significa tres veces más de energía química que la obtenida al quemar cualquier hidrocarburo, con la ventaja adicional de que el producto de la combustión del hidrógeno es agua gaseosa. La combustión del hidrógeno en oxígeno es más complicada que lo que la reacción anterior nos sugiere. Un modelo más acorde

con la realidad es el llamado mecanismo en cadena que es mostrado en la figura 1.1.B (Baskakov, 1985):

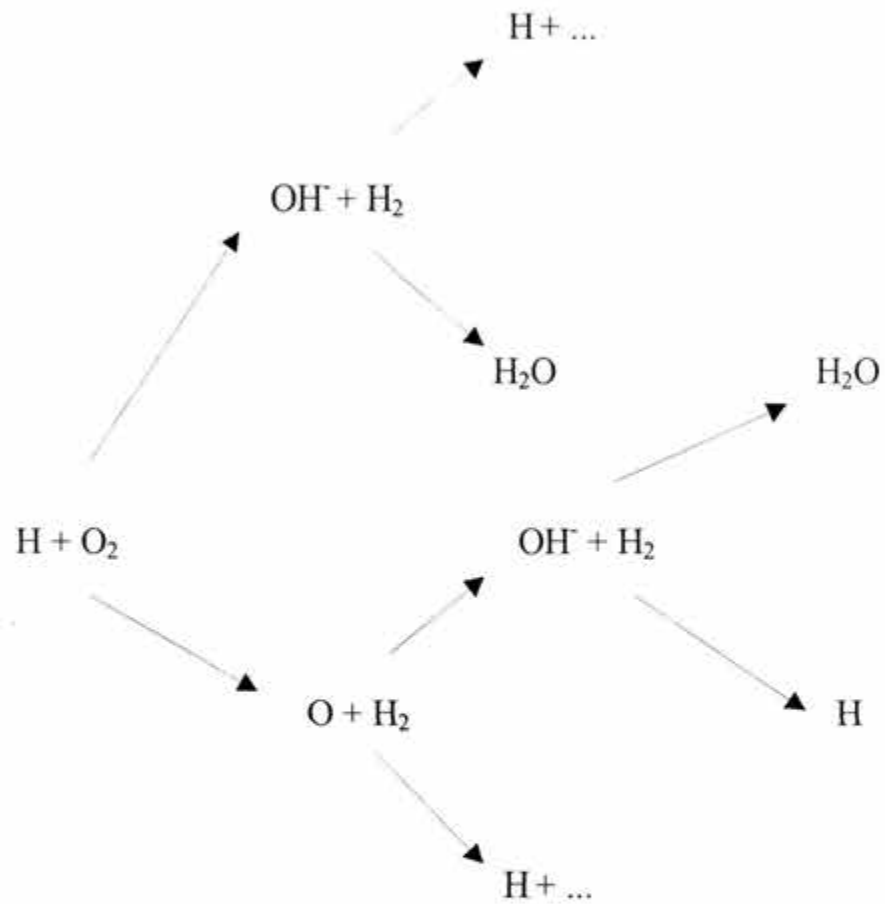


FIGURA 1.1.B REACCIÓN EN CADENA QUÍMICA HIDRÓGENO-OXÍGENO

El hidrógeno, al igual que cualquier otro combustible, sólo puede iniciar el proceso de combustión dentro de un intervalo específico de concentraciones aire-combustible y oxígeno-combustible. Para el hidrógeno, tales intervalos son 4% en volumen de hidrógeno en aire, conocido como límite inferior, hasta 75%, conocido como límite superior (H. F. Coward, 1952). En oxígeno tales límites son 4 y 94% respectivamente. La información experimental es muy clara: los combustibles no se incendian o explotan, son sus mezclas formadas con oxígeno o aire, dentro de intervalos de concentración específicos y bien definidos, quienes lo hacen.

Formada la mezcla combustible, se requiere un incremento de temperatura para que la reacción de combustión inicie. Esta temperatura para el hidrógeno se sitúa entre los 580 y 590 °C. En la práctica, es la energía de una chispa la que da inicio a las reacciones de combustión, dicha energía también está cuantificada para cada combustible y en el caso del hidrógeno, la misma tiene el valor de 0.02 mJ (D. H. France, 1980).

La termodinámica de la reacción $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ muestra que su constante de equilibrio se define como:

$$K_p = P_{\text{H}_2\text{O}} / P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{1/2} \quad 1.1.7.$$

Donde P es la presión parcial del respectivo gas. La variación de la constante en función de la temperatura es (V. I. Hanby, 1994):

T(K)	300	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
Log K _p	39.7	29.2	18.6	13.3	10.1	7.9	6.3	5.2	4.3	3.5	2.9	2.4	2.0	1.6	1.3

A 3000 K la reacción inversa $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ empieza a su vez a manifestarse de manera importante. En otras palabras, alrededor de los tres mil grados la reversibilidad química hace su aparición:



En esto reside la superioridad de la energía química del hidrógeno por sobre su energía nuclear: no es lo mismo manejar el hidrógeno a millones de grados como los procesos de fusión lo requieren, que manejarlo a no más de 3 000 grados como los procesos químicos lo necesitan. La manipulación segura y económica de esta última temperatura está al alcance de nuestros actuales

conocimientos científicos y tecnológicos como lo muestra la industria aeroespacial. Incluso, esos tres mil quinientos grados de temperatura pueden ser evitados: los fenómenos de fotólisis, catálisis y electroquímicos, permiten manipular la reversibilidad de la reacción química del hidrógeno con el oxígeno sin necesidad de elevarse a tales temperaturas. Esto se aprendió desde que se descubrió el fenómeno de la electrólisis del agua y su proceso contrario llevado a cabo en las llamadas celdas de combustible, fenómenos conocidos desde el siglo XIX. En este mismo siglo y antes de la era de la electricidad, el hidrógeno era utilizado mezclado con metano y monóxido de carbón para iluminar las calles de Inglaterra. En 1815 tal mezcla era distribuida en Londres por medio de 48 kilómetros de tubería (S.H.A., 1998).

Previo a la segunda guerra mundial, EU consumía una mezcla 50/50 de hidrógeno y monóxido de carbono para la cocción de alimentos, iluminación, calentamiento de agua y para la calefacción de los hogares en tiempos invernales (Sourcebook for hydrogen application, 1998).

El estudio de la fotosíntesis sugiere que el hidrógeno no sólo ha sido el vector energético de nuestro Universo sino también ha sido el vector energético de la

evolución de los sistemas vivientes. Un poco de esfuerzo durante todo el siglo XXI, nos permitiría construir la civilización humana sobre la energía del ciclo químico del hidrógeno. Del agua lo obtendríamos por medio de la energía de la radiación solar, los vientos, las mareas, caídas de agua y las olas marinas. Ya “quemado”, el agua obtenida puede volver a ser reciclada una y otra vez obteniéndose con ello, la energía eléctrica que nuestra civilización demanda.

Con base a las propiedades físicas y químicas del hidrógeno presentadas en la tabla 1.1.A. y comparadas con las propiedades del metano y las gasolinas, se pueden caracterizar las condiciones de operación y de seguridad que conlleva el manejo de tales sustancias en sus etapas de producción, almacenamiento, distribución y usos.

La determinación de estas propiedades es paso previo al diseño de todo sistema que conlleve su manipulación y su conocimiento implica desde la búsqueda de bibliografía especializada hasta la base de datos utilizada para proponer las dimensiones de todos y cada uno de los equipos involucrados en el almacenamiento y transporte de toda sustancia química.

Comparando las propiedades del hidrógeno con el metano y la gasolina (ver tabla 1.1.A., E. W. Justi, 1985), hay que notar una desventaja del primero por su amplia zona de inflamación, su baja energía de ignición y sus elevadas velocidades de flama y de explosión, lo que permite que mínimas chispas inicien un incendio. Por el contrario, su baja densidad, alta temperatura de autoignición, su baja emisión radiactiva de flama y su mayor velocidad de difusión, hacen que se compensen con las primeras a la hora de diseñar los mecanismos de seguridad ya que sus mezclas se diluyen más rápidamente en lugares abiertos y tienen temperaturas más altas para comenzar su autoignición.

La experiencia muestra que el manejo del hidrógeno se encuentra dentro de seguros intervalos estándar, pudiéndose afirmar que “para poder efectuar la transición a una tecnología de hidrógeno no existen problemas de seguridad, que impidan o dificulten el empleo del hidrógeno como portador secundario de energía” (E. W. Justi, p. 283).

Propiedad	Hidrógeno	Metano	Gasolina
Peso molecular	2.016	16.043	107
Densidad (kg/m ³) C.N.	0.0837	0.65	4.4
Calor mínimo de combustión (kJ/g)	119.93	50.02	44.5
Calor máximo de combustión	141.86	55.53	48
Viscosidad (10 ⁻⁴ g/cm*s)	0.85	1.1	0.52
Limites de combustión en aire (%)	4-75	5.3-15	1-7.6
Limites de combustión en oxígeno (%)	4-95	5-61	n.d.
Limites de detonación en aire (%)	18.3-59	6.3-13.5	1.1-3.3
Relación estequiométrica con aire (%)	29.53	9.48	1.76
Energía mínima de ignición (mJ)	0.02	0.29	0.24
Energía de explosión (kg de TNT)	2.02	7.03	44.22
Temperatura de combustión (°C)	585	540	228-471
Temperatura de llama en el aire (°C)	2 045	1 875	2 197
Velocidad de combustión en aire (m/s)	2.65-3.27	0.37-0.45	0.37-0.43
Velocidad de detonación en aire (km/s)	1.48-2.15	1.39-1.64	1.4-1.7
Coefficiente de difusión en aire (cm ² /s)	0.61	0.16	0.05
Velocidad de difusión en aire (m/s)	2.0	0.51	0.17
Coefficiente Joule-Thompson	0.04	-1.6	n.d.

TABLA 1.1.A. PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO, METANO Y GASOLINA (E. W. Justi, 1985)

1.2. LA FLAMA ACUOSA

Una mezcla previamente preparada y cuyas concentraciones se encuentran dentro del rango de combustión, se quema generalmente en forma de llama cuya velocidad de propagación está determinada solamente por la cinética de las reacciones químicas involucradas. La distribución de las temperaturas y de las concentraciones de los reactivos y productos en función de la coordenada en cuya dirección se dirigen, se muestra en el gráfico 1.2.A:

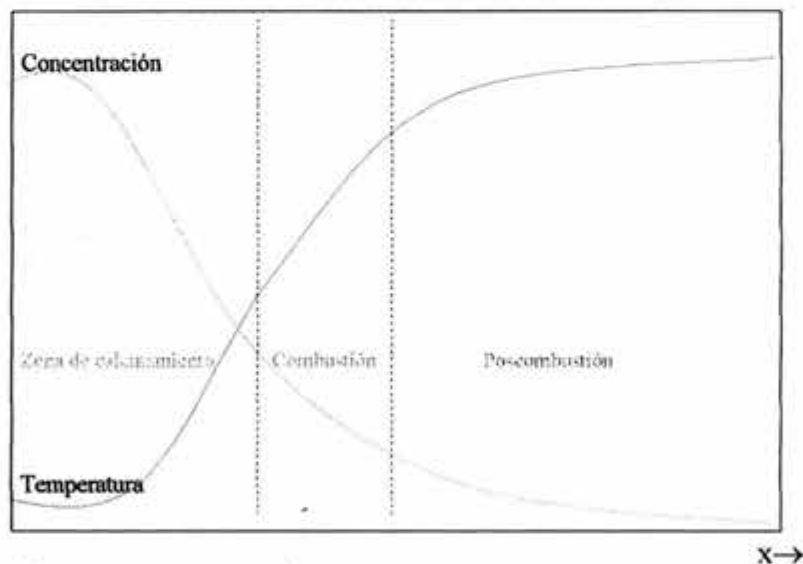


GRÁFICO 1.2.A. DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIONES Y TEMPERATURAS EN UNA FLAMA

A relaciones estequiométricas con el oxígeno, la flama del hidrógeno alcanza temperaturas adiabáticas cercanas a 3000 K, (S.K. Mishra, 1989), velocidades de reacción de 2.55 m/s (D.H. France, 1980), temperatura de auto-ignición arriba de 700 K (T.M. Cain, 1997) y su comportamiento a altas presiones y diversas condiciones físicas, se encuentra actualmente sometida a intenso estudio (He. Longting, 1993), (C.H. Sohn, 1998) y (L. D. Smoot, 1997). La flama de hidrógeno no es otra cosa que agua gaseosa a tres mil grados y su naturaleza permite concebir ciclos de potencia cerrados tanto a nivel del fluido motor como del combustible, como se analizará en los capítulos siguientes. Las nuevas ecuaciones para el cálculo de las propiedades del agua a más de 2000 K fueron anunciadas por W.T. Perry en Power de Noviembre-Diciembre de 1998 y es de esperar regiones más amplias de estudio a medida que el hidrógeno se extienda en calidad de combustible.

1.3. EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE

El ejemplo más patente del uso de la energía química del hidrógeno lo constituye la industria aeroespacial como la imagen I.3.A, lo describe:

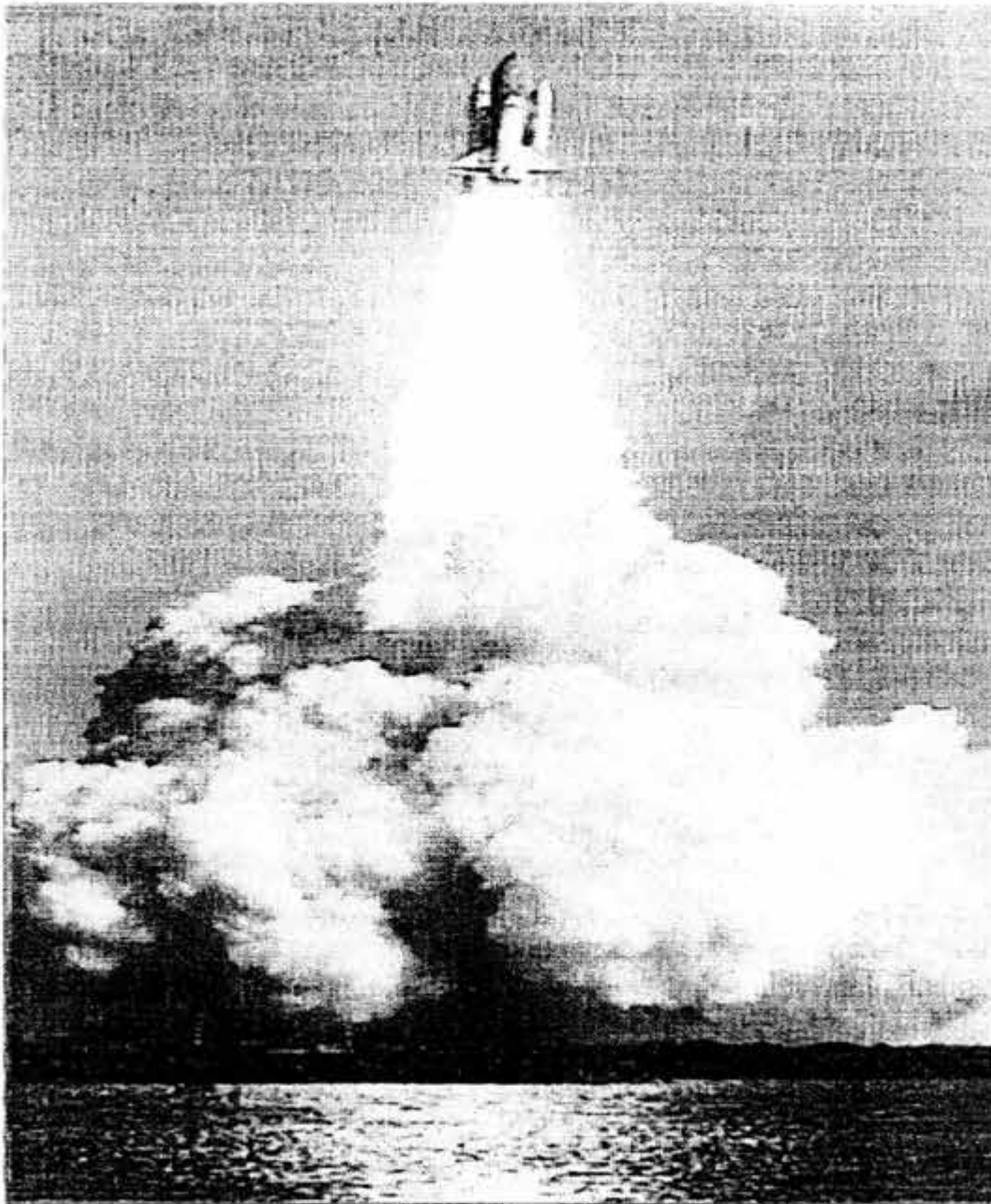


IMAGEN I.3.A. EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE AEROSPACIAL (NASA)

Esta imagen muestra el despegue de un cohete cuyo tanque de combustible lleno de hidrógeno líquido es vaciado a medida que el hidrógeno se quema dejando como único rastro una gigantesca nube de vapor de agua. Vencer la fuerza gravitatoria significa alcanzar una velocidad de 11 km/s que se logra quemando toneladas de hidrógeno, previamente obtenido por electrólisis, licuarlo y almacenarlo antes de ser inyectado a los tanques de las naves.

Desde 1972 está construido el escenario donde el hidrógeno es el vector energético de nuestra civilización (J'OM Bockris, 1972). Tal escenario plantea simplemente que los hidrocarburos y el uranio deberán ser desplazados en el transcurso del siglo XXI por las energías solares que pueden ser almacenadas en hidrógeno, construyéndose modelos económicos que podrían fomentar su producción, almacenamiento, transporte y usos.

La producción anual de hidrógeno asciende a 500 000 millones de Nm³ equivalente a 6.5 EJ, apenas el 1.6% de la producción mundial de energía primaria. Del total de la producción del hidrógeno el 48% procede del gas natural, 30% del petróleo, 18% del carbón y sólo el 4% del agua por electrólisis (U.S. Department of Energy, 2000).

A EU le correspondió producir en 1995, 8 500 millones de kilogramos representando apenas el 1.3% en términos energéticos de toda su energía consumida, donde el 95% fue obtenido a partir del metano a un costo de 65 centavos de dólar el kilogramo y una eficiencia del proceso de conversión del 65% (D. Morgan, 1995).

Un estudio realizado en 1989 por el Hawaii Natural Energy Institute estableció que para una planta de electrólisis productora del H₂ de 100 000 toneladas anuales de capacidad, los costos en función del costo de la electricidad son mostradas en la tabla 1.3.A.

Tabla 1.3.A. Costos del hidrógeno (H.N.E.I., 1989)

<u>ELECTRICIDAD</u>	<u>HIDRÓGENO ELECTROLÍTICO</u>	
(\$/kWh)	(\$/ton)	(\$/Mbtu)
0.01	657	5.38
0.015	858	7.03
0.02	1059	8.67
0.025	1260	10.32

El precio del hidrógeno es bastante sensible al precio de la electricidad. Esto hay que considerarlo al momento en que se pretenda producirlo con la electricidad proveniente de las energías renovables. Por ejemplo, la

electricidad proveniente de una planta fotovoltaica de 20 años de vida media y que proporcionara electricidad a un costo de 0.045 \$/kWh, incrementaría el precio del hidrógeno hasta 20 \$/GJ (CESHR, 1996), para este caso particular. La obtención del hidrógeno por electrólisis a alta temperatura lo sitúa a un costo alrededor de los 11-18\$/GJ (W. Donitz, 1990) que comparándolo de forma gruesa con los costos del carbón, petróleo y gas natural y sus externalidades (ver apéndices, del A al D): 16\$/GJ, 17\$/GJ y 12\$/GJ respectivamente, en dólares de 1998, hace al hidrógeno por tanto, competitivo desde la perspectiva económica.

En la actualidad, la investigación continúa en la producción de hidrógeno solar; esto es, en obtener el hidrógeno por medio de operar las plantas de electrólisis de agua por medio de la energía proveniente de las llamadas fuentes de energía renovables: radiación solar, energía eólica, caídas de agua, oleaje marino y desniveles de agua causadas por las mareas. Los costos de la electricidad de cada una de dichas fuentes difiere de experiencia a experiencia y, los prototipos existentes, los que se están construyendo y en proceso de diseño, son verdaderas obras maestras de la ingeniería (CADDET, 2001), (R.F. Bizec, 1995). Dos de las cuales se muestran en las imágenes 1.3.B y 1.3.C (además de las presentadas al inicio de cada capítulo):

IMAGEN I.3.B. GENERADOR MAREMOTRIZ (INTERNET)



IMAGEN I.3.C. PROTOTIPO HÍBRIDO EÓLO MAREMOTRIZ (INTERNET)



Las modernas plantas de electrólisis de agua son flexibles (sus capacidades van de pequeñas plantas al nivel de laboratorio hasta grandes centrales de gran capacidad de más de 10 000 Nm³/hr). Son seguras, automáticas, eficientes (más de 80%), de operación versátil (continuas o intermitentes según requerimientos) y accesibles económicamente (W. Kreuter, 1998). El concepto de una planta de electrólisis, lo ilustra la imagen I.3.D:

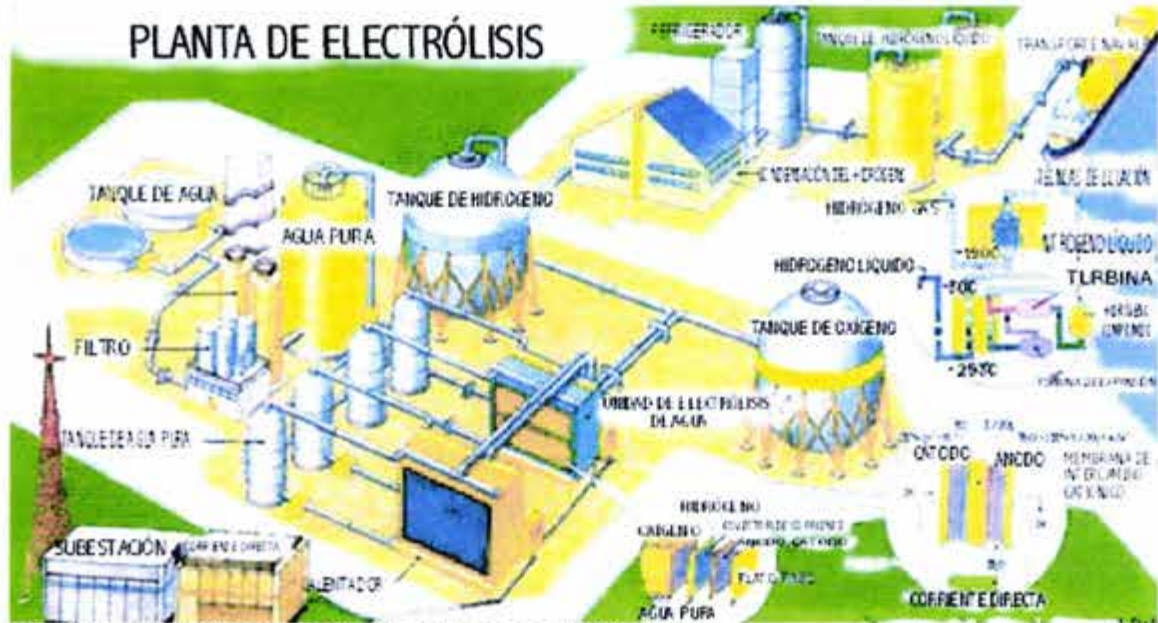


IMAGEN I.3.D. PLANTA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO (INTERNET)

Energías renovables son transformadas en electricidad por medio de los prototipos mostrados anteriormente. Esta corriente eléctrica de no más de 2 voltios es utilizada para romper la molécula del agua. Obtenidos sus componentes, hidrógeno y oxígeno, éstos son almacenados en esferas gigantes. Tanto en fase gaseosa como líquida, los componentes del agua pueden ser distribuidos por barcos o ductos hacia las regiones de consumo. El ciclo Rankine o celdas de combustible son los mecanismos para que al reaccionar el hidrógeno con el oxígeno se genere la electricidad con la continuidad, voltaje y frecuencia requeridos por el consumidor moderno.

1.4. LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Un esquema general de conversión energética para la captación y almacenamiento de las renovables que haría funcionar el proceso de electrólisis, se resume en el diagrama 1.4.1. En el mismo se enfatiza al agua, viento y sol como las fuentes renovables de energía que paulatinamente deberán sustituir a los hidrocarburos y al uranio para generar electricidad en el transcurso del siglo XXI. Esto sólo podrá ser posible mediante su almacenamiento en forma de hidrógeno y oxígeno. Comentemos brevemente su importancia.

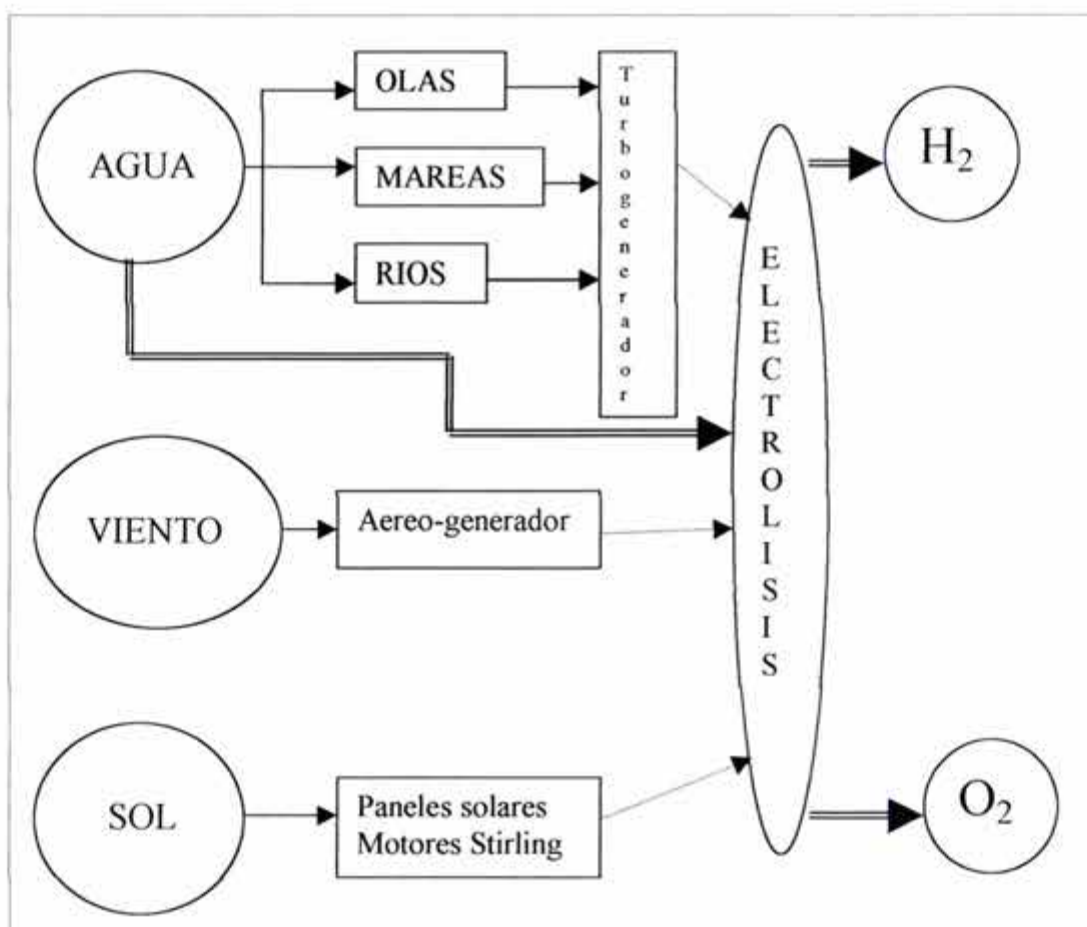


DIAGRAMA 1.4.1. CADENAS DE TRANSFORMACION DE LAS ENERGIAS RENOVABLES

1.4.1. ENERGÍA SOLAR

La radiación solar representa la fuente energética más importante del planeta. México dispone por cada metro cuadrado de su territorio un promedio de 17 MJ de energía solar diarios (R. A. Salgado, et.al., 1992), equivalente a quemar 0.4 metros cúbicos de gas natural a condiciones normales. La eficiencia de conversión de una planta solar está entre 10 y 20% por lo que suministrar los 684 PJ ($684 \cdot 10^{15} \text{J}$) de electricidad generados en el país durante un año (COFER, 1998), equivaldría a sembrar con paneles solares del 10% de eficiencia, un área de $684 \cdot 10^{15} \text{J} / 17 \cdot 10^6 \text{J} \cdot 365 \cdot 0.1 = 1102 \text{ km}^2$, similar a un cuadrado de 33 km de lado. Y si la eficiencia se incrementase hasta el 20% (los dispositivos comerciales la alcanzarán en los próximos lustros), el lado del cuadrado disminuiría a 23 km.

El Programa fotovoltaico del Departamento de Energía de E.U., elaboró la tabla III.A. para caracterizar los sistemas de conversión de la energía solar a electricidad y representa una prospectiva sobre sistemas que se encuentran ya en el mercado y es de esperar, a corto plazo, un uso cada vez más extendido entre las comunidades, fundamentalmente en las áreas rurales:

	1991	1995	2000	2010-2030
Precio de la Electricidad C/ kWh	40-50	25-50	12-20	< 6
Eficiencia del Módulo %	5-14	7-17	10-20	15-25
Costo del Sistema \$/ W	10-20	7-15	3-7	1-1.5
Vida Media Años	5-10	10-20	> 20	> 30
Ventas acumuladas E.U. MW	75	175	400-600	> 10 000

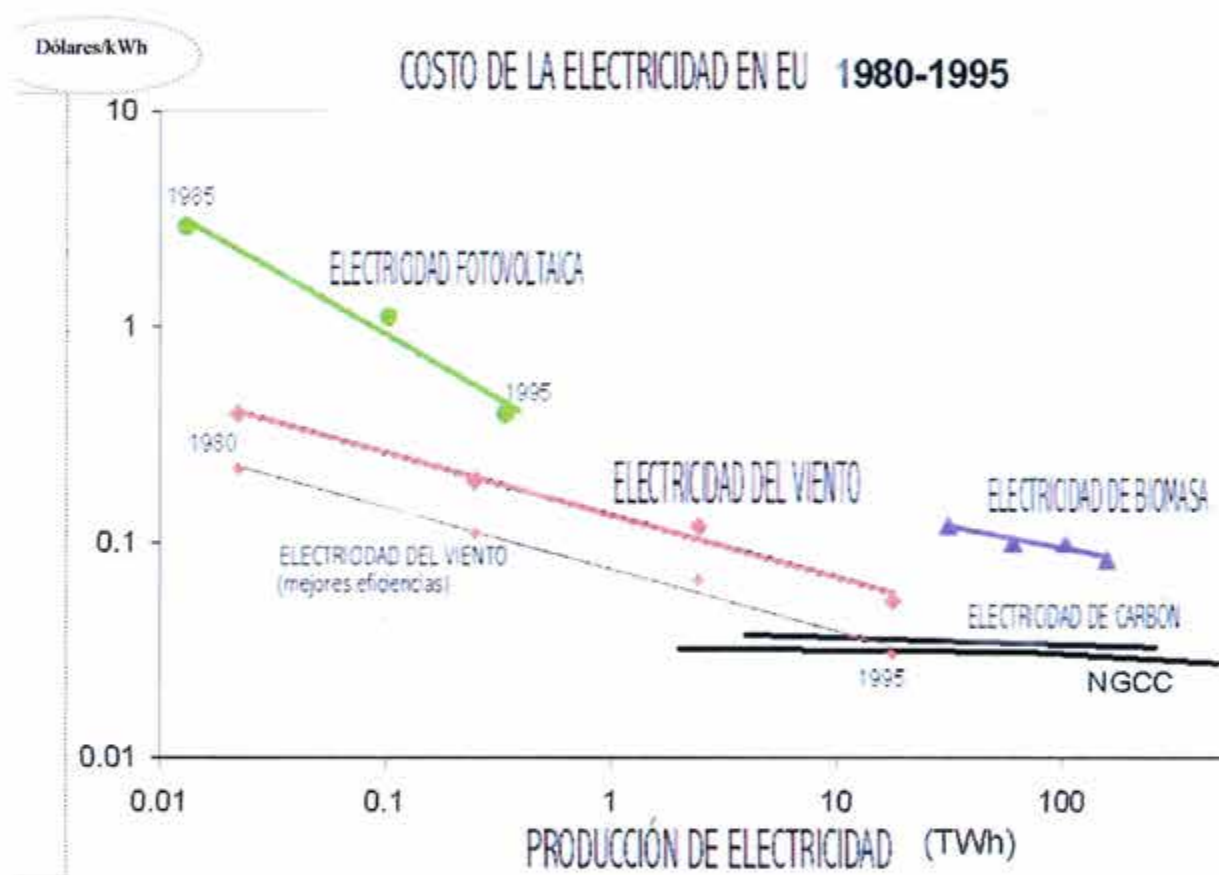
TABLA III.A. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (Departamento de energía E.U., 2000)

La prospectiva de los sistemas fotovoltaicos a treinta años es bastante alentadora. El precio de la electricidad generada por módulos solares caerá a menos de 6 centavos de dólar el kWh, la eficiencia de los mismos se elevará hasta el 25% y su vida media será mayor a los 30 años, con bajos costos de mantenimiento.

1.4.2. ENERGÍA EÓLICA

La electricidad proveniente del viento es la que con mayor rapidez se ha extendido por el mundo. Las granjas de viento son un espectáculo cada vez más familiar. Se estima que el 27% de la superficie terrestre está sometida a una velocidad del viento media mayor de 5.1 m/s, arriba de los 10 metros sobre el nivel del suelo. Esto da un potencial del orden de los 480 000 TWh al año, donde a México, junto al resto de la América Latina, le corresponderían

53 000 TWh de dicho potencial (WEC, 2000). En el país se encuentra una sola granja localizada en Oaxaca. Los costos de la electricidad proveniente del sol, viento, biomasa, carbón y gas natural se muestran en la gráfica 1.4.a. (CFE, 2000, IEA, 2000).



GRÁFICA 1.4.a. COSTO DE LA ELECTRICIDAD DE ENERGÍAS RENOVABLES (IEA, 2000)

1.4.3. ENERGÍA MAREMOTRIZ

Cuatro son los tipos de energía de los océanos de interés para generar electricidad: la energía transferida a los mismos debido a la rotación terrestre y a la fuerza de gravedad del sol y la luna, mejor conocida como marea; la energía almacenada en la superficie de los mares y disponible por la diferencia de temperaturas entre dicha superficie y los fondos marinos, llamada energía térmica oceánica; la energía mecánica del viento retenida por las olas, llamada energía de ondas y la energía debido a las diferencias de salinidad entre el agua descargada al mar por los ríos y el agua de los océanos.

Prototipos se encuentran en operación en Francia, Japón, Australia y países Nórdicos fundamentalmente y su número crece cada año con nuevos diseños y modelos (CADDET, 2000). El potencial energético mundial de los mares, se valora en 2 063 000 TWh al año (WEC, 2000), y en tan extraordinario recurso están depositadas muchas de las esperanzas para resolver parte del dilema energético de la humanidad. Pero tales esperanzas deben transformarse en proyectos de ingeniería. En México se tiene localizado en el Golfo de California una fuente de energía por marea cuyo potencial se calcula en 3.8 TWh al año, estando en proyecto una planta de 500 MW en el mar de Cortés

(TIDAL ELECTRIC, 2002). Pero esto aún no es suficiente ni satisfactorio para una nación con extensos recursos marítimos.

Si bien existen otras fuentes de energías renovables, las anteriores se consideran base para los objetivos de esta tesis. En la bibliografía se podrá encontrar información amplia sobre todas ellas.

1.5. VALORACIÓN Y BARRERAS AL DESARROLLO DE LAS RENOVABLES

El acoplamiento de las tecnologías de captación de las energías solares, eólicas e hidrodinámicas a las plantas de electrólisis de agua con el objetivo de almacenarlas en forma de hidrógeno y oxígeno, es técnicamente viable y, en particular, los sistemas viento-hidrógeno económicamente factibles (M. Altmann, et. al., 1999). Los sistemas sol-hidrógeno e hidrodinámicos-hidrógeno, aunque también viables técnicamente, se encuentran sometidos a diversos estudios económicos y es de esperar resultados positivos a corto plazo.

Esta tesis sugiere el diseño de sistemas híbridos que estarían en función del área geográfica a instalarse. En este sentido, algunos de los problemas a resolver y que fueron claramente expuestos por la Comisión para el Fomento de las Energías Renovables (COFER), consisten en:

1. Modificar los marcos institucionales, programáticos, legales, financieros y operacionales para introducir masivamente las energías renovables en el mercado.

2. Los sitios con potencial solar, eólico y maremotriz, deberán ser establecidos como reservas nacionales para prohibir su uso a actividades que comprometan su futuro aprovechamiento energético.
3. Se requiere el establecimiento de un marco institucional de carácter federal, que proporcione asistencia técnica, normatividad y financiamiento y, finalmente;
4. Es imprescindible la creación de escenarios energéticos por parte del Estado y especialistas del área, que establezcan claramente el papel que las energías renovables jugarán en el futuro del país (E.C. Muñoz, 1998).

Mientras las decisiones políticas trascendentes se toman, hay que intentar incentivarlas a corto plazo mostrando que, inversiones dirigidas a diseñar y construir prototipos tanto al nivel de laboratorio como de planta piloto, junto con sus respectivos simuladores, nos estarían preparando para un escalamiento a niveles industriales de 1 GW o más, como lo sugiere esta tesis; además, dichas inversiones no serían muy onerosas. Una estimación gruesa estaría situando los costos del prototipo de laboratorio entre los 10 mil y 20 mil dólares y consistiría básicamente en electrolizar once litros de agua pura diarios, con un panel solar de 69 m² metros cuadrados para la captación de la

una eficiencia total del 5.6%. La estimación de los costos de la planta piloto e industrial se encuentran fuera del alcance de este trabajo.

En el caso de regiones carentes de agua, la propuesta de la tesis permite abrir el ciclo del combustible de tal forma, que al mismo tiempo que se les proporciona energía a dichas regiones, también se les proporcionaría agua potable. Estaría funcionando aquí una extensión del concepto de cogeneración: además de electricidad y calor, se ofertaría agua de la mejor calidad, que después de usarse, bien puede reciclarse. Un argumento adicional a favor de esta perspectiva es que, a distancias mayores a los 320 kilómetros, el transporte de la energía vía gas hidrógeno por medio de tubería, es más barato que transportarla por cables eléctricos a alta tensión (E.W. Justi, 1985). La visión de que a finales del siglo XXI las torres de alta tensión desaparecerán del paisaje terrestre, no carece de sustento.

En regiones abundantes tanto de agua como de sol y vientos, el modelo propuesto en esta tesis puede ser ampliado para considerar la utilización de la electricidad generada directamente por las fuentes, almacenando el resto de la energía en forma de gases hidrógeno y oxígeno para ser posteriormente

transformada tanto en el ciclo Rankine como en alguna celda de combustible, esta última, como ejemplo adicional de la versatilidad del modelo.

Como ejemplo particular, el D.F. y sus zonas circundantes tienen una irradiación solar promedio de 0.7 kW/m^2 (J.L.F. Zayas, 1983). Con un 10% de eficiencia, el área de captación de la irradiación solar para obtener la potencia del prototipo de 1GW, tendría una extensión de $2\ 057\ 940 \text{ kW} / (0.1 * 0.7 \text{ kW/m}^2) = 29\ 399\ 143 \text{ m}^2$, equivalente a un cuadrado de 5.4 km de lado. Como se mostrará en el capítulo tres, las ineficiencias nos obligan a ampliar tal área. En cualquier caso, la zona de Texcoco, tan disputada, bien podría demostrar la generosidad de sus recursos solares y, el agua necesaria, bien podría obtenerse del reciclamiento, la captación y tratamiento del agua de lluvias.

La valoración cuantitativa de los recursos energéticos del país aún espera buenos tiempos y mejores inversiones. Los mapas de todos los recursos renovables de energía de México, están esperando que los empiecen a dibujar geólogos, geógrafos, oceanógrafos, biólogos e ingenieros. Más temprano que tarde la necesidad acicateará más fuerte que la curiosidad académica.

CONCLUSIONES AL CAPÍTULO UNO

1. La única alternativa que tienen las energías renovables de sustituir a los combustibles fósiles y al uranio para generar energía eléctrica de manera masiva es por medio de su almacenamiento en forma de hidrógeno.
2. El conocimiento científico y la ingeniería para producir, almacenar y utilizar el hidrógeno como combustible de una manera segura, eficiente y de bajo impacto ambiental existe. Este conocimiento se desarrolla en Alemania, EU, Japón e Islandia, por sólo nombrar algunas naciones, que valoran desde hace años su transformación a economías basada en el hidrógeno. México debe prepararse para entrar en esta cada vez inevitable fase de desarrollo.
3. Este capítulo prepara para el uso del hidrógeno como combustible y con su acoplamiento al ciclo Rankine, producir electricidad. Esto permite proponer un nuevo ciclo de potencia que integra a las energías renovables con el Rankine clásico.

CAPÍTULO 2. LOS CICLOS DE POTENCIA VÍA HIDRÓGENO



CAPÍTULO DOS

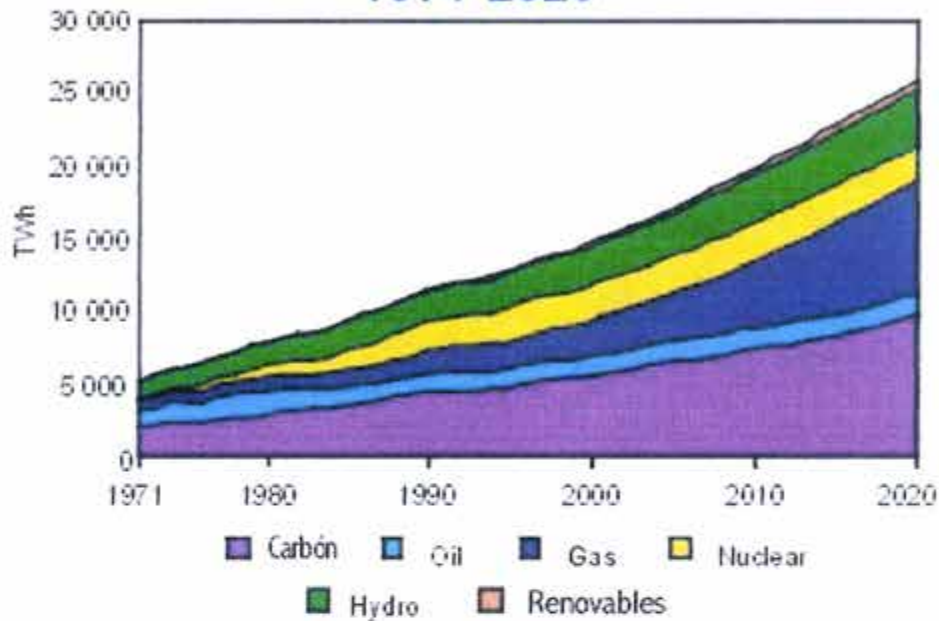
Introduce al mundo de la industria eléctrica desde la mirada termodinámica de la generación de electricidad, incluyendo las fuentes de energía primarias utilizadas. Así el ciclo Rankine es el proceso más conocido por la ciencia y la técnica para producir electricidad industrialmente. El ciclo Rankine genera la mayoría de la electricidad consumida en el mundo y cualquier reforma al sector eléctrico tendrá necesariamente que innovarlo. Es objetivo de este capítulo hacer una propuesta de innovación tecnológica a tal ciclo, utilizando la información sintetizada en el capítulo precedente. El capítulo se estructura en tres secciones: la primera ilustra la formidable tarea que hay que realizar antes de que las renovables puedan sustituir a las fuentes convencionales de energía en su tarea de transformarse en electricidad, la segunda sección describe qué es y cómo opera el ciclo Rankine y la última sección propone, de forma general, una integración modular del Rankine con las renovables y las técnicas de producción de hidrógeno. Este capítulo prepara la presentación formal de los diagramas de flujo de proceso para la conversión de las renovables y que el capítulo tres desarrolla, dando forma a los prototipos analizados en dicho capítulo.

2.1. ELECTRICIDAD: INTRODUCCIÓN FÍSICA Y ECONÓMICA

La electricidad es un flujo de electrones cuyo movimiento es sostenido por una diferencial de potencial provocada por campos electromagnéticos, efectos fotoeléctricos, reacciones químicas, diferencia de temperaturas o diferencias de presiones. Los campos electromagnéticos son generados por el fenómeno de inducción de Faraday dentro de máquinas conocidas como generadores o dinamos, en los cuales, un conjunto de imanes se mueven circunscribiendo devanados de cobre. Los efectos fotoeléctricos son provocados por la luz incidente sobre superficies semiconductoras, la luz considerada como partículas llamadas fotones, chocan contra los electrones transmitiéndoles energía para su movimiento. La pila de Volta fue el primer dispositivo que generó electricidad por medio de reacciones químicas, actualmente existen unas pilas que concentran la atención por funcionar con base a hidrógeno; son llamadas pilas de combustible. Las pilas de combustible son la fuente de energía de los vuelos espaciales y actualmente se han colocado en casas, edificios, automóviles, aeropuertos y en toda una gama de aplicaciones con resultados positivos. El efecto Seebeck, genera electricidad por medio de una diferencia de temperaturas, este efecto se utiliza en los termopares, medidores de temperatura ampliamente utilizados en la industria de procesos. El efecto

piezoeléctrico se vincula a la generación de electricidad por medio de un diferencial de presión. Todos estos fenómenos de conversión directa a energía eléctrica, de ser simples curiosidades de laboratorio, actualmente constituyen parte fundamental de la infraestructura física de nuestra civilización. La inducción de Faraday genera un alto porcentaje de la potencia eléctrica consumida por el mundo y el movimiento circular de los imanes que la provoca se logra cuando éstos son acoplados a turbinas, máquinas que a su vez son movidas por el soplo de vapor de agua a altas temperaturas y presiones, cual si fueran gigantescos rehiletes de acero, en el caso de las centrales termo y nucleoelectricas y, el chorro de la caída del agua, en el caso de las hidroeléctricas. Generar, transportar, distribuir y consumir electricidad se ha vuelto tan accesible para el hombre de la ciudad que suele olvidar lo complejo, costoso y contaminante que es “prender” la luz de su habitación, encender su televisor o hacer funcionar su refrigerador. Pero antes de profundizar, ilustremos estadísticamente a la industria eléctrica. La generación mundial de electricidad durante el periodo 1971-2020 por fuente primaria, se describe en la gráfica 2.1.A (IEA, 2000).

GENERACIÓN MUNDIAL DE ELECTRICIDAD 1971-2020



GRAFICA 2.1.A. GENERACION MUNDIAL DE ELECTRICIDAD POR FUENTES PRIMARIAS (IEA, 2000)

La generación de electricidad en México se ilustra en el diagrama 2.1.B. (IEA, 2000).

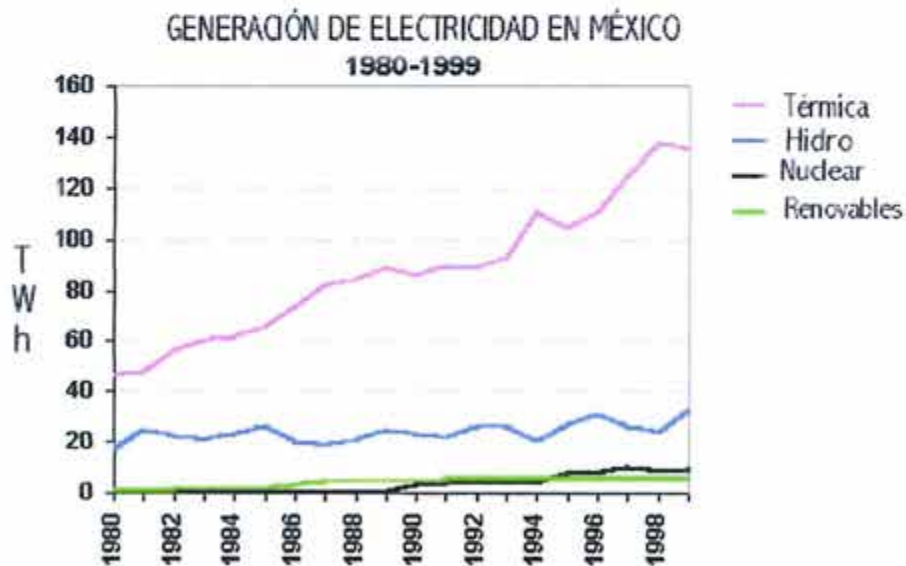


DIAGRAMA 2.1.B. GENERACION DE ELECTRICIDAD EN MEXICO POR FUENTE PRIMARIA (IEA, 2000)

El carbón es la fuente primaria más utilizada para producir la electricidad mundial y lo seguirá siendo hasta el 2020 con una participación del 31%, le sigue el gas natural con una participación del 27%. El consumo mundial para el mismo año se estima en 22 PWh, habiendo sido el consumo del año 1999 de 13 PWh, esperando un crecimiento promedio del 2.7% anual durante las primeras dos décadas del nuevo siglo. En México el combustóleo es el combustible más utilizado para general electricidad aunque en los últimos años el gas natural es el quemado en las modernas plantas de ciclo combinado, la hidroelectricidad que hace uso de las caídas de agua ha disminuido su presencia, la geoelectricidad que utiliza el vapor formada en el subsuelo, se genera en Baja California. Laguna Verde sigue siendo la única nucleoelectrica operando en el país, tres plantas carboeléctricas funcionan tanto en Coahuila como Michoacán y, una granja eoloelectrica operando en Oaxaca, inicia el uso del viento para producir electricidad en México. Con todo, siguen siendo las plantas termoeléctricas las principales productoras de potencia eléctrica en el país. En total hasta el 2000, operaban 172 centrales de potencia con 582 unidades de generación, con una capacidad efectiva de 36.213 GW y una generación bruta de 191.426 TWh. Se estima un crecimiento del sector en 6.3% anual y una instalación adicional de 27 GW durante la presente década,

haciendo uso de una inversión cercana a los 676 mil millones de pesos a precios del 2001 (CFE, 2000; S.E., 2001).

Esta manera de disponer la energía de nuestra actual civilización no puede seguirse sosteniendo como hasta el momento. Los costos verdaderos simplemente se hacen a un lado y no se pagan. El ciudadano moderno deberá sacrificar algunas “comodidades” que en realidad son las causantes de sus males cotidianos: obesidad, cáncer, contaminación y males cardiacos. El proceso de sustituir al carbón, gas natural, petróleo y al uranio por energías primarias renovables para producir electricidad, en mucho avanzaría con un simple cambio de actitud de tal ciudadano; en efecto, tendría que pagar un poco más por la electricidad que consume pero quedaría compensado por la menor, mejor uso y mayor calidad de la que dispondría por un lado; por el otro, de la información y tendencias mostradas, el 80% de la electricidad generada proviene de las plantas termo y nucleoelectricas y que, a su vez, dichas plantas operan a través de un proceso termodinámico conocido como ciclo Rankine, luego entonces, una estrategia de ingeniería puede ser concebida para dar entrada a las fuentes renovables y, antes de mostrarla, explicaremos tal ciclo.

2.2. EL CICLO RANKINE

El ciclo Rankine se simboliza por medio del diagrama de procesos 2.1.A;

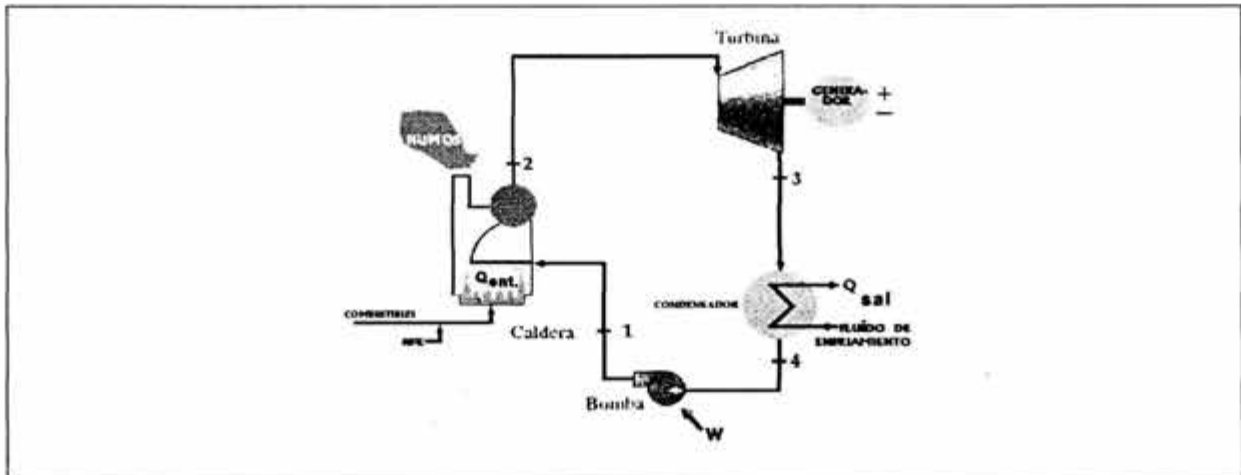


DIAGRAMA 2.1.A. CICLO RANKINE. EQUIPOS BÁSICOS.

El ciclo Rankine es el ciclo termodinámico que permite que el agua líquida en el estado 1 absorba el calor de combustión Q_{ent} de los combustibles fósiles quemados dentro de una caldera, vaporizándose hasta el estado 2. El agua en estado vapor se inyecta a una turbina acoplada a un generador donde al expanderse, moviendo sus álabes cual rehilletes de acero, hace posible la producción de electricidad debido al fenómeno de inducción de Faraday. El vapor extenuado por el trabajo realizado para producir electricidad, alcanza el estado 3, donde lo recibe un condensador que lo licúa extrayéndole el calor

Qsal hasta el estado 4. El agua otra vez en fase líquida se bombea de nueva cuenta a la caldera, iniciándose con esto otro ciclo termodinámico más.

El diagrama temperatura-entropía que describe termodinámicamente tal proceso lo da la figura 2.1.B;

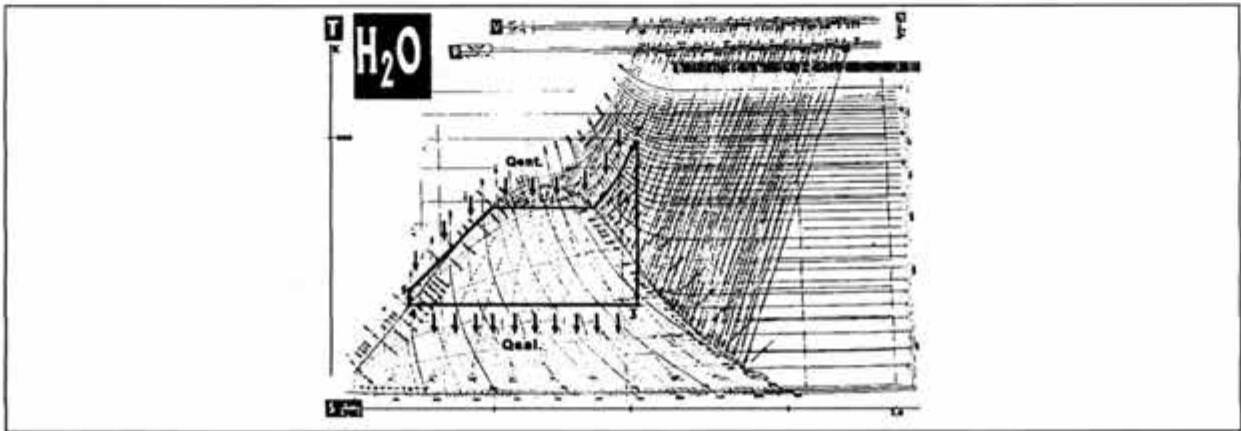


FIGURA 2.1.B. DIAGRAMA TEMPERATURA-ENTROPIA DEL CICLO RANKINE

La lectura del diagrama T-S es similar al diagrama de procesos donde se sitúan los equipos básicos: el agua líquida está representada por el estado 1 a la que se le transfiere el calor Q_{ent} que permite su vaporización hasta el estado 2, el agua vaporizada es proyectada en chorro a los álabes de la turbina que como un gigantesco rehilete de acero empieza a girar y hacer que giren los imanes del generador al que está acoplado y, por el fenómeno de inducción de

Faraday, empieza a producir la electricidad. Realizado su trabajo, el agua gaseosa ya “exhausta” se representa por el estado 3, en este estado se le extrae el calor Q_{sal} dentro de un condensador haciendo que regrese a la fase líquida del estado 4, un sistema de bombeo cierra el ciclo en el estado 1, volviendo una vez más a repetirse el ciclo Rankine.

El ciclo Rankine se llama supercrítico cuando el agua líquida se bombea a una presión mayor a su presión crítica que le corresponde a su vez una temperatura crítica. La temperatura crítica se define como la máxima temperatura a la cual coexisten la fase líquida y la fase vapor. Las condiciones supercríticas tienen la ventaja de que durante el proceso del estado 1 al estado 2, el agua no sufre ningún cambio de fase y, a su vez, la eficiencia del ciclo de potencia se eleva.

La desventaja del ciclo Rankine tal cual opera actualmente, se encuentra en la caldera que hace posible el proceso 1-2. Se dice que cuando la caldera quema carbón para generar el calor Q_{ent} , la planta de potencia se le llama carboeléctrica, cuando quema combustóleo o gas natural se le llama termoeléctrica y, cuando consume uranio, nucleoelectrica. Cuando el turbogenerador se mueve por la caída de agua almacenada en alguna presa, tal planta se le conoce como hidroeléctrica.

El impacto ambiental producido por los desperdicios de la combustión es notable y son, en lo general, desconocidos por la sociedad en general pero bien conocidos por las comunidades que por mala suerte, tienen que vivir cerca de las centrales de energía.

Afortunadamente un cambio de actitud de dicha sociedad se encuentra en marcha y se refleja, entre otros indicadores, en la encuesta de la Comisión para la Cooperación Ambiental de América de Norte que, al entrevistar a las 100 empresas mexicanas, principales consumidoras de electricidad, el 94% expresó estar preparadas para adquirir más energía de fuentes renovables y estar dispuestas a pagar hasta un 10% más de los precios actuales para comprar dicha energía.

Ante este lento pero continuo cambio de conducta de una sociedad que empieza a exigir industrias que impacten lo menos posible al ambiente así como sus individuos hacerse responsables de su particular comportamiento, la oferta de electricidad de fuentes renovables, tendría ya en el país una franja ciudadana receptiva y dispuesta a pagar los costos reales de la energía que consume.

Una política que contemple ofertar electricidad de fuentes renovables tendrá, necesariamente, que considerar modificar sustancialmente la etapa 1-2 del ciclo Rankine. A la luz del conocimiento científico y tecnológico actual, tal modificación es posible y se ha estado desarrollando a lo largo de todo este trabajo pero, una presentación formal desde el punto de vista de la termodinámica, se presentará en el próximo capítulo.

2.3. CICLOS DE POTENCIA UTILIZANDO LAS FUENTES RENOVABLES VÍA HIDRÓGENO

Sustituir las calderas convencionales que queman hidrocarburos por calderas que operen con la energía almacenada de las fuentes renovables es, en principio, relativamente sencillo. Una propuesta se sintetiza en las figuras 2.2.1.A y 2.2.1.B, (R. S. Dirzo, 1998):

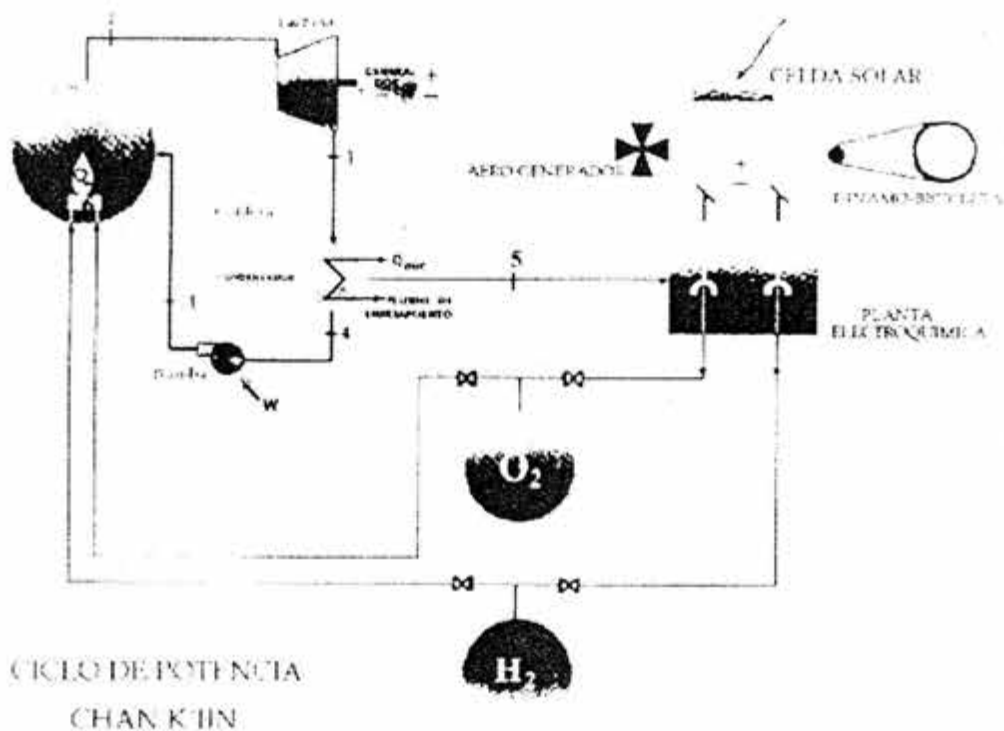
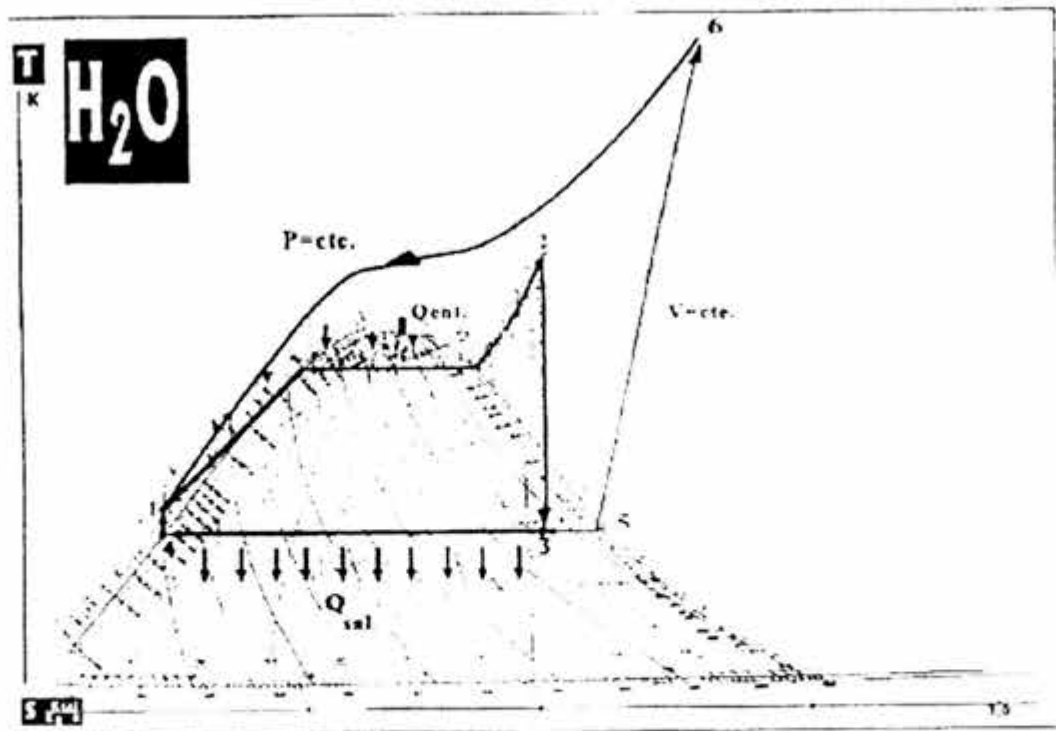


FIGURA 2.2.1.A. CICLO RANKINE INTEGRADO AL CICLO DEL COMBUSTIBLE HIDRÓGENO

La captación de la energía solar, eólica e hidráulica se lleva a cabo por medio de paneles semiconductores y turbogeneradores respectivamente. El almacenamiento de tales energías sigue una vía química: electrólisis de agua, separándola en sus componentes hidrógeno y oxígeno, gases que son mecánicamente almacenados en tanques a presión. Ambos gases son puestos a reaccionar dentro de un quemador generando agua gaseosa que es mezclada con agua líquida para generar el vapor que pone a funcionar el ciclo Rankine, previamente ya descrito. En otras palabras, almacenar las energías solares, equivale a almacenar dos gases, componentes del agua: oxígeno e hidrógeno.

FIGURA 2.2.1.B. DIAGRAMA TEMPERATURA-ENTROPIA



La propuesta en el diagrama T-S se describe así: el ciclo Rankine convencional, estados 12341, se conserva; una fracción del agua motriz, estado 5, se envía a la planta de electrólisis de agua extrayéndose oxígeno e hidrógeno, estado 6. La mezcla estequiométrica se quema mezclándose con agua líquida dentro de una caldera no convencional, generándose el vapor motriz necesario para mover la turbina. El ciclo otra vez se reinicia en el estado 1.

En resumen, al ciclo de potencia clásico, se le adiciona el ciclo del combustible, estados 123561. Esto es posible debido a las extraordinarias propiedades químicas del hidrógeno que al quemarse con oxígeno, el producto, simplemente es agua gaseosa a tres mil grados. Ambos ciclos se fusionan precisamente en la etapa 1-2 del ciclo Rankine.

La electricidad proveniente de las energías renovables significa, dentro de la fase energética 1-2 del ciclo Rankine, quemar el hidrógeno con el oxígeno. En otras palabras, el calor de combustión del hidrógeno es equivalente, energéticamente hablando, a la energía eléctrica proveniente de las renovables. Y aquí radica la ventaja de esta propuesta: sustituir a los difusos e

intermitentes potenciales de las energías renovables por la electricidad continua, de frecuencias y voltajes fijos proveniente del ciclo Rankine mejorado.

Como cualquier otro proceso físico y químico de transformación energética, la captación y posterior almacenamiento en forma de hidrógeno de las energías renovables, así como su posterior combustión y mezcla con el agua líquida, hace que la alternativa de mejorar la fase 1-2 del ciclo Rankine tenga sus ventajas pero también sus desventajas. Estas últimas se sitúan principalmente y al inicio del cambio, en los aspectos de costos como se comentó en el capítulo 1, estos costos sólo la sociedad puede decidir pagar, y una política de Estado debe necesariamente programar.

Antes de presentar el capítulo tres, comentaremos brevemente lo siguiente:

- a) Las plantas de electrólisis de agua más comunes son aquéllas que descomponen al agua desde su fase líquida pero también existen las que lo hacen desde su fase vapor a altas temperaturas, invirtiendo menor energía para ello. Mientras las primeras tienen una eficiencia del 80% a escala

industrial, las pruebas de laboratorio de las segundas alcanzan el 90% (R. L. Leroy, 1983; C. A. Linkous, 1998). Estas posibilidades tecnológicas le dan mayor flexibilidad al proceso 2.2.1.A., ya que la fracción de agua para electrólisis puede provenir antes o después de pasar por el condensador. El desarrollo de plantas de electrólisis para vapor de agua haría que dicha fracción se extrajera saliendo de la turbina para aprovechar su todavía alta entalpía.

- b) El quemador de la mezcla hidrógeno-oxígeno así como su acoplamiento a la caldera no convencional del ciclo Rankine es un aspecto que la tecnología actual tiene resuelta al nivel de planta piloto (T. N. Vesiroglu, 1992). Este tipo de quemadores en realidad son mezcladores de agua a diferentes temperaturas. Su sencillez conceptual no tiene por que confundirse con su construcción y operación ya que no hay que olvidar las diferencias de temperatura existentes entre el agua gaseosa a tres mil grados y el agua líquida a 25 grados. En cualquier caso esto significa áreas de desarrollo tecnológico de interés para todas las ingenierías. En particular, el comportamiento de la flama de hidrógeno dentro de la fase líquida del agua tiene importancia tanto desde la perspectiva de la ciencia básica hasta la aplicación que se propone en este capítulo pero, con toda su

importancia, no es la única opción para el proceso de atemperación y mezclado del agua a estas condiciones extremas.

- c) La capacidad de almacenamiento del hidrógeno y oxígeno es función de la disponibilidad que se tenga de las fuentes de energía renovables. En el caso de México, aunque se sabe que las mismas son abundantes, su cuantificación aún deja mucho que desear, sobre todo sus recursos maremotrices, pero en la medida en que su explotación racional se incrementa, es seguro de que dispondremos de datos cada vez más confiables. En general el almacenamiento de estos gases es un asunto que la ingeniería tiene resuelto (S. P. Cicconardi, 1997).
- d) Los captadores de las energías renovables: bombas de olas, paneles solares, aerogeneradores, etcétera, así como todos los accesorios y controles que requieren, es un área de la ingeniería de gran actualidad y dinamismo (A. D. Caso, 1999). Diversos diseños y prototipos se encuentran en fase de experimentación pero otros son ya una realidad en el mercado. Diseñar, construir y probar los equipos para la transformación de las energías renovables es una prioridad a la que se le deben destinar importantes inversiones. En el caso de México las mismas tendrán que provenir de Pemex y de la CFE.

CONCLUSIONES AL CAPÍTULO DOS

1. La sustitución de los hidrocarburos y el uranio por las energías renovables para generar industrialmente la electricidad, sólo es posible por medio de una etapa intermedia consistente en su almacenamiento químico en forma de hidrógeno.
2. La reacción $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$, permite la integración de las energías renovables con el ciclo Rankine, ciclo que genera prácticamente toda la potencia eléctrica del mundo.
3. El diagrama 2.2.1.B. describe un ciclo Rankine dentro de otro ciclo Rankine. Esto es, la energía de las renovables almacenada en hidrógeno modela un ciclo Rankine autocontenido. Esto permite seguir utilizando el análisis termodinámico del ciclo Rankine pero funcionando con energía que no provoca emisiones. Así la propuesta general planteada en este capítulo para acoplar el ciclo Rankine con las energías renovables vía hidrógeno, sustenta la construcción de los diferentes diagramas de procesos presentados en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3 EL CICLO RANKINE INTEGRADO AL CICLO QUÍMICO HIDRÓGENO-AGUA



CAPÍTULO TRES

Toda la información básica desarrollada en los primeros dos capítulos se sintetiza para proponer dos prototipos de transformación energética de las renovables con el fin de obtener potencia eléctrica. El primer prototipo es de 800 W de potencia, está concebido al nivel de laboratorio y en sus detalles se encuentra más desarrollado que el segundo prototipo que alcanza una potencia de 1 GW. El experimental utiliza un panel solar de un poco arriba de los 69 metros cuadrados con una eficiencia del 15% capaz de transformar una fracción de los 17.7 MJ/m^2 , (que en promedio caen diariamente en forma de radiación solar sobre el distrito federal), en electricidad constante. Esta energía solar electroliza 11 litros de agua diarios dentro de una celda de electrólisis de 20 centímetros de diámetro, 70 centímetros de largo y 33 celdas unitarias. El hidrógeno y el oxígeno así obtenidos se hacen reaccionar dentro de una celda de combustible con 800 W de salida. Se muestra el esquema de conversión energética y los diagramas de flujo de proceso. Este prototipo, de forma gruesa, tiene un costo entre 10 000 y 20 000 dólares y es lo que más se acercaría a la famosa máquina de movimiento perpetuo. Sistemas de almacenamiento hacen posible que este “móvil perpetuo” funcione, incluso de noche.

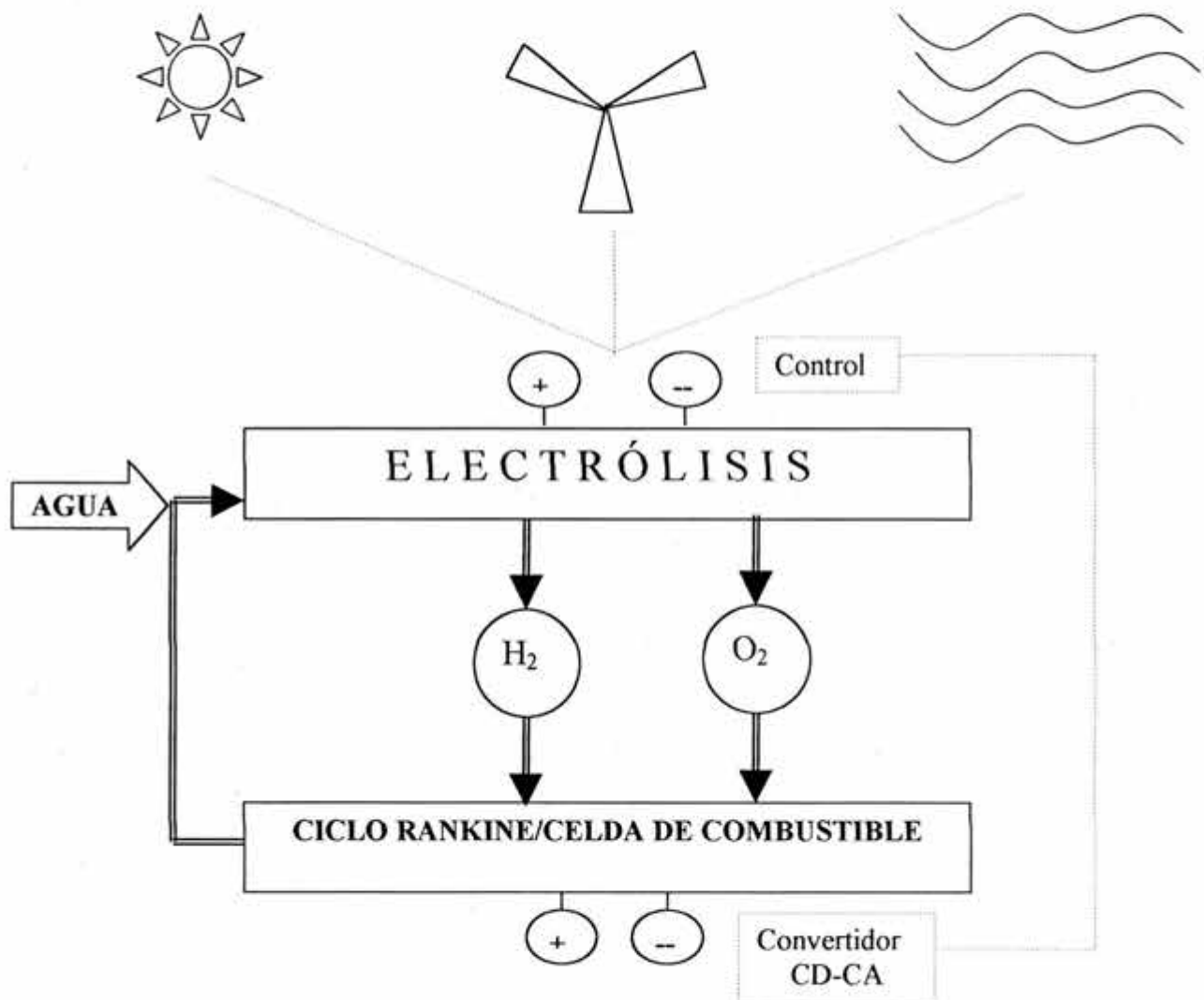
El prototipo industrial carece aún de información que nos pueda permitir dar tantos detalles como el primero. Sólo se intenta mostrar su viabilidad termodinámica y ésta nos proporciona datos positivos. Se muestran los balances de masa y energía y los resultados son alentadores. Una investigación estudiando su factibilidad y los costos de cada kWh generado, es proyecto de doctorado del autor.

La metodología mostrada puede ser utilizada para analizar prototipos similares de cualquier potencia. Los procesos propuestos son cerrados tanto para el combustible como para el fluido motor lo que conlleva una ventaja fundamental sobre los actuales procesos de generación de potencia: no existen emisiones contaminantes al ambiente.

3.1. SISTEMAS DE TRANSFORMACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Los sistemas energéticos sustentados en las energías renovables, vía hidrógeno, pueden ser modelados a través del esquema 3.1.1:

ESQUEMA 3.1.1. SISTEMAS ENERGÉTICOS DE TRANSFORMACIÓN DE LAS RENOVABLES



El nivel superior representa la captación de las difusas e intermitentes energías renovables cuya energía es utilizada para romper la molécula del agua obteniendo sus componentes, oxígeno e hidrógeno. Éstos son almacenados en forma de gases a presión, tanto en recipientes como cavernas apropiadas. El hidrógeno también puede almacenarse en fase líquida o en metales que lo adsorben formando hidruros. El nivel inferior del esquema simboliza la reacción de ambos elementos para generar electricidad de manera continua, a voltaje y frecuencia estandarizados, ya sea por medio de celdas de combustible en el caso de bajo consumo o, por medio del ciclo Rankine, en el caso de un consumo industrial.

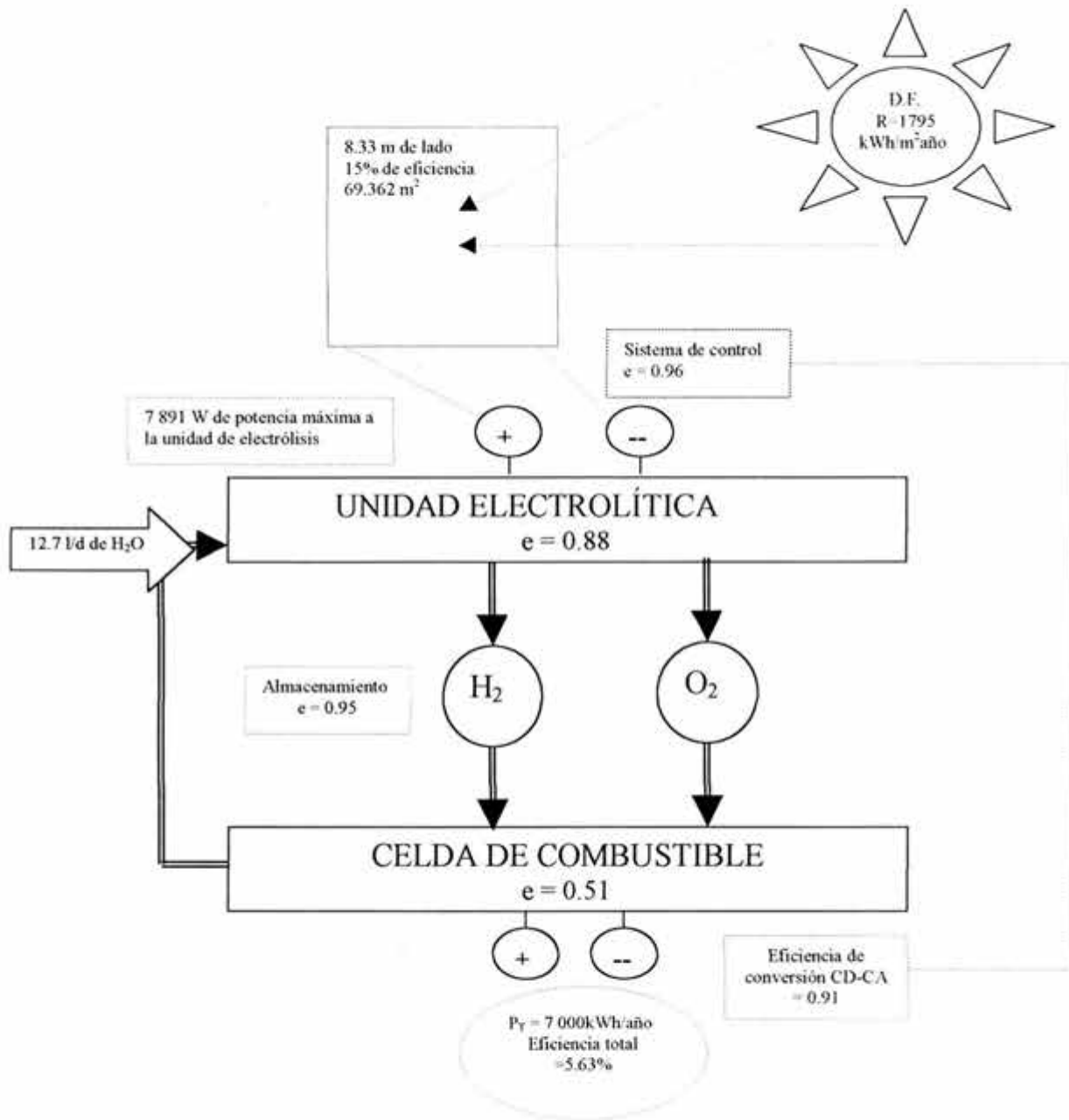
El sistema de control permite consumir directamente la energía de las renovables cuando las condiciones son favorables para ello, operar el sistema por las noches, días nublados o desfavorables para el consumo directo de las renovables y arrancar el proceso de almacenamiento cuya capacidad dependerá de condiciones geográficas y climáticas específicas. Por ejemplo, en zonas con generoso acopio de sol, vientos y ríos, la capacidad de almacenamiento será mucho menor a las zonas donde tales recursos escasean.

En general, la dinámica de arranque, almacenamiento y consumo de las renovables es diferente a la de su consumo. Esto es, el consumo tiene cierta dinámica como la de requerir de energía necesaria, continua, a voltajes y frecuencias fijas y en el momento que el consumidor así lo requiera, mientras que la dinámica del almacenamiento no necesariamente tiene que coincidir con los “caprichos” del consumidor salvo la de disponer de la suficiente energía almacenada durante aquellos periodos cuando no halla sol, ni vientos.

El prototipo de baja potencia (A. Koukouvinos, 1982) se adaptó a las condiciones de irradiación solar de México D.F, mejorando los diagramas de flujo de procesos. Para el prototipo industrial no hay antecedentes.

3.2 PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE 800 W DE POTENCIA

El esquema 3.2.1. resume las características del prototipo de 800 W:



ESQUEMA 3.2.1. PROTOTIPO DE 800 W

Usando como fuente primaria la energía solar, siendo para el D.F. un promedio de 17.7 MJ/m² diarios, 1 795 kWh/m² al año (R. A. Salgado, 1992) y teniendo un máximo de 790 W/m² (J. L. F. Zayas, 1983), usando una eficiencia del panel de 15%, de la unidad de electrólisis de 88%, del sistema de almacenamiento de 95%, de la celda de combustible de 51% y de los sistemas de control y conversión de 88% y, teniendo una potencia de salida del sistema de 800 W, (7 000 kWh al año), el área necesaria para captar la energía solar y vinculada a los parámetros anteriores está dada por:

$$R \cdot A \cdot e = E$$

Donde:

R = Radiación solar anual disponible = 1 795 kWh/m² año.

A = Área del arreglo fotovoltaico en m²

e = Eficiencia total del sistema = (0.15)(0.88)(0.95)(0.51)(0.88) = 5.63%

E = Energía requerida anual = 7 000 kWh/año.

Entonces:

$A = 7\,000 \text{ kWh/año} / 1\,7951\,795 \text{ kWh/m}^2 \text{ año} * 0.0563 = 69.362 \text{ m}^2$, que corresponde a un cuadrado de 8.33 metros de lado.

La máxima potencia de salida del arreglo solar es calculada a partir del máximo valor de radiación:

$$P = p * A * e_s$$

Donde:

P = Potencia de salida del panel solar W.

p = Potencia máxima de radiación = 790 W/m^2

A = Área del arreglo solar = 69.362 m^2 .

e_s = Eficiencia del panel solar = 0.15.

Luego:

$$P = 69.362 \text{ m}^2 * 790 \text{ W/m}^2 * 0.15 = 8\,219 \text{ W}.$$

Entonces la potencia de entrada a la celda de electrólisis es:

$$P_c = P * e_{sc}$$

$$P_c = 8\,219 * 0.96 = 7\,891 \text{ W}$$

Donde e_{sc} es la eficiencia del sistema de control.

Las unidades electrolíticas están constituidas a su vez por celdas de electrólisis unitarias, estandarizadas por los fabricantes, donde se eligió una celda unitaria de potencia 239 W (ver referencia citada). El voltaje para romper la molécula del agua es de 1.9 volts, entonces la intensidad de la corriente por celda unitaria es:

$$I = P/V$$

$$I = 239\text{W}/1.9\text{V} = 125.79 \text{ Amperes/celda unitaria}$$

Ya que la potencia máxima a la entrada de la unidad es de 7 890 W y tenemos 239 W por celda, el número de celdas total necesarias para la electrólisis es:

$$N = P/P_{\text{cel}} = 7\,890/239 = 33 \text{ celdas unitarias}$$

De la ley de Faraday:

$$W_{\text{H}_2} = I \cdot E / 1000$$

Donde:

$$I = \text{intensidad por celda} = 125.79 \text{ A/celda}$$

$$E = \text{equivalente electroquímico del hidrógeno} = 0.0376 \text{ g/Ah}$$

$$1000 \text{ factor de conversión g/kg}$$

Luego el caudal másico del hidrógeno depositado en el electrodo es:

$$W_{\text{H}_2} = 125.79 \text{ A/celda} \cdot 0.0376 \text{ g/Ah} / 1000 \text{ g/kg} = 0.004725 \text{ kg/h}$$

$$W_{\text{H}_2} = 1.3125 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{s}$$

De la estequiometría de la reacción $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$ $\Delta H = -120 \cdot 10^6 \text{ W/kg}_{\text{H}_2}/\text{s}$

$$1 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h} + 8 \text{ kg}_{\text{O}_2}/\text{h} = 9 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{h}$$

$$0.004725 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h} + W_{\text{O}_2} = W_{\text{H}_2\text{O}}$$

Entonces:

$$W_{\text{O}_2} = 8 \text{ kg}_{\text{O}_2}/\text{h} \cdot 0.004725 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h} / 1 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h} = 0.0378 \text{ kg}_{\text{O}_2}/\text{h}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}} = 0.004725 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h} + 0.0378 \text{ kg}_{\text{O}_2}/\text{h} = 0.042525 \text{ kg}/\text{h}$$

El hidrógeno estequiométrico requerido para obtener 800W de potencia es:

$$W_{\text{H}_2} = 800 \text{ W} / 120 \cdot 10^6 \text{ W/kg}_{\text{H}_2}/\text{s} / 0.88 \cdot 0.95 \cdot 0.51 = 6.6666 \cdot 10^{-6}$$

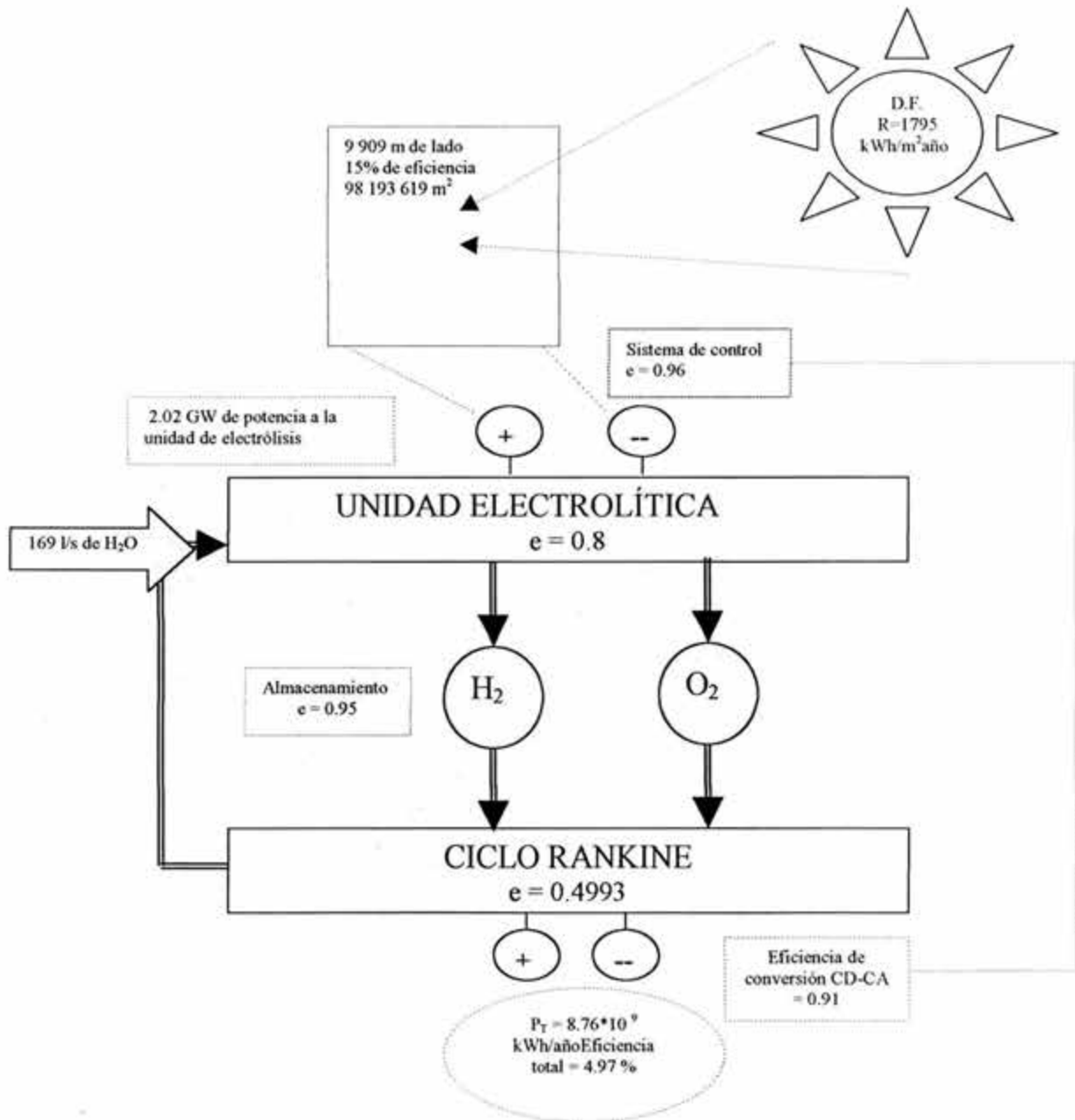
$$\text{kg}_{\text{H}_2}/\text{s} / 0.88 \cdot 0.95 \cdot 0.51 = 0.0563 \text{ kg}_{\text{H}_2}/\text{h} = 1.35 \text{ kg}/\text{d}$$

El agua electrolizada en las 33 celdas será $0.042525 \text{ kg/h} * 33 = 1.403325 \text{ kg/h}$. Disponiendo de un promedio de 9 horas diarias de sol, la cantidad de agua electrolizada diariamente será de 12.7kg. Dispondríamos de 1.4175kg de hidrógeno y 11.344kg de oxígeno en nueve horas de insolación diarias para la generación de 800 W instalado de potencia. Los requeridos a la salida del sistema.

El diagrama de flujo de proceso completo para este sistema se presenta en el apéndice F, (J. L. P. Ramos, 2001). Todos los detalles del prototipo se encuentran en el mismo trabajo. Hay que insistir que la dinámica de almacenamiento es diferente a la dinámica del consumo. Este último exige 800 W de potencia continua, 127 volts de voltaje y 60 Hz de frecuencia, en el caso estándar; mientras que el proceso de almacenamiento sólo depende de los flujos de gases a almacenar y que exista el suficiente combustible almacenado para hacer uso del mismo en periodos de tiempo cuando las renovables no se encuentren a nuestra disposición, como es el caso de las noches o días nublados.

3.3. PROTOTIPO INDUSTRIAL DE 1 GW DE POTENCIA

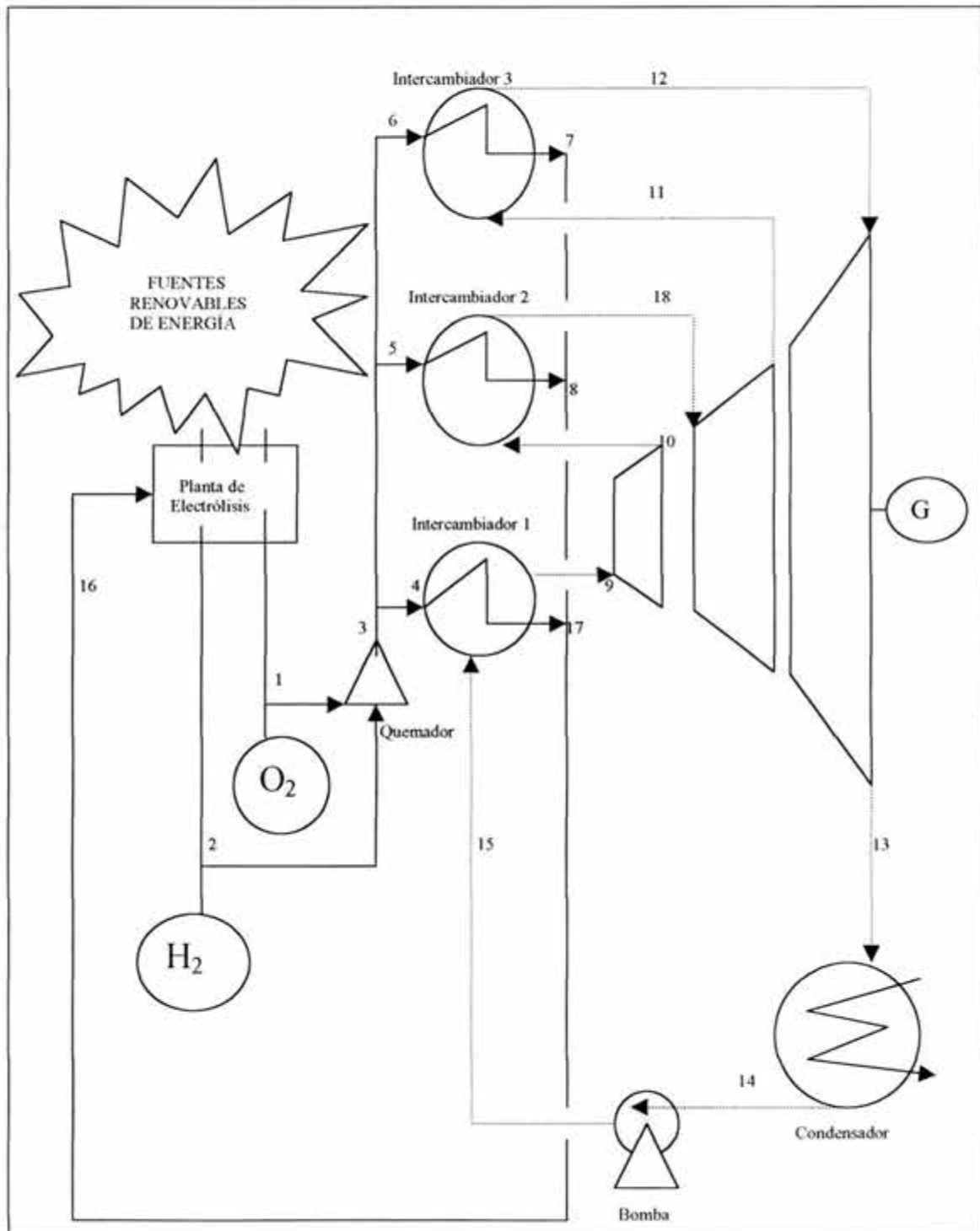
El esquema 3.3.1. resume las características del prototipo de 1 GW:



ESQUEMA 3.3.1. PROTOTIPO DE 1 GW

Reelaboremos el esquema 3.3.1. donde resaltemos el ciclo Rankine (líneas discontinuas) y el ciclo cerrado del combustible (líneas continuas). Esto se muestra en el diagrama 3.3.2.

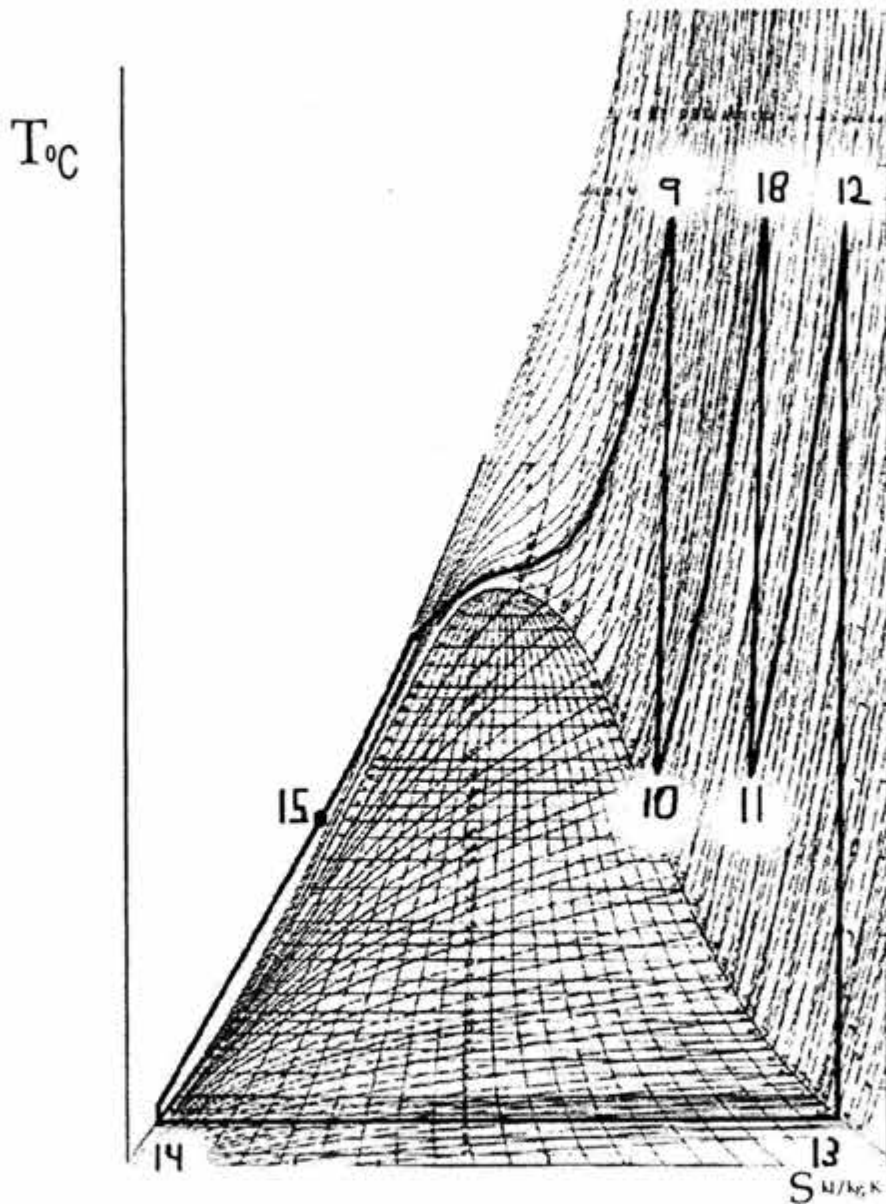
DIAGRAMA 3.3.2. de PROCESOS DEL CICLO RANKINE INTEGRADO A LAS RENOVABLES Y SU ALMACENAMIENTO



El diagrama 3.3.2. resume el ciclo Rankine integrado a las fuentes de energía renovables vía hidrógeno y se calcula termodinámicamente para una capacidad de 1 GW de salida de potencia eléctrica. El diagrama describe la captación, almacenamiento y uso de las fuentes de energía renovables para generar potencia eléctrica por medio del ciclo Rankine: Agua a 250 bar y 150°C entran a la planta de electrólisis que la descompone en los gases oxígeno e hidrógeno, mismos que son almacenados y, posteriormente, sometidos a reacción estequiométrica produciendo 13 333.33 kJ por cada kilogramo de agua formada, elevando al mismo tiempo su temperatura en alrededor de los 3000°C. La energía de esta agua gaseosa a alta temperatura es transportada en tres niveles de transferencia dentro de los intercambiadores 1, 2 y 3 que elevan la temperatura del fluido motor a 600°C y 250, 30 y 4 bar de presión respectivamente. El ciclo es por consiguiente un ciclo supercrítico como se muestra en el diagrama T-S descrito en el esquema 3.3.3. el cual resume las características del mismo. Realizado el trabajo, el vapor extenuado se condensa a 0.03 bar y 24°C para ser bombeado, volviendo a iniciarse de nueva cuenta el ciclo de potencia.

Se trata de un ciclo cuya potencia neta es de 1 GW concebido para trabajar a bajas presiones en el condensador (0.03 bar), recalentamiento del vapor, altas presiones de bombeo (250 bar, fluido supercrítico) y se concibió lo más simple posible introduciendo casi todos los mecanismos que permiten elevar la eficiencia de cualquier ciclo Rankine, y hasta aquí no existe nada nuevo. La novedad inicia cuando al ciclo del agua motriz se le acopla el ciclo cerrado de su combustible: hidrógeno reaccionando estequiométricamente con oxígeno. Es en esta perspectiva en que debe analizarse la posibilidad de la explotación masiva de las energías renovables para la producción industrial de potencia eléctrica, como ya se afirmó en capítulos anteriores.

En aras de que el proceso sea lo más elemental e ilustrativo posible, se han supuesto todas las transformaciones reversibles y la eficiencia de los equipos al 100%. Con la misma intención no se introdujeron mayores complejidades tanto en los balances de la planta de electrólisis como en el ciclo Rankine.



ESQUEMA 3.3.3. DIAGRAMA TEMPERATURA-ENTROPÍA

Vistas así las cosas, producir electricidad equivale a estar simplemente “jugando” con las transformaciones físicas y químicas del agua. Las condiciones de todas las corrientes se dan en la tabla 3.3.1, y los balances de masa, energía y exergía, en 3.3.2, 3.3.3 y 3.3.4 respectivamente. La propuesta que se discute incluye la cadena de transformaciones energéticas, desde las fuentes primarias hasta la generación de electricidad lo que permite evaluar desde un inicio el impacto ambiental, las inversiones requeridas y la eficiencia total entre otros rubros técnico-económicos. Otra ventaja consiste en que el modelo es modular y puede ser escalado tanto hacia arriba o hacia abajo, en otras palabras el sistema puede tener un tamaño tal que quepa en un laboratorio (800 W de potencia), al nivel de una planta piloto (100 kW) o el tamaño de 1 GW de potencia (o más grande).

Notarán los detallistas de los cálculos termodinámicos la carencia de datos a temperaturas de más de 2000 grados y menos aún de 3000. La entropía de las corrientes a 250 bar y tres mil grados está extrapolada de las tablas del Haar donde también se observará una diferencia con respecto a la entalpía extrapolada. La bibliografía consultada es insuficiente en información al

respecto. Cabe esperar, a medida que las energías renovables, vía hidrógeno, sean aceptadas, que este vacío de información empiece a llenarse.

corriente	m kg/s	P bar	T °C	x	h kJ/kg	s kJ/kgK	b kJ/kg
1	150.408	250	25	Gas Ideal	271.31	6.4071	1.175
2	18.8	250	25	Gas Ideal	4 234	65.287	18.8
3	169.21	250	3000	-	13333.33	10.1632	10309
4	104.427	250	3000	-	13333.33	10.1632	10309
5	34.023	250	3000	-	13333.33	10.1632	10309
6	30.76	250	3000	-	13333.33	10.1632	10309
7	30.76	250	150	-	647.2	1.8169	110.36
8	34.023	250	150	-	647.2	1.8169	110.36
9	412	250	600	-	3490.4	6.3593	1599
10	412	30	260	-	2885	6.3419	1000
11	412	4	260	-	2984	7.4169	778
12	412	4	600	-	3703	8.4561	1188
13	412	0.04	29	1	2553.5	8.4725	33.2
14	412	0.04	29	0	121	0.422	0.58914
15	412	250	29	-	148	0.428	0.58
16	169.21	250	150	-	647.2	1.8169	110.36
17	104.427	250	150	-	647.2	1.8169	110.36
18	412	30	600	-	3682	7.5084	1449

TABLA 3.3.1. CONDICIONES DE LAS CORRIENTES. TABLA DE PROPIEDADES.

EQUIPO	ECUACIÓN
I. Quemador de hidrógeno	$m_3 - m_1 - m_2 = 0$
II. Mezclador de agua 1	$m_9 + m_{17} - m_4 - m_{15} = 0$
III. Mezclador de agua 2	$m_{18} + m_8 - m_5 - m_{10} = 0$
IV. Mezclador de agua 3	$m_7 + m_{12} - m_6 - m_{11} = 0$
V. 1a. Expansión	$m_{10} - m_9 = 0$
VI. 2a. Expansión	$m_{11} - m_{18} = 0$
VII. 3a. Expansión	$m_{13} - m_{12} = 0$
VIII. Condensador	$m_{14} - m_{13} = 0$
IX. Paquete de intercambio y bombeo	$m_{15} - m_{14} = 0$
X. Planta de electrólisis	$m_1 + m_2 - m_{16} = 0$

TABLA 3.3.2. BALANCE DE MASA

EQUIPO	ECUACIÓN
I.	$\Delta H_c - 13\,333.33 = 0$
II.	$m_9 h_9 + m_{17} h_{17} - m_4 \Delta H_c - m_{15} h_{15} = 0$
III.	$m_{18} h_{18} + m_8 h_8 - m_{10} h_{10} - m_5 \Delta H_c = 0$
IV.	$m_7 h_7 + m_{12} h_{12} - m_{11} h_{11} - m_6 \Delta H_c = 0$
V.	$P1 + m_{10} h_{10} - m_9 h_9 = 0$
VI.	$P2 + m_{11} h_{11} - m_{18} h_{18} = 0$
VII.	$P3 + m_{13} h_{13} - m_{12} h_{12} = 0$
VIII.	$Q + m_{14} h_{14} - m_{13} h_{13} = 0$
IX.	$-w_b + m_{15} h_{15} - m_{14} h_{14} = 0$
X.	$m_3 \Delta H_c - m_{16} h_{16} - Pe = 0$

TABLA 3.3.3. BALANCE DE ENERGÍA

EQUIPO	ECUACIÓN
I.	$m_3 b_3 - m_1 b_1 - m_2 b_2 = B_1$
II.	$m_9 b_9 + m_{17} b_{17} - m_{15} b_{15} - m_4 b_4 = B_2$
III.	$m_{18} b_{18} + m_8 b_8 - m_{10} b_{10} - m_5 b_5 = B_3$
IV.	$m_7 b_7 + m_{12} b_{12} - m_{11} b_{11} - m_6 b_6 = B_4$
V.	$m_{10} b_{10} - m_9 b_9 + P1 = B_5$
VI.	$m_{11} b_{11} - m_{18} b_{18} + P2 = B_6$
VII.	$m_{13} b_{13} - m_{12} b_{12} + P3 = B_7$
VIII.	$m_{14} b_{14} - m_{13} b_{13} = B_8$
IX.	$-w_b + m_{15} b_{15} - m_{14} b_{14} = B_9$
X.	$m_3 \Delta H_c (1 - T_0 / T) + m_{16} b_{16} - Pe = B_{10}$

TABLA 3.3.4. BALANCE DE EXERGÍA

3.3.1. MEMORIA DE CÁLCULO

La eficiencia de la primera ley del ciclo supercrítico, esquema 3.3.3. es:

$$E = Wc/Q_{ent}$$

$$E = (h_9 - h_{10} + h_{18} - h_{11} + h_{12} - h_{13} - (h_{15} - h_{14})) / (h_9 - h_{15} + h_{18} - h_{10} + h_{12} - h_{11})$$

$$E = (490.4 - 885 + 3682 - 2984 + 3703 - 2553.5 - (148 - 121)) / (3490.4 - 148 +$$

$$3682 - 2885 + 3703 - 2984)$$

$$E = 2425.9 \text{kJ/kg} / 4858.4 \text{kJ/kg}$$

$$\underline{\underline{E = 49.93\%}}$$

El caudal másico de agua requerido para alcanzar 1GW de potencia es:

$$P = m_r Wc$$

$$m_r = P/Wc$$

$$m_r = 1000000 \text{kW} / 2425.9 \text{kJ/kg}$$

$$\underline{\underline{m_r = 412 \text{kg/s}}}$$

La reacción de combustión del hidrógeno es:



$$1 \text{ kgH}_2 + 8 \text{ kgO}_2 = 9 \text{ kgH}_2\text{O} \quad \Delta H_c = -13\,333.33 \text{ kJ/kg H}_2\text{O} /$$

$$m_2 + m_1 = 169.21 \text{ kgH}_2\text{O}$$

$$m_1 = 169.21 \cdot 8/9 = 150.408 \text{ kgO}_2$$

$$m_2 = 169.21/9 = 18.8 \text{ kgH}_2$$

El balance de energía en el mezclador 3 es:

$$m_7 h_7 + m_{12} h_{12} - m_{11} h_{11} - m_6 \Delta H_c = 0$$

$$m_7 = m_6$$

$$m_r = m_{11} = m_{12}$$

$$m_6 = m_r (h_{11} - h_{12}) / (h_{12} - \Delta H_c)$$

$$m_6 = 412 \text{ kg/s} (2984 \text{ kJ/kg} - 3703 \text{ kJ/kg}) / (3703 \text{ kJ/kg} - 13333.33 \text{ kJ/kg})$$

$$\underline{\underline{m_6 = 30.76 \text{ kg/s}}}$$

Balance de energía en el mezclador 2:

$$m_{18} h_{18} + m_8 h_8 - m_{10} h_{10} - m_5 \Delta H_c = 0$$

$$m_5 = m_8$$

$$m_r = m_{10} = m_{18}$$

$$m_5 = m_r(h_{18} - h_{10}) / (\Delta H_c - h_{18})$$

$$m_5 = 412(3682-2885) / (13333.33-3682)$$

$$\underline{m_5 = 34.023 \text{ kg/s}}$$

Balance de energía en el mezclador 1:

$$m_9 h_9 + m_{17} h_{17} - m_4 \Delta H_c - m_{15} h_{15} = 0$$

$$m_4 = m_{17}$$

$$m_9 = m_{15}$$

$$m_4 = m_r(h_9 - h_{15}) / (\Delta H_c - h_{15})$$

$$m_4 = 412(3490-148) / (13333.33-148)$$

$$\underline{m_4 = 104.427 \text{ kg/s}}$$

Balance en el condensador:

$$Q + m_{14} h_{14} - m_{13} h_{13} = 0$$

$$Q = (412 \text{ kg/s})(121 \text{ kJ/kg}) + (412 \text{ kg/s})(2553.5 \text{ kJ/kg})$$

$$\underline{Q = 1\,002\,190 \text{ kW}}$$

Balance en la planta de electrólisis:

$$m_3 \Delta H_c - m_{16} h_{16} - Pe = 0$$

$$Pe = m_{16} h_{16} - m_3 \Delta H_c$$

$$Pe = m_3 (\Delta H_c - h_{16})$$

$$Pe = 169.21 \text{ kg/s} (13333.33 \text{ kJ/kg} - 647.2 \text{ kJ/kg})$$

$$\underline{\underline{Pe = 2\ 146\ 620\ \text{kW}}}$$

Balance en los sistemas de captación de las renovables:

Usando las mismas ecuaciones que en el caso del prototipo de 800 W, el área necesaria para captar la energía solar y vinculada a los parámetros establecidos en el prototipo de 1GW, esquema 3.3.1. es:

$$A = E/e \cdot R$$

Donde

R = Radiación solar anual disponible = 1 795 kWh/m² año

A = Área del arreglo fotovoltaico m²

e = Eficiencia total del sistema = (0.15)(0.8)(0.95)(0.96)(0.4993)(0.91)=4.97%

E = Energía requerida anual = 8.76*10⁹ kWh/año = 1 GW.

P = Potencia = 1 GW

Entonces:

$A = 8.76 \cdot 10^9 \text{ kWh/año} / 1795 \text{ kWh/m}^2 \text{ año} \cdot 0.0497 = 98\,193\,619 \text{ m}^2$, que
corresponde a un cuadrado de 9 909 metros de lado.

EFICIENCIA DEL CICLO SEGÚN LA 2ª ley DE LA TERMODINÁMICA

$$\eta = \eta_1 / (1 - T_0/T) = 0.4993 / (1 - 298/3000) = 0.5544$$

$$\eta = 0.5544$$

CONCLUSIONES AL CAPÍTULO TRES

1. Un esquema general de transformación de las energías renovables ilustrando sus etapas principales y las eficiencias que actualmente la tecnología puede disponer fue presentado en este capítulo.
2. El prototipo de laboratorio de 800 W de potencia no tiene más pretensión que ser de tipo demostrativo y educativo. Su construcción sólo exige terminar los diagramas de su ingeniería de detalle, los cuales el autor está llevando a cabo. No fue objetivo de esta tesis presentarlos.
3. El prototipo industrial de 1 GW, exige otro tipo de análisis. La inexistencia de plantas de electrólisis de la magnitud de la sugerida aquí no invalida la propuesta. La naturaleza modular de este tipo de plantas supone la viabilidad de diseñar y construir una que electrolice 170 kg/s de agua. En cualquier caso un sistema más pequeño, al nivel de planta piloto (100 kW), se sitúa como fase intermedia y necesaria antes de alcanzar magnitudes de gigawatts o mayores. Todavía hay caminos que recorrer pero el análisis termodinámico les ha dado luz verde.
4. El desarrollo de las celdas de combustible es realmente asombroso, están concebidas desde pequeñas pilas hasta celdas de 100 MW ya diseñadas y construidas con técnicas japonesas y es de esperar aún mayores avances.

Pese a todo, el ciclo Rankine seguirá siendo el proceso para obtener electricidad de manera masiva. Es desde mi opinión insustituible en esa misión.

5. El problema del intercambio de masa y energía entre agua gaseosa a altas temperaturas con agua líquida a 25°C para obtener el vapor requerido en el ciclo Rankine, puede ser reducido a un problema de ciencia básica: ¿Cuál es el comportamiento de la flama de hidrógeno dentro de la fase líquida del agua? Al parecer la termodinámica clásica y termodinámica de los procesos irreversibles tienen respuestas que, sin embargo, por desconocimiento del problema, no han atraído la atención de nuestros mejores físico-químicos para encontrarlas. ¿Podrá este trabajo provocarlos? Este es el objetivo oculto de la tesis.
6. El sistema sugerido también resuelve el problema del agua en regiones carentes del vital líquido. Estaría aquí funcionando una extensión del concepto de cogeneración: además de electricidad y calor, se ofertaría agua de la mejor calidad.
7. A distancias mayores que 320 kilómetros, el transporte de la energía vía hidrógeno, es más barato que su transporte por medio de cables de alta tensión.

8. Todos los cálculos formales que la termodinámica establece para el ciclo Rankine se conservan, el cambio de caldera en nada los afecta. Las innovaciones a turbinas y equipos en general así como los avances en los ciclos combinados, se vienen a sumar a estas mejoras.
9. El acoplamiento de las tecnologías de captación de las renovables a las plantas de electrólisis con el objeto de almacenarlas es cada vez más sujeto de estudios experimentales, en particular los sistemas eolo-hidrógeno tienen estudios de factibilidad. La investigación de los sistemas maremotrices-hidrógeno recién iniciaron y se esperan resultados prometedores.

ALEGATOS FINALES

1. Cinco son las áreas de la ingeniería energética que, desarrolladas de manera independiente, hoy pueden ser conjuntadas para generar electricidad de manera masiva, con bajo impacto al ambiente y accesible económicamente: a) Exploración y captación de las energías renovables, b) Producción, almacenamiento y distribución de hidrógeno líquido y gaseoso, c) Ciclo Rankine, d) Celdas de combustible y e) Ingeniería económica. Esta tesis toma parcialmente a), desarrolla b) y lo integra con c) y, hace una breve referencia a d) y e), sin profundizar.
2. Las tecnologías para producir hidrógeno son cuatro fundamentalmente: reforma de hidrocarburos, fotolíticas, biológicas y electrolíticas. Todas están sometidas a intensas investigaciones siendo la más utilizada la primera. La electrólisis del agua tiene la ventaja de que puede operarse por medio de la electricidad generada por las difusas e intermitentes energías renovables, siendo uno de los objetos de estudio de esta tesis. A las fotolíticas y biológicas se les augura un futuro bastante promisorio (United States Department of Energy, 2002), y están fuera de los objetivos de este trabajo pero, es un tema de investigación para cualquier interesado en ellas.

3. El esquema general de transformación energética, paso por paso, de las energías renovables hasta la obtención de electricidad por medio del ciclo Rankine con la continuidad, potencia, voltaje y frecuencia estándar, permite avizorar un uso masivo de estas. Japón, Alemania, Islandia y EU, principalmente, han empezado a construir la infraestructura para su explotación.
4. La integración modular de las distintas etapas de transformación energética de las renovables (captación, almacenamiento químico, distribución y generación de potencia eléctrica) permite seguir el desarrollo técnico y económico tanto de cada una de las mismas como del conjunto en general, de forma sencilla y funcional.
5. La Comisión para el Fomento de las Energías Renovables (COFER), ha expuesto la necesidad de modificar los marcos institucionales, programáticos, legales, financieros y operacionales para introducir masivamente las energías renovables en el mercado. Los sitios con potencial solar, eólico y maremotriz, deberán ser establecidos como reservas nacionales con el objeto de prohibir su uso a actividades que comprometan su futuro aprovechamiento energético. Se necesita establecer un marco institucional de carácter federal que proporcione asistencia

técnica, normatividad y financiamiento y por último, la COFER recomienda la creación de escenarios energéticos por parte del Estado y especialistas del área que determinen claramente el papel que las renovables jugarán en el futuro del país (E. C. Muñoz, 1998).

6. La propuesta modular para la explotación de las renovables, vía hidrógeno, es flexible. Se sabe que la electricidad se consume inmediatamente después de que se produce. Esto obliga a diseñar las plantas para responder a picos de demanda energética que son intervalos de tiempo en lo general, cortos. Ello significa que el resto del tiempo existe una capacidad instalada ociosa. Observando la lista de plantas de potencia existentes en el país (D. Reséndiz-Nuñez, 1994), se puede planear utilizar dicha capacidad ociosa para eliminar tales picos y almacenar la energía eléctrica en forma de hidrógeno y oxígeno. Esto es, acoplaríamos a alguna central previamente seleccionada, una planta de electrólisis de agua y estudiaríamos su comportamiento. Algo similar se ha propuesto con el uso de tal capacidad ociosa para bombear agua a puntos altos para posteriormente utilizar su caída libre y con ella generar energía, pero creo que la propuesta de esta tesis es más interesante y en cualquier caso ninguna excluye a la otra, más bien son complementarias. Recordemos que antes de su uso energético,

tanto el hidrógeno como el oxígeno son insumos básicos de la industria química, siderúrgica, vidriera, petroquímica, alimentaria y de los fertilizantes. Esta capacidad ociosa de nuestras plantas de potencia bien podría ser utilizada para satisfacer a dichas industrias con la ventaja de que las mismas, podrían participar con el financiamiento necesario para completar su aplicación energética.

7. Las ventajas para México de este diseño para organizar el desarrollo de sistemas de potencia basado en las renovables son:

- Desarrollo de tecnologías propias conociendo con precisión qué tecnologías importar, dónde adaptar y qué innovar.
- Generar y asimilar a tiempo, estándares de ingeniería para los futuros productores de equipos, accesorios e instrumentos para los sistemas de potencia diseñados, construidos y operados en el país.
- Establecer las áreas de investigación científica, tecnológica y financiera y conocer qué carencias de conocimientos científicos y tecnológicos padecemos con el propósito de iniciar la formación de recursos humanos en esa dirección.

- Iniciar los estudios económicos y construcción de escenarios para la introducción de los nuevos sistemas energéticos en el mercado.
- Difundir la información hacia la sociedad, mostrándole las ventajas y posibilidades para su desarrollo y bienestar que le traería apoyar una economía basada en el hidrógeno.
- Fomentar los estudios sociológicos, políticos y jurídicos alrededor de una futura economía basada en las energías renovables.
- Nos motiva a proponer los siguientes plazos:
 - Dos años para el primer prototipo modular experimental de 800 W.
 - Diez años para el primer prototipo planta piloto de 100 kW y su sistema de simulación.
 - Veinticinco años para el primer complejo industrial comercial de 1GW

CONCLUSIONES GENERALES

El dilema ambiental y el impacto del hombre sobre la naturaleza nos obliga no sólo a cuestionar severamente la forma en que nuestras sociedades acceden a la energía necesaria para su operación sino a sondear y construir prospectivas que permitan visualizar alternativas tecnológicamente viables y económicamente factibles. En este sentido el desarrollo de las fuentes de energía renovables, las tecnologías para el rompimiento de la molécula de agua y la innovación a los ciclos de potencia (especialmente el Rankine), nos ha permitido dibujar un panorama para el tránsito de economías basadas en los hidrocarburos y el uranio hacia economías basadas en las renovables, vía hidrógeno, desde una perspectiva de viabilidad ingenieril.

Una síntesis sobre la información disponible del hidrógeno solar fue mostrada en el primer capítulo. De ninguna manera se pretendió exhaustiva si bien lo suficientemente actualizada para mostrar el creciente interés sobre el tema en el mundo. Una valoración crítica sobre el desarrollo de la energía solar, eólica y maremotriz, también incluida, muestra la necesidad de que México disponga de mayor información sobre sus recursos susceptibles de transformación energética y de que estos sitios sean catalogados de importancia estratégica, al

mismo nivel de sus recursos de hidrocarburos. La fase intermedia para hacer uso masivo de las renovables, las plantas de electrólisis, pese a la sencillez científica que las fundamenta, como cualquier planta de proceso sofisticada, su know how se halla en manos de un puñado de firmas transnacionales pero, su innovación para ser conectadas a las variaciones de las energías renovables, está recién iniciada. Esto abre espacios a proyectos de desarrollo tecnológico que esta tesis describe a partir de su segundo capítulo el cual parte de diagramas de flujo de proceso para la transformación energética de las renovables pasando por su fase de almacenamiento químico. Tales diagramas son empleados de manera particular y rigurosa en el tercer capítulo donde se muestran los balances de masa y energía, las eficiencias y la metodología general para el diseño termodinámico que describen las transformaciones fisicoquímicas de las renovables hasta su uso final que es la generación de electricidad bajo las normas de continuidad, voltaje y frecuencia exigidas por el consumidor final. Son mostrados así dos prototipos al nivel de diagramas de flujo de proceso, uno de 800 W y otro de 1 GW de potencia. El primero a escala experimental, tendría un costo entre 10 000 y 20 000 dólares y sus objetivos son sólo educativos y demostrativos. El segundo es un ejercicio de viabilidad termodinámica sin considerar costos. Éstos serán incluidos dentro

de un proyecto de doctorado, actualmente en elaboración. En cualquier caso, existe la suficiente información y experiencia internacional para que México voltee con mayor entusiasmo y compromiso hacia lo que será sin duda, la base energética de las sociedades del futuro: la energía proveniente del sol, los vientos y los mares y, su almacenamiento en forma de hidrógeno y oxígeno. El agua será por tanto la materia prima fundamental para saciar nuestras necesidades energéticas, como ya Verne lo había profetizado.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- ❖ A. P. Baskakov, termotecnia, MIR, 1985.
- ❖ A. W. Culp, principles of energy conversion, Mc Graw Hill, 2ª. Edición 1991.
- ❖ B. B. Damaskin, O.A Petri, fundamentos de la electroquímica teórica, MIR Moscú, 1981.
- ❖ D. Caso, energía, Arbol editorial, 1999.
- ❖ D. Reséndiz-Nuñez, el sector eléctrico de México, F.C.E. 1994
- ❖ E. W. Justi, hidrógeno solar, Marcombo, 1985.
- ❖ H. Wendt, electrochemical hydrogen technologies, Elsevier 1990.
- ❖ Hawaii Natural Energy Institute, hydrogen energy from renewable resources, 1989.
- ❖ I. G. Estrada, G.C. Nava, irradiación solar en la república mexicana: valores horarios medios, UNAM, 1996.
- ❖ L. Haar, J.S Gallagher, G.S Kell, tablas de vapor, Interamericana, 1985.
- ❖ Lewis Von Elbe, combustion, flames and explosions of gases, Academic Press, 2ª edición, 1961.

- ❖ M. Peimbert, temas selectos de astrofísica, UNAM, 1984.
- ❖ R. F. Bizec, las nuevas energías, RBA editores, 1995.
- ❖ Secretaría de Energía, prospectiva del sector eléctrico 2001-2010.
- ❖ Tokio Otha, solar hydrogen energy systems, Pergamon Press. 1979.
- ❖ V. I Hanby, combustion and pollution control in heating systems, Springer-Verlag, 1994.
- ❖ Y. A. Cengel, M.A. Boles, termodinámica, Mc Graw Hill, 4ª. Edición 2003.
- ❖ Y. Yudal, hydrogen energy system, Kluwer Academic Publishers 1995.

REVISTAS

- A. Koukouvinos, V. Lygerou, N. Koumoutsos. Design for solar energy storage via water electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 7(8) 1982, pp. 645-650.
- C. A. Linkous, et. al.. Development of new proton exchange membrane electrolytes for water electrolysis at higher temperatures. *Int. J. Hydrogen Energy* 23(7) 1998, pp. 525-529.
- C.H. Sohn, S.H. Chung, S.R. Lee, J.S. Kim. Structure and acoustic-pressure response of hydrogen-oxygen diffusion flames at high pressure. *Combustion and Flames* 115, 299-312 (1998).
- D. Dini. Hydrogen production through solar energy water electrolysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 8(11/12) 1983, pp. 897-903.
- D.H. France. Combustion characteristics of hydrogen. *Int. J. Hydrogen* 5, 369-374 (1980).
- G. Derek. The hydrogen economy. *Sci. Am.*, enero 1973.
- H. Abaoud, H. Steeb. The german-saudi hysolar program. *Int. J. Hydrogen Energy* 23(6) 1998, pp. 445-449.
- H. Urey, H. Brown, *Phys. Rev.* 88, 248 (1952).

- H.F. Coward, G.W Jones. Limits of flammability of gases and vapors. U.S. Bur. Of Mines Bull. No. 503 (1952).
- He. Longting, P. Clavin. Premixed hydrogen-oxygen flames. Part I and II, *Combustion and Flame* **93**, 391-420 (1993).
- J.R. Bolton. Solar photoproduction of hydrogen: a review. *Solar Energy* **57**(1) 1996, pp 37-50.
- J'OM Bockris. A hydrogen economy. *Science* Junio, p. 1323, 1972.
- L.D. Smoot. A decade of combustion research. *Prog. Energy Combust. Sci.* **23**, 203-232 (1997).
- M. Valenti. Breaking the thermal efficiency barrier. *Mechanical Engineering*, julio 1995.
- M. Valenti. Building more efficient turbines. *Mechanical Engineering*, agosto 1994.
- N. Serpone, D. Lawless, R. Terzian. Solar fuels: status and perspectives. *Solar Energy* **44**(4) 1992, pp. 221-234.
- R. L. Leroy. Industrial water electrolysis: present and future. *Int. J. Hydrogen Energy* **8**(6) 1983, pp. 401-417.
- R. Ramachandran, R.K. Menon. An overview of industrial uses of hydrogen. *Int. J. Hydrogen Energy* **23**(7) 1998, pp 593-598.

- R. S. Dirzo. Chan k'iin: las fuentes de las energías renovables. Educación Química **9**(4) 1998, p. 190-195.
- S. K. Mishra, R. P. Dahiya. Adiabatic flame temperature of hydrogen in combination with gaseous fuels. Int. J. Hydrogen Energy **14**(11) 1989, pp. 839-844.
- S. P. Cicconardi, et. al. Hydrogen energy storage: hydrogen and oxygen storage subsystems. Int. J. Hydrogen Energy **22**(9) 1997, pp. 897-902.
- T. M. Cain. Autoignition of hydrogen at high pressure. Combustion and Flame **111**, 124-132 (1997).
- T. N. Vesiroglu, F. Barbir. Hydrogen: the wonder fuel. Int. J. Hydrogen **17**(16) 1992, p. 391-404.
- T. N. Veziroglu. Hydrogen technology for energy needs of human settlements. Int. J. Hydrogen Energy **12**, 99-129 (1987).
- U. Wagner, B. Geiger, H. Schaefer. Energy life cycle analysis of hydrogen systems. Int. J. Hydrogen Energy **23**(1) 1997, pp. 1-6.
- W. Doenitz, R. Schmidberger, E. Steinheil. Hydrogen production by high temperature electrolysis of water vapour. Int. J. Hydrogen Vol. 5 pp 55-63, 1979.

- W. E. K. Winsche, C. Hoffman, F.J. Salzano. Hydrogen its future role in the nation's energy economy. *Science*, junio 1972.
- W. Kreuter, H. Hofmann. Electrolysis: the important energy transformer in a world of sustainable energy. *Int. J. Hydrogen Energy* **22**(8) 1998, pp. 661-666.
- W. Pyle, J. Healy, R. Cortez. Solar hydrogen production by electrolysis. *Home Power* N° 33, 1994.
- W. T. Perry. New steam properties coming. *Power* Nov.-Dec., 1998.
- Y. S. H. Najjar. Some trends and progress in gas turbine technology and research. *Energy Convers* **23**(12) 1996, pp. 1713-1723.

WEB

ALTERNATIVE ENERGY DEVELOPERS en h24@hygen.com

Artículos selectos en www.homepower.com

CADDET Renewable Energy. IEA.2001. www.caddet-re.org

CESHR, engineet.tamu.edu/tees/cesnr/center

ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY

CLEARINGHOUSE (EREC) en doe.erec@nciinc.com

HYDROGEN en www.reedchemicals.com

HYDROGEN en American Hydrogen Association aha@getnet.com

HYDROGEN ENERGY CENTER en www.h2eco.or/

HYDROGEN ENERGY SYSTEMS en

www.matrixengineers.com/hydrogenfuel

HYDROGEN: THE ULTIMATE FUEL en www.hygen.com/solution

HYDROGENE: PRODUCTION ACTUELLE ET PERSPECTIVES en

www.alh2.org

LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO Y EL MUNDO en

www.conae.gob

HYDROGENE: PRODUCTION ACTUELLE ET PERSPECTIVES en
www.alh2.org

LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO Y EL MUNDO en
www.conae.gob

MOLECULAR HYDROGEN AND WATER VAPOUR EMISSIONS IN A
GLOBAL HYDROGEN ENERGY ECONOMY en
www.hydrogen.org/wisen/vapour

Morgan D., HYDROGEN: TECHNOLOGY AND POLICY, THE
COMMITTEE FOR THE NATIONAL INSTITUTE FOR THE
ENVIRONMENT, 1995: Cnie@cnie.org

THE ACCEPTANCE OF HYDROGEN TECHNOLOGIES en
www.hydrogen.org

TIDAL ELECTRIC INC., www.tidalelectric.com

U.S. Department of Energy. PHOTOVOLTAICS PROGRAM. 2000.
<http://www.eren.doe.gov/pv/program>.

WHY HYDROGEN? En www.hydrogenus.com

WhySE Wind-Hidrogen Supply of Electricity Markets-technology-
Economics, M. Altmann, et. al. Altmann@lbst.de, www.lbst.d

OTRAS REFERENCIAS

- ✓ Comisión Federal de Electricidad. Información básica 2000.
- ✓ E. C. Muñoz. Potencial de generación eléctrica con energías renovables en México. Cofer Conae, septiembre de 1998. Mimeo.
- ✓ E. V. Franco. Las celdas de combustible: inicio de la era del hidrógeno. Facultad de ingeniería UNAM, 2000. Tesis.
- ✓ J. L. F. Zayas, V. E. Cajigal. Cálculo de la irradiación instantánea en la república mexicana. Series del Instituto de Ingeniería, No. 472, 1983.
- ✓ La Jornada, miércoles 10 de octubre del 2001. Más electricidad de fuentes renovables, exigen industriales. P.30.
- ✓ Nasa et. al. Sourcebook for hydrogen applications. 1998.
- ✓ R. A. Salgado, V. E. C. Ramírez, J. B. Avila, Actualización de los mapas de irradiación solar en la república mexicana. Series del Instituto de Ingeniería, No. 543, 1992.
- ✓ United States Department of Energy. A national vision of america's transition to a hydrogen economy to 2030 and beyond, 2002.

RESUMEN

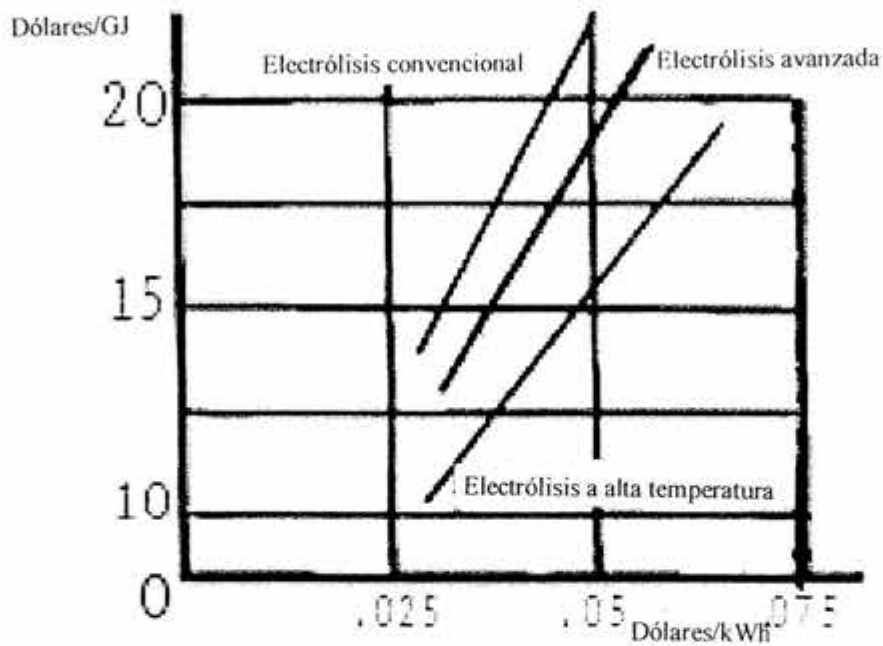
COSTOS DE PRODUCCIÓN COMPARATIVOS PROMEDIO
ENTRE EL HIDRÓGENO, CARBÓN, PETRÓLEO Y GAS
NATURAL CONSIDERANDO EXTERNALIDADES EN
DÓLARES/GJ

Gas natural	H ₂ de hidroeléctrica	H ₂ fotovoltaico	Petróleo	Carbón
12	4.1	15	16	17

FUENTE: Ver apéndices

APÉNDICE A

COSTOS DEL HIDRÓGENO EN FUNCIÓN DEL PRECIO DE LA ELECTRICIDAD Y EL PROCESO PARA SU OBTENCIÓN



Adaptado de W. Donitz, E. Erdle, R. Streicher, High temperature electrochemical technology for hydrogen production and power generation, Elsevier, 1990

APÉNDICE B

COSTO MÍNIMO DEL HIDRÓGENO USANDO ELECTRICIDAD PROVENIENTE DE LA PLANTA HIDROELÉCTRICA DE ITAIPU, BRASIL

4.1 dólares/GJ

FUENTE: S. N. M. De Souza, Hydrogen energy as a possibility of utilization of the secondary energy of brazilian hydropower plant of Itaipu, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2000
(Precio de la energia en Itaipu: 0.04 dólares/kWh. Precios de la energia secundaria: 0.0 \$/kWh, 0.005\$/kWh y 0.01\$/kWh)

COSTO DEL HIDRÓGENO USANDO ELECTRICIDAD DE UNA PLANTA FOTOVOLTAICA

20 dólares/GJ

Costo de la electricidad fotovoltaica 0.045 dólares/kWh

FUENTE: CESHR, 1996

COSTO DEL HIDRÓGENO USANDO ELECTRICIDAD DE OTRA PLANTA FOTOVOLTAICA

15 dólares/GJ

Costo de la electricidad fotovoltaica: 0.03 dólares/kWh

FUENTE: K. Andreason, Hydrogen production by electrolysis, Kluwer Academic Publishers, 1998

COSTO MÁXIMO DE LA ELECTRICIDAD PARA QUE LA
OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO POR ELECTRÓLISIS
CONVENCIONAL SEA COMPETITIVA AL NIVEL DE
DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DEL 2000

0.03dólares/kWh

FUENTE: M. C. Mattos, E.R. Gonzalez, A hydrogen/fuel cell bus program in Brazil, Instituto de química de São Carlos, 2000

COSTO DE LA ELECTRICIDAD GENERADA POR UN
SISTEMA INTEGRADO EÓLO-HIDRÓGENO DE 10 MW EN
1999

0.3 dólares/kWh

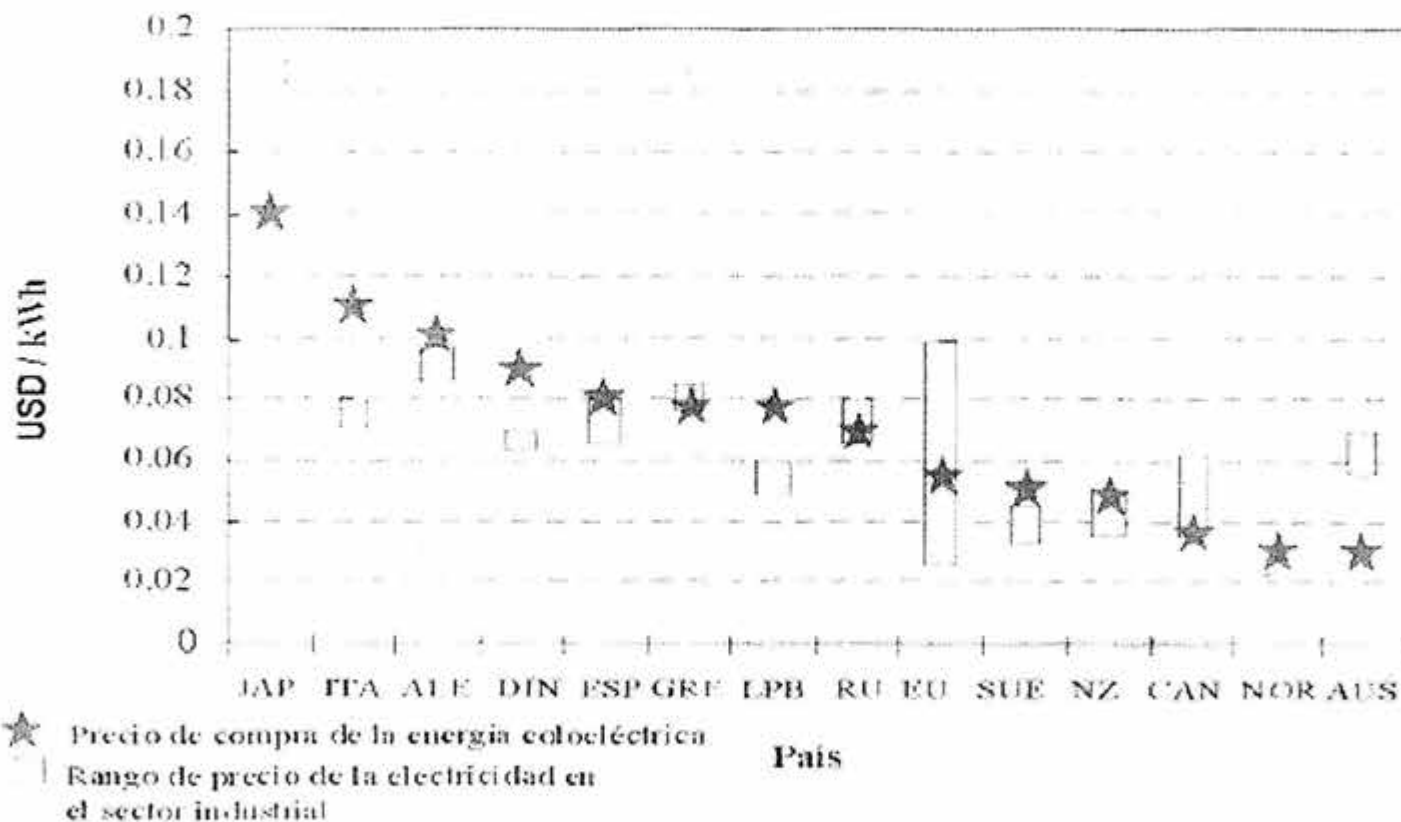
COSTO ESPERADO DE LA ELECTRICIDAD GENERADA POR
EL MISMO SISTEMA ANTERIOR PARA EL 2005

0.1 dólares/kWh

FUENTE: M. Altmann, P. Niebauer, E. P. Schoberer, W. Zittel, Wind-hidrogen supply of electricity, 2000

Precio de compra de la energía eoloelectrónica en varios países.

APÉNDICE C



APÉNDICE D

EXTERNALIDADES DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES

(Adaptado de T. Nejat Veziroglu, University of Miami 2001)

Tipo de externalidad	\$ de 1998/GJ				
	Carbón		Petróleo		Gas Natural
		Sub-total		Sub-total	Sub-total
I.- EFECTOS SOBRE LOS HUMANOS		5.16		4.19	3.09
I.1. Muertes prematuras	1.75		1.42		1.05
I.2. Gastos médicos	1.75		1.42		1.05
I.3. Pérdida de eficiencia laboral	1.66		1.35		0.99
II.- EFECTOS SOBRE LOS ANIMALES		0.75		0.63	0.45
II.1. Pérdida en animales domésticos	0.25		0.21		0.15
II.2. Pérdida en vida salvaje	0.5		0.42		0.3
III.- EFECTOS EN PLANTAS Y BOSQUES		1.99		1.61	1.2
III.1. Reducc. de rendimiento en cosechas	0.25		0.21		0.15
III.2. Lluvia ácida en bosques	0.13		0.1		0.07
III.3. Pérdida de flora	0.77		0.62		0.46
III.4. Pérdida de bosques	0.27		0.22		0.16
III.5. Pérdida de biodiversidad	0.53		0.43		0.33
III.6. Pérdida del valor recreacional	0.04		0.03		0.03
IV.-EFECTO EN ECOSISTEMAS ACUÁTICOS		0.26		1.55	0.16
V.- DERRAMES PETROLEROS		0.26		1.5	0.16
V.1. Fugas de tanques marinos			0.9		
V.2. Fugas en lagos	0.04		0.03		0.03
V.3. Pérdidas en comunidades de peces	0.04		0.03		0.03
V.4. Disminución en biodiversidad marina	0.18		0.15		0.1
VI.- EFECTOS EN SUPERESTRUCTURA		1.66		1.34	0.983
VI.1. Construcciones históricas	0.18		0.15		0.1
VI.2. Deterioro en casas	0.37		0.3		0.22
VI.3. Corrosión en aceros	0.99		0.8		0.59
VI.4. Manchas	0.12		0.09		0.07
VII.- COSTOS DE POLUCIÓN DEL AIRE		1.45		1.16	0.88
VII.1. Reducción de visibilidad	0.3		0.23		0.18
VII.2. Limpieza de la polución	1.15		0.93		0.7
VIII.- EFECTO DE MINAS ABIERTAS		0.73			
IX.- CAMBIO CLIMÁTICO		2.04		1.66	1.22
IX.1. Ondas de calor	0.27		0.22		0.16
IX.2. Pérdida de agricultura	0.16		0.13		0.1
IX.3. Pérdida en las especies	0.13		0.1		0.07
IX.4. Pérdida en bosques	0.16		0.13		0.1
IX.5. Pérdida en fauna y flora	0.93		0.75		0.56
IX.6. Contaminación en aguas	0.25		0.21		0.15
IX.7. Inundaciones	0.07		0.06		0.04
IX.8. Tormentas, huracanes, tornados	0.07		0.06		0.04
X.- EFECTO DEL NIVEL DEL MAR		0.47		0.38	0.28
TOTAL		14.51		12.52	8.26

APÉNDICE E

Diversos son los procesos que permitirían disponer de la energía del sol, vientos y mares para generar electricidad, calor y agua potable con la continuidad, calidad y seguridad que el consumidor moderno exige.

De tal diversidad sólo es intención de este apéndice mostrar un número limitado pero representativo de alternativas que esperan una valoración ingenieril. Son sólo ideas personales para el periodo de tránsito entre los combustibles fósiles y el uranio, y las energías renovables. Decidi incluirlas en esta tesis tanto por su atractivo desde la perspectiva de la ingeniería de procesos como por su potencial factibilidad. No sé, tal vez a alguien le interese desarrollar alguno de estos procesos o mejorarlos o proponer otros. Que las generaciones futuras no digan que al menos no lo intentamos, al recibir el planeta sucio que seguramente les vamos a heredar.

El primer diagrama es el proceso que esta tesis valora desde el punto de vista termodinámico, su factibilidad como ya se dijo, es proyecto de doctorado. El diagrama es simple e incluye la alternativa de electrolizar agua en estado vapor.

El segundo integra solamente una celda de combustible. Es una variación del primero.

El tercer diagrama propone un híbrido que hace uso tanto del ciclo Rankine como de celdas de combustible.

El cuarto diagrama integra, además del ciclo Rankine y la celda de combustible, al ciclo Stirling; los avances realizados en este último son notables y dignos de considerarse.

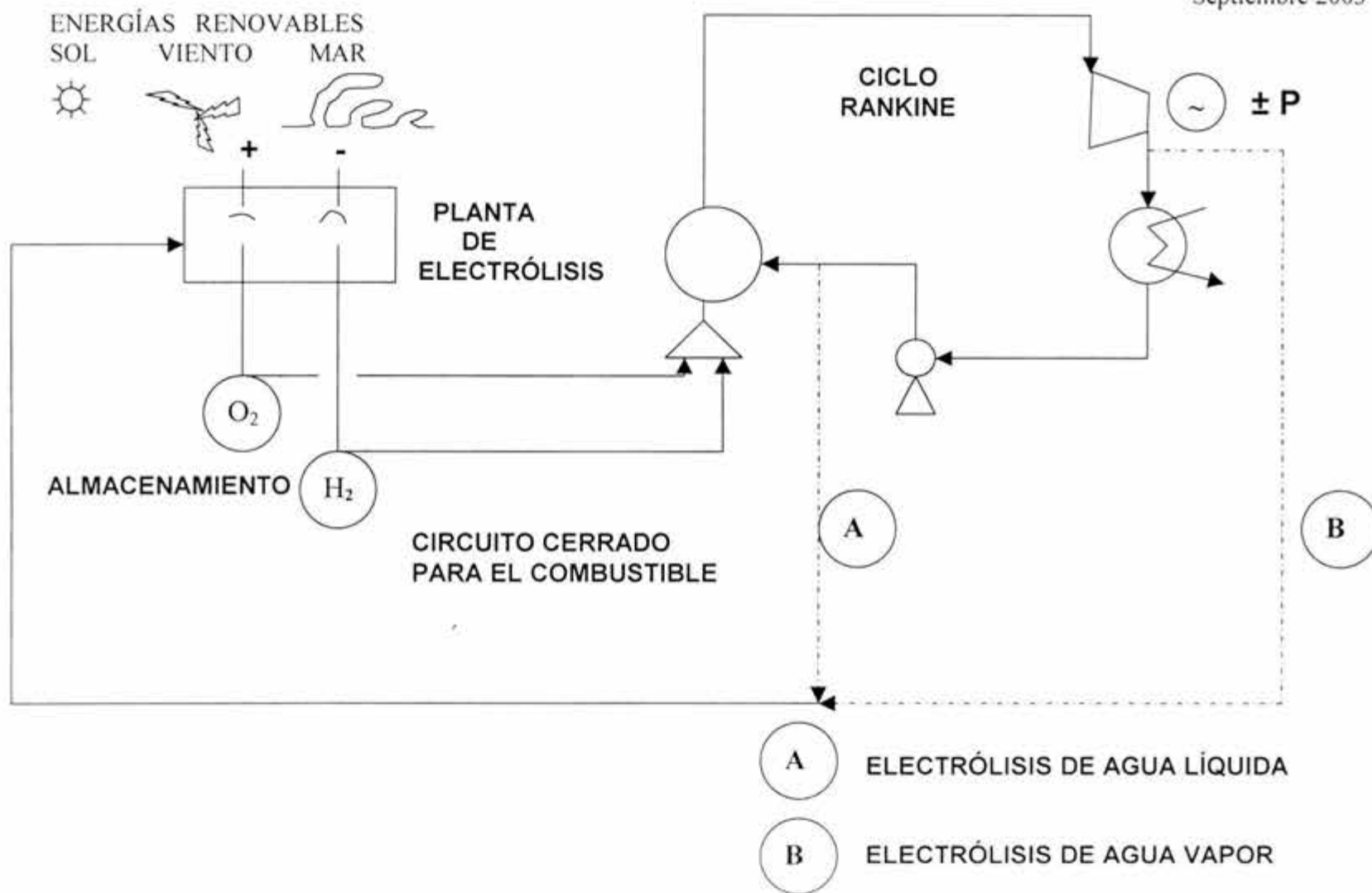
El quinto diagrama hace una propuesta de ampliar el concepto de cogeneración clásico: además de electricidad y calor, es posible disponer de agua potable. Con esto, municipios aislados dispondrían de energía eléctrica, calorífica y agua.

El sexto diagrama incluye al ciclo Stirling y Rankine para obtener electricidad, calor y agua.

El último diagrama se incluye para recordar de manera esquemática y general cómo se obtiene actualmente potencia eléctrica desde la exploración de los combustibles fósiles hasta su inevitable emisión contaminante en aire, tierra y suelo.

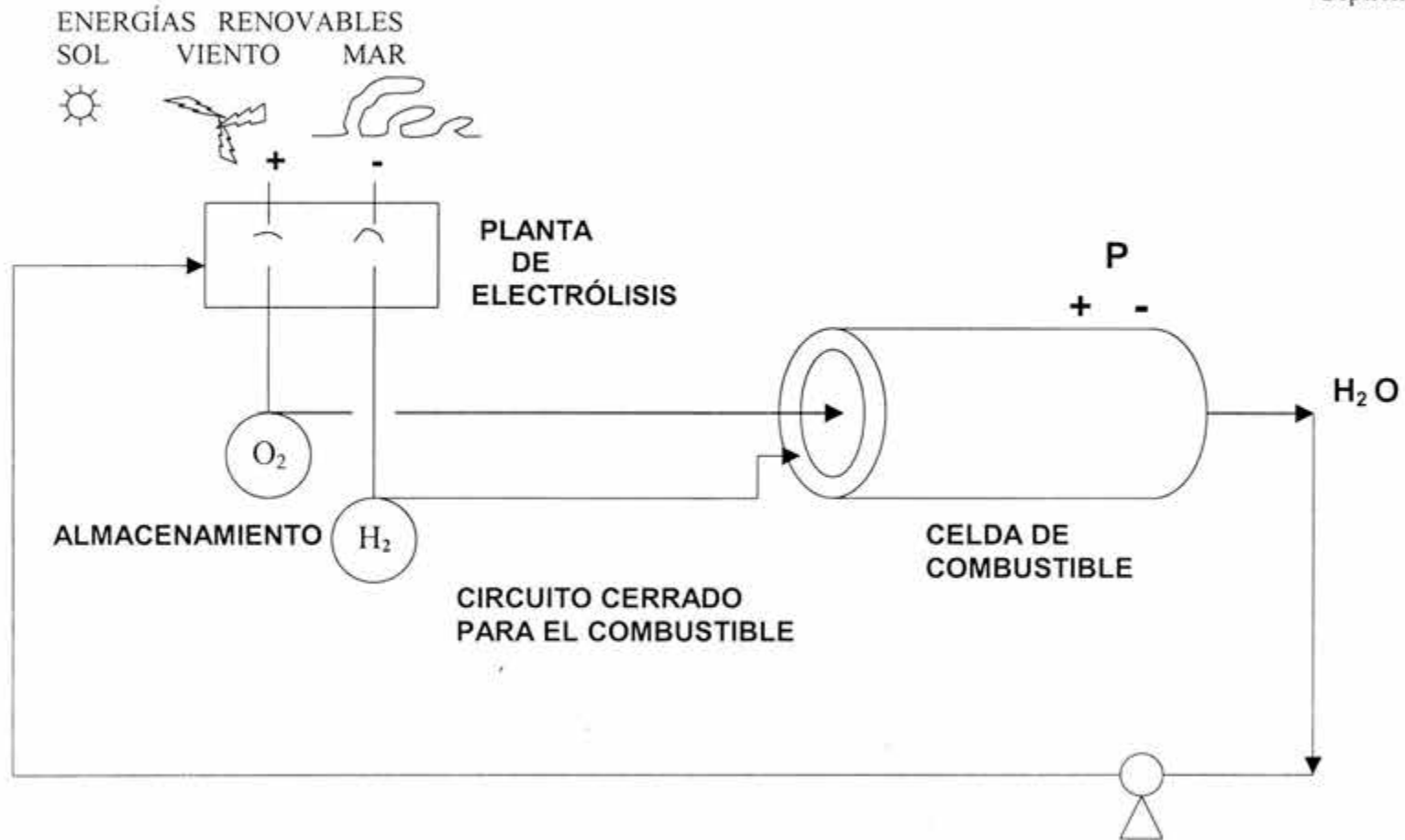
POTENCIA ELÉCTRICA DE ENERGÍAS RENOVABLES
(Ciclo cerrado para el combustible. Ciclo Rankine)

Rafael Sánchez Dirzo
Septiembre 2003



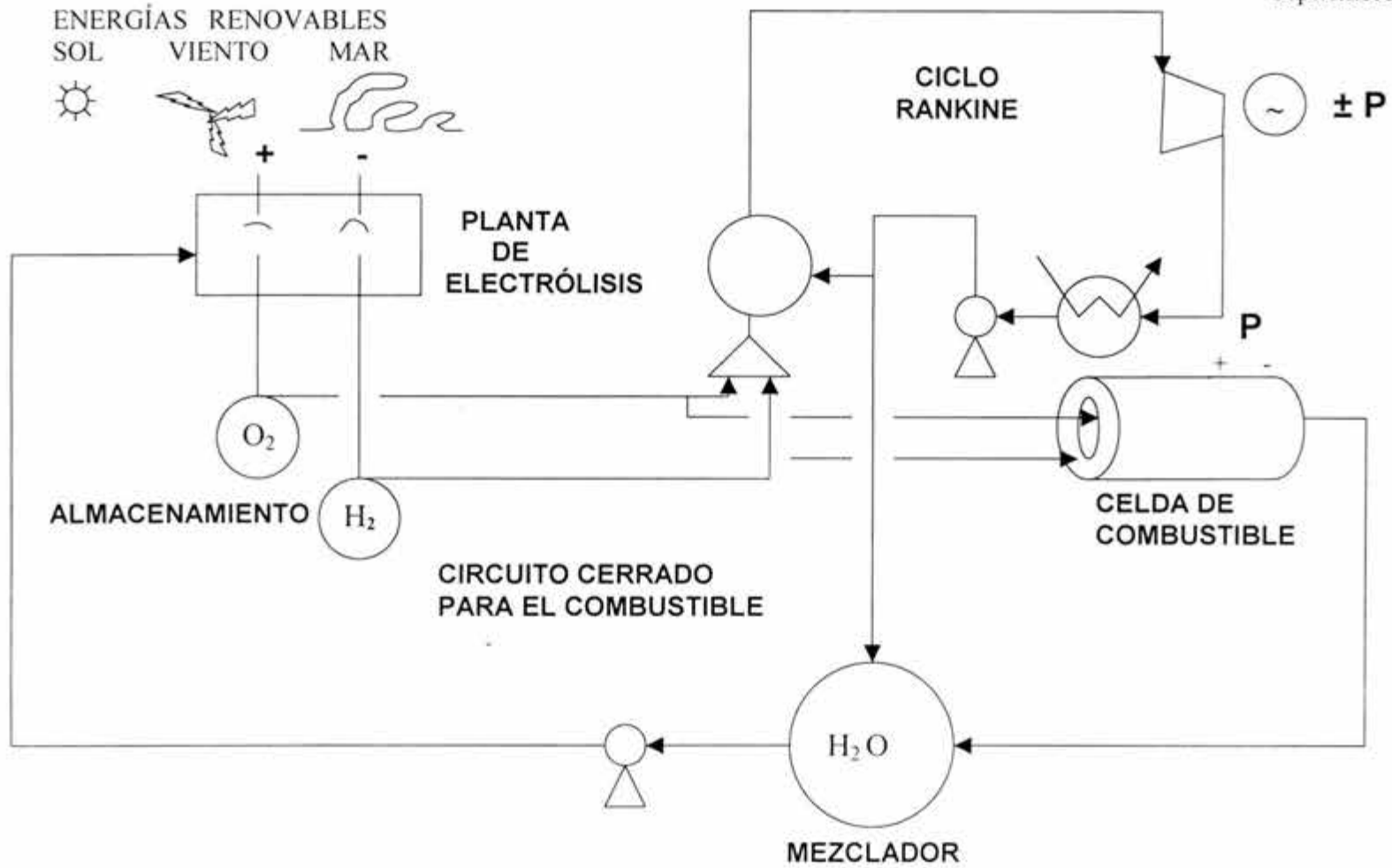
POTENCIA ELÉCTRICA DE ENERGÍAS RENOVABLES
(Ciclo cerrado para el combustible. Celdas de Combustible)

Rafael Sánchez Dirzo
Septiembre 2003



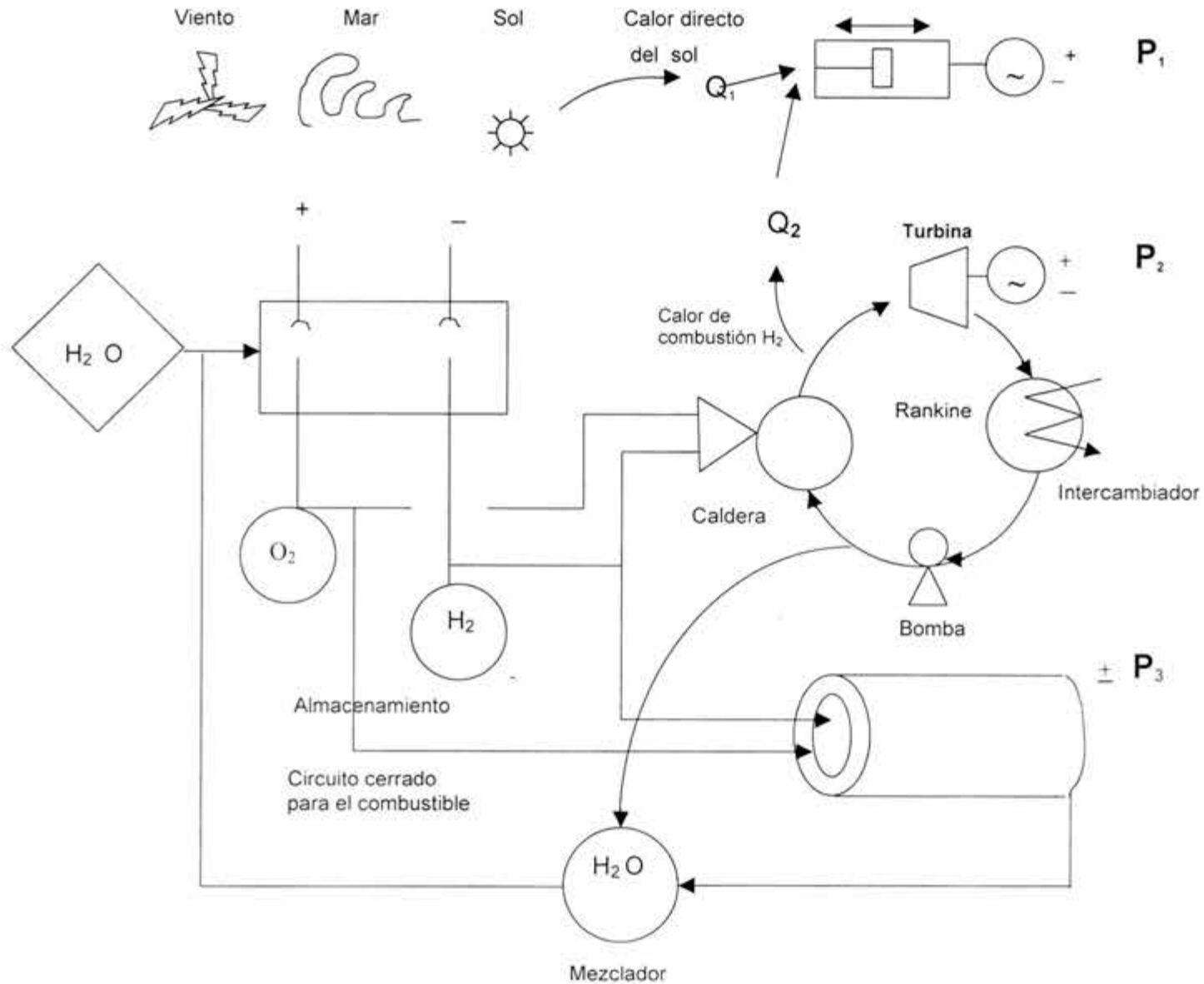
POTENCIA ELÉCTRICA DE ENERGÍAS RENOVABLES (Híbrido)

Rafael Sánchez Dirzo
Septiembre 2003



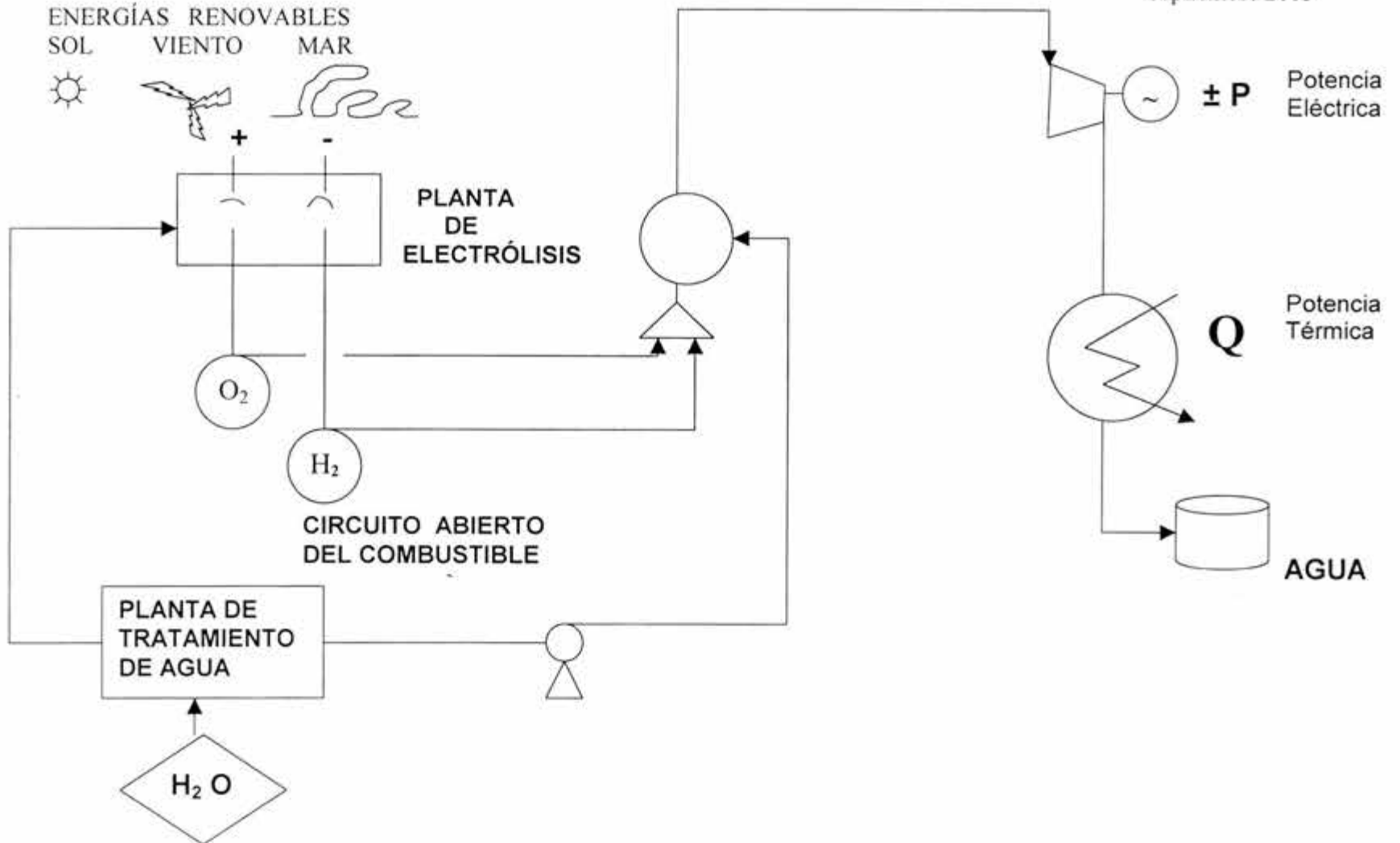
POTENCIA ELÉCTRICA DE RENOVABLES (Híbrido. Ciclos Stirling, Rankine y celdas de combustible)

Rafael Sánchez Dirzo



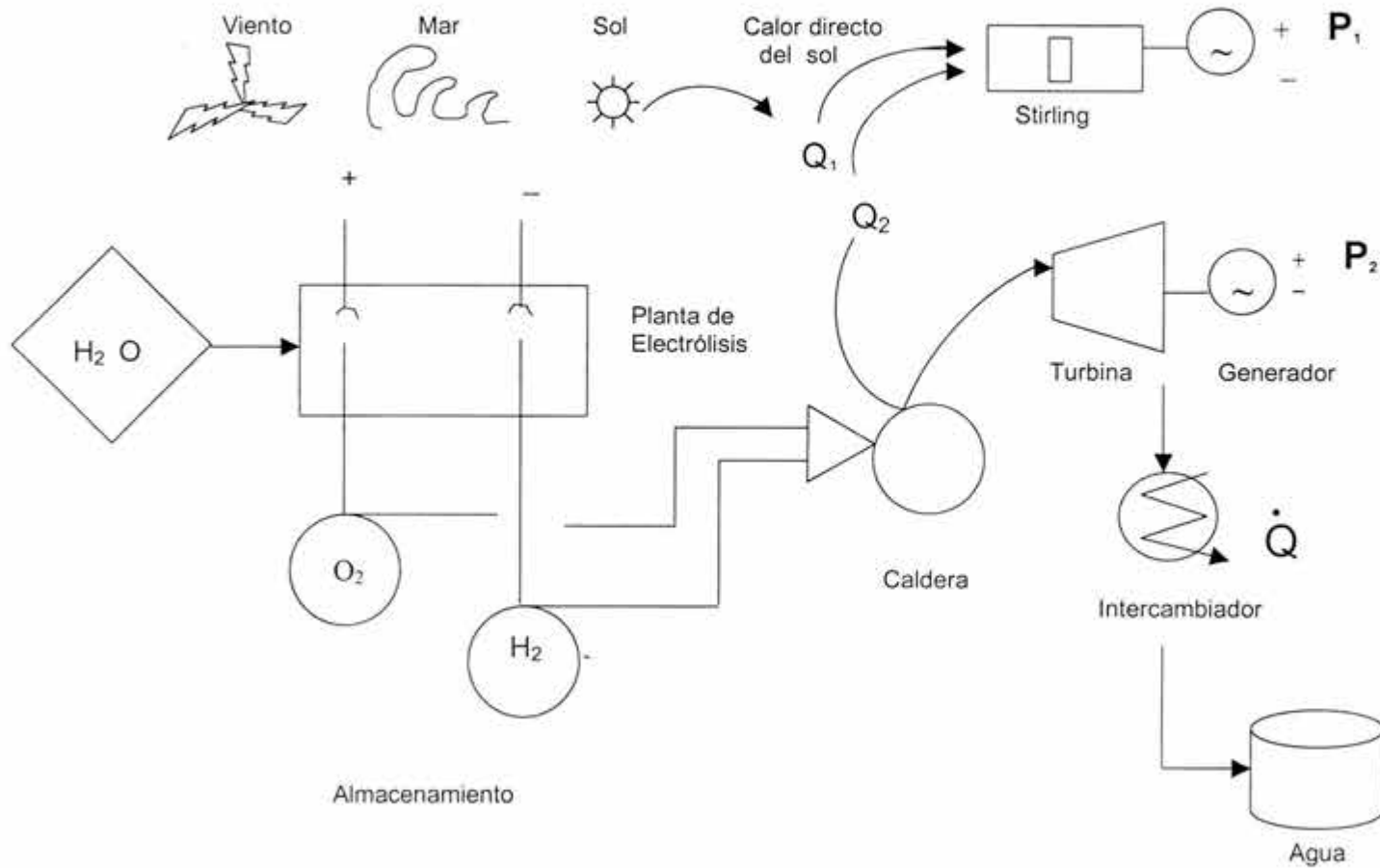
POTENCIA ELÉCTRICA DE ENERGÍAS RENOVABLES
(Ciclo abierto. Ampliación del concepto de cogeneración:
además de calor y electricidad se ofrece agua pura)

Rafael Sánchez Dirzo
Septiembre 2003



POTENCIA ELÉCTRICA DE RENOVABLES (Cogeneración. Stirling. Rankine. Calor y agua)

Rafael Sánchez Dirzo



POTENCIA ELÉCTRICA DE LOS HIDROCARBUROS

Rafael Sánchez Dirzo

Septiembre 2003

