

4



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CELDA DE COMBUSTIBLE, TECNOLOGIA ALTERNATIVA
PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO ELECTRICO ELECTRONICO

P R E S E N T A N :

RUBEN ANDRES DUEÑAS GARCIA

CARLOS GARCIA SAGREDO OLGUIN

295744

DIRECTOR DE TESIS: ING. DAVID VAZQUEZ ORTIZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMIENTOS

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO,
POR DARNOS LA OPORTUNIDAD DE FORMARNOS
HUMANA Y PROFESIONALMENTE**

**A LA FACULTAD DE INGENIERIA
POR PERMITIRNOS TENER EL PRIVILEGIO Y HONOR DE
PERTENECER A ELLA**

**A TODOS LOS PROFESORES
QUE NOS IMPARTIERON CLASES, CUYAS ENSEÑANZAS Y
CONOCIMIENTOS NOS MOTIVARON PARA ALCANZAR
ESTA META**

**AL INGENIERO DAVID VÁZQUEZ ORTÍZ,
NUESTRO DIRECTOR DE TESIS, POR EL APOYO
INCONDICIONAL PARA REALIZAR EL PRESENTE
TRABAJO**

**Y A TODOS AQUELLOS QUE HICIERON POSIBLE LA
REALIZACIÓN DE ESTA TESIS**

MUCHAS GRACIAS

A MIS PADRES

Lic. Carlos García Sagredo González y Ma. Isabel Olguín Calderón,
en agradecimiento por todo lo que han hecho por mí, por apoyarme y orientarme en
todo momento, porque gracias a su comprensión y cariño he logrado una meta más en
mi vida. *Son un ejemplo a seguir. Los quiero muchísimo.*

A MIS HERMANAS

Sandra y Mary quienes de una u otra forma ma han apoyado; sé que puedo contar con
ustedes al igual que ustedes conmigo. Espero que este logro en mi vida las aliente
para que también alcancen sus objetivos.

A MIS PADRINOS

Dr. Omar Avila Mariño y Victoria García Sagredo González, por todo el apoyo
recibido de su parte.

A MIS TIOS

Miguel Olguín Calderón y Fabiola Silva, por su cariño.

A MIS ABUELOS

De quienes recibí su cariño, comprensión y buenos consejos durante todo el tiempo
que permanecieron a mi lado. Siempre vivirán en mi corazón.

A ANDRES DUEÑAS GARCIA

Compañero y amigo, por todos los momentos compartidos en la Universidad y por
llevar a cabo esta meta.

A MIS AMIGOS

Que comparten conmigo uno de mis más grandes sueños.

Carlos García Sagredo Olguín

A DIOS

Por la oportunidad de estar hoy aquí.

AMIS PADRES

Sra. Gloria García Ramos y Sr. Luis Dueñas Peña,
por su cariño, confianza, apoyo y consejos que me han ayudado a lograr todas mis metas.

Gracias por su interminable amor.

A MIS HERMANOS

Rosario, Susana, Martha, Luis, Héctor y Sergio,
por brindarme su amistad, cuidados, ayuda y comprensión.

Cada uno es esencial en mi vida.

A MIS SOBRINOS

Claudia, Carlos, Fabiola, Julián, Diana, Montserrat y Daniela,
por su compañía, vitalidad y paciencia.

Me ayudan a ser mejor cada día.

AMIS CUÑADOS

Gabriela, Lourdes, Verónica y Fidel,
por su amistad y ayuda.

A MI FAMILIA

Para mi abuela Margarita y todos mis Tíos,
gracias por su apoyo.

A LA FAMILIA GARCIA SAGRADO OLGUIN

Por todas sus atenciones y apoyo para lograr esta meta.

A MIS AMIGOS

Gracias por aceptarme a pesar de mí mismo.

Rubén Andrés Dueñas García

INDICE

Introducción.....	1
-------------------	---

Capítulo 1

Fuentes de Generación de Energía Eléctrica en el país. Estado Actual

1.1. Hidroeléctricas.....	1
1.2. Centrales termoeléctricas.....	4
1.2.1. Centrales termoeléctricas de combustible fósil.....	4
1.2.1.1. Termoeléctrica vapor.....	5
1.2.1.2. Dual.....	6
1.2.1.3. Carboeléctrica.....	7
1.2.1.4. Turbo gas.....	8
1.2.1.5. Combustión interna.....	9
1.2.1.6. Ciclo combinado.....	10
1.2.2. Geotermoeléctrica.....	12
1.2.3. Nucleoeléctrica.....	13
1.3. Eoloeléctrica.....	14
1.4. Recursos energéticos y generación de energía eléctrica en México.....	16
1.4.1. Hidrocarburos.....	16
1.4.2. Energía hidráulica.....	16
1.4.3. Energía geotérmica.....	16
1.4.4. Carbón térmico.....	17
1.4.5. Uranio.....	17
1.5. Desarrollo del sector eléctrico.....	17

Capítulo 2

Impactos ambientales asociados a la generación de energía eléctrica

2.1. Emisiones de las centrales termoeléctrica.....	22
2.1.1. Emisiones atmosféricas.....	22

2.1.2. Emisiones térmicas asociadas al sistema de enfriamiento.....	23
2.1.3. Emisiones de aguas residuales.....	23
2.1.4. Desechos sólidos de las centrales nucleares	25
2.2. Las centrales hidroeléctricas.....	25
2.3. Efectos en el ambiente.....	25
2.3.1. Efecto invernadero.....	25
2.3.2. Lluvia ácida.....	27
2.3.3. Los suelos y la geotermia.....	28
2.3.4. Radiaciones.....	28
2.3.5. Creación de presas.....	30

Capítulo 3

Fuentes alternas de energía

3.1. Energía solar.....	32
3.1.1. Sistemas fotovoltaicos.....	33
3.1.2. La celda fotovoltaica.....	35
3.1.3. Rendimiento del proceso fotovoltaico.....	35
3.1.4. Estructura de un generador fotovoltaico.....	36
3.1.5. Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos.....	37
3.1.6. Impacto en el medio ambiente, por el uso de la energía solar.....	39
3.2. Energía eólica.....	40
3.2.1. Disponibilidad del recurso.....	40
3.2.2. Tecnologías para el aprovechamiento de la energía eólica	41
3.2.3. Aeroturbinas de eje horizontal.....	42
3.2.4. Aeroturbinas de eje vertical.....	43
3.2.5. Conversión de energía eólica en energía eléctrica.....	44
3.2.6. Impacto en el medio ambiente, por el uso de la energía eólica.....	48
3.3. Almacenamiento eléctrico.....	48

Capítulo 4

Celdas de combustible

4.1. Historia.....	50
4.2. Principio de operación	51
4.3. Tipos de celdas de combustible.....	53
4.3.1. Celdas de ácido fosfórico (PAFC).....	54
4.3.2. Celdas de carbonatos fundidos (MCFC).....	54
4.3.3. Celdas de óxido sólido (SOFC).....	55
4.3.4. Celda de polímero sólido o membrana de intercambio protónico (PEM)	56
4.3.5. Celdas alcalinas	57
4.3.6. Otras celdas de combustible, celda de combustible de metanol directo (DMFC)	58
4.4. Descripción de la celda de combustible	58
4.4.1. Descripción detallada de cada componente	62
4.5. Costos y eficiencia.....	66
4.6. Operación de la tecnología de las celdas de combustible.....	68
4.6.1. Plantas estacionarias.....	68
4.6.2. Plantas móviles	69
4.7. Aplicaciones de las celdas de combustible y desarrollo actual.....	71
4.7.1. Aplicaciones estacionarias.....	71
4.7.2. Aplicaciones en el transporte.....	75
4.7.3. Energía portátil.....	80
4.8. Sistema de turbina avanzada vs tecnología de las celdas de combustible....	82
4.9. Situación nacional.....	84

Capítulo 5

Hidrógeno

5.1. Métodos genéricos para la obtención del hidrógeno.....	86
5.2. Métodos para el transporte de energía a grandes distancias.....	89
5.3. La producción del hidrógeno a escala industrial a partir del agua.....	90

5.4. Almacenamiento de hidrógeno.....	92
5.4.1. Almacenamiento de gas hidrógeno.....	92
5.4.2. Hidrógeno fijado por medios físicos o químicos.....	94
5.5. Aspectos relacionados con las medidas de seguridad para el manejo del hidrógeno	97
5.5.1. Datos físicos y técnicos que están relacionados con la seguridad	97
5.6. Almacenamiento de la energía eléctrica	101
5.7. El oxígeno	101
5.7.1. Posibles utilizaciones del oxígeno	102
5.8. Reformador	103
Conclusiones	105
Bibliografía y referencias	107

Introducción

En la actualidad, las sociedades modernas requieren para su desarrollo científico, técnico, económico y social de una elevada cantidad de energía, la mayor parte de está se suministra en forma de electricidad. La electricidad es una forma de energía totalmente limpia en su uso final, que resulta hoy imprescindible en buena parte de las principales actividades humanas.

En los últimos años, el sistema de generación de energía eléctrica se ha basado principalmente en la utilización de los siguientes combustibles fósiles:

- El petróleo, es una mezcla de una gran variedad de hidrocarburos (compuestos de carbono e hidrógeno) en fase líquida, mezclados con una variedad de impurezas. Por destilación y otros procesos, se obtienen los diversos compuestos que se utilizan en algunas centrales para generar energía eléctrica. En el ámbito mundial ya no es un recurso abundante.

- El gas natural, el cual está compuesto principalmente por metano y corresponde a la fracción más ligera de los hidrocarburos, por lo que se encuentra en los yacimientos en forma gaseosa.

- El carbón mineral, que es principalmente carbono, también de origen fósil, que se encuentra en grandes yacimientos en el subsuelo. A nivel mundial, el carbón mineral es abundante, aunque los problemas ecológicos que causa son aún mayores que los inherentes al petróleo y sus derivados.

De tal manera que la disponibilidad de los recursos energéticos es uno de los factores más importantes en el desarrollo tecnológicos de las naciones.

Por otra parte, la generación de energía eléctrica afecta al medio ambiente, la atmósfera, la corteza terrestre, la biodiversidad de especies, cursos de aguas, etc. Sin embargo a pesar del impacto ambiental que esta actividad humana produce en el medio, si es controlada y llevada a valores razonables desde los puntos de vista técnico, ambiental y económico los daños causados al medio son aceptablemente bajos comparando con el beneficio que esta actividad otorga a la calidad de vida humana.

Todas las formas de generar energía eléctrica afectan nuestro hábitat, ya que contribuyen al desarrollo de fenómenos ambientales adversos. Desde luego, el impacto que se produce depende del método de generación empleado.

Por ello se tiene que apoyar el desarrollo y la implantación de nuevos sistemas avanzados de generación eléctrica más eficaces y limpios, de forma que se responda a las exigencias tecnológicas y ambientales de cada momento y su proyección a futuro.

En la búsqueda de tecnologías alternativas de generación de energía eléctrica, desde hace algunos años se estudia una en especial, que puede llegar a tener un gran potencial a futuro, las celdas de combustible. Las celdas de combustible son una tecnología en la cual, uno de los principales beneficios, es que podrían reducir de manera dramática la contaminación del aire, debido a que utilizan hidrógeno como combustible y generan agua como producto final. Sin embargo, uno de los problemas que se presenta con esta tecnología es que el hidrógeno no se encuentra disponible como tal en la naturaleza, sino que hay que producirlo industrialmente. Actualmente se considera al hidrógeno como una fuente energética muy interesante.

El presente trabajo consiste en una investigación en la cual, en el capítulo 1, se presentan las fuentes de generación de energía eléctrica en el país, presentando su principio de operación, su aportación actual al sistema de generación y la forma en que se elevará la capacidad instalada para los próximos años.

El capítulo 2, se dedica a los principales daños al medio ambiente asociados a la generación de energía eléctrica.

En el capítulo 3 se estudian fuentes alternas para la generación de energía eléctrica que pueden desarrollarse en nuestro país, resaltando sus ventajas y desventajas.

En el capítulo 4, se abordan los parámetros más importantes en relación a la tecnología de las celdas de combustible, como son su estructura, operación y casos prácticos de aplicación, entre otros.

Finalmente, el capítulo 5 está dedicado al hidrógeno, presentando sus principales parámetros, desde su obtención hasta su uso final.

CAPITULO 1

FUENTES DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN EL PAIS. ESTADO ACTUAL

La Energía Eléctrica generada en el Sistema Eléctrico Nacional se produce básicamente con combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón) y agua. Los combustibles fósiles son fuentes de energía no renovables, es decir, aquellas que se encuentran en forma limitada en nuestro planeta y se agotan a medida que se les consume. Los combustibles fósiles (hidrocarburos) son la principal fuente de energía, sin embargo, el impacto ambiental consecuente a su uso y el hecho de ser no renovables son las principales razones por las que se buscan fuentes alternas de generación de energía eléctrica.

A continuación se describen brevemente cada uno de los tipos de plantas generadoras existentes en el país.

1.1 Hidroeléctricas

Un aprovechamiento hidroeléctrico es un conjunto de obras civiles, mecánicas y eléctricas cuyo fin es aprovechar la energía potencial y cinética del agua para la generación de energía eléctrica.

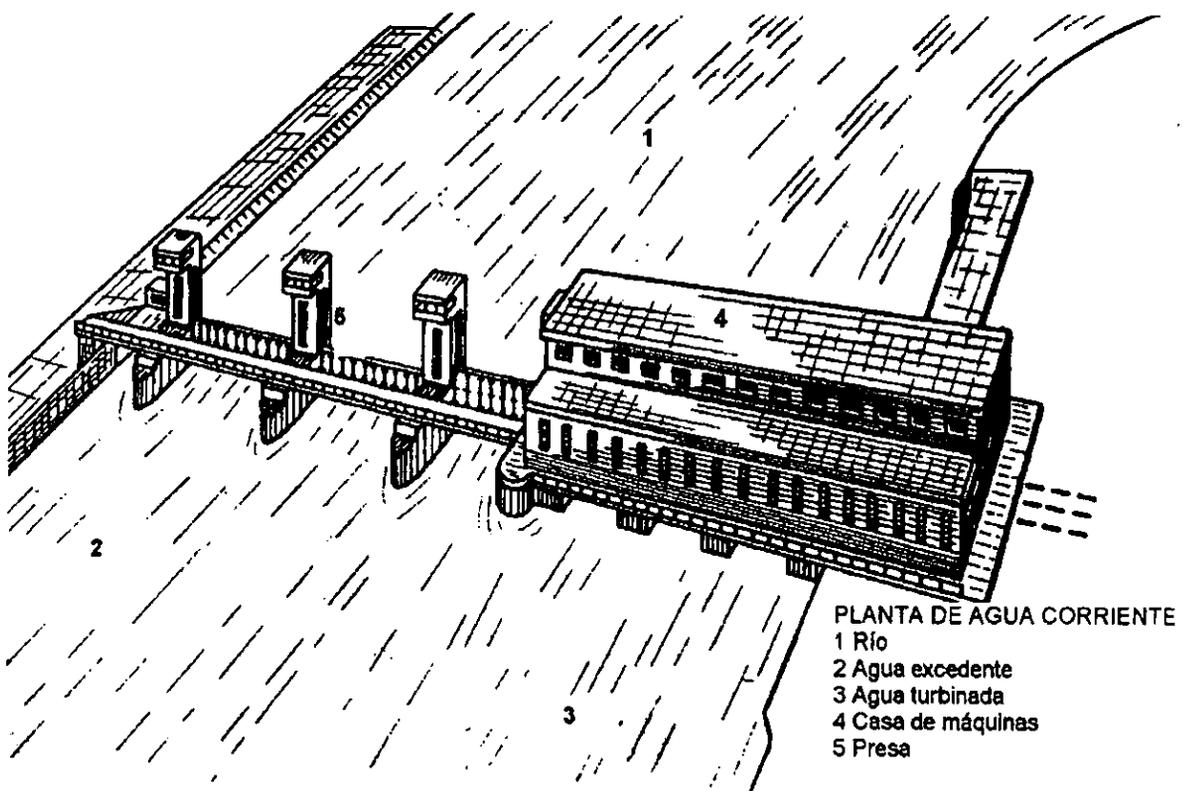
La energía eléctrica, en este tipo de plantas, se obtiene al hacer girar por medio de un flujo de agua las turbinas que se encuentran acopladas a generadores eléctricos. La energía eléctrica generada llega a una subestación en la que se eleva el voltaje para su transmisión y distribución hacia los centros de consumo.

Pueden ser clasificadas principalmente bajo los siguientes criterios:

- Forma de utilización del agua.
- Agua Fluente:

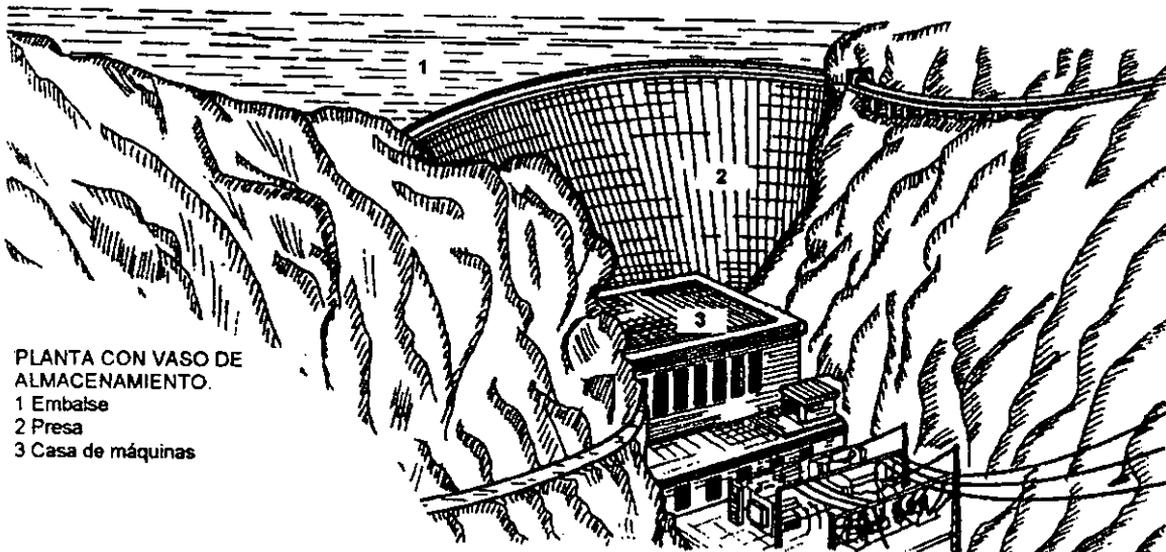
Conocidas también como de agua corriente, utilizan la energía hidráulica que se obtiene de un embalse de almacenamiento pero sin tener ninguna posibilidad de control en el caudal de suministro.

En las temporadas de precipitaciones abundantes desarrollan su potencia máxima, al dejar pasar el agua excedente; por el contrario, durante el tiempo de secas, la potencia producida disminuye considerablemente en función del caudal, llegando a ser casi nula en algunos ríos en época de estiaje.



- Con Vaso de Almacenamiento:

Concentrando grandes cantidades de agua en un embalse, se obtiene, inicialmente, energía potencial. Por la acción de la gravedad, el agua adquiere energía cinética o de movimiento: pasa de un nivel superior a otro muy bajo, a través de las obras de conducción. Por su masa y velocidad, el agua produce un empuje que se aplica a las turbinas, las cuales transforman la energía hidráulica en energía mecánica. Esta se propaga a los generadores acoplados a las turbinas.



Según la caída o desnivel, se clasifican en:

- Baja caída:

Con un desnivel menor de 40 m y con un gasto aproximado de 300 m³/s por turbina. En estas plantas se utilizan turbinas de reacción tipo Kaplan.

- Media caída:

Para desniveles entre los 40 y 250 m, con un gasto de 200 m³/s por cada turbina. En estas plantas se utilizan turbinas de reacción tipo Francis.

- Alta caída:

Un desnivel mayor de 250 m con un gasto aproximado de 20 m³/s por turbina. En este caso utilizan turbinas para alta presión de impulso o tipo Pelton.

Estado Actual

Actualmente el mayor desarrollo hidroeléctrico en México corresponde a la cuenca del Río Grijalva en el Sureste del país, constituido por las centrales de Angostura (900 MW), Chicoasén (1,500 MW), Malpaso (1,080 MW) y Peñitas (420 MW). La capacidad total del conjunto es de 3,900 MW.

Otro desarrollo importante es el de la cuenca del Río Balsas localizado en el Sur del País; las centrales que integran este conjunto son: Caracol (600 MW), Infiernillo (1,000 MW) y Villita (295 MW), con una capacidad total de 1,895 MW.

A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía 64 centrales en operación, con un total de 182 unidades, generando aproximadamente 9,745.149 MW lo que corresponde al 26.9% de la capacidad total instalada.

1.2 Centrales Termoeléctricas

1.2.1 Centrales Termoeléctricas de Combustible Fósiles

Las centrales térmicas convencionales son las centrales que utilizan combustibles fósiles, como energético. Producen electricidad mediante la energía calorífica generada por la combustión de diesel, carbón, gas natural, combustóleo y otros aceites pesados, con la que se produce el vapor para activar las turbinas.

El vapor de agua se bombea a alta presión a través de los tubos de la caldera donde alcanza temperaturas de hasta 600° C (vapor recalentado).

Este vapor entra a gran presión en la turbina a través de un sistema de tuberías; la turbina de vapor consta de tres cuerpos; de alta, media y baja presión respectivamente. El objetivo de esta triple disposición es aprovechar al máximo la fuerza del vapor, ya que este va perdiendo presión progresivamente. Así pues, el vapor de agua a presión hace girar la turbina, generando energía mecánica.

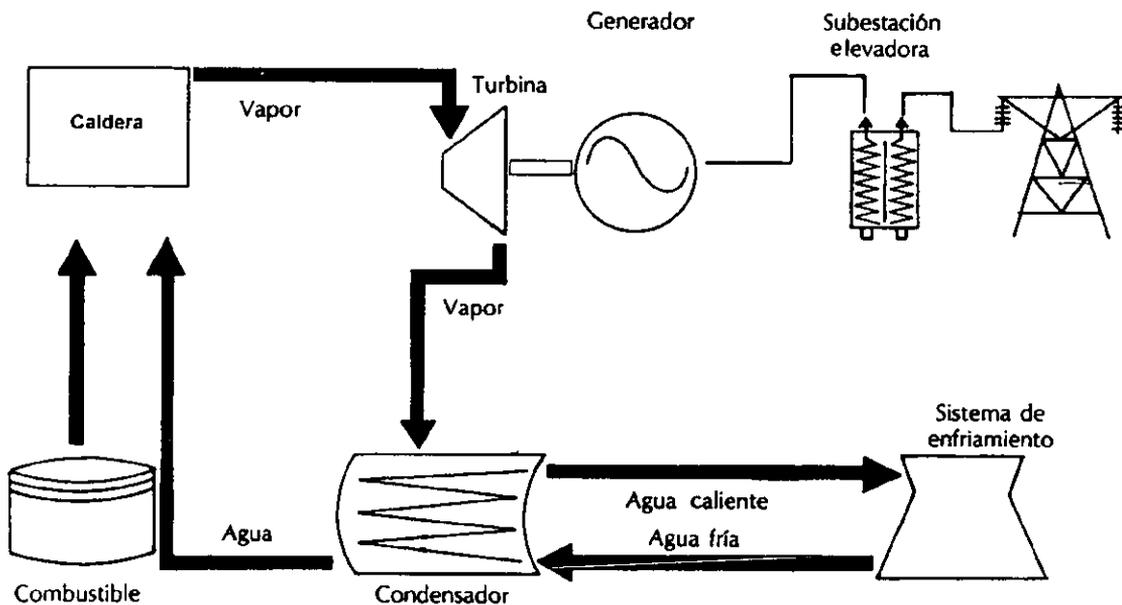
El vapor, con el calor residual no aprovechable, pasa de la turbina al condensador. Aquí, a muy baja presión y temperatura (40° C), el vapor se convierte de nuevo en agua, la cual es conducida otra vez a la caldera a fin de reiniciar el ciclo productivo. El calor latente de condensación del vapor de agua es absorbido por el agua de refrigeración, que lo entrega al aire del exterior en las torres de enfriamiento.

La energía mecánica de rotación que lleva el eje de la turbina es transformada a su vez en energía eléctrica por medio de un generador acoplado a la turbina.

Se trata de un proceso de transformación de energía. El esquema básico de funcionamiento de todas las centrales térmicas convencionales es prácticamente el mismo. Las diferencias sustanciales consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado en la caldera y el diseño de los quemadores de la misma, que varía según el tipo de combustible empleado.

1.2.1.1 Termoeléctrica Vapor

En México, este tipo de plantas utilizan, básicamente, como fuente energética primaria combustóleo y en un futuro próximo podrán emplear, además, gas natural.



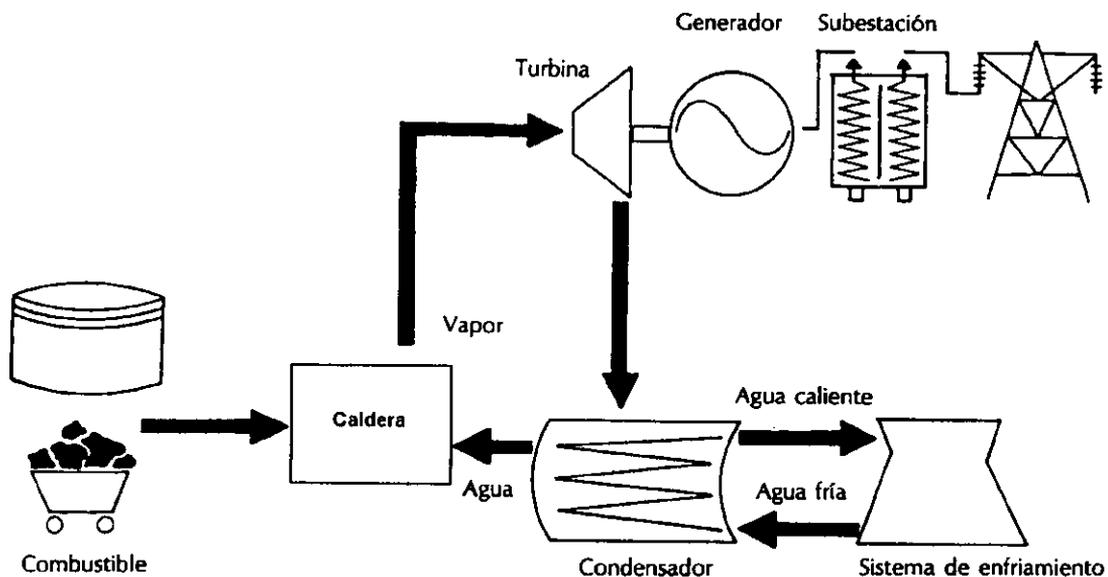
Estado Actual

A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía 28 centrales en operación, con un total de 93 unidades, generando aproximadamente 14,323.875 MW, lo que corresponde al 39.55% de la capacidad total instalada.

1.2.1.2 Dual

Esta clase de central utiliza como fuente energética primaria dos combustibles: combustóleo o carbón, lo que le da la particularidad de ser "dual". Actualmente, en México, funciona con combustóleo, aunque ya se está montando la infraestructura necesaria para que trabaje también con carbón mineral con bajo contenido de azufre.

Siguiendo el diagrama, el generador de vapor transforma el poder calorífico del combustible en energía térmica, la cual es aprovechada para llevar el agua a la fase de vapor. El vapor, ya sobrecalentado, se conduce a la turbina, donde su energía cinética se convierte en mecánica, la cual se transmite al generador para producir energía eléctrica.



Estado Actual

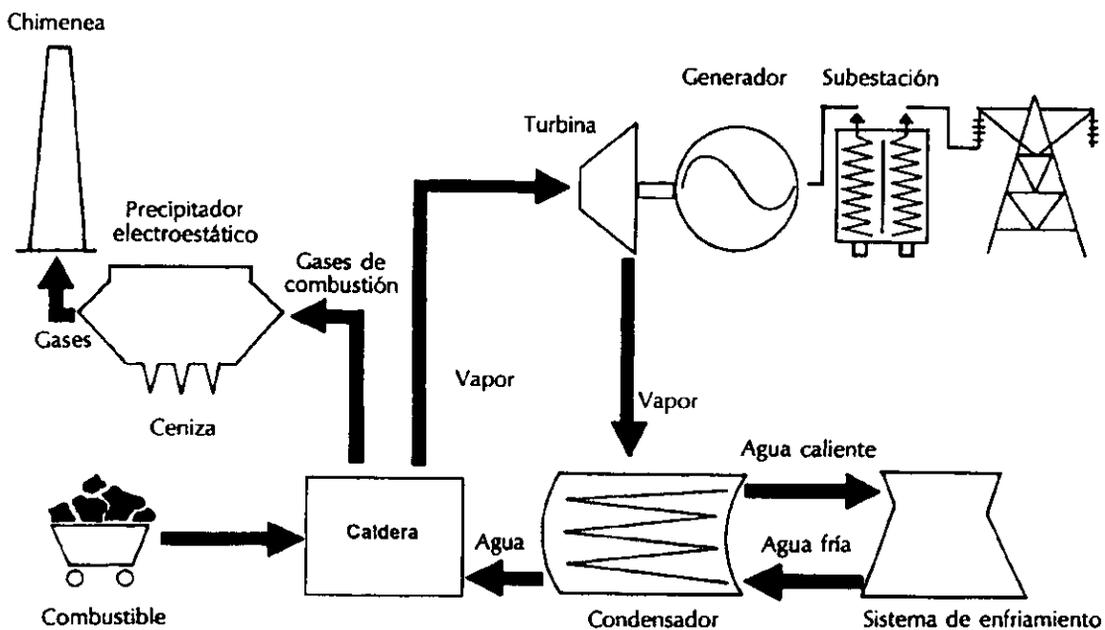
A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía en operación la central de Petacalco, con un total de 6 unidades, generando aproximadamente 2,100 MW lo que corresponde al 5.8% de la capacidad total instalada.

1.2.1.3 Carboeléctrica

Como su propio nombre lo dice, usa carbón de bajo contenido de azufre como energético primario. En la práctica, el carbón y sus residuos de combustión, requieren de una alta tecnología para su buen manejo y de instalaciones especiales para abatir la contaminación.

En el caso de una central térmica de carbón, el combustible se reduce primero a un polvo fino y se bombea después dentro del horno por medio de unos chorros de aire precalentado.

Este esquema es aplicable a centrales que utilizan carbón con bajo contenido de azufre, como las que se localizan en México en la vecindad de Río Escondido, Coahuila.



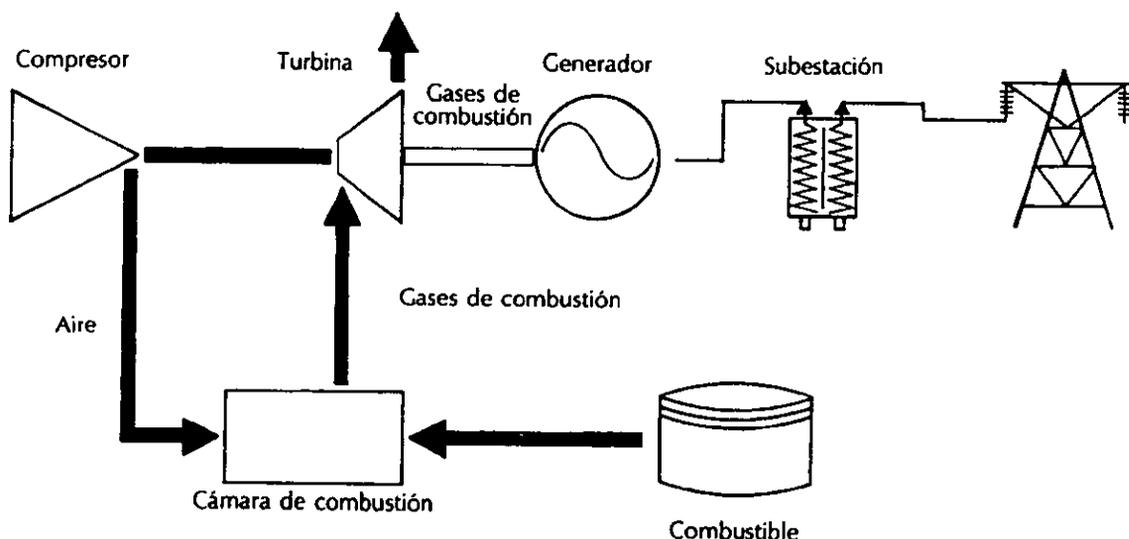
Estado Actual

A diciembre del año 2000, C.F.E tenía 2 centrales en operación, con un total de 8 unidades, generando aproximadamente 2,600 MW, lo que corresponde al 7.18% de la capacidad total instalada.

1.2.1.4 Turbo Gas

La generación en este tipo de central, se logra aprovechando directamente en los álabes de la turbina, la energía cinética que resulta de la expansión de aire y los gases de la combustión, comprimidos y a altas temperaturas. La turbina está acoplada al rotor del generador dando lugar a la producción de energía, como se muestra en el esquema: los gases de la combustión, después de trabajar en la turbina, se descargan directamente a la atmósfera.

Esta central emplea gas natural o diesel, y en los modelos avanzados pueden quemar también combustóleo o petróleo crudo mediante una maquina preparada para ello; el cambio de combustibles se puede realizar en forma automática en cualquier momento. El breve tiempo que requiere para arrancar y para tomar carga, hace ventajosa su operación en horas de alto consumo.

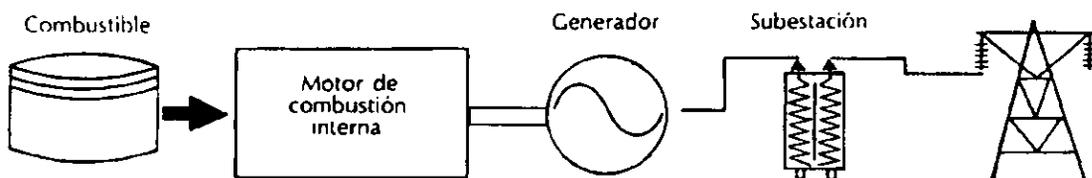


Estado Actual.

A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía 34 centrales en operación, con un total de 79 unidades, generando aproximadamente 2,338.58 MW, lo que corresponde al 6.46% de la capacidad total instalada.

1.2.1.5 Combustión Interna

En estas plantas se utiliza el principio de los motores de combustión interna, en donde se aprovecha la expansión de los gases de combustión para obtener la energía mecánica, que es transformada en energía eléctrica en el generador, de acuerdo como se muestra en el esquema siguiente:



Este tipo de plantas consumen una mezcla de combustóleo y diesel, de acuerdo con la información de los fabricantes de los equipos y dependiendo de la calidad del combustóleo.

Estado Actual

A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía 8 centrales en operación, con un total de 46 unidades, generando aproximadamente 134.604 MW, lo que corresponde al 0.37% de la capacidad total instalada.

1.2.1.6 Ciclo Combinado

El ciclo combinado utiliza de manera óptima la energía del combustible, esto se logra con la combinación de dos ciclos de producción de energía eléctrica que operan con una turbina de gas (ciclo Brayton), así como una turbina de vapor (ciclo Rankine). Este tipo de central tiene la característica de energía con un alto rendimiento, además tiene dos ventajas, una construcción rápida y menor costo.

Las unidades generadoras tienen menor capacidad que las termoeléctricas convencionales, pero pueden confrontar las variaciones bruscas de la demanda, es decir, unidades que operen durante periodos cortos, de rápido arranque, cuyo costo y tiempo de instalación son menores.

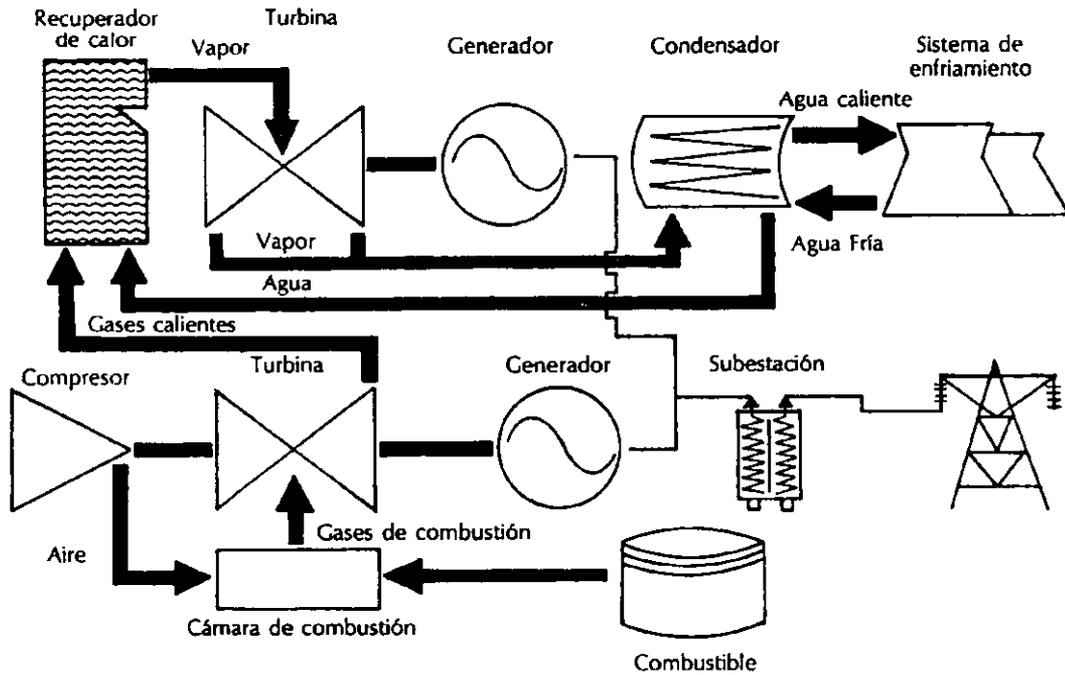
Como la turbina de gas trabaja con un gran exceso de aire, del orden del 400 al 500%, se propicia así el quemado de más combustible, para obtener una mayor cantidad de energía calorífica aprovechable en los gases. Este hecho hace más viable el ciclo combinado de gas y vapor. Los gases de escape de la turbina de gas, con o sin quemado de combustible adicional, sirven de fuente caliente para el ciclo de vapor.

En el recuperador o fuente caliente del ciclo de vapor, los gases ceden energía calorífica al ciclo de vapor. El recuperador puede ser un simple intercambiador de calor de los gases con el agua, sin calor adicional, ó bien tener un quemador de combustible adicional, que con el exceso de aire que traen los gases, o inyectando aire secundario, se aumenta el calor disponible, se eleva la temperatura y se mejora el rendimiento de este. La forma simple de operación señalada se denomina de alimentación directa. El combustible empleado en el combustor de la turbina de gas y en el recuperador puede ser de la misma naturaleza (gaseoso o líquido ligero), o puede usarse en el recuperador carbón pulverizado aproximadamente entre el 70 y 80 %.

La temperatura de los gases expulsados por la turbina de gas es del orden de 400 a 500° C. Este nivel de temperatura prefijado determinará el quemado o no del combustible adicional en el recuperador, de acuerdo a la temperatura de trabajo que se imponga a la turbina de vapor, en algunos casos una temperatura adecuada es de 450 a 500 centígrados, en otros casos se exige llegar a 540° C.

Estas temperaturas vienen condicionadas por la forma de compartir la potencia entre los dos ciclos de gas y de vapor. Como también debe de estar definida la temperatura alta del ciclo de la turbina de gas, que puede ser del orden de los 1000° C o

más, e igualmente la presión de descarga en el condensador de la turbina de vapor, del orden de 0.05 bar.



Al combinar ambos ciclos se mejora notablemente la eficiencia de cada uno de los ciclos.

Estado Actual

A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía 7 centrales en operación, con un total de 33 unidades, generando aproximadamente 2,873.02 MW lo que corresponde al 7.93% de la capacidad total instalada.

1.2.2 Geotermoeléctrica

Estas centrales utilizan la energía térmica producida directamente en el subsuelo terrestre. La energía geotérmica se presenta en forma de gases de alta temperatura (fumarolas), en forma de vapor y agua hirviendo (geiser) y en forma de agua caliente (fuentes termales). La temperatura de estos fluidos puede estar entre 32 y 360° C. Para poder generar electricidad se requieren temperaturas superiores a 150° C.

El vapor utilizado para mover los generadores se obtiene por medio de pozos profundos los cuales llegan a tener profundidades de 4200 m. Los pozos producen una mezcla de vapor y agua a una temperatura de 300° C aproximadamente.

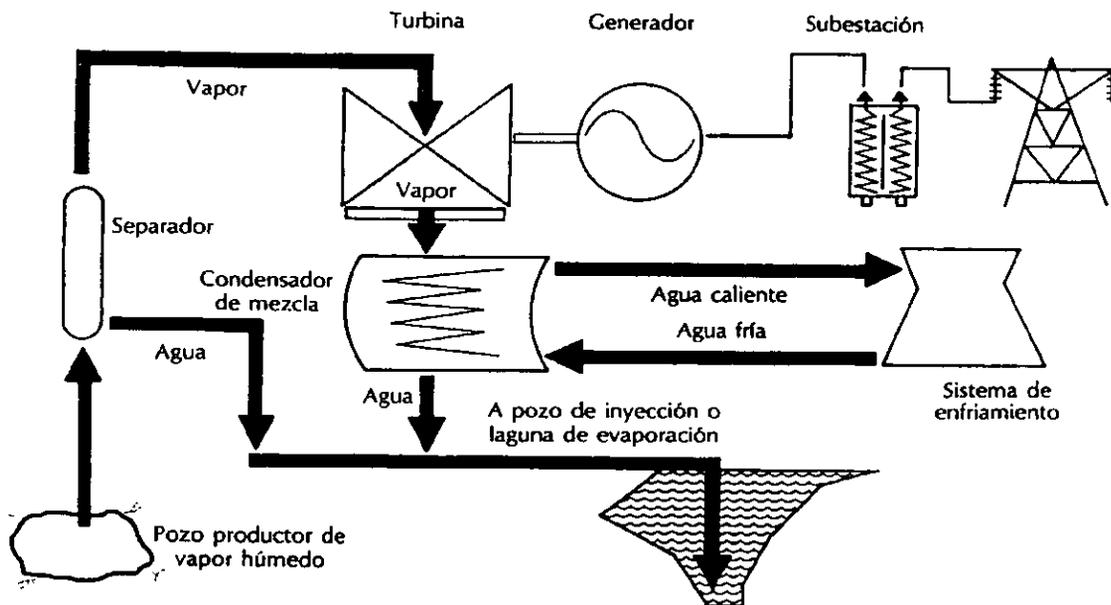
El agua es separada del vapor por medio de separadores ciclónicos instalados al pie del pozo, el agua separada es enviada y descargada a una laguna de evaporación, el vapor es enviado a la central llegando a unos colectores o cabezales de distribución desde donde es inyectado a las turbinas.

Existen unidades de 5 MW en las que el vapor, una vez que ha trabajado en la turbina, se libera directamente a la atmósfera. En las unidades de 20 a 110 MW, el vapor se envía a un sistema de condensación; el agua condensada, junto con la que proviene del separador, se reinyecta al subsuelo, o bien, es enviada a una laguna de evaporación.

Son pocas las zonas geográficas, en las que se pueden construir centrales de estas características. En México, el aprovechamiento de energía geotérmica encuentra su mejor manifestación en la central de Cerro Prieto (I, II y III) en las cercanías de Mexicali B.C. con una capacidad de 620 MW.

Estado Actual

A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía 5 centrales en operación, con un total de 28 unidades, generando aproximadamente 752.9 MW, lo que corresponde al 2.08% de la capacidad total instalada.



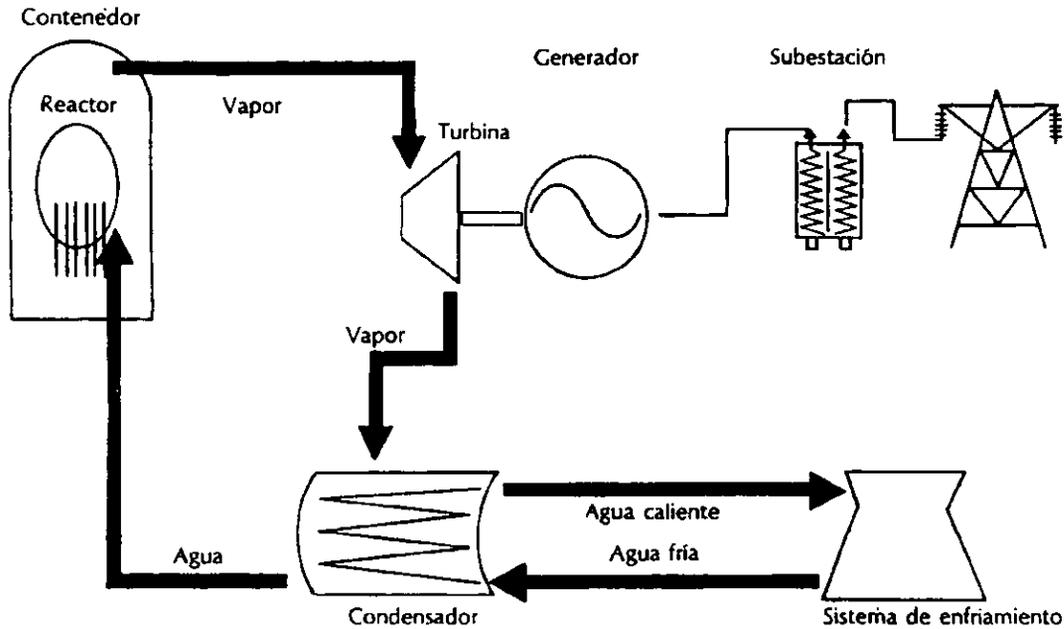
1.2.3 Nucleoeléctrica

Este tipo de centrales son prácticamente centrales térmicas en las que los combustibles y la caldera donde se efectúa la combustión de los mismos han sido sustituidos, respectivamente, por un combustible nuclear (uranio), y un reactor nuclear, en el cual se lleva a efecto el fenómeno de la fisión del combustible, que podemos resumir como la rotura en cadena de los núcleos de los átomos del uranio, lo que debido a la gran cantidad de energía liberada, da origen al calor necesario para la posterior obtención del vapor de agua.

Se conocen tres combustibles nucleares fisionables, uranio 235, plutonio 239 y uranio 233.

Este tipo de centrales utiliza como máquinas motrices turbinas de vapor como las utilizadas en las centrales térmicas ya mencionadas.

Su ubicación, esta condicionada a zonas en las que se pueda disponer de caudales de agua de valor determinado y constante, necesarios para la continua refrigeración que han de estar sometidos el reactor y sistemas de la instalación.



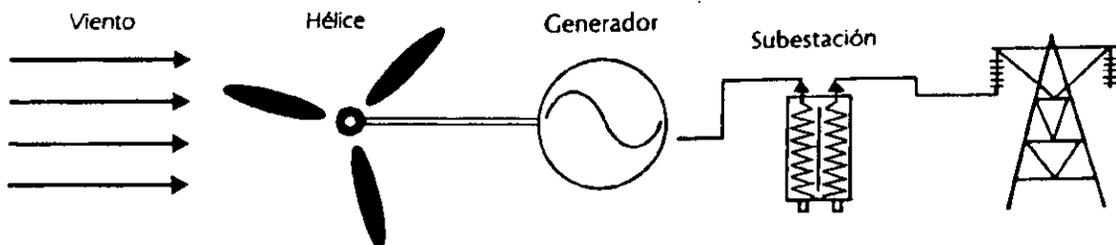
Estado Actual

A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía una central en operación, con un total de 2 unidades, generando aproximadamente 1,350 MW lo que corresponde al 3.73% de la capacidad total instalada.

1.3 Eoloeléctrica

Las plantas eoloeléctricas aprovechan el viento para generar electricidad. El perfeccionamiento del tradicional molino de viento ha dado lugar a modernos aeromotores que aprovechan la energía eólica para generar electricidad. Estos aeromotores pueden instalarse aislados o bien en agrupaciones que aportan energía a las redes de distribución. Sin embargo, el viento tiene dos características que lo diferencia de otras fuentes energéticas: su imprevisible variabilidad y su dispersión. Esto obliga a constantes perfeccionamientos en el diseño de las aspas y el sistema de control que regula las revoluciones por minuto, para evitar velocidades, excesivas y orientar el rotor hacia la posición mas favorable.

Al producir electricidad con aerogeneradores, naturalmente se desplaza el uso de combustibles fósiles como es el caso de las centrales eolieléctricas construidas en México por la CFE: La Venta, ubicada en el poblado del mismo nombre, en Oaxaca, con una capacidad de 1.580 MW; y la recién construida Guerrero Negro, en Mulegé, Baja California Sur, que tiene una capacidad instalada de 0.600 MW.



Se estima que el potencial del Istmo de Tehuantepec es suficiente para instalar 2000 MW de capacidad eolieléctrica, que reflejarían un ahorro o reemplazo de combustibles fósiles de 18 millones de barriles por año.

Estado Actual

A diciembre del año 2000, C.F.E. tenía 2 centrales en operación, con un total de 8 unidades, produciendo aproximadamente 2.175 MW, lo que corresponde al 0.006% de la capacidad total instalada.

Al final del capítulo se presentan algunas estadísticas relevantes referentes a la generación de energía eléctrica en el país.

1.4 Recursos energéticos y generación de energía eléctrica en México.

México dispone de una amplia variedad de recursos energéticos, pero lamentablemente los más importantes son no renovables. A continuación se describen algunos de los recursos disponibles para la generación de energía eléctrica.

1.4.1 Hidrocarburos

Según las estadísticas de 1998, las reservas probadas de hidrocarburos ascendían a 40,379 millones de barriles de petróleo crudo equivalente. La producción de hidrocarburos durante el mismo año ascendió a 1,548 millones de barriles. La producción diaria de gas natural fue de 4,790 millones de pies cúbicos. Cabe hacer notar que para la generación de energía eléctrica, en 1998 se usaron 22'181,410 metros cúbicos de combustóleo y diesel, además de 6'989,280 metros cúbicos de gas. A partir de estos combustibles se produjo el 60 % del total de electricidad generada en el país.

1.4.2 Energía hidráulica

Aun cuando a principios de la década de los 80's se suponía que el potencial hidráulico del país ascendía a 172 TWh, estudios realizados a principios de 1990 revelaron que el potencial aprovechable es de apenas 80 TWh, de los cuales ya se utilizan prácticamente 26 TWh. En 1998 la capacidad total instalada en centrales hidroeléctricas era de 9,700 MW.

1.4.3 Energía geotérmica

La reserva probada es de 1.26 GW y la probable de 4.2 GW, repartidos en poco más de 15 sitios.

En 1998 había en operación centrales geotérmicas con capacidad para producir 750 MW, las cuales aportan aproximadamente 5.7 TWh.

1.4.4 Carbón térmico

En general, México tiene poco carbón térmico, que sirve para producir calor pero no es coquizable y se aprovecha para la producción de energía eléctrica. La reserva probada es de 75 millones de toneladas y la posible asciende a 650 millones.

En 1998 la capacidad instalada en centrales carboeléctricas era de 2,600 MW, produciendo 18 TWh.

1.4.5 Uranio

Las reservas probadas de uranio en México son de 14 600 toneladas, de las cuales 10,600 son económicamente explotables. Estas reservas aseguran el combustible necesario para abastecer los dos reactores de Laguna Verde durante toda su vida, con un excedente del 30%.

1.5 El desarrollo del sector eléctrico

Debido a que la demanda de energía eléctrica a crecido 5.1% en promedio de 1990 a 1999, la C.F.E. tiene en ejecución un amplio programa de construcción de centrales de generación y obras de transmisión y transformación.

Además tiene un programa de proyectos en licitación y por licitar, que garantizan el abasto de energía eléctrica hasta el año 2004.

Calendario de entrada en operación de proyectos			
Año	Número de proyectos	Capacidad (MW)	Inversión (mUSD*)
2001	10	3,146.9	2,021
2002	6	1,542	871.3
2003	7	3,343.4	2,383
2004	5	2,730	1,243.8
Total	28	10,762.3	6,519.1

* millones de dólares estadounidenses. Las cifras estimadas de inversión se refieren al costo total para cada proyecto de inversión financiada. Paridad 2000: 10.44 \$/USD.

Programa en ejecución para Generación			
En construcción	Adjudicados y/o en cierre financiero	En licitación	A licitar
CCC Chihuahua 435 MW CCC Hermosillo 250 MW ² CCC Río Bravo 495 MW ² CCC Rosarito III, 8 y 9 541 MW CCC Saltillo 248 MW CG Tres Vírgenes 10 MW CD Puerto San Carlos II 39 MW ² CCC Bajío (El Sauz) 495 MW ² CCC Monterrey III 489 MW CCC Tuxpan II 495 MW CCC Altamira II 495 MW CT Valle de México, Repot. 249 MW ¹² CCC Campeche 252 MW 2ª etapa CH Ing. M. Moreno Torres (Chicoasen) 930 MW ² CCC Naco Nogales 258 MW CG Los Azufres II y campo geotérmico 100 MW ²	CCC Rosarito IV 489 MW CCC Tuxpan III y IV 983 MW ² CCC Altamira III y IV 1036 MW ²	CCC Chihuahua III 225 MW ² CCC La Laguna II 450 MW ² CCC Río Bravo III 450 MW ²	TG El Sauz) 150 MW ^{1,2,3} TG El Encino 150 MW ^{1,2,3} CCC El Sauz conv. TG a CC 139 MW ² CCC Altamira V 450 MW ² CCC Tamazunchale (Altamira VI) 450 MW ² CD Guerrero Negro 9 MW
Total: 16 proyectos 5,781 MW 3,285.6 musd*	3 proyectos 2,508 MW 1,679 musd*	3 proyectos 1,125 MW 763.3 musd*	6 proyectos 1,348 MW 790.7 musd*

*Las cifras estimadas de inversión se refieren al costo total de los proyectos. Paridad 2000: 10.44 \$/usd

¹ Con recursos presupuestales

² El programa de contingencia define como importante la fecha de entrada en operación de este proyecto

³ Corresponde a turbogas a adquirir dentro el programa de contingencia

SISTEMA ELECTRICO NACIONAL

Capacidad efectiva (MW)

	HIDRO ELECTRICA	TERMOELECTRICAS								EOLIO ELECTRICA	TOTAL
		VAPOR	CICLO COMBINADO	TURBOGAS	COMBUSTION INTERNA	GEOTERMO ELECTRICA	DUAL	CARBO ELECTRICA	NUCLEO ELECTRICA		
SISTEMA ELECTRICO NACIONAL	10,018.149	14,697.875	2,873.02	2,709.58	134.612	752.9	2,100	2,600	1,350	2.175	37,238.311
GCIA. REGIONALES DE OPERACION	9,745.149	14,473.875	2,873.02	2,338.58	134.612	752.9	2,100	2,600	1,350	2.175	36,370.311
GERENCIA REGIONAL NOROESTE	936.85	2,905.5		702.88	96.83	620				0.6	5,262.66
SRG NOROESTE	936.85										
S.R.G. BAJA CALIFORNIA		739.5		446.88	95.68	620				0.6	
S.R.G. NORPACIFICO		2,166		256	1.15						
GERENCIA REGIONAL NORTE	125.5	2,169	1,307.66	834.6	1.218			2,600			7,037.978
S.R.G. CENTRO NORTE	28	1,092	930	305.9	1.218						
S.R.G. NORESTE	97.5	1,077	377.66	528.7				2,600			
GERENCIA REGIONAL OCCIDENTE	2,809.584	2,600		26	1.18	97.9	2,100				7,634.664
S.R.G. BALSAS SANTIAGO	2,809.584										
S.R.G. OCCIDENTE		2,600		26	1.18	97.9	2,100				

SISTEMA ELECTRICO NACIONAL

Capacidad efectiva (MW)
(continuación)

	HIDRO ELECTRICA	TERMOELECTRICAS								EOLIO ELECTRICA	TOTAL
		VAPOR	CICLO COMBINADO	TURBOGAS	COMBUSTION INTERNA	GEOTERMO ELECTRICA	DUAL	CARBO ELECTRICA	NUCLEO ELECTRICA		
GCIAS. REGIONALES DE OPERACION	1,268.325	3,224.375	865.36	193.5							5,551.56
SR.G. KTA PANTONGO	1,268.325										
SR.G. CENTRAL		3,224.375	865.36	193.5							
GERENCIA REGIONAL SURESTE	4,604.89	3,575	700	450	0.77	35				1.575	9,367.235
SR.G. GOLFO	673.93										
SR.G. GRUALVA	3,930.96									1.575	
SR.G. SURESTE		3,133	480			35					
SR.G. PENINSULAR		442	220	450	0.77						
GERENCIA LAGUNA VERDE									1,350		1,350
PLANTAS MOVILES				131.6	34.614						166.214
LUZ Y FUERZA DEL CENTRO	273	224		371							868

Gerencias regionales de producción = C.F.E. (incluye plantas móviles).
Generación.

Plantas móviles: Su localización depende de las necesidades de servicio.

S.R.G.: Subgerencias Regionales de Generación.

Fuente de información: Subdirección de

Reporte de operación 1999 - 2000

CAPITULO 2

IMPACTOS AMBIENTALES ASOCIADOS A LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA

Las sociedades modernas enfrentan diversos problemas ambientales entre los que figuran la contaminación del aire, la acidificación de suelos, el deterioro de mares y costas, la lluvia ácida y el cambio climático, todos ellos, fenómenos relacionados en mayor o menor medida con las prácticas convencionales de producción y consumo de energía.

Si bien la energía eléctrica es una de las formas de energía más limpias de que se puede disponer, dentro del proceso de su generación, en las etapas de construcción, operación y distribución, se producen diversos impactos ambientales, los cuales se manifiestan fundamentalmente en afectaciones al medio.

La generación de energía eléctrica mediante la combustión de derivados del petróleo y gas natural, produce contaminantes en cantidades que dependen principalmente del combustible. De acuerdo a lo expuesto en el capítulo anterior, se puede observar que las plantas generadoras a partir de combustibles fósiles tienen una aportación importante para abastecer de energía eléctrica al país. Además la tendencia principal para los próximos años es la construcción de centrales térmicas de ciclo combinado.

Conviene entonces analizar los efectos principales que, en su conjunto, implican las centrales generadoras de energía eléctrica para el ambiente.

2.1 Emisiones de las centrales termoeléctricas.

2.1.1 Emisiones atmosféricas.

La contaminación atmosférica producidas por centrales termoeléctricas que queman combustibles fósiles es provocada principalmente por la emisión de:

Oxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido y monóxido de carbono (CO_2 y CO respectivamente) y partículas suspendidas.

De estos el que representa el mayor problema en el país es el dióxido de azufre (SO_2), debido al alto contenido de azufre de los combustóleos mexicanos.

De acuerdo a un análisis de impacto ambiental según datos obtenidos de la Subgerencia de Evaluación de Emisiones, Gerencia de Protección Ambiental de la C.F.E. y la composición de la generación eléctrica con respecto a los energéticos primarios con base en datos del balance nacional de energía de 1995. Se estimaron las emisiones contaminantes por tipo de energético primario:

Toneladas por GWh

	SO_x	NO_x	CO_2	CO	Partículas susp.	hidrocarburos
Gas natural	0.00285	1.96	0	0,19	0.00475	0.0083
Combustóleo	15.7	2.03	669	0,138	1.073	0.288
Diesel	15.7	2.03	669	0,138	1.073	0.288
Carbón	8.62	4.9	1,541.5	0,125	26.3	0.03

En las centrales geotermoeléctricas, gases incondensables y partículas acompañan al vapor geotérmico que se envía a la atmósfera durante la operación de la planta. Los contaminantes más comunes son el dióxido de carbono (del 75 al 95% de los gases incondensables), además de emisiones de ácido sulfhídrico; amoniaco, metano y nitrógeno se encuentran en menor cantidad y gases tales como el radón, vapores de mercurio y argón están presentes en trazas.

En las centrales nucleoeeléctricas los componentes transportados por el aire son los gases nobles producto de la fisión, los yodos radiactivos, el tritio y las partículas resultantes del decaimiento de los gases nobles producto de la fisión. En la tabla siguiente se muestran los gases nobles liberados en reactores de agua ligera tipo BWR.

GASES NOBLES DESCARGADOS EN EMANACIONES GASEOSAS

Gas noble	Vida media	Ci ⁽¹⁾ / GW año en BWR's ⁽²⁾
Xe ¹³³	5.27 días (d)	2 * 10 ⁵
Xe ¹³⁵	9.2 horas (h)	3.6 * 10 ⁵
Xe ¹³⁸	14.2 minutos (m)	1.9 * 10 ⁵
Kr ⁸⁵	10.57 años (a)	3 * 10 ⁴
Kr ⁸⁸	2.79 h	2 * 10 ⁵
Kr ⁸⁷	76 m	1.7 * 10 ⁵
Kr ⁸³	1.86 h	1 * 10 ⁵
Xe ¹³¹	11.96 d	-
Ar ⁴¹	1.86 h	-
Xe ¹³⁷	3.82 m	1 * 10 ⁴

Notas:

- (1) Ci (Curie): unidad de radiactividad. Un Curie equivale a 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo. Un Curie es del índice de desintegración de un gramo de radio.
- (2) BWR: siglas en inglés para *Reactor de Agua Hirviente*

2.1.2 Emisiones térmicas asociadas al sistema de enfriamiento.

La contaminación térmica se presenta en las zonas costeras, originada por las descargas de agua de los sistemas de enfriamiento, al cual se calienta la condensar el vapor de escape de las turbinas. Generalmente el rango de calentamiento, con respecto a la temperatura original de la masa de agua utilizada es de 5 a 10° C.

En cualquier central termoeléctrica cerca de dos terceras partes del calor producido es liberado al ambiente.

2.1.3 Emisiones de aguas residuales.

Las aguas residuales de las centrales se originan de las purgas de las torres de enfriamiento, los flujos de las plantas de tratamiento de agua de repuesto de las calderas, aguas de lavado de equipo y servicios generales, los cuales debido a su

contenido salino, acidez o alcalinidad, contenido de grasas, etc., pueden ocasionar problemas de contaminación a los cuerpos receptores de agua en los que se descargan.

En las centrales geotérmicas las emisiones de agua presentan las siguientes concentraciones de elementos :

CONSTITUYENTES QUIMICOS EN AGUA SEPARADA (ppm)

	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	B	As	HCO ₃	Ca ⁺⁺
Los Azufres	1,047	1,670	379	2,875	240	22	76	16
Cerro Prieto	1,202	10,761	3,065	20,133	≈ 1	trazas	103	431
Los Humeros	656	584	57	373	225	trazas	903	5

Las emisiones provenientes de centrales nucleoelectricas contienen varios radionúclidos^(*), las aguas se tratan en el sistema de tratamiento de desechos líquidos mediante filtros de resina de intercambio iónico, la radioactividad residual que sale después del tratamiento se descarga mezclada con la corriente del agua de enfriamiento al medio acuático.

(*)un núclido radiactivo, el producto de la fisión en el núcleo del reactor

RADIONUCLIDOS DESCARGADOS EN EMANACIONES LIQUIDAS

Núclido	Vida media	Ci / GW año en BWR's
I ¹³¹	8 días (d)	3.6
Cs ¹³⁷	30.3 años (a)	25
I ¹³³	20.5 horas (h)	0.15
Cs ¹³⁴	2.1 a	17.3
Co ⁶⁰	5.2 a	6.1
Cr ⁵¹	27.7 d	0.58
Mn ⁵⁴	313 d	1.9
Ce ¹⁴⁴	290 d	0.34
Ru ¹⁰³	41 d	-
Ag ¹¹⁰	270 d	0.006
Sr ⁸⁹	51 d	0.8
I ¹³²	2.4 h	-
Fe ⁵⁹	45 d	0.046
Nb ⁹⁵	35 d	-
Zr ⁹⁵	63 d	0.012
Mo ⁹⁹	68 h	0.160
Sr ⁹⁰	28 a	0.098
Zn ⁶⁵	244 d	0.23
Ce ¹⁴¹	32.8 d	0.009

2.1.4 Desechos sólidos de las centrales nucleares

Los residuos sólidos son materiales que sufrieron contaminación radiactiva durante los trabajos normales de operación o mantenimiento, tales como herramientas, ropa, equipos de trabajo y principalmente los ensambles de combustible que fueron extraídos del reactor por haberse terminado su vida útil. Los primeros, por lo general son de baja intensidad y de corta o mediana vida media, mientras que los últimos contienen una gran diversidad de isótopos radiactivos de elevada intensidad, que pueden ser de corta, mediana o larga vida media. Estos desechos pueden ser dispuestos en depósitos subterráneos después de un determinado tiempo o bien, ser reprocesados para su posterior utilización.

2.2 Las centrales hidroeléctricas

Los proyectos hidroeléctricos, son considerados fuentes de energía excelentes debido a que tienen una vida operativa larga, bajos costos de mantenimiento y no dependen de combustibles costosos.

Sin embargo las plantas requieren de un sitio adecuado, con altura y/o corriente apropiados para disponer de la presión o flujo necesarios. Esto se logra con terrenos montañosos, con presas o con ríos muy caudalosos. En caso de requerir presas es necesario inundar valles y almacenar agua, formando lagos artificiales, los cuales pueden dar lugar a impactos ambientales significativos.

2.3 Efectos en el ambiente

Entre los principales impactos al ambiente se encuentran los siguientes:

2.3.1 Efecto invernadero

El metano y el dióxido de carbono (CH_4 y CO_2), liberados por la combustión de hidrocarburos, son gases que se encuentran de manera natural en la capa más baja de la atmósfera, conocida como troposfera, y junto con el ozono, el vapor de agua, el óxido

nitroso y los clorofluorocarbonos (CFC), absorben y retienen parte de la radiación infrarroja proveniente del sol a manera de invernadero, permitiendo que la temperatura del planeta sea apta para la vida. Sin su existencia, se estima que la temperatura de la Tierra sería de -13°C .

Podemos notar que el llamado "efecto invernadero" es un fenómeno benéfico e imprescindible para la vida, pero lo que hoy alarma a los científicos es su modificación sustancial. Las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono pueden llevar a un cambio en el clima al aumentar la capacidad de la atmósfera para absorber radiación infrarroja y romperse el equilibrio entre la energía que entra y la que sale de la atmósfera.

De acuerdo al último reporte del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), dado a conocer en febrero de 2001, este efecto invernadero artificial podría ocasionar un aumento en las temperaturas mundiales de entre 1.4 a 5.8°C durante el presente siglo.

De materializarse estas proyecciones, las consecuencias serán devastadoras: se prevé el deshielo de los polos glaciares, los cuales ya disminuyeron en un 40%, y, como consecuencia, un aumento en el nivel del mar de entre 11 y 88 centímetros que afectaría a muchas zonas costeras de bajo nivel, así como la biodiversidad existente en la región.

La diversidad biológica se verá afectada a medida que las zonas climáticas se vayan desplazando hacia los polos y disminuya la superficie de bosques tropicales y boreales septentrionales. Además, los bosques y desiertos, así como otros ecosistemas se pueden hacer más húmedos, más secos, más calurosos o más fríos, lo que afectará a muchas especies y ocasionará perturbaciones a gran escala en la agricultura, la pesca y las explotaciones forestales.

También se esperan cambios en la regularidad e intensidad de las lluvias como consecuencia de un fenómeno conocido como ciclo hidrológico intensificado, que consiste en el aceleramiento de los patrones de evaporación y precipitación del agua como resultado del exceso de este líquido proveniente del deshielo de los polos y el aumento en el nivel del mar y mayores temperaturas; es decir, habrá más agua que se evaporará y condensará más rápido.

2.3.2 Lluvia ácida

La sedimentación ácida o lluvia ácida, es causada por emisiones de bióxido de azufre (SO₂) y de óxidos de nitrógeno (NO_x). Aunque existen fuentes naturales de estos gases, más de 90 por ciento del azufre y 95 por ciento de nitrógeno lanzados a la atmósfera son de origen humano. Una vez que se liberan en la atmósfera, pueden convertirse químicamente en contaminantes secundarios como el ácido nítrico y el ácido sulfúrico, los cuales se disuelven fácilmente en el agua. Las gotas de agua ácida resultantes pueden ser transportadas a grandes distancias por los vientos, y regresan a la Tierra como lluvia ácida, nieve o niebla.

Como consecuencia del arrastre de diversas sustancias, componentes naturales del aire, partículas sólidas, y debido fundamentalmente a la disolución del dióxido de carbono en el agua de lluvia, ésta tiene una ligera acidez que oscila entre valores de 5 a 7 unidades de pH.

Se ha medido el grado de acidez del agua de lluvia en zonas donde existía una elevada concentración de ciertos contaminantes y se ha visto que su pH es mucho más bajo de lo normal, de hecho algunas lluvias llegan a tener pH del orden de 4 a 3, lo que indica un grado de acidez muy alto, esto es lo que conocemos con el nombre de "lluvia ácida", denominación con la que se designa cualquier agua de lluvia de pH inferior al natural de 5.5.

La sedimentación ácida puede incrementar los niveles de metales tóxicos tales como aluminio, cobre y mercurio depositados en los abastecimientos no tratados de agua potable.

Para un ecosistema marino, si el número de ejemplares de una especie o de un grupo de especies cambia en respuesta a la acidificación, el ecosistema de todo el cuerpo de agua puede resultar afectado por la relación presa - depredador de la red de alimentación. Según aumenta la acidez, más y más especies de plantas y animales declinan o desaparecen.

Tanto la vegetación natural como las cosechas pueden resultar afectadas de las siguientes maneras:

- Al alterar la capa cerosa protectora de las hojas, lo que baja la resistencia a la enfermedad.
- Al inhibir la germinación de la planta y su reproducción.
- Acelerando la descomposición del suelo y la remoción de los nutrientes.

2.3.3 Los suelos y la geotermia

La estabilidad de los suelos y las formaciones geológicas del subsuelo pueden ser afectadas de diferentes maneras por la geotermia. Entre las más significativas potencialmente adversas se tienen las siguientes:

- La erosión del suelo
- El hundimiento del suelo
- La inducción de actividad sísmica

Parte de estos problemas pueden ser resueltos por la reinyección del agua separada. Para ello es necesario investigar sobre la naturaleza del subsuelo y del agua de reinyección , ya que es posible en algunos casos producir taponamiento del yacimiento o su enfriamiento.

2.3.4 Radiaciones

El hombre se ve expuesto a las radiaciones emitidas por el sol, cosmos y elementos radiactivos presentes en estado natural en el suelo. Tanto el suelo como el agua o los alimentos que se consumen así como el aire que se respira también contienen materiales radiactivos naturales. Además de estas fuentes naturales, existen radiaciones artificiales.

Lo que caracteriza a las reacciones nucleares es su capacidad para arrancar uno o más electrones a los átomos en el momento en que penetran en la materia. Estos átomos sin sus electrones se convierten en partículas inestables cargadas eléctricamente que se denominan iones. Es por esto que los científicos denominan radiaciones ionizantes a las radiaciones nucleares. La radiación de emisiones ionizantes se efectúa durante un proceso denominado desintegración radiactiva. Durante dicho proceso un átomo radiactivo que está en un estado de excitación inestable pasa a un estado más estable al liberar su exceso de energía en forma de radiaciones ionizantes.

Se distinguen tres tipos de radiaciones ionizantes asociadas a la emisión radiactiva.

El primer tipo son las radiaciones α que son emitidas por la desintegración de ciertos elementos radiactivos naturales como el uranio y el radio. Existen partículas cargadas positivamente que se desplazan a gran velocidad. Debido a su gran dimensión las partículas α tiene un poder de penetración débil, basta una hoja de papel para detenerlas, no obstante lo alteran todo a su paso y pueden causar daño en el cuerpo si se introducen por las vías respiratorias o digestivas.

El segundo tipo de radiación son las llamadas radiación de las partícula β , son electrones que son arrancados de un núcleo de un átomo inestable. Al ser más pequeñas que las partículas α , las partículas β pueden penetrar uno o dos centímetros en tejidos vivos pero perturban menos las células que las partículas α . Una lámina de aluminio de un milímetro de espesor logra inmobilizarla.

Los rayos γ forman el tercer tipo de emisión radiactiva. Tienen el poder de atravesar el cuerpo humano. Pueden ser frenados por materiales densos como el cemento y el plomo.

Cuando las radiaciones ionizantes penetran en una célula viva pueden destruir las moléculas con las que entran en colisión, por ejemplo, pueden penetrar en una molécula de agua y descomponerla en iones hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-). Si dos iones hidroxilo se encuentran se unen para dar peróxido de hidrógeno que es una molécula nociva para las células.

El pH puede romper un eslabón de la cadena de ADN. El ADN es preciso porque encierra todas las instrucciones necesarias para el funcionamiento de una célula. Las radiaciones ionizantes pueden golpear de lleno la cadena de ADN y dañarla. La célula está provista de mecanismos que reparan las roturas provocadas por las radiaciones

ionizantes. La reacción es a veces incorrecta y el ADN sufre un cambio permanente o mutación. Este cambio puede no tener importancia pero en algunas situaciones puede darse en un lugar crítico. Por ejemplo, puede producirse en la proximidad de un sitio implicado en el control de crecimiento de una célula. Si la zona circundante lo predispone, la célula empieza a dividirse sin control, de forma anárquica; es lo que se denomina metástasis. Ello dará lugar a un tumor canceroso.

Los efectos de las radiaciones sólo se expresan como probabilidad. Se dice que los riesgos que se producen aumentan en función de la dosis de radiación recibida.

2.3.5 Creación de presas

Los problemas ecológicos relacionados con la construcción de presas se deben principalmente a la modificación del medio que se produce al alterar el curso de un río, provocando con ello la inundación de una superficie determinada, incluyendo asentamientos humanos.

Lo anterior puede provocar:

- Disminución o desaparición de las tierras de cultivo
- Disminución de flora y fauna silvestres
- Destrucción de hábitats y la posible desaparición de especies endémicas

Además de los problemas anteriores, la reubicación de los poblados fuera del embalse lleva a la deforestación y erosión del suelo debido al cambio de uso de suelo.

Respecto al medio acuático se producen los siguientes problemas:

- Algunas poblaciones de peces se ven desplazadas aguas arriba y otras aguas abajo del embalse; siendo afectadas por la disminución del caudal.
- Se puede ver afectada la calidad del agua debido a las descargas de los nuevos centros de población

Se produce un incremento en la humedad del ambiente al tener una mayor superficie de agua expuesta la calentamiento y evaporación.

CAPITULO 3

FUENTES ALTERNAS DE ENERGIA

El interés por desarrollar tecnologías que permitan aprovechar nuevas fuentes energéticas ha crecido enormemente. Las alzas de precios que han sufrido los hidrocarburos desde los primeros años de la década de los setenta han despertado nuevas conciencias sobre el problema energético. Las economías actuales se basan en recursos energéticos no renovables, cuyas reservas se irán agotando independientemente de posibles nuevos descubrimientos de yacimientos de hidrocarburos o depósitos de carbón, que se estima no serán espectaculares. Existe entonces la necesidad de transitar hacia economías que incorporen en su base energética fuentes diferentes de las convencionales, como las energías renovables.

Se llama energía renovable a la que, administrada en forma adecuada, puede explotarse ilimitadamente, es decir, su cantidad disponible (en la Tierra) no disminuye a medida que se aprovecha. Para tener un esquema de desarrollo sustentable es indispensable que la mayoría de los recursos, y particularmente la energía, sean de tipo renovable.

La principal fuente de energía renovable es el Sol. Como se explicará más adelante, el Sol envía a la Tierra únicamente energía radiante, es decir, luz visible, radiación infrarroja y algo de ultravioleta. Sin embargo, en la atmósfera se convierte en una variedad de efectos, algunos de los cuales tienen importancia como recurso energético, tal es el caso de la energía eólica.

Resulta claro que si las tecnologías para aprovechar las fuentes renovables de energía estuvieran ya desarrolladas, fuesen económicamente competitivas y socialmente aceptables, dichas fuentes serían preferidas a las no renovables.

Ante las demandas crecientes de energía, el interés por aprovechar fuentes no convencionales como las mencionadas anteriormente, ha aumentado también en nuestro país, a pesar de contar México con importantes recursos de hidrocarburos.

3.1 ENERGIA SOLAR

La energía solar que recibe la superficie terrestre puede convertirse en energía útil (calorífica, mecánica o eléctrica) mediante muy diversas tecnologías. Las características importantes de la energía solar que deben tomarse en cuenta para plantear su aprovechamiento son: su distribución geográfica; su relativamente baja densidad energética, su carácter intermitente, con variaciones diarias, estacionales y las debidas a las condiciones atmosféricas prevalecientes.

La radiación solar recibida fuera de la atmósfera terrestre es prácticamente constante, mientras que la recibida por la superficie terrestre varia considerablemente, se altera por dispersión y absorción, al pasar a través de la atmósfera y el total incidente sobre la superficie horizontal terrestre rara vez excede 1 kW/m.

La radiación solar puede descomponerse en directa y difusa. La primera de ellas se refiere al flujo de rayos solares recibidos desde la dirección del disco solar; la radiación difusa es la que llega a la superficie terrestre desde el resto del cielo y es producto de la dispersión que sufre la luz solar a través de la atmósfera terrestre. La proporción de cada una de ellas en la radiación total depende de la nubosidad, humedad, presencia de partículas suspendidas en la atmósfera y otras condiciones ambientales, pudiendo llegar a corresponder a la radiación difusa desde un 10% hasta un 85% de la radiación total, siendo esta proporción menor en zonas tropicales. La composición de la radiación es importante dado que algunas de las tecnologías solares disponibles aprovechan solo la insolación directa, mientras que otras aprovechan la total. Por otra parte, la radiación solar recibida es diferente para distintas latitudes y la que llega sobre superficies inclinadas difiere de la recibida sobre superficies horizontales.

México está en una zona geográfica que resulta atractiva desde el punto de vista de disponibilidad del recurso solar. Algunos estudios han cuantificado con mayor detalle los niveles de insolación para la República Mexicana.

La mayor parte de las dificultades tecnológicas para su aprovechamiento son:

- Su baja densidad por unidad de área, lo que hace necesario dispositivos con gran extensión para captar cantidades importantes de energía.
- Su intermitencia, lo que implica que para muchas de sus aplicaciones potenciales se requieren dispositivos de almacenamiento energético que encarecen las tecnologías.

Estas dos características hacen que los esfuerzos de investigación y desarrollo se dirijan fundamentalmente hacia dos puntos: la tecnología de materiales en su más amplio sentido y el almacenamiento de energía.

Las tecnologías termodinámicas tienen como propósito capturar la energía solar y convertirla en calor útil el que posteriormente puede ser transformado en energía mecánica o eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos convierten directamente la energía solar captada en energía eléctrica, al generarse portadores móviles de carga eléctrica, como resultado de la absorción de la energía de los fotones que inciden sobre materiales semiconductores. Los procesos termodinámicos aprovechan la emisión de electrones desde un cátodo caliente, convirtiendo así la energía calorífica en energía eléctrica. Los dos primeros grupos de tecnologías han sido los más estudiados y en los que se ha logrado un mayor desarrollo.

3.1.1 Sistemas fotovoltaicos

Las celdas solares (fotovoltaicas) son dispositivos que absorben energía de los fotones presentes en la luz que inciden sobre ellas y la convierten en energía eléctrica. El efecto fotovoltaico ocurre en dispositivos en que:

- En uno de los materiales que los componen se generan portadores móviles de carga eléctrica mediante la absorción de la energía de los fotones presentes en la luz.

- Y cuando existe además una barrera de potencial que permite separar a los portadores de carga de la región en que se generan.

La conducción de energía eléctrica en los semiconductores ocurre por los electrones que saltan a la banda de conducción, y por los “huecos” dejados por ellos en la banda de valencia al pasar a la de conducción. Cuando el número de electrones y huecos que se forman son iguales, el semiconductor se denomina intrínseco. Agregando impurezas a un material semiconductor se puede lograr que el número de electrones disponibles para la conducción sea mayor que el de huecos, en cuyo caso se habla de un semiconductor tipo n, o que los huecos sean mayoritarios, recibiendo entonces el semiconductor la denominación de tipo p.

Los semiconductores aprovechan solo los fotones cuya energía excede la brecha entre las bandas de valencia y de conducción.

Las celdas fotovoltaicas son unidades pequeñas y generan bajas potencias, por lo que su aplicación requiere la conexión eléctrica de varias de ellas y su encapsulamiento en un armazón que les proporcione soporte y protección formándose así lo que se conoce como módulo fotovoltaico. Los módulos suelen reunirse en conjuntos, denominados arreglos, se conectan en serie o en paralelo para obtener las tensiones y corrientes que nos den la potencia deseada. Módulos en serie aumentan el voltaje y conservan la misma corriente, mientras que módulos en paralelo aumentan la corriente, conservando el mismo voltaje. Los módulos generalmente se fabrican para tener una salida de 12 VCD.

La energía eléctrica que por sí solas pueden suministrar las celdas, módulos o arreglos fotovoltaicos, sigue en el tiempo la curva de radiación solar incidente sobre ellos. Así, en aquellas aplicaciones que requieran de una alimentación sostenida de energía a cierto nivel de corriente y/o de potencia, deben de integrarse a los sistemas fotovoltaicos sistemas de almacenamiento de energía, en particular baterías eléctricas. Requieren además, en general, elementos eléctricos tales como reguladores de voltaje que protejan a las baterías y convertidores para pasar de corriente directa a alterna.

3.1.2 La celda fotovoltaica

Actualmente la mayor parte de las celdas solares fotovoltaicas comerciales están basadas en la tecnología de Silicio (Si) monocristalino y producen 0.5 V para prácticamente cualquier nivel de iluminación, y cerca de 30 mA/cm² con una radiación de 1 kW/m². su potencia de salida varía de 1 a 2 W pico. Las eficiencias teóricas alcanzables de los dispositivos fotovoltaicos están entre 10 y 26%, según los materiales empleados. Los dispositivos comerciales tienen eficiencias típicas que van del 3 al 13%.

En resumen, para que una célula solar expuesta al sol produzca energía eléctrica debe reunir las siguientes tres características fundamentales:

- a) Capaz de absorber una fracción importante de la radiación solar para que la generación de pares electrón - hueco sea eficiente.
- b) Tener un campo eléctrico interno que separe las dos cargas impidiendo su posterior recombinación.
- c) Finalmente, las cargas separadas deben ser capaces de viajar a través de la oblea de Silicio hasta los electrodos superficiales desde donde pasan al circuito exterior.

Aunque en la práctica las células solares de mayor utilización son las de Si monocristalino, desde 1954 a la fecha se han ensayado y desarrollado una gran variedad de nuevos tipos, modelos y conceptos de células solares. Estas se pueden fabricar de diferentes geometrías según las necesidades.

3.1.3 Rendimiento del proceso fotovoltaico

Existen ciertos factores que influyen en mayor o menor medida en el rendimiento de una célula solar. Estos pueden ser de origen interno o externo como características del material, espesor de la oblea, superficie activa, geometría de los contactos, etc.

También pueden ser factores ambientales como temperatura de operación y composición espectral de la radiación. Al aumentar la temperatura por encima de la temperatura ambiente (40-45 °C), el rendimiento disminuye, razón por la que sería conveniente refrigerar las células solares.

Un concepto útil al trabajar con células solares es la potencia pico de una célula fotovoltaica.

3.1.4 Estructura de un generador fotovoltaico

Suele llamarse generador fotovoltaico al conjunto de elementos, debidamente acoplados, que permiten utilizar la energía eléctrica obtenida por conversión de la solar mediante las células solares. La estructura de un generador es variable según la aplicación a la que está destinado, aunque algunos elementos tienen que estar presentes necesariamente. Para fines prácticos, podemos decir que hay dos grandes grupos de generadores: los autónomos, que constituyen una fuente de energía eléctrica independiente de la red general de electricidad y que por lo tanto precisan de algún sistema de almacenamiento de energía eléctrica; y los no autónomos, que operan en conjunto con dicha red y que pueden prescindir del sistema de almacenamiento.

Los generadores fotovoltaicos autónomos se componen de tres subsistemas: el panel fotovoltaico, donde la energía solar se convierte en corriente continua, el regulador, conversor electrónico y el subsistema de almacenamiento, que generalmente son baterías electroquímicas. El acoplamiento de estos tres subsistemas se hace en función del tipo de consumo que vaya a satisfacer el generador fotovoltaico, el regulador tiene la doble función de evitar la sobrecarga de las baterías desconectándolas cuando ya están cargadas, y evitar la descarga de las mismas en períodos en que los paneles no generan suficiente energía por haber baja insolación o ser de noche.

Otra característica importante de los generadores fotovoltaicos es su carácter modular. Por modularidad se entiende la posibilidad de ampliar la potencia pico instalada por acoplamiento de nuevos paneles. Así, el sistema se adapta a la demanda sin la necesidad de adquirir un nuevo generador.

Por otro lado, el sistema de paneles fotovoltaicos posee una vida larga, unos 20 a 25 años, al final de los cuales su rendimiento debe ser del orden del 75% del inicial.

Después de este tiempo, su degradación se acelera y desciende el rendimiento hasta valores despreciables.

3.1.5 Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos.

Desde un punto de vista histórico, el motivo de la construcción de las celdas fotovoltaicas fueron los satélites artificiales. La idea era construir un generador eléctrico para alimentar los equipos de toma de datos que llevaban a bordo, que presentara ventajas con respecto a otros generadores como los termoeléctricos y las pilas de combustible. De hecho, las ventajas encontradas en este tipo de generadores fueron: peso reducido, larga vida, ocupación de espacio mínima y nivel de insolación elevado y continuo por estar fuera de la atmósfera terrestre, aunque sus costos eran muy elevados. Para aplicaciones terrestres, el factor económico era muy importante si se deseaba tener una aplicación más generalizada y por lo tanto, desde esos años (1972-73), se inició una tremenda carrera cuya meta era la simplificación y el descubrimiento de nuevas tecnologías, procesos, e investigación de nuevos materiales, que condujeran a un abaratamiento de las células solares y demás componentes del generador fotovoltaico. Dichos esfuerzos han rendido ya sus frutos y encontramos que en la actualidad los precios han bajado drásticamente y existen muchas más aplicaciones de las células solares, las cuales se mencionaran brevemente a continuación:

- Electrificación rural y de viviendas aisladas. Existen muchas zonas rurales y viviendas aisladas donde llevar energía eléctrica por medio de la red general sería demasiado costoso y por lo tanto no cuentan con este servicio. En este caso, la instalación de un generador fotovoltaico es ampliamente rentable.
- Comunicaciones. Los generadores fotovoltaicos son una excelente solución cuando hay necesidad de transmitir cualquier tipo de señal o información desde un lugar aislado, por ejemplo, emisores de señales de TV, plataformas de telemetría, radioenlaces, estaciones meteorológicas.

- Ayudas a la navegación. Aquí la aplicación puede ser relativa a la navegación misma o a sus señalizaciones, como alimentar eléctricamente faros, boyas, balizas, plataformas y embarcaciones.
- Transporte terrestre. Iluminación de cruces de carretera peligrosos y túneles largos. Alimentación de radioteléfonos de emergencia o puestos de socorro lejos de líneas eléctricas. Señalizaciones de pasos a desnivel o cambio de vías en los ferrocarriles.
- Agricultura y ganadería. Se está teniendo una atención muy especial en estos sectores. Mediante generadores fotovoltaicos podemos obtener la energía eléctrica necesaria para granjas que conviene que estén aisladas de las zonas urbanas por motivos de higiene. Sin embargo, la aplicación más importante y de futuro es el bombeo de agua para riego y alimentación de ganado que normalmente se encuentra en zonas no pobladas. Otras aplicaciones pueden ser la vigilancia forestal para prevención de incendios.
- Aplicaciones en la industria. Una de las principales aplicaciones en este campo es la obtención de metales como cobre, aluminio y plata, por electrólisis y la fabricación de acumuladores de electroquímicos.
- Difusión de la cultura. Televisión escolar para zonas aisladas. Difusión de información mediante medios audiovisuales alimentados eléctricamente mediante generadores fotovoltaicos.

Vale la pena mencionar que en la actualidad también se está trabajando con generadores mixtos o híbridos, esto es, adaptar el generador fotovoltaico con otros generadores ya existentes como los eólicos o los generadores diesel. También podemos mencionar que actualmente se han construido algunas centrales fotovoltaicas que proporcionan una potencia considerable y que en un momento dado pueden llegar a ser rentables en ciertos casos, comparadas con las centrales tradicionales como las termoeléctricas o hidráulicas.

3.1.6 Impacto en el medio ambiente, por el uso de energía solar

Todos los métodos artificiales para captar la energía solar y convertirla en electricidad de manera continua representan posibles impactos sobre el medio ambiente. Algunos impactos serían positivos, como el abatimiento del CO₂ en la atmósfera al sustituir los combustibles fósiles, pero otros serían negativos, como el desecho de los subproductos de la manufactura de las celdas fotovoltaicas.

Los impactos ambientales de las plantas solares dependen de varios factores, como se mencionan a continuación:

- Tipo de proceso de conversión
- Escala de la aplicación
- Tipo de sistema (centralizado o disperso)
- Magnitud e intensidad de la aplicación
- Tipo de conversión (directa o indirecta y temperatura de operación)

Algunos de los impactos más evidentes:

- Agua : si es necesario el uso de torres secas de enfriamiento, el consumo de agua de una planta solar puede llegar a ser mayor que para las plantas convencionales por las menores eficiencias involucradas. Y una fuga en cualquiera de sus líneas del receptor, puede causar contaminación.
- Aire : puede ser que los estanque solares modifiquen el contenido de humedad de la atmósfera.
- Terreno : el desarrollo de grandes plantas requerirá la construcción de carreteras, la nivelación y el relleno del área para los colectores. Este proceso implica la destrucción de muchos ecosistemas locales. La presencia de muchos colectores, altera apreciablemente las condiciones del viento y por tanto el equilibrio ecológico con resultados difíciles de predecir.

Otros efectos de las plantas solares incluyen los aspectos estéticos, los efectos sociales, accidentes, la productividad total a corto y largo plazo en las comunidades, el uso de recursos, y los efectos sobre las condiciones climáticas locales.

3.2 Energía eólica

La energía eólica ha sido aprovechada como fuerza motriz en la navegación y para generar la energía mecánica en molinos de grano y bombas de agua desde tiempos muy remotos. Solo desde fines del siglo pasado se han empleado para generar energía eléctrica.

El desarrollo de molinos de viento para generar electricidad se generalizó a fines del siglo XIX y principios del siglo XX. El primer aerogenerador de energía eléctrica fue diseñado por P. LaCour en Dinamarca y entro en operación en 1890, poco tiempo después que el primer generador eléctrico a vapor. Durante ese siglo el principal objeto de atención en los desarrollos tecnológicos de molinos fueron las aspas y la forma de controlar automáticamente la velocidad del eje de rotación (frenos de aire, gobernadores centrífugos, etcétera).

3.2.1 Disponibilidad del recurso

Los vientos ocurren por diferencias de presiones generadas por un calentamiento no uniforme de la atmósfera terrestre, desplazándose grandes masas de aire de las zonas de alta presión a las de baja. Por limitaciones de tipo tecnológico y económico únicamente el viento que fluye en los primeros 150m sobre el nivel del suelo es aprovechable. Por otra parte, de la potencia eólica disponible en un lugar solo una fracción puede convertirse en energía útil.

La potencia eólica P [W], es proporcional a la velocidad del viento V [m/s], elevada al cubo y está dada por: $P = \rho * A * V^3$, donde ρ es la densidad de masa del aire [kg/m^3] y A el área de la sección considerada [m^2]. La selección del lugar de instalación de un sistema para el aprovechamiento de la energía eólica es crítica; diferencias en las velocidades de viento de menos de 1m/seg (3 km/h) pueden marcar la diferencia entre un sistema exitoso y uno antieconómico.

La duración de los vientos sostenidos a altas velocidades es factor determinante en los costos de aprovechamiento. Por otra parte, cuanto mayor sea la correlación de la curva de demanda de energía y la disponibilidad de vientos, más económico será al aprovechamiento de la energía eólica por reducirse entonces la capacidad requerida por los sistemas de almacenamiento de energía, que representa una parte importante del costo de los sistemas eólicos.

En el país, los sistemas regionales más importantes son: la región del sur del Istmo de Tehuantepec, con velocidades medias del viento de 6.5 y 7 m/s; la península de Baja California, las costas de Oaxaca, Guerrero y Michoacán, en las que en horas de la tarde el viento alcanza velocidades de entre 13 y 15 m/s, y el Altiplano Central.

3.2.2 Tecnologías para el aprovechamiento de la energía eólica

La energía cinética del viento puede convertirse en energía mecánica rotacional en forma directa, cuando se extrae por medio de superficies que están en contacto directo con el viento y acopladas a motores mecánicos, o en forma indirecta, cuando interviene un elemento intermedio para su conversión. La energía mecánica rotacional puede ser a su vez convertida en energía eléctrica.

La turbina eólica (aeroturbina) constituye el principal elemento de los sistemas de aprovechamiento de energía, constituida por un arreglo de aspas, soportadas por una torre, que giran al ser atravesadas por una masa de aire. Las aspas deben soportar todos los esfuerzos que se producen en ellas ocasionados por turbulencias provocadas al girar con el viento, las torres suelen ser estructuras de concreto o metal y la altura apropiada para una torre es por lo menos de 15 m mayor que los obstáculos que puedan encontrarse a menos de 15 m de ella.

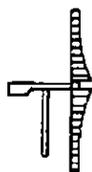
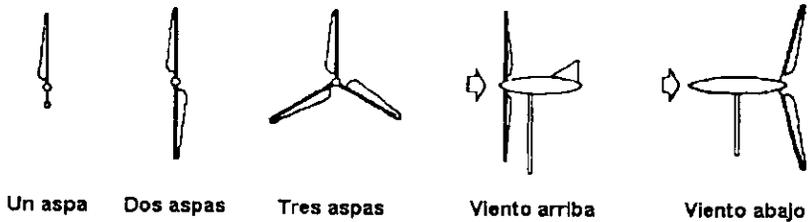
Las aeroturbinas pueden agruparse en dos grandes grupos, de eje horizontal o de eje vertical, de acuerdo con la posición del eje con respecto a la superficie terrestre.

3.2.3 Aeroturbinas de eje horizontal

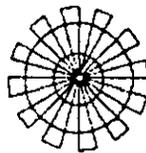
Las aeroturbinas de eje horizontal pueden tener una, dos, tres o más aspas. A mayor número de aspas corresponde una mayor superficie de contacto con el viento. Las de dos o tres aspas utilizan mecanismos automáticos de control que permiten girar todo el dispositivo dejando su eje de rotación perpendicular a la dirección del viento cuando este sopla a velocidades excesivas. Se emplean además otros mecanismos para controlar el ángulo de ataque de las aspas con el viento logrando de esta manera que el rotor de la aeroturbina gire a una velocidad constante.

La elección entre una configuración de dos o tres aspas se basa fundamentalmente en un compromiso, con tres aspas se distribuyen mejor los esfuerzos estructurales a que esta sometida la aeroturbina, pero con dos aspas se reduce el costo y se obtienen mayores velocidades de giro. En general las aeroturbinas de gran tamaño tienen dos aspas y entre las pequeñas no existe preferencia por una u otra configuración.

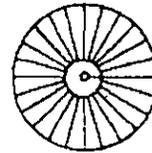
EJE HORIZONTAL



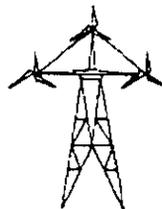
Vela



Multiaspas



Bicicleta



Multitoro

3.2.4 Aeroturbinas de eje vertical

Entre las turbinas de eje vertical se pueden distinguir tres tipos importantes: Savonius, Darrieus y Ciclogiro. Las de menor eficiencia son las de rotor tipo Savonius, que presentan una gran superficie de contacto al viento siendo por ello de baja velocidad y par inicial muy alto.

La aeroturbina de eje vertical más utilizada es la de rotor tipo Darrieus, cuyas aspas asemejan a las de una batidora. Normalmente tienen dos o tres aspas soportadas en la parte superior e inferior de la flecha. Estas aeroturbinas necesitan una potencia adicional no eólica para iniciar su operación, lo que representa una desventaja.

Las aeroturbinas tipo Ciclogiro, es semejante al Darrieus, pero con dos diferencias importantes: primero las aspas son rectas y, segundo, su orientación se modifica constantemente durante la rotación a fin de maximizar el par inducido por el viento, requiriendo por ello un mecanismo de reorientación de aspas. La potencia pico predicha para este tipo de aeroturbinas es más alta que para cualquier otro.

Las aeroturbinas de eje vertical tienen ciertas ventajas sobre las de eje horizontal. Los rotores de eje vertical requieren de un sistema de orientación; cuando se utilizan para generar energía eléctrica, solo requieren de un anillo colector que transmita la energía a la base de la torre y no necesitan de un mecanismo de control para regular la inclinación de las aspas, pero tienen la desventaja que la orientación de las aspas con respecto al eje rotor permanece constante y no siempre tiene la mejor orientación con respecto al viento.

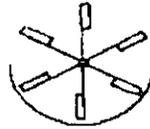
En el caso de aeroturbinas de eje vertical tipo Darrieus se han alcanzado eficiencias del 35% y en las de tipo Savonius, que presentan el comportamiento más pobre, se alcanzan eficiencias máximas del 15%.

EJE VERTICAL

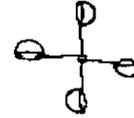
Arrastre



Savonius

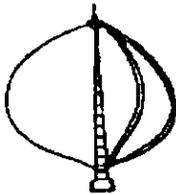


Paletas

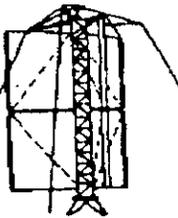


Casquetes

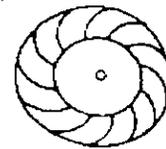
Sustentación



Darrieus

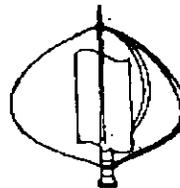


Ciclogiro



Turbina

Combinaciones

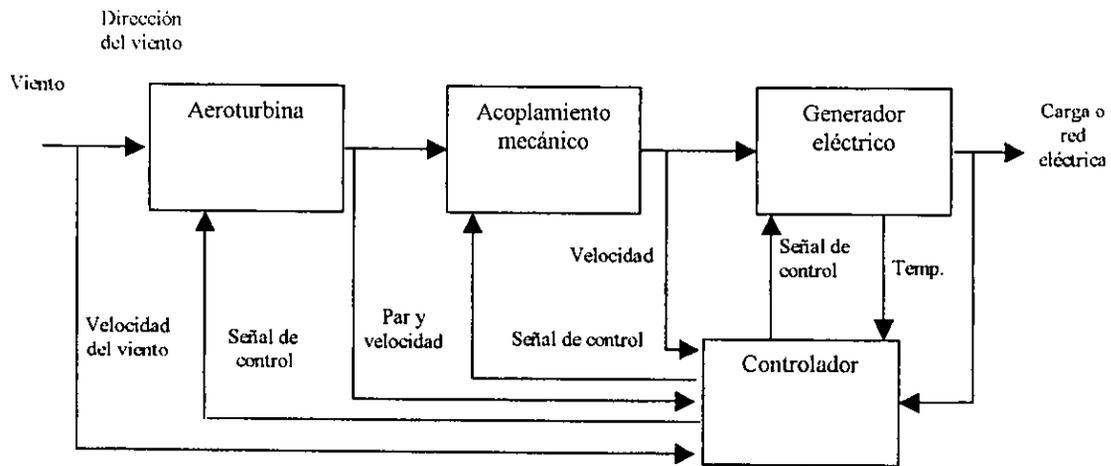


Darrieus - Savonius

3.2.5 Conversión de energía eólica en energía eléctrica (aerogeneradores)

Los sistemas conversores de energía eólica en eléctrica suelen subdividirse en dos grupos: a) de pequeña escala, que proporciona parte de la energía eléctrica utilizada en una casa o determinado tipo de equipo, y b) de gran escala, en que la energía extraída del viento es alimentada a una red eléctrica convencional, por lo que el sistema debe ser capaz de producir potencial compatible con la fase y frecuencia de la red.

Los sistemas básicos de un sistema de conversión viento - electricidad se indican en la siguiente figura:



Los sistemas de conversión viento -- electricidad, pueden ser clasificados según los siguientes factores:

- Tipo de salida
 - Corriente directa
 - Corriente alterna {
 - Frecuencia variable {
 - Voltaje constante
 - Voltaje variable
 - Frecuencia constante {
 - Voltaje constante
 - Voltaje variable
- Velocidad de rotación de la aeroturbina
 - Velocidad constante
 - Velocidad variable
- Utilización de la energía eléctrica obtenida
 - Almacenamiento en baterías
 - Otras formas de almacenamiento
 - Interconexión con redes convencionales

El esquema para generación de energía eléctrica depende del tipo de salida requerida y modo de operación de la aeroturbina. Uno de los esquemas más simples consiste en utilizar un alternador de imán permanente; la salida del estator del alternador puede ser bifásica o trifásica. La frecuencia de salida es igual a la velocidad angular multiplicada por la mitad del número de polos. Si la aeroturbina es operada a velocidad constante, la salida bajo condiciones de carga es de frecuencia constante pero el voltaje variable. Si la aeroturbina es operada a velocidad variable, la salida será de frecuencia y voltaje variables. Ambas salidas pueden ser convertidas en señales de frecuencia y voltaje constantes con una combinación inversor – rectificador de estado sólido.

La generación de CA de frecuencia y velocidad constante se puede hacer con un generador síncrono que debe girar a velocidad constante (velocidad síncrona). Cuando este tipo de configuración se opera en paralelo con las redes de potencia el requerimiento de velocidad constante es muy estricto; solo pueden aceptarse fluctuación de alrededor del 1 o 2% durante periodos de fracciones de segundos. Satisfacer este requerimiento es complicado debido a las constantes fluctuaciones en la velocidad del viento, la sensibilidad de la salida eléctrica a los cambios de velocidad, la capacidad del generador para trabajar como motor. Este tipo de problemas puede ser disminuido por acoplamientos mecánicos apropiados entre la flecha de la aeroturbina y la del generador.

Para evitar los problemas de sincronía puede utilizarse un generador de inducción, con lo que el mantenimiento, el control y la operación del sistema se vuelven mucho más simples. Un generador de inducción gira a una velocidad cercana a la velocidad síncrona. Una vez que la aeroturbina excede la velocidad de operación, un mecanismo de control regula el ángulo de ataque de las aspas con respecto al viento (en el caso de las aeroturbinas de eje horizontal) para controlar la velocidad. Si la aeroturbina no es autoarrancable (eje vertical tipo Darrieus) se puede utilizar el generador de inducción como motor de arranque y una vez alcanzada de velocidad necesaria, como generador.

Para obtener frecuencia constante a partir de una aeroturbina de velocidad variable se han desarrollado diferentes esquemas que utilizan conmutadores mecánicos y/o dispositivos electrónicos a base de tiristores y diodos.

Los sistemas conversores viento - electricidad empiezan a generar potencia a partir de una velocidad de viento mínima (llamada de corte o entrada) y dejan de operar cuando la velocidad del viento alcanza un umbral de velocidad máxima (velocidad de corte de salida), por arriba del cual la aeroturbina ya no opera de forma segura. Para valores de velocidad de viento intermedios la potencia de salida esta determinada por el coeficiente de potencia de la aeroturbina y las eficiencias del acoplamiento mecánico y el generador eléctrico.

A bajas velocidades de viento los sistemas de velocidad constante operan a mayor relación de velocidad de punta; debido al mecanismo que controla el ángulo de ataque de las aspas, dando como resultado valores del coeficiente de potencia menores que el óptimo. Los sistemas de velocidad variable operan a relaciones de velocidad de punta constante y consecuentemente pueden mantener coeficientes de potencia más altos, aun a bajas velocidades de viento.

En sistemas de velocidad constante, una vez que la salida del generador está en su valor nominal, la velocidad se mantiene aun para altas velocidades de viento (a no ser que se alcance el valor de salida). Este esquema de operación desperdicia parte de la energía disponible en el viento a altas velocidades, pero impide sobre cargas en el generador eléctrico.

La elección entre sistemas de velocidad constante y de velocidad variable no puede hacerse pensando únicamente en la eficiencia de conversión. Dependiendo del tamaño de la aeroturbina, otro tipo de factores, tales como su estabilidad mecánica, pueden ser más importantes.

Los sistemas de conversión de energía eólica en electricidad pueden ser clasificados de acuerdo con su potencia de salida en:

- Baja potencia: hasta 100 kW
- Mediana potencia: de 100 a 200 kW
- Media – Alta potencia: de 200 a 1,000 kW
- Alta potencia: de 1 a 3 MW

Los sistemas de baja potencia tienen un mercado muy disperso, aplicándose en residencias rurales, en la agricultura o en localidades remotas.

La eficiencia de conversión de estos sistemas es de a lo sumo dos terceras partes del 59% máximo teórico alcanzable; es decir tienen una eficiencia total de 30 a 40%. La energía anual obtenida es función del diámetro del rotor y las velocidades del viento del lugar de instalación.

3.2.6 Impacto en el medio ambiente, por uso de la energía eólica

Aunque aparentemente los sistemas de energía eólica son tecnologías limpias, pueden crear disturbios ambientales en la zona donde se instalan. Los grandes sistemas pueden llegar a interferir señales de alta frecuencia como las de televisión o de comunicación, cuando la aeroturbina esta localizada entre el transmisor y el receptor. Estas interferencias ocurren debido a que la señal transmitida es reflejada en las aspas de la aeroturbina interactuando con la señal original y provocando fluctuaciones en su amplitud y frecuencia. Estudios preliminares indican que las interferencias ocurren alrededor de la aeroturbina en un área de 400 m de radio para las señales de muy alta frecuencia (VHF) y de 4,800 m para señales de ultra frecuencia (UHF).

Por otra parte, el ruido que producen los aerogeneradores al operar puede causar disturbios en la vida natural del lugar e interferencias en las actividades cotidianas. Al mismo tiempo pueden ocurrir colisiones con las aves y la aeroturbina, particularmente si el sistema esta localizado en una zona con grandes poblaciones de aves o en el trayecto de aves migratorias.

Finalmente, puede producirse un rechazo social hacia las aeroturbinas, particularmente hacia los grandes sistemas, por considerarse que son poco estéticas y perturban por lo tanto un paisaje apreciado localmente. El impacto visual de la aeroturbina depende de su tamaño del carácter del paisaje y de su visibilidad desde las áreas de actividad humana.

3.3 Almacenamiento eléctrico

La energía eléctrica puede almacenarse electroquímicamente en baterías secundarias (recargables), que trabajan con corriente directa, por lo que son compatibles con los sistemas fotovoltaicos. Para aplicaciones en otros sistemas de aprovechamiento

de las energías solar y eólica, generalmente se requiere acondicionamiento adicional (convertidores de CA/CD y CD/CA). Las dificultades asociadas con la conversión de la corriente a la salida de las baterías en corriente alterna han sido reducidas en mucho con tiristores.

CAPITULO 4

CELDA DE COMBUSTIBLE

En la búsqueda de tecnologías alternativas de generación de energía eléctrica, desde hace algunos años, se estudia una en especial, que promete ser clave en los próximos años, las celdas de combustible. Las celdas de combustible son una tecnología que se encuentra en una etapa de transición entre la investigación y su utilización, no obstante, pueden llegar a tener un gran potencial a futuro.

Uno de los principales beneficios de esta tecnología, es que las celdas de combustible podrían reducir de manera dramática la contaminación del aire debido a que no emiten ningún tipo de compuesto químico a la atmósfera, el único subproducto que se genera es agua.

4.1 Historia

En 1839 Sir William Grove, un juez y científico galés realizaba experimentos con los cuales generaba electricidad además de agua y calor al suministrar hidrógeno y oxígeno a dos electrodos separados, los cuales estaban sumergidos en ácido sulfúrico, así este aparato contenía todos los elementos de lo que ahora llamamos una celda de combustible. Como siempre pasa en estos casos, la gente no lo tomó en serio, sino más bien se rieron de su idea. Si lo hubiesen tomado en serio, a estas horas la historia de la humanidad habría sido totalmente distinta, posiblemente la tecnología habría avanzado a paso más acelerado e incluso es posible que los temas políticos, económicos y sociales asociados al petróleo, habrían sido muy diferentes.

La segunda guerra mundial paró gran parte de las investigaciones en el área de la conversión directa de energía. Sin embargo, en el Reino Unido, F.T. Bacon trabajó en un sistema alcalino de celdas de combustible utilizando electrodos porosos de metal, desafortunadamente sus trabajos no se difundieron y no fueron conocidos sino hasta que se rescataron de su biblioteca privada.

El verdadero interés en celdas de combustible como un generador práctico vino hacia comienzos de 1970, cuando el programa espacial de los Estados Unidos seleccionó las celdas de combustible en lugar de un generador nuclear y de la costosa energía solar para proporcionar electricidad y agua a las naves espaciales Gemini y Apollo. Hoy en día, la aplicación espacial ya no es la única de tipo práctico, puesto que las celdas de combustible están atravesando por un gran momento, al haber alcanzado una etapa tecnológica que les permite estar en posición de competir cada día más con las tecnologías convencionales de generación eléctrica, ofreciendo enormes ventajas sobre ellas.



William Grove

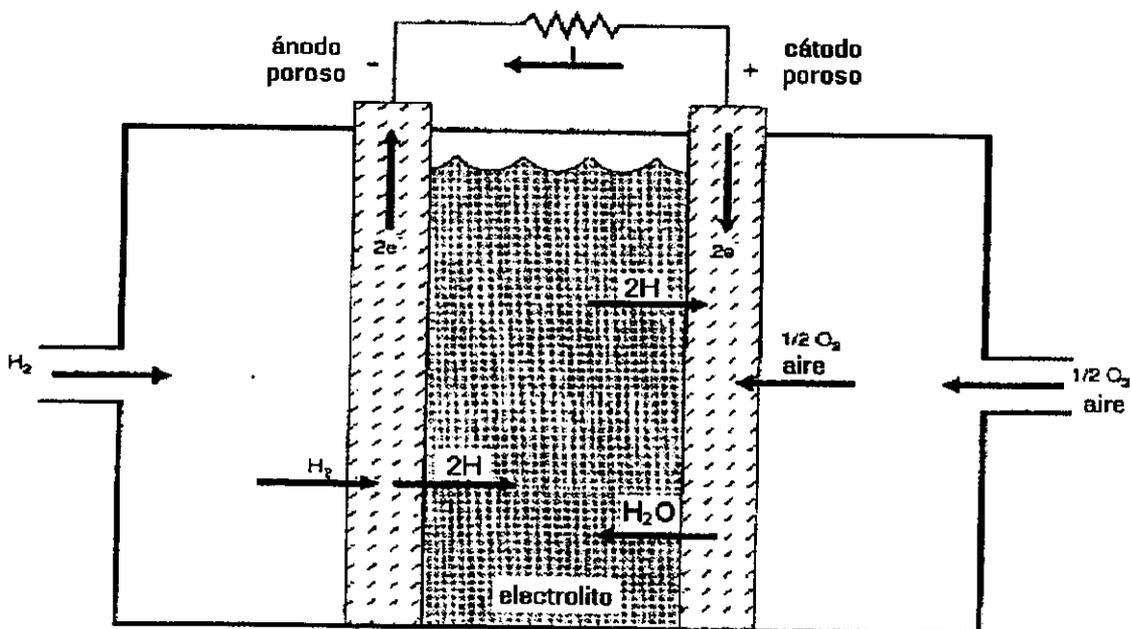
4.2 Principio de operación

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica. Genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente. A diferencia de las baterías, una celda de combustible no se agota ni requiere recarga. Producirá energía en forma de electricidad y calor mientras se le provea de combustible.

En la práctica, la corrosión y la degradación de materiales y componentes de la celda pueden limitar su vida útil. La manera en que operan es mediante una celda electroquímica consistente en dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un electrolito.

El oxígeno proveniente del aire pasa sobre un electrodo y el hidrógeno gas pasa sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado en el ánodo se oxida y pierde un electrón; al ocurrir esto, el hidrógeno oxidado y el electrón toman diferentes caminos migrando hacia el segundo electrodo llamado cátodo. El hidrógeno lo hará a través del electrolito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor externo (carga). Al final de su camino ambos se vuelven a reunir en el cátodo donde ocurre la reacción de reducción o ganancia de electrones del oxígeno gas para formar agua junto con el hidrógeno oxidado. Así, este proceso produce agua, corriente eléctrica y calor útil.

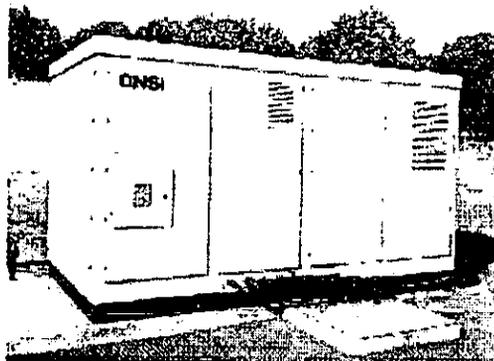
En todas las celdas de combustible se utiliza hidrógeno para su funcionamiento, este elemento se puede almacenar en forma líquida, gaseosa o sólida por medio de hidruros metálicos. Por otra parte, se pueden emplear combustibles como: metanol, gas natural, gas LP o gasolina partiendo de que todos estos compuestos contienen hidrógeno en su estructura química y por tanto se puede extraer a través de reformadores. El grado de pureza requerido del hidrógeno depende fundamentalmente del tipo de electrolito y catalizador que emplee cada celda. Las celdas de combustible que utilizan directamente hidrógeno se considera que no emiten contaminantes, sin embargo en el caso de las celdas que emplean un reformador se les clasifica como de muy bajas emisiones contaminantes.



4.3 Tipos de celdas de combustible

Las celdas de combustible son en realidad una familia de tecnologías que usan diferentes electrólitos y que operan a diferentes temperaturas. Por ello se puede hablar de celdas de combustible de alta temperatura, las cuales operan a temperaturas mayores a 200°C y las de baja temperatura, cuya operación puede llegar sólo hasta los 200°C . Una diferencia derivada de la temperatura de operación es el empleo de diferentes materiales, principalmente electrolitos ya que a temperaturas elevadas deben ser utilizados electrolitos no acuosos. La clasificación de alta y baja temperatura es quizá la más adecuada, debido a las aplicaciones que unas y otras celdas tienen. En general, las celdas de combustible de alta temperatura tienen como objetivo principal la generación de energía eléctrica para una potencia mayor a 1 MW, mientras que las de baja temperatura se están diseñando para salidas menores a 1 MW.

La razón principal por la que las celdas de combustible de alta temperatura están diseñadas para aplicaciones de generación de alta potencia es su mayor eficiencia, comparada con las de baja temperatura. Ello se debe parcialmente a que las reacciones de oxidación y de reducción no requieren de materiales electrocatalizadores, ya que ocurren con mayor facilidad. Los electrocatalizadores son necesarios cuando las reacciones ocurren a baja temperatura y generalmente son materiales costosos basados en metales nobles como el platino. Por otra parte, la generación de vapor de alta temperatura con suficiente energía calorífica en las celdas de alta temperatura favorece la cogeneración mediante el empleo, por ejemplo, de ciclos convencionales de vapor, incrementando así la eficiencia.



4.3.1 Celdas de ácido fosfórico (PAFC)

Es la tecnología más desarrollada en celdas de combustible en la actualidad. Sus rangos de capacidad varían entre 200 kW y 11 MW.

Los mayores progresos esperados están en las áreas de reducción de costos de capital, aumento de la vida útil de la celda y reducción de costos de operación y mantenimiento. Las celdas de combustible de ácido fosfórico usan líquidos de este ácido como medio electrolítico.

En el ánodo, el gas de Hidrógeno es ionizado produciendo ión Hidrógeno y electrones. El ión de H viaja al cátodo a través del medio electrolítico. En el cátodo, el oxígeno reacciona con el ión Hidrógeno y los electrones, formando agua. Esta reacción es distinta de la combustión convencional de Hidrógeno y Oxígeno.

En lugar de que se libere el total de energía libre como calor, parte de esta energía es liberada directamente como electricidad. El balance de energía se completa con la liberación de calor, reflejada en el aumento de la temperatura en la celda de combustible.

El agua producida puede entrar en el medio electrolítico o perderse a través del cátodo como vapor.

Para celdas de ácido fosfórico, la temperatura de operación es de 200 ° C. El uso de un electrolito corrosivo como el ácido fosfórico y potencialmente peligroso de manejar tiende a restar la preferencia sobre este tipo de celda por parte de algunos usuarios.

4.3.2 Celdas de carbonatos fundidos (MCFC)

Las celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC) utilizan sales fundidas como electrolito y prometen altas eficiencias combustible - electricidad, así como la habilidad para consumir combustibles base carbón, incluyendo CO y biocombustibles, son un tipo de celda de combustible directa, que elimina los procesadores de combustible externos. Metano, el principal ingrediente del gas natural y vapor son convertidos en un gas rico en hidrógeno en el ánodo de regeneración o en la cámara de regeneración, la cual es parte de la pila de la celda de combustible. Esta pila comprime dos electrodos porosos en contacto con una sal fundida de Carbonatos de Litio y Potasio (LiKCO₃). Esta celda opera a temperaturas del orden de los 650 ° C y permite la reformación del

(extracción del hidrógeno contenido en hidrocarburos) dentro de la propia celda, además de que no necesita electrocatalizadores de metales nobles.

En el cátodo, el oxígeno (O_2) y el dióxido de carbono (CO_2) son convertidos en iones de carbonatos. El electrolito permite a los iones viajar hacia el ánodo. En él, el Hidrógeno reacciona con los iones para formar agua y CO_2 , y dos electrones son liberados. Conectando los electrodos a través de un circuito externo se completa el flujo de generación de corriente continua. Una pequeña cantidad de agua es requerida para su funcionamiento.

En 1996 se hizo en California una demostración de las celdas de carbonatos fundido. Las desventajas más importantes son la corrosividad de las sales fundidas y la necesidad de reposición de CO_2 en el cátodo para recuperación y formación de iones carbonato.

4.3.3 Celdas de óxido sólido (SOFC)

Es una celda de combustible altamente prometedora por sus bajos costos de fabricación y su capacidad de operar a costos competitivos (principalmente en unidades pequeñas). Este tipo de celda no utiliza electrólitos corrosivos, normalmente utiliza zirconio, un material sólido cerámico, en lugar de un electrolito líquido, opera a presiones elevadas y a una temperatura alrededor de $1000^\circ C$. A esta temperatura, el electrolito se vuelve lo suficientemente conductivo como para permitir la oxidación de iones. La temperatura de los gases expulsados de las celdas van de 500 a $850^\circ C$.

Las SOFC conducen iones de oxígeno (O_2^-) desde un electrodo de aire (cátodo), donde ellos se forman, a través de un medio sólido, hasta un electrodo de combustible (ánodo). Ahí, los iones reaccionan con el monóxido de carbono y el hidrógeno, liberando electrones y generando electricidad. La regeneración del gas natural u otros combustibles que contengan hidrocarburos puede ser llevada a cabo dentro del generador (la celda), al igual que las MCFC, el hidrocarburo alimentado puede ser reformado dentro de la celda.

Celdas individuales son rodeadas por arreglos de celdas eléctricamente conectadas en serie o en paralelo, formando una estructura semi - rígida que encierra el contenedor del generador.

Existen numerosos desarrollos de tecnologías de celdas tipo SOFC que las convierten en atractivas alternativas para aplicaciones industriales. Una de ellas es su alta

tolerancia a las impurezas de los combustibles, gracias a su alta temperatura de trabajo. El electrolito sólido es muy estable; además de evitarse problemas como la migración de electrolito, fugas y otros. Además se puede llegar a fabricar electrolitos sumamente densos.

4.3.4 Celda de polímero sólido o membrana de intercambio protónico (PEM)

Estas celdas utilizan como electrolito una membrana polimérica conductora de protones. Dicha membrana se encuentra entre dos electrodos porosos impregnados en el lado de la membrana con un electrocatalizador (usualmente Pt) y un material hidrofóbico del otro lado. Operan a temperaturas relativamente bajas (unos 80°C), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial alta o rápida. El único líquido que maneja la celda PEM es agua, por lo que los efectos por corrosión son mínimos. La presente tecnología permite fabricarlas en un modo tan compacto que una celda puede tener el grosor de una hoja de papel y generar varios mA de corriente por centímetro cuadrado, esto es, densidades de corriente superiores a los otros tipos de celdas. Desarrollos recientes evitan que el combustible tenga que ser presurizado para aumentar la eficiencia del sistema y que el manejo del agua sea controlado para evitar la "inundación" de los electrodos porosos empleados manteniendo, al mismo tiempo, la necesaria humedad en la membrana para que ésta pueda conducir iónicamente las cargas positivas provenientes del ánodo.

Presiones actuales de operación se encuentran alrededor de valores de 30 psi en potencias de hasta 285 kW, sin embargo adecuados colectores de corriente y estructuras soporte pueden llevar a las celdas PEM a presiones de operación hasta de 3000 psi, lo cual incrementa principalmente el voltaje de la celda y la densidad de corriente. En general, el desempeño de las celdas PEM es muy variado, ya que éste depende de la presión, temperatura y calidad de los gases, entre otros parámetros. El desempeño actual de las celdas PEM está representado por resultados del laboratorio nacional de Los Alamos, Estados Unidos, en donde se han mostrado valores de 0.78 V por celda a corrientes de 200mA/cm² a presiones de 3 atm de H₂ y 5 atm de aire, usando cargas de Pt de 0.4mg/cm². Gran parte del éxito mostrado por esta celda se debe a los avances en materiales con propiedades fisicoquímicas más favorables para este sistema.

También es en el área de materiales en donde se esperan mejoras adicionales, las cuales están concentradas principalmente en los electrocatalizadores tanto en su sustitución por otros menos costosos como en el mejor diseño de electrodos porosos para así bajar la carga del electrocatalizador. Otros componentes como los colectores de corriente, los cuales también juegan el papel de distribuidores de gases y las placas finales de la celda, son objeto de investigación en universidades e instituciones académicas, en donde se han convertido en principales contribuyentes y proveedores de los desarrollos tecnológicos clave para fabricantes de celdas. El IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas) se encuentra trabajando junto con otras instituciones en esta dirección para mejorar componentes de este tipo de celdas de combustible tanto en el área de colectores de corriente como electrodos porosos.

Una celda de tipo PEM de 5 kW de potencia requiere más de 80 litros por minuto de un hidrógeno puro al 99.95%.

4.3.5 Celdas alcalinas (AFC)

Utilizadas desde hace mucho tiempo por la NASA en misiones espaciales, estas celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito y hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales, pero varias compañías están encontrando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación. No requieren materiales nobles como catalizadores, ya que la dificultad de reducción de oxígeno presente en otras celdas de baja temperatura es mínima, por lo que pueden operar a temperaturas bajas. Un factor adverso de estas celdas es el efecto nocivo que el CO_2 produce al reaccionar con el hidróxido presente, lo que genera la necesidad de un combustible altamente puro, ya sea como hidrógeno puro o bien mediante sistemas caros de limpieza de combustible reformado capaces de reducir al máximo la concentración del gas carbónico en el flujo del combustible.

4.3.6 Celda de combustible de metanol directo (DMFC)

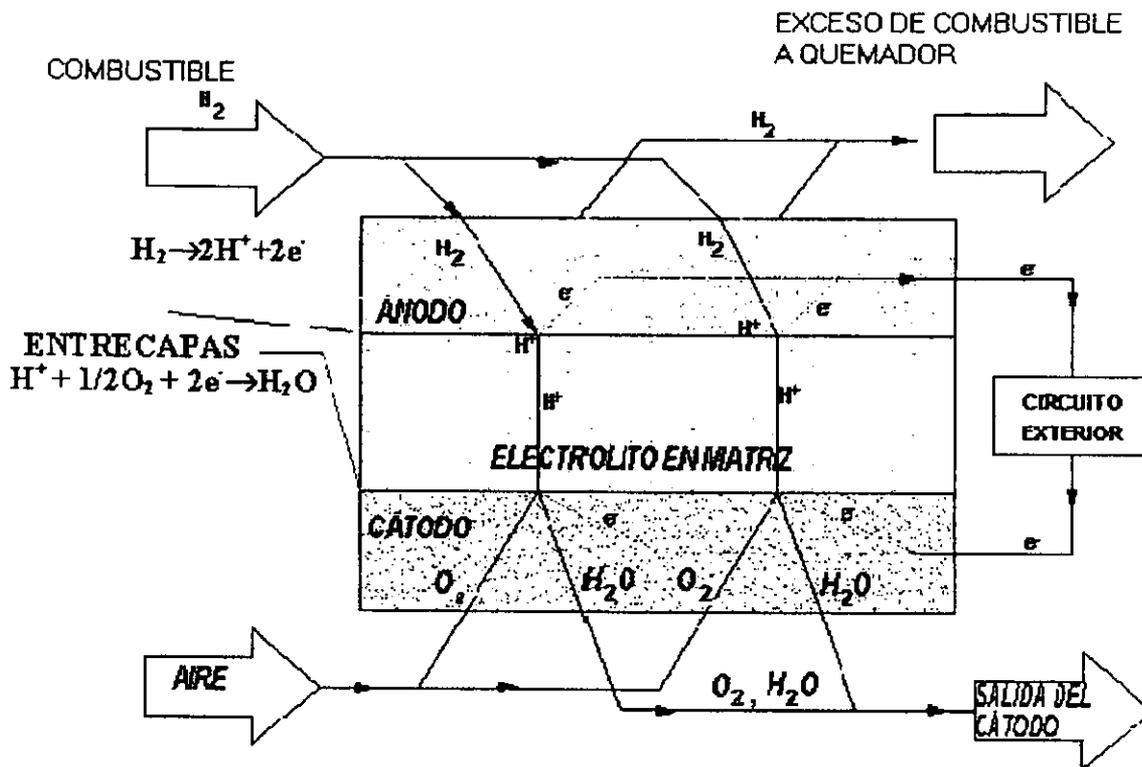
Nuevos miembros de la familia de celdas de combustible, tales como las DMFC, han surgido como resultado de la necesidad de llevar esta tecnología a terrenos prácticos. Esta celda utiliza directamente metanol como combustible sin necesidad de reformación del mismo.

4.4 Descripción de la estructura de la celda de combustible

Para describir los componentes y reacciones de una celda de combustible de una manera más detallada, nos basamos en una celda del tipo PAFC, debido a que es la tecnología más desarrollada.

Una celda de combustible de ácido fosfórico se compone principalmente de los siguientes componentes:

- electrodos (ánodo y cátodo)
- matriz conteniendo el electrolito (ácido fosfórico)
- separador platos de enfriamiento
- sistema de entrada múltiple



El objetivo de la matriz no es sólo mantener el ácido fosfórico como una parte integral de la celda sino que impide el cruce de los gases reactantes hacia los electrodos opuestos.

Cada electrodo contiene una capa de catalizador en la que se producen las siguientes reacciones:



Los iones de hidrógeno son transferidos desde el ánodo al cátodo a través del electrolito, y los electrones del ánodo al cátodo vía circuito externo.

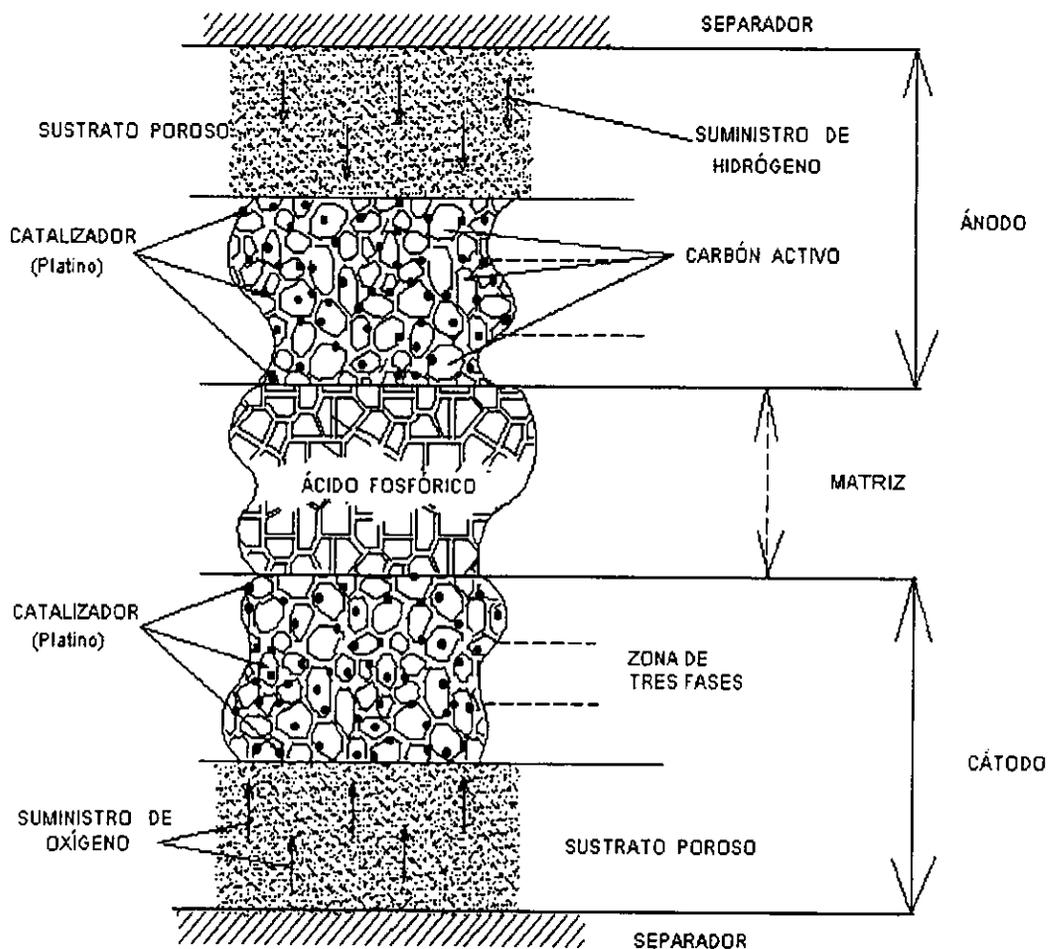


La matriz que contiene al electrolito conduce sólo iones. La corriente eléctrica no la conduce.

A través del sistema de entrada múltiple, el gas rico en hidrógeno y el aire alimenta a la celda. Las reacciones electroquímicas tienen lugar en la capa porosa del catalizador. Las reacciones, tanto en el ánodo como en el cátodo, ocurren en la llamada zona de tres fases. Recibe este nombre porque en esa zona están presentes las tres fases:

- fase sólida (catalizador -Pt-)
- fase líquida (ácido fosfórico)
- fase gas (hidrógeno y oxígeno)

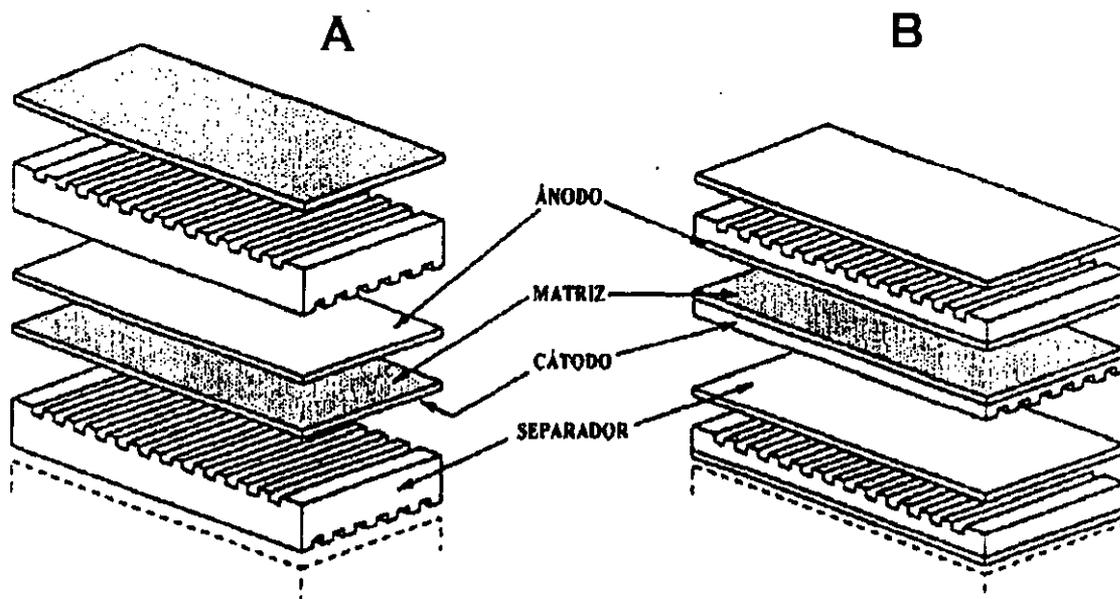
La estructura de una celda es la siguiente:



Para que esta reacción tenga lugar eficientemente, la capa porosa de catalizador debe ser fabricada de manera que tenga suficientes poros para que los gases se difundan libremente y el ácido penetre adecuadamente, ofreciendo un contacto suficiente sobre la superficie de catalizador de Pt. La entrada del gas y del ácido se controla en la zona de las tres fases.

La figura que se muestra a continuación nos muestra las dos estructuras típicas para una celda:

- separador acanalado (A)
- sustrato acanalado (B)

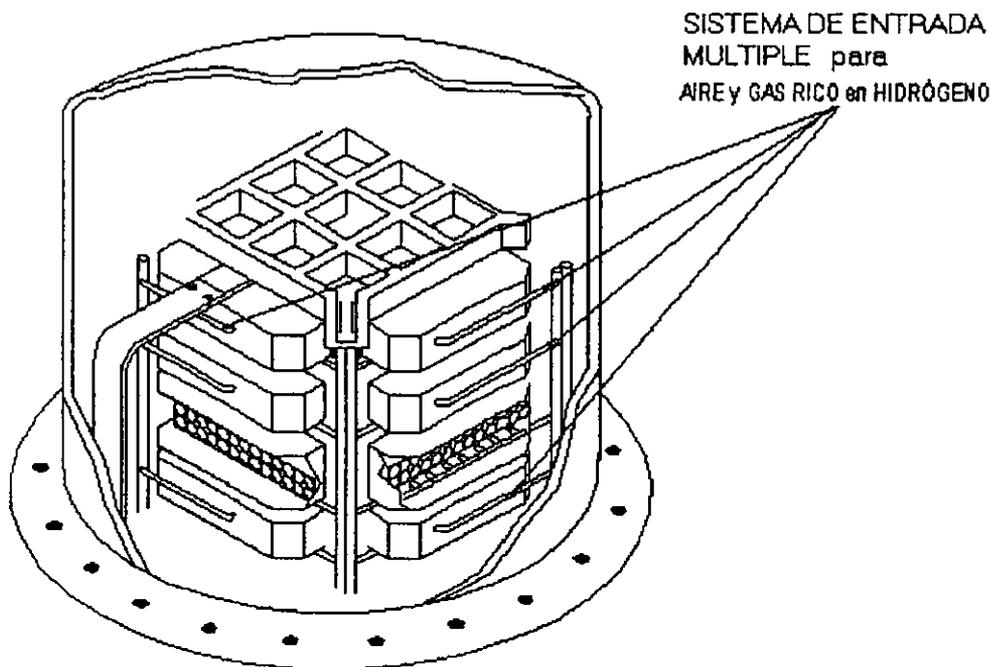


CONFIGURACIÓN DE UNA CELDA

La estructura de separador acanalado es aquella en la que los huecos de la alimentación están formando parte de su estructura, mientras que el otro tipo tiene los huecos formando parte de los sustratos de los electrodos, por los que entrarán los gases de alimentación.

La subestructura del conjunto de celdas está equipada con un sistema de entrada múltiple, que está situado normalmente en la cara externa del conjunto. Los sistemas

de entrada múltiples más utilizados para los gases ricos en H_2 y para aire son como se muestran en la siguiente figura:



Su función es alimentar los reactivos gaseosos hasta cada celda.

4.4.1 Descripción detallada de cada componente

Electrodo y Catalizador

El electrodo está compuesto de una capa de catalizador donde tiene lugar la reacción electroquímica y un sustrato donde la capa de catalizador esta soportada mecánicamente. Los componentes de la capa de catalizador son:

- carbón para soporte del catalizador
- el catalizador (*Pt*) altamente dispersado
- un agente *hidrofóbico* como el PTFE (teflón)

La superficie de contacto del platino es alta por lo que se utiliza como catalizador. La utilización del Pt es debido a que la reacción ocurre a una temperatura de trabajo baja comparada con las demás celdas de combustible, por lo que dicha reacción debe ser promovida por un catalizador.

La reacción química tiene lugar en la zona de tres fases. Para incrementar la densidad de corriente el número de puntos de contacto debe ser el máximo, la presión parcial de los reactivos gaseosos debe mantenerse alta y debe ser mínima la oposición a la difusión de los gases. La conductividad del electrolito debe de ser alta para reducir la resistencia óhmica en el electrodo. La hidrofobidad del electrodo debe ser máxima para favorecer la difusión de los gases y el "empapamiento" por parte del electrolito.

Para prever que el ácido contacte con el catalizador se emplea el teflón, utilizando además sus características hidrofóbicas. Para evitar la sobredifusión de los gases en la capa de catalizador, ésta posee una alta capilaridad en la zona adyacente a la matriz donde se encuentra el electrolito.

La actividad del Pt depende de la clase del catalizador, de su talla y de la superficie de contacto. El tamaño de los cristales de Pt es de 20 amstrongs. El espesor de la capa porosa de catalizador es de 0.1 mm.

Las funciones del carbón como soporte son:

- dispersar el Pt
- proveer de numerosos microporos al electrodo
- incrementar la conductividad eléctrica de la capa de catalizador

Sustrato

El sustrato del electrodo, que actúa como material de refuerzo adyacente a la capa de catalizador, permite el paso de electrones además de los gases reactivos. Desde el punto de vista del rendimiento, el sustrato debería ser:

- estable bajo las condiciones de trabajo y de la naturaleza del ácido fosfórico
- electrónica y térmicamente conductivo
- poroso, para que el reactante pueda difundirse efectivamente
- mecánicamente fuerte bajo condiciones de trabajo presurizado

A la temperatura de trabajo, el ácido fosfórico es muy corrosivo, por lo que utiliza como material carbón grafitizado.

Los sustratos son fabricados por moldeo de fibras de grafito, seguido por un cocimiento y estructuramiento a alta temperatura. La porosidad es del 60-65% y la talla del poro es de 20 - 40 μm de diámetro.

Los sustratos porosos también tienen la habilidad para reservar ácido. La estructura de sustrato acanalado es la utilizada por este fin. El espesor del sustrato es de 1.5 mm. El espesor de los acanalamientos es de 0.7 mm.

Ácido fosfórico

El ácido utilizado como electrolito es el fosfórico por las siguientes razones:

- buen rendimiento bajo condiciones de alta temperatura
- tolerancia al CO_2
- baja presión de vapor
- alta solubilidad para el O_2
- buena conductividad iónica a alta temperatura
- baja velocidad de corrosión a altas temperaturas

El ácido fosfórico es incoloro, viscoso y un líquido higroscópico, es decir, que absorbe humedad. El ácido no está libre en la celda sino que está contenido en una matriz porosa fabricada de SiC. El ácido fosfórico tiene un punto de solidificación de 42°C , por eso a temperatura ambiente el ácido fosfórico contenido en la matriz se solidifica, lo que incrementa su volumen. Este aumento de volumen se puede producir según las condiciones de carga y de descarga. Este cambio de volumen puede dañar los electrodos y la matriz, produciendo una baja en el rendimiento de la celda. Entonces es necesario que la temperatura de la celda no baje nunca de la temperatura de solidificación del ácido fosfórico.

Matriz

El ácido fosfórico está contenido en la matriz propiamente dicha. La función de la matriz es contener el ácido fosfórico por acción capilar. La matriz normalmente usada está

compuesta SiC (carburo de silicio) con una pequeña cantidad espolvoreada de PTFE (politetrafluoroetileno, llamado teflón)

El espesor de la matriz deberá ser lo más pequeño para así minimizar la resistencia interna. El espesor es de 0.15 mm.

Los requerimientos básicos de la matriz que contiene el ácido fosfórico son los siguientes:

- Elevada acción capilar para retener el ácido
- Prevenir el cruce de los gases dentro de la celda
- Estabilidad química a elevadas temperaturas
- Alta conductividad térmica
- Suficiente resistencia mecánica

La estructura de la matriz corriente puede cumplir todas estas condiciones exceptuando la de resistencia mecánica.

La presión de vapor del ácido fosfórico es muy baja, lo que no impide que este se vaya evaporando después de muchas horas de funcionamiento. Ésta disipación depende de la velocidad de los gases y de la densidad de corriente.

Las celdas de sustrato acanalado con un 40% de ácido se evaporarían después de 40000 h de trabajo continuo con unas condiciones de trabajo como son: presión de 8.2 bar y 205 ° C de temperatura.

Como se sabe la matriz está situada entre el ánodo y el cátodo. Así pues, la matriz tiene un rol de prevención del cruce de los dos gases reactantes que son alimentados a ambos electrodos bajo unas condiciones de operación. La diferencia de presión, en alguna variación de las condiciones, entre los electrodos de unos milímetros de agua, debería, la matriz, de ser capaz de restituir esa diferencia de presión de una forma mecánica. Éste es el gran inconveniente de la matriz pues sólo soporta una caída de presión de 1000 mm. de agua.

Separadores

La característica principal de los separadores es la de impedir la mezcla del gas rico en H₂ del ánodo con el aire del cátodo de la celda contigua, además de conectar a dos celdas eléctricamente.

Los requerimientos de los electrodos se exponen a continuación:

- Suficiente impermeabilidad para prevenir la mezcla de los gases
- Estabilidad química a alta temperatura y presión, además de soportar las propiedades químicas del ácido fosfórico.
- Alta conductividad eléctrica y térmica
- Elevada resistencia mecánica.

El material utilizado en la fabricación de los separadores es carbón vítreo o un polímero de carbón. El espesor de los separadores no debe ser muy elevado, para que no disminuya su conductividad. El espesor es de 0.5mm.

Sistema de entrada múltiple

La estructura de los alimentadores gaseosos debe ser capaz de proveer los dos reactantes a la alimentación de la celda.

Los criterios de diseño son:

- La caída de presión debe ser la mínima
- Debe ser química y mecánicamente estable
- Aislante eléctrico

4.5 Costos y Eficiencia

Costos

Actualmente las celdas de combustible son una tecnología experimental. Por lo tanto, cada sistema es construido utilizando materias producidas en pequeñas cantidades. Sin embargo las celdas de combustible PEM, tienen una mayor demanda por parte de la industria automotriz, por lo que pueden costar hasta 20 dólares estadounidenses por watt producido. Con el mejoramiento de la tecnología y producción a gran escala de las celdas de combustible, el costo se rebajará considerablemente. Tal es el caso de la compañía Dupont que ha anunciado una nueva estructura para establecer los precios del polímero usado en celdas de combustible PEM así como en los catalizadores. Esta estructura está basada en los volúmenes de material necesario para la producción anual de celdas de combustible actualmente. El precio futuro de la membrana podría ser tan bajo como \$ 10 dólares / kW dependiendo de los volúmenes de producción y del desempeño de la celda

de combustible y podría ir a valores menores a medida que nuevos procesos y productos a base de celdas de combustible PEM son desarrollados. Los costos de la membrana son al momento una parte importante en los costos de los arreglos de las celdas PEM.

A la fecha, los costos por kW de la tecnología de celdas de combustible en general disminuyen cada vez más hacia valores altamente competitivos dependiendo de su capacidad y aplicación.

Eficiencia

Las celdas de combustible no están limitadas por el ciclo de eficiencia de Carnot de motores térmicos. Una celda de combustible es eficiente independiente de su tamaño y nivel de rendimiento. Las celdas de combustible pueden ser operadas a potencia nominal, manteniendo altas eficiencias. Casi todas las plantas de celdas de combustibles funcionan en modo de cogeneración, debido a que son limpias y a sus altos grados de generación de calor.

Es posible mantener eficiencias relativamente constantes, ya que dada la modularidad con la que están construidas, ante posibles fallas se emplea muy poco tiempo en cambiar los módulos; es decir, existe un tiempo rápido de reparación.

Particularmente, en lo que respecta a las celdas de combustibles de ácido fosfórico (PAFC), tienen una eficiencia de conversión eléctrica del 41% con una razón de calor de 8535 BTU / kWh. Las celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad utilizando gas natural a más de 40% de eficiencia y cerca de 85% si el vapor que produce se emplea en cogeneración, comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna.

Las plantas de Carbonatos Fundidos pueden alcanzar eficiencias eléctricas de 50%, que es considerablemente mayor a las logradas por las plantas de celdas de ácido fosfórico.

Análisis y operaciones experimentales con plantas de SOFC muestran que estas pueden alcanzar rendimientos de un 50% o 60%. Este tipo de celda utiliza un arreglo de tubos de un metro de longitud, cuya disposición permite alcanzar mayores eficiencias (unidad Siemens Westinghouse), mientras que otras variaciones incluyen un disco comprimido, semejando la parte superior de una lata de sopa y ofrecen ventajas potenciales de fabricación y eficiencia. Esta facilidad de morfología es producto de poder

vaciar el material sólido en diferentes formas durante la fabricación haciéndolas, por ejemplo, planares, tubulares o monolíticas. Su eficiencia es mayor a 80% cuando el calor producido es empleado en cogeneración.

4.6 Operación de la tecnología de celdas de combustible

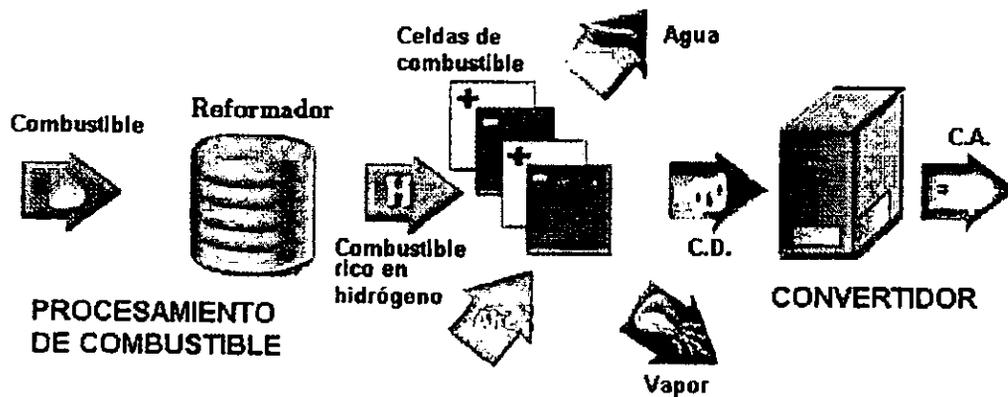
4.6.1 Plantas estacionarias

La emisión para una planta de 200 kW de PAFC es baja (del orden de 1 lb/MW diaria de óxidos de Nitrógeno y de sulfuro). Una planta de 200 kW PAFC tiene un encendido en frío de alrededor de 5 horas. El sistema operacional completo requiere una área libre de 84 metros cuadrados. La unidad acondicionadora de poder y el proceso de ventilación son las principales fuentes de ruido en estas plantas. El máximo nivel de ruido está estimado en 60 db a 90 m de la unidad.

Las celdas de carbonatos fundidos pueden operar desde un 25 a un 125 % de sus valores nominales. Una planta de 2 MW tendrá una superficie de 511 metros cuadrados y puede ser considerada tanto para instalaciones exteriores como interiores. Necesita más de 16 horas para alcanzar su potencia nominal de salida desde una partida en frío. Una pequeña cantidad de agua es requerida para su funcionamiento. No emite prácticamente partículas y las emisiones de SO_x y NO_x son extremadamente bajas.

En las celdas de óxido sólido (SOFC), la temperatura de los gases expulsados de las celdas van de 500 a 850° C, valores muy atractivos para realizar una cogeneración o para usos de ciclos combinados. En ellas, el hidrocarburo alimentado puede ser reformado dentro de la celda. Además, poseen muy pocas emisiones; debido a la remoción del sulfuro del combustible, no se emiten partículas de SO_x , así como el no paso de Nitrógeno por el electrolito impide la formación de NO_x , además de que las temperaturas de emisión no son altas, los niveles de emisión de estas partículas no superan los 0.5 ppm. (Westinghouse)

En forma práctica, cualquier tipo de plantas de potencia de celdas de combustibles están constituidas por tres subsistemas:



- Subsistema de Procesamiento de Combustible: convierte el combustible en gas rico en Hidrógeno. Acepta, como ya se dijo, diferentes combustibles, como hidrógeno, gas natural, propano, metanol y gas de carbón.
- Subsistema de Apilamiento: Aquí es donde ocurre el proceso electroquímico y la corriente eléctrica continua es producida
- Convertidor de Poder Estático: Este sistema convierte la corriente eléctrica continua en corriente alterna.

4.6.2 Plantas móviles

Los vehículos impulsados por celdas de combustible representan una posibilidad muy prometedora para el transporte del futuro. Desde hace varios años, la industria automotriz está centrando sus esfuerzos en el desarrollo de esta tecnología como respuesta, en gran medida, a los problemas de contaminación en las ciudades. Sus ventajas: no emiten partículas contaminantes, ahorran combustible y son silenciosas. El único desafío pendiente para su masificación es bajar el costo de su producción. Podrían reemplazar a los motores de combustión interna en automóviles, autobuses, camiones y aún en embarcaciones y locomotoras.

Las Celdas de Combustible podrían dar la potencia del auto del mañana; más limpios, silenciosos y más eficientes que los autos a gasolina y con un mayor rango y menores tiempos de recarga de combustible que los autos eléctricos movidos por

baterías. Los beneficios serían extraordinarios en términos de seguridad de energía, aire limpio y la creación de cientos de miles de empleos.

Una de las ventajas de la celda de combustible es que no tiene partes móviles, por lo que se reducen considerablemente las partes mecánicas del vehículo que la use. Al ser productoras de electricidad esta se envía directamente hasta los ejes de las ruedas donde un motor eléctrico acoplado las hace girar. Quedan entonces obsoletos los cardanes, cajas de cambio, diferenciales y un sinnúmero de otros componentes mecánicos. Al reducirse la cantidad de componentes mecánicos del automóvil se disminuye también la cantidad de mantenimiento que requiere el vehículo. Gran parte de las costosas fallas y reparaciones de los autos de hoy se deben precisamente a los componentes mecánicos que tienen, los que fallan debido a los esfuerzos a los que son sometidos. Un vehículo de celda de combustible tendrá entonces una proporción mucho menor de partes y piezas mecánicas.

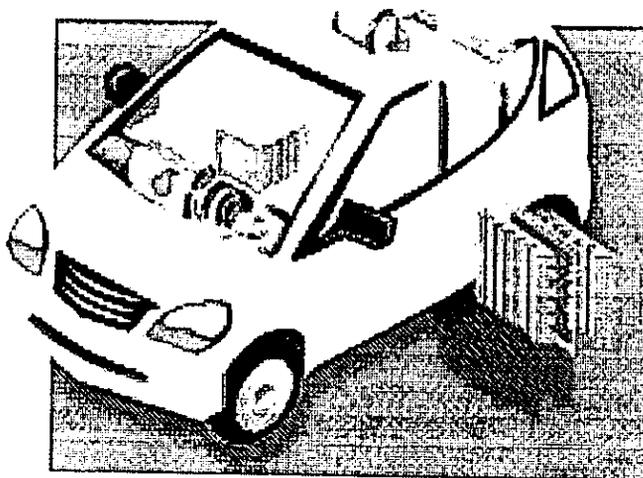
El vehículo a hidrógeno será silencioso y seguro. Por ser vehículos eléctricos dispondrán de incrementos continuos de energía por lo cual las cajas de cambio estarán obsoletas o, por decirlo así, será como si todos los vehículos de esta clase fueran de cambio automático. Por ser vehículos cuyos motores eléctricos estarán directamente en el eje de las ruedas, será equivalente a disponer de vehículos de tracción en las cuatro ruedas.

De resultar exitoso, las celdas de combustible posiblemente también acabarán con los esfuerzos, hasta ahora vanos, por masificar los autos eléctricos. Ello, porque estos últimos presentan un problema difícil de solucionar: las horas que requieren para volver a ponerse en funcionamiento una vez que la batería se ha descargado (entre 2 y 8 horas).

Los automóviles alimentados con celdas de combustible están constituidos por las siguientes partes:

- Tanque de combustible. El vehículo transporta metanol o gasolina. El tamaño del tanque es casi proporcional al de los autos de hoy.
- Procesador de combustible. Se extrae hidrógeno puro del metanol o de la gasolina gracias a un procesador de combustible (reformador).

- Central de poder. El poder eléctrico de la planta consiste en un grupo de celdas de combustible almacenadas en orden. El número de celdas determina el rendimiento del automóvil.
- Motor eléctrico. Los vehículos a celdas de combustible usarán motores electrónicos y eléctricos, similares a los autos que funcionan con una batería.



4.7 Aplicaciones de las celdas de combustible. Estado actual

4.7.1 Aplicaciones Estacionarias

Uno de los países que más desarrollo tiene en celdas de combustible son los Estados Unidos de América, tan sólo el Departamento de Energía de ese país, gasta alrededor de 300 millones de dólares en desarrollo de celdas de combustible para aplicaciones de tipo estacionario, además son varias las compañías que actualmente desarrollan y comercializan este tipo de plantas. A continuación se presentan algunas de estas compañías y sus trabajos e inversiones más relevantes en relación a las celdas de combustible:

- La compañía canadiense Sistemas de Potencia Ballard ha recibido una orden de pedido de Cinergy por \$1.625 millones de dólares para proveer a esta última compañía con una planta de generación eléctrica a base de celdas de combustible, tipo

estacionaria alimentada con gas natural, de 250 kW convirtiéndose esta planta en el primer intento de Ballard para un producto de esta clase en campo.

- La compañía Power Technologies Corporation (PTC) de California y la Rocket Space Corporation (RSC) de Rusia lanzaron un esfuerzo conjunto para comercializar celdas de combustible para mercados de aplicaciones estacionarias. Están desarrollando unidades que operarán con gas natural, propano, diesel, y para aplicaciones de energía distribuida, así como unidades para alimentar equipo de desalinización de agua de mar.

- La compañía americana Gemicrogen recientemente introdujo al mercado su HomeGen 7000 que es un sistema de celdas de combustible diseñado para una casa habitación capaz de proveer 7 kW continuos de energía eléctrica el cual funciona con gas natural o gas LP.

Otro de los países que cuenta con desarrollos importantes de celdas de combustible para aplicaciones estacionarias es Japón, actualmente este país trabaja en prototipos de 5 kW a 5 MW de capacidad. El gobierno japonés financia con 1/3 de los fondos necesarios para continuar estos proyectos. Entre las compañías que se encuentran desarrollando esta tecnología se encuentran: Toshiba, Fuji, Mitsubishi, y Hitachi.

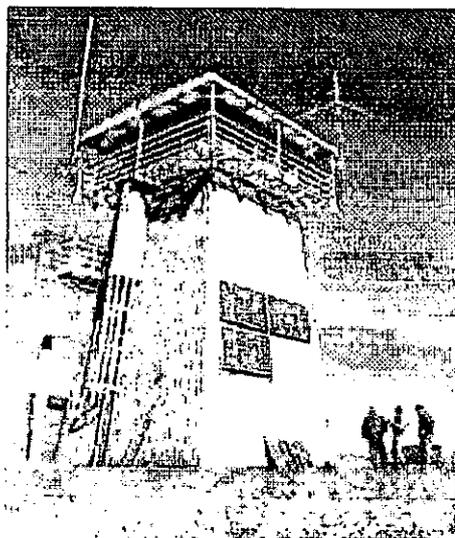
- Mitsubishi desarrolla una planta generadora de 200 kW de celda de combustible tipo MCFC, será construida para demostración y prueba por parte de Kansai Electric Power Company, la cual es parte de un consorcio japonés encargado de desarrollar sistemas de potencia. Mitsubishi espera desarrollar eventualmente un sistema MCFC a gran escala.

- La compañía Sanyo Electric Co., está apuntando hacia la comercialización de celdas de combustible que puedan ser usadas en sistemas de cogeneración para uso en hogares y tiendas. Sanyo empezó a desarrollar celdas de combustible tipo PEM para uso residencial desde 1996. Las unidades generadoras de 1 kW podrán usar hidrógeno extraído de gas natural.

Un caso de aplicación

El SERC (Centro de Investigaciones de Energía Schatz), ubicado en la costa norte del Estado de California, E.U.A. diseña y construye celdas de combustible utilizando la tecnología de Membranas de Intercambio Protónico (PEM). Ha construido un sistema de celda de combustible que provee energía confiable durante todo el año para una estación de telecomunicaciones en un sitio aislado. Esta estación provee servicio telefónico a una población en el norte del Estado de California, E.U.A.

Los miembros de esta población, como en cualquier otra parte del mundo requieren del servicio telefónico. Pero en su remota aldea, en el corazón del valle del río Klamath, obtener ese servicio no ha sido fácil. Alejados de las líneas telefónicas y las estaciones emisoras de telefonía celular, la opción más confiable para establecer el servicio telefónico es la instalación de una serie de transmisores de microondas, que puedan llevar las señales telefónicas. Sin embargo, fue necesario ubicar la emisora más importante de la cadena en la cima de la montaña a varios kilómetros de las líneas eléctricas.



Dado que la administración del parque prohíbe el uso de generadores que usan combustibles de petróleo dentro del parque, y que la energía solar no sería suficiente

durante los largos períodos oscuros y lluviosos del invierno, fue necesario escoger una fuente alternativa de energía, una celda de combustible.

La emisora de microondas está ubicada en una torre usada para la detección de incendios forestales. Esta emisora usa 100 volts, igual que una bombilla eléctrica. Durante el día, los módulos solares proveen la energía, almacenando el exceso en baterías. Durante los largos períodos nublados, cuando no hace suficiente sol y las baterías se descargan, se enciende la celda de combustible.

El sistema de la celda de combustible está ubicado dentro de la torre. Cuando la celda de combustible está funcionando, produce suficiente energía para apoyar a la emisora de microondas y recargar las baterías. El hidrógeno se almacena en 12 tanques industriales conectados con un colector de escape. La misma celda de combustible, es una pila relativamente pequeña de 32 celdas.

Los tanques que almacenan el hidrógeno se rellenan desde un camión después de cada 1000 horas de operación, o sea, aproximadamente cada dos meses en el invierno. En el verano, se espera que los módulos solares suministren la mayor parte de la energía. El sistema fue encendido por primera vez en octubre 1999. En sus primeros cinco meses el sistema funcionó sin fallas, acumulando más de 2000 horas en operación, con una eficiencia neta de 49%. Además, la celda de combustible mantiene las baterías a un nivel de carga de por lo menos 50%, extendiendo así su vida útil.

En comparación con un generador de combustible de petróleo, normalmente usado en esta aplicación, la celda de combustible es un avance tecnológico importante. El generador consume petróleo y produce contaminación. Si se produjera una fuga de la gasolina, contaminaría el suelo y el agua. En cambio, la celda de combustible consume hidrógeno y produce agua y electricidad solamente. Si fugara el hidrógeno, éste ascendería sin peligro hasta la capa atmosférica superior sin contaminar el agua ni el suelo, porque el hidrógeno es más liviano que el aire. La celda de combustible tiene una eficiencia de 50% en la conversión de energía de combustible a electricidad, en comparación con 15% de eficiencia en el generador. En contraste con el ruido que produce el generador (como cualquier motor de gasolina), la celda de combustible funciona silenciosa y limpiamente, sin emitir ninguna contaminación en el ambiente puro del Parque Nacional.

4.7.2 Aplicaciones en el Transporte

El sector del transporte parece ser un mercado potencialmente grande para la implementación de las celdas de combustible. Son varias las compañías que actualmente se encuentran desarrollando proyectos, a continuación se mencionan algunas de ellas:

- General Motors presentó un modelo avanzado de automóvil que utiliza celdas de combustible, el motor híbrido, sería alimentado de metanol, alcanzaría un nivel de emisiones de casi cero y tendría un rango de alcance de 483 km y una economía de combustible de 33 kilómetros por litro.

- Chrysler también presentó un modelo a escala real de un vehículo movido a base de un sistema de celdas de combustible que podría emplear gasolina. El sistema de las celdas de combustible emplea un reformador del combustible, el cual convierte gasolina y otros combustibles líquidos en hidrógeno. Tiene la intención de tener un auto trabajando y listo para su comercialización para el año 2015.

- Daimler-Benz, dio a conocer, en mayo de 1996, su vehículo a base de celdas de combustible de segunda generación, un vehículo tipo Van llamado NECAR II y en octubre de 1997 dio a conocer NECAR III, recientemente presentó el NECAR IV, alimentado con metanol para su celda de combustible, puede ser uno de los primeros que lleguen al mercado. Recientemente, presentó un autobús, el NEBUS (New Electric BUS) equipado con celdas de combustible que operan con hidrógeno almacenado, el autobús es capaz de desarrollar 275 CP, lo cual le permite transportar a unos 60 pasajeros con una autonomía de 400 km. En las ciudades Vancouver y Chicago se concluyó la fase de demostración de esta tecnología con excelentes resultados por lo que la comercialización de este producto se estima comience en el año 2002. Daimler ha comprometido \$725 millones de dólares en su participación junto con Ballard para investigación en celdas de combustibles que usan metanol como combustible. Estas compañías esperan tener un vehículo a base de celdas de combustible comercialmente viable y producir unos 100,000 motores al año para el 2003-2004. Este automóvil tendrá una autonomía superior a los a 450 km con un tanque de 40 litros con la capacidad de alcanzar una velocidad de 144 km / h.

- Toyota presentó un vehículo que utiliza celdas de combustible. El auto corrió abastecido de hidrógeno almacenado a bordo en forma de hidrógeno sólido, en un "tanque" de una aleación capaz de absorber hidrógeno desarrollada por Toyota. Para la aceleración Toyota usa un sistema híbrido basado en baterías. Recientemente presentó una nueva versión de su vehículo alimentado con metanol. Este auto es operado con una celda de combustible tipo PEM empleando un reformador de combustible y tiene un rango con tanque lleno de 500 km.

- Mazda desarrolló un auto a base de celdas de combustible, éste está diseñado para alcanzar una velocidad máxima de 90 km/h y un rango de 170 km con un tanque de hidrógeno lleno.

- La compañía ZEVCO ha recibido una orden de compra por parte del municipio de Westminster, Londres de la primera de varias Vans híbridas con baterías, movidas por celdas de combustible alcalinas. La primera Van programada para su entrega en Abril del 2002, costará aproximadamente unos \$ 67,000 dólares. Este municipio planea montar dos estaciones de re - abastecimiento de hidrógeno y podría hacer pedidos por otras 20 a 50 Vans a un precio esperado de alrededor de la mitad del precio original.

La idea de todas estas compañías es lograr abaratar los costos y contar con este tipo de autos en las calles, antes de que termine la próxima década. Si se toma en cuenta que cuando comenzaron las investigaciones hace 10 años, los costos alcanzaban los \$ 3 millones de dólares por vehículo, no es imposible pensar que para el 2004 el precio de estos autos sólo alcance los \$ 3,000 dólares.

Un caso de aplicación

El Proyecto de Transporte Palm Desert del SERC, fue establecido para demostrar un sistema completo y práctico de vehículos impulsados por celdas de combustible. Desde la generación limpia de hidrógeno, utilizando módulos solares, hasta vehículos impulsados por celdas de combustible sin emisiones en absoluto, este proyecto representará el futuro del transporte actual.

Este proyecto busca desarrollar un sistema de transporte sano y sustentable para la comunidad. El proyecto demuestra la utilidad práctica del hidrógeno como combustible

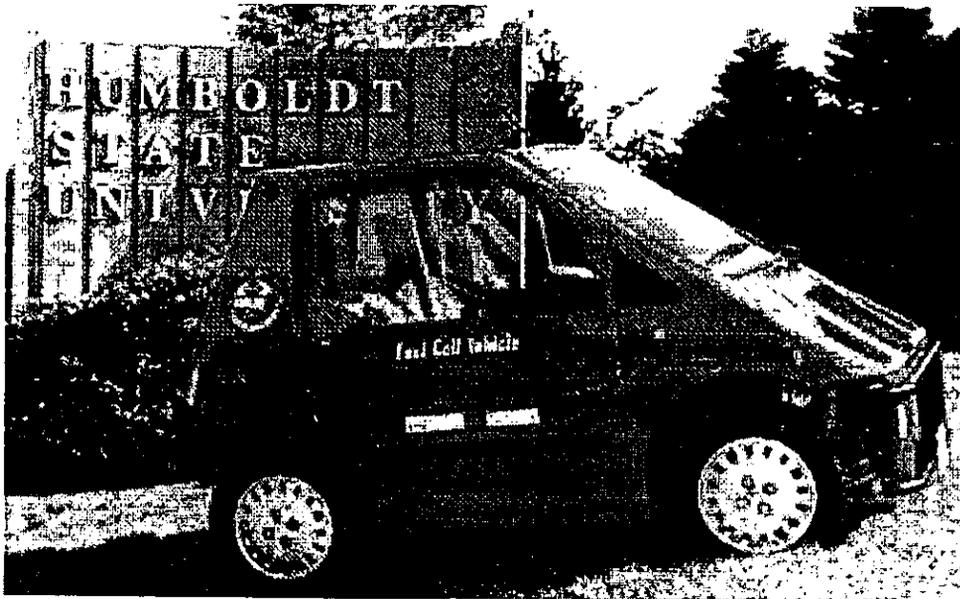
para el transporte, y el valor de la celda de combustible de membrana de intercambio protónico como sistema de energía vehicular.

Abarca el ciclo entero de la energía, desde la producción hasta su uso último, el transporte. Un arreglo de módulos solares generará electricidad para operar un equipo de electrólisis que producirá hidrógeno a partir del agua. El hidrógeno se comprimirá y se bombeará hacia la estación de relleno de tanques para usarlo en vehículos motorizados. El SERC provee a la Ciudad de Palm Desert con una flotilla de tres vehículos de utilidad personal (potencia: 5 kW, velocidad máxima: 19.2 km/h, alcance: 26 km) y un vehículo eléctrico para trayectos cortos (potencia: 9 kW, velocidad máxima: 56 km/h, alcance: 48 km), impulsados por celdas de combustible e hidrógeno que manejan diariamente los empleados de la Ciudad. El 24 de abril de 1998 se estrenó el carro del SERC, que se integró a la flotilla. Ahora están trabajando en la construcción de una planta de generación de hidrógeno utilizando energía solar y una estación de abastecimiento de tanques para vehículos.

Los vehículos de celda de combustible tienen un mayor alcance que los vehículos eléctricos que usan baterías y se rellenan en pocos minutos (en contraste con las baterías que necesitan varias horas para recargarse). Son verdaderos vehículos de cero emisiones, su combustible de hidrógeno se elabora por medio de la energía limpia solar o eólica, y sus emisiones consisten solamente en agua.

En Abril 21 de 1998, el centro de investigación de energía Schatz, lanzo un auto compacto para dos personas, este funciona con hidrógeno almacenado a bordo, puede ser re-abastecido de combustible en 2 minutos y tiene un rango de alcance de 48 km con una velocidad máxima de 56 Km/h.

Las celdas PEM son los principales candidatos para vehículos ligeros.



Vehículo Eléctrico Para Trayectos Cortos

Especificaciones:

Combustible.....	Membrana de Intercambio Protónico
Potencia de la Celda de Combustible.....	9.0 kW @ 600mV/celda (12.2 caballos)
Cantidad de Celdas.....	96
Temperatura Operativa de la Celda de Combustible.....	50-65° C
Presión de Almacenaje de Gas.....	21,000 kPa
Volumen del Tanque de Hidrógeno.....	31.1 litros
Alcance.....	48 kilómetros
Tiempo Requerido para Rellenar el Tanque.....	2 minutos
Potencia del Motor Eléctrico.....	7.5 kW (10 caballos)
Velocidad Máxima.....	56 kilómetros por hora
Fabricante Original del Vehículo Convertido.....	Kewet (de Dinamarca)



Vehículo de Utilidad Personal

Especificaciones:

Clase de Celda de Combustible.....	Membrana de Intercambio Protónico
Potencia de la Celda de Combustible.....	4.0 kW (5.4 caballos)
Cantidad de Celdas.....	64
Temperatura Operativa de la Celda de Combustible.....	50-60° C
Peso del Sistema de Celda de Combustible.....	440 kilogramos
Potencia del Motor Eléctrico.....	1.5 kW (2.0 caballos)
Velocidad Preferida.....	19 kilómetros por hora
Potencia Neta de la Celda a la Velocidad Preferida.....	1.8 kW (2.4 caballos)
Volumen del Tanque de Hidrógeno.....	14 litros
Presión de Almacenaje de Gas.....	14,000 kPa
Alcance.....	41.8 kilómetros
Tiempo Requerido para Rellenar el Tanque.....	2 minutos

4.7.3 Energía Portátil

- Las celdas de combustible se están aplicando también en otros campos, pues en Estados Unidos de América se creó una celda de combustible miniatura la cual funciona con metanol para proveer de energía a equipo electrónico portátil. Energy Related Devices recibió \$1 millón de dólares del Manhattan Scientifics para desarrollar un prototipo este año, con producción comercial para el mercado de teléfonos celulares. Una y media onzas de metanol para la celda de combustible del teléfono celular darían un tiempo de conferencia efectivo de 100 horas.

- El sistema "Stack-In-A-Box™" es un generador de energía completamente portátil, diseñado y hecho a la medida por el laboratorio SERC. Fue diseñado para su uso por un grupo de estudiantes de la academia Merit en Santa Cruz, California, EUA.

Es una celda de combustible diseñada como fuente de energía para hacer funcionar una máquina de helados, pero se ha usado también para una licuadora, un televisor, una videograbadora, y una computadora. Se ha utilizado este sistema portátil para demostrar que las celdas de combustible se operan fácilmente y con seguridad. Algunos estudiantes usan el sistema para enseñar la operación de esta celda de combustible en todo el mundo y mostrar las posibilidades que nos presentan las celdas de combustible y la energía renovable.

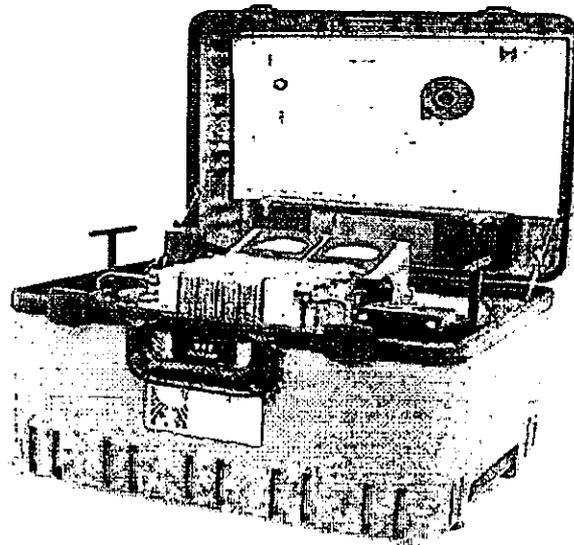
En este sistema, el hidrógeno almacenado en un pequeño cilindro se provee a una membrana de intercambio protónico para producir electricidad en corriente continua. Este diseño (recién patentado) de baja presión de aire asegura una alta eficiencia del sistema de celda de combustible. Un pequeño invertidor de voltaje convierte la electricidad del sistema de 12 voltios corriente continua a 110 voltios corriente alterna para utilizarla con cualquier electrodoméstico.

El electrodoméstico preferido para las demostraciones es la máquina para hacer helados. Un pequeño cilindro de hidrógeno (56 litros estándares/0,5 litros comprimidos) dura aproximadamente una hora y media, suficiente para elaborar tres porciones (cantidades) de helados. El "Stack-in-a-Box" es fácil de usar y los estudiantes de la academia Merit lo han usado numerosas veces con un record perfecto en seguridad y funcionamiento.

El sistema de 15 celdas PEM tiene una capacidad máxima de 250 volts, suficiente para impulsar una variedad de electrodomésticos. El sistema es portátil e independiente.

No es necesario estar en el laboratorio para utilizarlo. El sistema puede proveer electricidad donde sea y en cualquier momento. El mayor reto que aún queda es el costo.

Los materiales para elaborar el "Stack-in-a-Box" costaron 10,000 dólares. Todos los prototipos desarrollados en el laboratorio han resultado muy costosos. El mejoramiento en las técnicas de fabricación y automatización, el mejoramiento en los diseños, las ventajas económicas de comprar los componentes en gran escala y la producción masiva se reunirán para rebajar el costo de los sistemas de producción de celdas de combustible.



4.8 Sistema de turbina avanzada vs tecnología de las celdas de combustible.

Los mayores avances en generación de energía eléctrica a partir de tecnologías convencionales están representados por aquellos surgidos del programa ATS (Advanced Turbine Systems), sistemas modernos de turbina del Departamento de Energía de los Estados Unidos para sistemas de generación de ciclo combinado. Dichos avances han alcanzado límites históricos al conseguir diseños de sistemas de turbinas a gas con eficiencias que prometen mejoras de 15% en sistemas industriales, mientras que centrales de potencia utilizando sistemas de ciclo combinado (sistemas con dos o más fuentes de electricidad a partir del mismo combustible) podrán alcanzar valores alrededor de 55% de eficiencia térmica neta. Estos sistemas modernos operarán a costos 10% menores que los actuales sistemas y reducirán los niveles de NO_x, CO₂, CO, e hidrocarburos no quemados según proyecciones del mismo ATS. A pesar de esto, dichos avances están alcanzando los límites de temperatura de operación de los materiales actuales debido a que la eficiencia del sistema a turbina depende de la temperatura de entrada de los gases, limitada por el daño potencial de los álabes de la turbina misma. A diferencia de estos sistemas avanzados, la eficiencia en las celdas de combustible no está limitada por la temperatura. Desde la perspectiva de gases de efecto invernadero, las celdas de combustible representan un desarrollo potencialmente revolucionario, ya que en lugar de utilizar combustión para generar electricidad utilizan la reacción electroquímica entre el hidrógeno del combustible y el oxígeno del aire para producir electricidad, agua y calor. Es también cierto que cuando una celda de combustible utiliza hidrocarburos como fuente de hidrógeno (gas natural, metanol, etcétera) generalmente requerirá una etapa de reformación para extraer el hidrógeno, lapso durante el cual producirá CO₂.

No obstante, gracias a su capacidad de obtener altas eficiencias de conversión combustible / electricidad, las celdas de combustible producen menor cantidad de CO₂ que cualquier tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar electricidad, por lo que las emisiones de este gas por kWh producido son mucho menores en las celdas de combustible, que los valores prometidos, por ejemplo, por los sistemas avanzados de turbina tanto en los sistemas actuales como en los sistemas proyectados en los próximos años de ambas tecnologías.

Comparación entre tecnologías avanzadas de turbina y las tecnologías de celdas de combustible.

	Primera generación (2000-2010)		Generación avanzada (posterior 2010)	
Tecnología avanzada	Eficiencia combustible / electricidad (LHV)	Reducciones en CO ₂	Eficiencia combustible/electricidad (LHV)	Reducciones en CO ₂
Sistemas avanzados de turbina	60%	19%	65%	18%
Celdas de combustible	70%	32%	70%	27%

1 LHV: (Lower Heating Value). No se considera condensación del agua (10.54 kcal/mol).

2 Las reducciones de CO₂ son comparadas con tecnologías convencionales usadas en plantas que queman gas natural (2.2 kg CO₂ / kWh en 2004 y 2.03 kg CO₂ / kWh en el 2010).

3 Las reducciones relativamente menores posteriores al 2010 se deben a que las tecnologías avanzadas están siendo comparadas con proyecciones de mejora en tecnologías convencionales a gas natural en el mismo marco de tiempo.

Fuente: Boosting Power Plant Efficiency, Departamento de Energía de los Estados Unidos, Energía de Origen Fósil, 1998.

Otra diferencia fundamental es la alta flexibilidad que tienen las celdas para aceptar una gran diversidad de combustibles, lo cual las ubica como una tecnología que permite una transición hacia tecnologías limpias y el uso de fuentes de energía renovables. Las celdas de combustible ya se consideran como elementos clave para sistemas híbridos que las integran, junto con tecnologías avanzadas de turbinas, en donde se espera que para el año 2010 operen a eficiencias del 80%. No sólo son las tecnologías convencionales las que pueden beneficiarse de las ventajas de las celdas de combustible, también otros sistemas basados en fuentes renovables de energía pueden integrarlas en sistemas híbridos en donde, por ejemplo, se alimente biogás a la celda o bien celdas fotovoltaicas alimenten un electrolizador (celda electroquímica comercial de generación de hidrógeno y de eficiencias entre 60 y 85%) para generar hidrógeno y alimentar la celda de combustible. Estos sistemas híbridos mantendrían relaciones costo / beneficio en niveles interesantes gracias a las altas eficiencias de conversión de

las celdas de combustible, lo cual significaría otro atractivo para impulsar un mayor desarrollo de tecnologías como la solar, la biomasa, la eólica, etcétera, que desafortunadamente pocas veces se consideran soluciones para demandas crecientes, limpias y eficientes de energía eléctrica.

4.9 Situación nacional

México, como país en desarrollo, presenta uno de los crecimientos en demanda de energía eléctrica más altos con valores de 5.8 a 6% anual. Las estrategias energéticas actuales requieren un mejor uso de combustibles (tecnologías más eficientes). Las políticas ambientales cada vez más estrictas en todo el planeta exigen pronta solución a los problemas de contaminación y demandan niveles de emisiones cada vez más bajos.

La inestabilidad de los precios del petróleo están forzando a países como el nuestro a estimular una economía menos dependiente de este energético, mientras que, a su vez, países compradores del petróleo ven en las celdas de combustible una solución a la búsqueda de independencia energética a corto y mediano plazos. Por ejemplo, el Departamento de Energía de los Estados Unidos proyecta que si 10% de los autos de ese país usaran celdas de combustible, se reducirían unos 800 mil barriles diarios de las importaciones de petróleo alrededor de 13% del total que ese país importa. Sabiendo que en 1998 México exportó cerca de 1.4 millones de barriles diariamente y considerando un precio de 20 dólares por barril, el uso de celdas de combustibles en Estados Unidos implicaría que nuestro país estaría perdiendo 28 millones de dólares diarios. México tiene a los Estados Unidos como su principal comprador del hidrocarburo, el cual destina millones de dólares anuales en la tecnología de celdas de combustible buscando tanto su independencia energética como, obviamente, conservar su liderazgo tecnológico. Las reservas oficiales mexicanas de petróleo son de alrededor de 40 mil millones de barriles, esto es, petróleo para 30 años y se podría duplicar su duración al emplear una tecnología como las celdas de combustible al disminuir el consumo nacional actual de casi dos millones de barriles diarios reportado para 1998, en la generación de energía eléctrica, así como en nuestros autos e industria (si se considera que estos son los sectores principales de consumo del hidrocarburo). Por otra parte, el uso más eficiente de gas natural puede ayudar a reducir las importaciones del mismo (que se proyecta aumentarán para el 2003 cuando México reduzca sus impuestos actuales de 4 % sobre

dicho energético). En relación con los beneficios ambientales y por lo tanto de salud, en Estados Unidos se proyecta que si tan sólo 10% de los autos de ese país fueran movidos por celdas de combustibles, se reduciría un millón de toneladas al año de contaminantes, y 60 millones de toneladas de dióxido de carbono (uno de los gases causantes del efecto invernadero) serían completamente eliminados. Nuestro país tiene en la ciudad de México la mayor concentración de autos movidos por motores de combustión interna, y todo indica que la quema de combustibles como la gasolina seguirá en aumento, al igual que las concentraciones de emisiones. Así, programas como el de "no circula" tendrán que ir en aumento al mismo tiempo que el número de vehículos se incremente.

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

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

En México se prevé una gran área para la aplicación de las celdas de combustible debido a problemas de contaminación en lugares con una gran aglomeración de habitantes como es el caso de la Ciudad de México. En esta ciudad se lleva a cabo un programa de autobuses de celdas de combustible que tiene como meta sustituir para el año 2020 del 80 al 90% de los autobuses diesel por celdas de combustible, asimismo contempla que para ese año el costo de este tipo de autobús pueda ser equiparable al de un diesel.

La aplicación de esta tecnología a las necesidades de nuestro País, estarán determinadas por las decisiones que analicen y discutan representantes de los gobiernos, fabricantes y la propia comunidad.

CAPITULO 5

HIDROGENO

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido que se encuentra en estado libre, en la naturaleza, en pequeña cantidad (la atmósfera contiene menos de una parte por millón de hidrógeno en sus capas inferiores). También se puede encontrar en gases volcánicos o absorbido en metales como el platino, el hierro, el cobalto o el níquel.

En estado combinado, sin embargo, el hidrógeno es un elemento frecuente, ya que está presente en los alimentos, en los tejidos de los seres vivos, en los gases combustibles naturales, en todos los ácidos y en los derivados del petróleo y, por supuesto, en el agua.

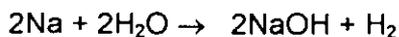
El hidrógeno ha sido un combustible confiable por varios años, desde su uso como un gas doméstico en muchas casas en el siglo XIX hasta los poderosos motores de los cohetes espaciales de hoy. Ahora, con el desarrollo de la celda de combustible, el hidrógeno tiene la gran oportunidad de convertirse en el mayor portador de energía para nuestra sociedad.

5.1 Métodos genéricos para la obtención del hidrógeno

El hidrógeno puede obtenerse por alguno de los siguientes métodos:

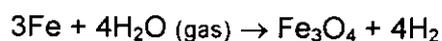
A partir del agua, mediante desplazamiento

Algunos metales, como el sodio o el potasio, son capaces de desplazar el hidrógeno del agua a la temperatura ambiente. Así, al poner estos elementos en contacto con el agua, se obtiene como resultado el hidróxido del metal correspondiente (que queda disuelto en el agua) y el gas hidrógeno, que se desprende a la atmósfera.



Mediante vapor de agua

Existen algunos metales, que, si bien no reaccionan con el agua a temperatura ambiente, sí lo hacen con vapor de agua a altas temperaturas. Por ejemplo, poniendo en contacto metales como el zinc o el hierro con vapor de agua a una elevada temperatura, se obtiene el óxido del metal y el desprendimiento de hidrógeno.



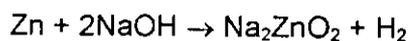
A partir de los ácidos, mediante desplazamiento

Los ácidos contienen en sus moléculas átomos de hidrógeno que pueden ser desplazados por ciertos metales. Para ello se pone el metal en contacto con una disolución del ácido, obteniéndose sulfato del metal e hidrógeno. Un ejemplo típico es el uso del hierro con ácido sulfúrico.



A partir de hidróxidos solubles

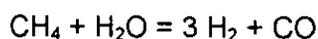
Mediante la reacción que producen ciertos metales con álcalis, puede obtenerse también desprendimiento de hidrógeno, como, por ejemplo, empleando silicio e hidróxido sódico.



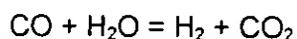
Mediante gas natural

A partir de los gases de las refinerías de petróleo o del gas natural puede obtenerse hidrógeno si se combinan adecuadamente con vapor de agua y se hacen pasar por un catalizador (por ejemplo, una mezcla de cobalto y níquel).

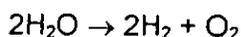
Este catalizador, a elevadas temperaturas (cerca de 900° C), hace que el metano presente en esos gases se transforme en hidrógeno y monóxido de carbono.



Estos productos, combinados con vapor de agua, se convierten en hidrógeno y dióxido de carbono al pasar a través de otro catalizador con baja temperatura.

*Por electrólisis del agua*

Si hacemos pasar una corriente eléctrica continua a través del agua, en la que previamente se haya disuelto una pequeña cantidad de algún ácido, álcali o ciertas sales que la haga conductora, se producirá un desprendimiento de gas oxígeno en el ánodo y de gas hidrógeno en el cátodo, produciendo el doble volumen de hidrógeno que de oxígeno.



Desde el punto de vista energético esta descomposición del agua en estado líquido requiere de 57 Kcal por mol (237 KJ / mol) de energía libre. Es por lo tanto una reacción fuertemente endotérmica.

5.2 Métodos para el transporte de energía a grandes distancias

Si el hidrógeno fuera el vector energético universal, su transporte desde grandes distancias sería más barato que el de su mismo equivalente energético en corriente eléctrica a través de cable.

El H₂ tiene las ventajas de poseer una tecnología de tipo comercial, su transporte es barato, se puede emplear en muchas aplicaciones y ser absolutamente no contaminante, puesto que como producto final de su combustión produce agua.

Redes de gasoductos de H₂ actualmente están en funcionamiento, en Alemania se tiene una experiencia práctica de más de 50 años en la construcción de gasoductos de H₂ a presión elevada. Hasta el momento, esta red representa la fuente de experiencia mundial más importante sobre el transporte y almacenamiento de H₂.

En todo este tiempo no se ha observado que el H₂ produjera daños sobre el material de las instalaciones. Esto último es muy importante, pues se ha hablado mucho sobre el peligro que ofrece la descarbonización del acero por formación de carburos al difundirse en H₂ dentro del acero de las tuberías. Estos resultados coinciden con la experiencia que sobre el tema se tiene y que indica que el peligro sólo existe a presiones y temperaturas muy elevadas.

El funcionamiento de una red de distribución de H₂ mediante gasoductos no difiere mucho del de una red parecida de gas natural. Toda la red se controla día y noche de modo centralizado; la temperatura, presiones y cantidades que se miden en los distintos puntos de la red se transmiten al puesto de control central.

Las conclusiones de estas experiencias coinciden con las previsiones de los expertos y son las de que el transporte de energía mediante H₂, además de ser el método más económico también es el procedimiento más seguro, puesto que no se han presentado problemas al emplear aceros normales en la construcción de gasoductos. Los resultados de la red alemana de distribución de H₂ indican que no hace falta recurrir a los caros aceros especiales.

El H₂ se puede transportar a través de tuberías, del mismo modo y con la misma finalidad que la electricidad se transporta a largas distancias a través de cables de alta tensión y después se distribuye y reparte a través de cables de baja tensión. Pero debe tenerse en cuenta que para ciertas distancias y flujos la conducción por tubería del

hidrógeno no podrá ser rentable y que para estos casos deberán existir depósitos de acero para H_2 a presión, que deberá ser transportado al usuario desde el centro de la producción o desde centros de distribución a donde lleguen gasoductos que permitan el llenado de estos depósitos.

El aumento de la importancia industrial del H_2 y por tanto de la distribución por carretera y ferrocarril del mismo, a llevado al desarrollo y utilización de recipientes con mejor relación de pesos; para ello se han utilizado aceros aleados con Cr y Mo.

El procedimiento para la descarga de estos recipientes a los depósitos fijos del cliente sigue dos métodos distintos; el vaciado hasta igualación de presiones o el vaciado por grupos de bombas, lo cual representa un vaciado en cascada a relación de presiones distintas. Para este último método se utilizan métodos estacionarios de alimentación de presiones diferentes.

5.3 La producción de hidrógeno a escala industrial a partir del agua

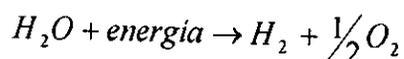
Para que pueda existir una tecnología moderna del hidrógeno es necesario que su obtención sea económica y energéticamente favorable. Esto se podría lograr utilizando como materia prima el agua, de la cual se puede disponer en cantidades prácticamente ilimitadas y separar de la misma hidrógeno puro y oxígeno en una sola reacción.

Desde el punto de vista técnico y energético, la producción de H_2 por medio de reacciones termoquímicas es una posibilidad muy interesante; la energía necesaria la deberían suministrar las centrales solares o centrales nucleares.

El ciclo del hidrógeno solar funciona así: la electricidad producida por los módulos solares opera un equipo de electrólisis que divide el agua (H_2O) en sus componentes elementales, hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). El oxígeno se libera al aire y el hidrógeno se bombea a los tanques, donde es almacenado en el lugar de producción o se envía a otras regiones.

En general se entiende por electrólisis la fragmentación o descomposición de un sustrato que se encuentra en la solución conductora (electrolito) mediante la corriente eléctrica. El paso de la corriente eléctrica a través de la frontera entre las fases de

cátodo / electrolito o ánodo / electrolito viene acoplado de una serie de pasos de reacción electroquímica, así, en el caso de la electrólisis del agua, el electrolito, que es generalmente una sal iónica, no se descompone sino que lo hace el solvente, o sea el agua. En el caso de electrolitos alcalinos la reacción bruta se presenta:

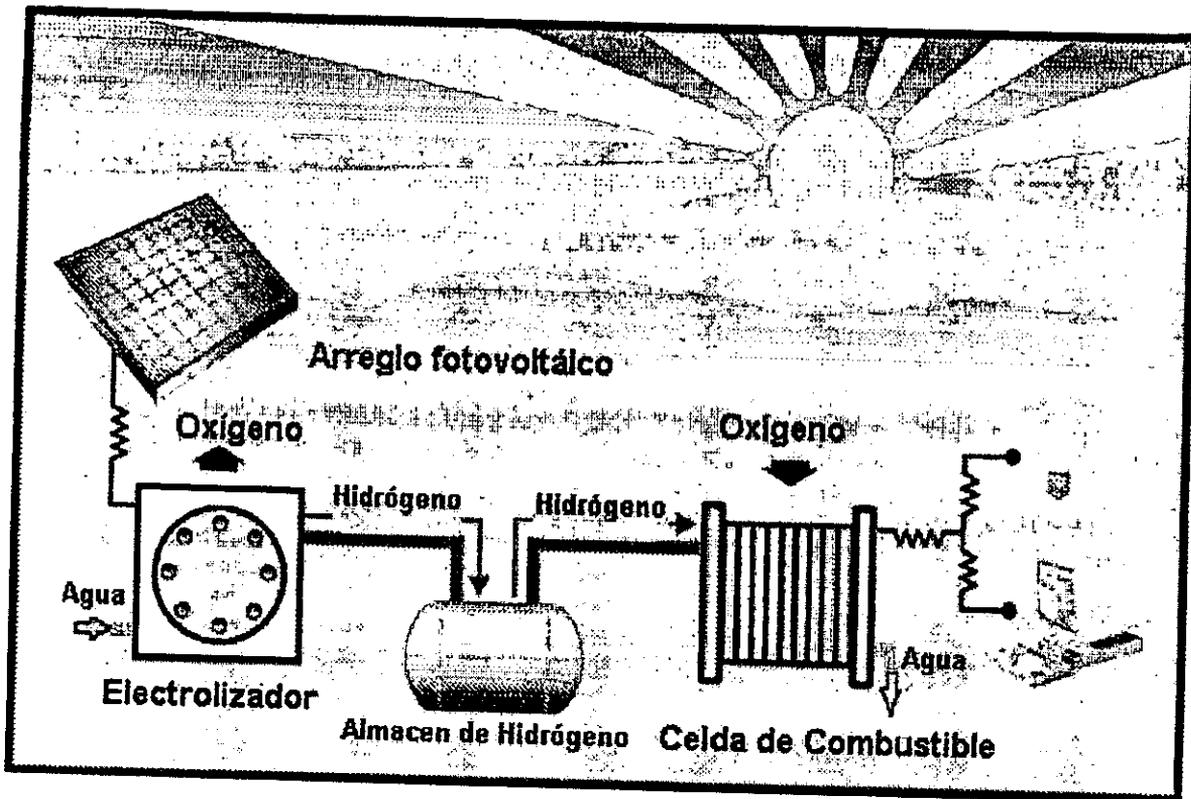


Esta energía debe suministrarse al sistema en forma de energía eléctrica.

La producción electroquímica de hidrógeno a partir de agua, al compararla con los otros métodos de obtención, aparece como un método sencillo y ya conocido. Los actuales electrolizadores que funcionan industrialmente se han caracterizado por su fácil mantenimiento, pero debido a su consumo de energía y al precio de la energía eléctrica, el costo del hidrógeno producido es relativamente caro. No obstante, el hidrógeno electrolítico será una auténtica alternativa comercial cuando se pueda disponer de energía eléctrica procedente de centrales solares grandes.

Para reducir el actual consumo de energía primaria en la descomposición electrolítica del agua, la tecnología de la electrólisis del agua debería ser mejorada en su diseño, en los materiales para electrodos o, dado el caso, en los catalizadores; también deberían optimizarse los parámetros de trabajo.

Si el H_2 bajara sus precios, sería aun más usado en la industria y eso sucederá si existe una investigación y un desarrollo intensivo.



5.4 Almacenamiento del hidrógeno

Actualmente se pueden acumular químicamente grandes cantidades de energía en forma de hidrógeno. La densidad energética del H_2 referida al peso es muy elevada. Para alcanzar la densidad energética respecto al volumen del gasóleo, el hidrógeno se debería comprimir a 3500 bar. El almacenamiento del hidrógeno es esencialmente un problema del volumen y esto es especialmente crítico en el caso de sistemas móviles.

5.4.1 Almacenamiento del gas hidrógeno

Envases a presión

Actualmente el gas hidrógeno se almacena casi exclusivamente en envases de acero ("obuses") y a una presión entre 150 y 300 bar.

Recipientes a presión no enterrados

En recipientes a presión inmobilizados se pueden almacenar grandes cantidades de hidrógeno. El empleo de este tipo de recipientes es relativamente corriente en el caso del gas natural. Los depósitos de baja presión trabajan hasta 49 mbar y tienen capacidades para unos 600 000 m³(v), [1m³(v) = 1 m³ a T = 0° C y p = 1 bar] que en el caso del H₂ representa una energía de 1.8*10⁶ kWh. Los depósitos de alta presión trabajan hasta 14 bar y tienen capacidad para cerca de 50 000 m³(v).

Por mejora de los materiales de construcción el aumento posible de la presión de trabajo de estos depósitos no será suficiente para aumentar sensiblemente su capacidad de almacenamiento. Los depósitos enterrados o sumergidos en agua pueden trabajar a presiones bastante elevadas.

Campos petrolíferos, campos de gas natural, acuíferos y cavernas

Como tanques a presión enterrados existe la solución natural de emplear los campos agotados de petróleo y gas natural, los acuíferos y las cavernas artificiales. En el mundo funcionan unas 700 cavernas para almacenar gas. Estas acostumbran a estar entre 600 y 1200 m de profundidad, tienen volúmenes de 20 000 a 800 000 m³ y trabajan a presiones de 60 bar; es posible que las presiones de trabajo puedan ser aumentadas hasta 200 bar. Los costos de inversión vienen determinados fundamentalmente por la eliminación por disolución de la sal. Otra posibilidad es el almacenamiento en campos petrolíferos o de gas natural ya agotados. Para el almacenamiento de gases y al igual que los campos petrolíferos y de gas natural, son adecuadas las capas porosas de los acuíferos que poseen una capa superior impermeable a los gases. La introducción del gas sirve tanto para almacenarlo como para desplazar el agua. Los costos de inversión dependen de las condiciones geológicas y son por lo tanto muy variables.

Almacenamiento en sistemas de tuberías

Los centros de consumo de hidrógeno y los centros productores del mismo deberán estar conectados por un sistema de gasoductos, puesto que estarán separados por largas distancias. Las presiones de trabajo de este sistema de gasoductos y tuberías

pueden oscilar dentro de ciertos límites y por lo tanto puede variar la cantidad de gas que contienen, lo cual significa que pueden actuar como acumuladores de energía. Este sistema de almacenamiento es igual de caro que los depósitos a presión no enterrados, pero por servir a la vez como transporte y como depósito, en el cálculo de los costos se derivan ventajas.

5.4.2 Hidrógeno fijado por medios físicos o químicos

Como puede verse, el problema principal en el almacenamiento de gas H_2 es su gran volumen, o sea su baja densidad energética por volumen. La densidad específica del hidrógeno se puede aumentar mucho por anclaje, solución o unión química a otros elementos o compuestos. No obstante, de todos estos métodos posibles de almacenamiento de hidrógeno, si los consideramos desde un punto energético y económico, sólo muy pocos tienen sentido.

Tanques de hidruros metálicos

En la búsqueda de sistemas para almacenar hidrógeno, especialmente en el caso de sistemas móviles, se ha dado mucha importancia desde hace algunos años a los hidruros metálicos y a los compuestos intermetálicos con el hidrógeno. En principio cualquier material es adecuado como acumulador de H_2 que pueda adquirir hidrógeno y después volverlo a ceder. No obstante, para que este material se pueda emplear técnica y comercialmente tiene que cumplir necesariamente ciertas condiciones: debe ser económico, poseer por peso una gran capacidad de fijar hidrógeno, deben ser mínimas las pérdidas de su capacidad de acumulación al aumentar los ciclos de su uso, poseer velocidades de reacción elevadas, calores pequeños de absorción y desabsorción, propiedades físicas y químicas adecuadas para que la reacción tenga una buena reversibilidad. Como la formación del enlace de hidruro es exotérmica, para disociar al hidrógeno se necesitará calor. Desde el punto de vista energético se necesitan hidruros, que para la disociación precisen poco calor. Además tienen importancia la zona de presión y temperatura en que se cede el hidrógeno. Para ver estas zonas se emplean curvas isotermas de presión y concentración.

En la siguiente tabla se presentan los datos de los metales y las aleaciones que combinan hidrógeno y que pueden ser factibles de utilización. Estos datos sólo son orientativos, puesto que pequeñas impurezas en el metal pueden hacerlo variar.

Así por ejemplo, la adición de 0.92% en peso de Si al vanadio disminuye el contenido máximo de hidrógeno en un 10% y aumenta la presión de disociación a 45° C desde cerca de 4 a 15 bar. El Niobio se comporta de modo parecido frente a las impurezas.

Propiedades físicas de algunos hidruros metálicos importantes

	LaNi ₅ H _{6,7}	FeTiH _{1,95}	MgNiH _{4,2}	Mg ₄ Cu ₂ H ₆
Contenido en Hidrógeno (% en peso)	1.5	1.8	3.8	2.6
Temperatura de equilibrio a 1 bar (en ° C)	10	-19	250	240
Calor de descomposición (en kJ/mol H ₂)	30.2	29.8	64.8	73.2

Las aleaciones más adecuadas parecen ser las de LaNi₅ y TiFe, pero el uso de la primera queda limitada para algunos casos especiales, pues el precio del material es muy elevado. Los esfuerzos para encontrar una aplicación técnica se concentran sobre el TiFe, el cual permite una densidad de acumulación de hidrógeno de 10 g H₂/kg TiFeH que corresponde a 9.7 % de la energía acumulada en forma de hidrógeno. La energía de disociación es muy baja y se puede suministrar por calefacción. En la práctica las capacidades de almacenamiento de hidrógeno, que se indican en la tabla anterior, se verán disminuidas debido al depósito a presión, a la matriz soporte del material, etc. Por otro lado son de esperar desarrollos que proporcionen capacidades de acumulación más elevadas. Una estimación realista de la capacidad de acumulación, teniendo en cuenta la masa del depósito y la matriz soporte, es la del 1 al 2 % en peso del hidrógeno. En la actualidad no se pueden hacer aún estimaciones sobre los costos.

Adsorción

El hidrógeno también se puede unir por adsorción a la superficie de adsorbentes altamente dispersados. De esta manera, el Fe, Ni y el Pt llegan a adsorber 1 átomo de H por átomo de metal de la superficie. No obstante y como en el mejor de los casos sólo uno de cada átomo está en la superficie, este valor se reduce como máximo a 0.25 átomo de H por átomo de metal, que no es un valor muy bueno. Si este método llega a

tener éxito será porque se ha recurrido a un adsorbente que se pueda dispersar muy fácilmente. En este sentido en 1962 se introdujo el uso del carbón vegetal de superficie rugosa. Un carbón de coco adsorbió $86 \text{ m}^3(\text{v})$ de H_2/cm^3 de carbón a 77°K y 1 bar de H_2 , lo cual significa 0.58 g/cm^3 , o sea 1.5 % en peso. La cantidad adsorbida aumenta mucho al disminuir la temperatura; de 77 a 63°K varía en un factor de 2.

Se continúan realizando estudios sobre este método y la introducción de otros tipos comerciales de carbón. Una ventaja es que los calores de adsorción sean pequeños (entre 3.8 y 4.2 J/molH_2), además la introducción de fase adsorbente evita tener que trabajar a las bajas temperaturas del hidrógeno líquido (20°K) y permite usar la temperatura 4 veces superior del nitrógeno líquido, el cual es barato (por ejemplo se usa en la producción de abonos sintéticos) y existe en grandes cantidades; evidentemente el uso de esta temperatura más elevada representa también una pérdida de densidad de H_2 si lo comparamos con el hidrógeno líquido; no obstante, las densidades de H_2 obtenidas son similares a las del hidrógeno líquido ($1/6$ de 0.071 g/cm^3), por lo que unos avances más en este sentido podrían significar la implantación del método.

Compuestos que contienen hidrógeno

Los compuestos líquidos de hidrógeno, al contrario que el hidrógeno gas, se pueden almacenar con relativa facilidad y con buenas relaciones de peso de combustible respecto al peso del envase. Valores parecidos se pueden obtener con compuestos gaseosos de punto de ebullición bajo, si por medio de presión se consiguen transformar y almacenar en forma líquida.

Por ejemplo, los compuestos de nitrógeno e hidrógeno permiten almacenar grandes cantidades de hidrógeno. Estos compuestos tienen la ventaja de que el nitrógeno se encuentra por todas partes y al descomponer la unión N-H puede emitirse el nitrógeno al aire circundante. El compuesto de N-H con mayor contenido energético y en donde es más fácil de romper el enlace N-H es la hidrazina. Por ejemplo, en presencia de Níquel y en medio alcalino la hidrazina se puede descomponer; como subproducto de reacción aparece NH_3 , el cual debe eliminarse descomponiéndolo o disminuirse su producción buscando las condiciones óptimas en que debe producirse la reacción. El porcentaje de hidrógeno de la hidracina es del 8 % en peso y su descomposición es

exotérmica, por lo cual no debe suministrarse ninguna energía adicional para descomponerla. No obstante, la hidrazina es demasiado cara para que su uso se generalice. El compuesto más barato de N-H es el amoníaco. El amoníaco es volátil a presión normal y temperatura ambiente, pero se puede almacenar líquido a temperatura ambiente, si se origina una sobrepresión de 10 bar. En lo que se refiere a pesos, un envase de amoníaco de 40 L pesa en vacío 42 kg y el amoníaco que puede contener pesa unos 21 kg; 21 kg de amoníaco contienen unos $41 \text{ m}^3(\nabla) \text{ H}_2$. En la calefacción del reactor se necesita consumir un 20 % del H_2 producido. De todo ello resulta un peso de almacenamiento de $1.9 \text{ kg/m}^3(\nabla) \text{ H}_2$. En este peso no se incluye el del reactor para descomponer el amoníaco; este peso depende mucho del flujo de trabajo, del procedimiento empleado, etc., pero se puede calcular que representa entre 2 y 5 kg por $\text{m}^3(\nabla)$.

5.5 Aspectos relacionados con las medidas de seguridad para el manejo del hidrógeno

La discusión de los aspectos técnicos que tratan sobre la seguridad, es de gran importancia para la aceptación o no a escala industrial de una nueva tecnología.

Las propiedades físicas y químicas del hidrógeno son las que determinan su seguridad o peligro. Es por ello que hay que conocer las propiedades relevantes del hidrógeno, que son técnicamente importantes para su seguridad, comparándolas con las de otros energéticos y analizando los riesgos que implica el manejo del hidrógeno.

5.5.1 Datos físicos y técnicos que están relacionados con la seguridad

No tiene sentido hablar de la peligrosidad de un portador energético, tomando en consideración un solo criterio, por ejemplo la inflamabilidad. Las previsiones sobre los riesgos en la seguridad resultan del conjunto de todas las propiedades técnicas importantes que la afectan. Pero la utilización del hidrógeno en una tecnología como las celdas de combustible presentará exigencias específicas en el campo de las técnicas de seguridad.

Para tener una idea de los posibles riesgos se comparan en la tabla siguiente datos físicos y técnicos que se relacionan con la seguridad del gas hidrógeno, del metano y de la gasolina.

DATOS FÍSICOS Y TÉCNICOS RELACIONADOS CON LA SEGURIDAD DEL
HIDROGENO GAS, EL METANO Y LA GASOLINA

Propiedad	Hidrógeno	Metano	Gasolina
Peso molecular	2.016	16.043	107.0
Densidad * [kg/m ³]	0.0837	0.65	4.40
Calor mínimo de combustión [kJ/g]	119.93	50.02	44.5
Calor máximo de combustión [kJ/g]	141.86	55.53	48
Viscosidad [10 ⁻⁴ g/cm.s]	0.875	1.10	0.52
Límites de inflamación en el aire**	4 - 75	5.3 - 15	1 - 7.6
Límites de inflamación en oxígeno**	4 - 95	5 - 61	
Límites de detonación en el aire **	18.3 - 59	6.3 - 13,5	1.1 - 3.3
Energía mínima de inflamación en el aire [mJ]	0.02	0.29	0.24
Energía de explosión***	2.02	7.03	44.22
Temperatura de inflamación [° C]	585	540	228 - 471
Temperatura de llama en el aire [° C]	2045	1875	2197
Velocidad de combustión en el aire * [m/s]	2.65 - 3.25	0.37 - 0.45	0.37 - 0.43
Velocidad de detonación en el aire [km/s]	1.48 - 2.15	1.39 - 1.64	1.4 - 1.7
Coefficiente de difusión en el aire [cm ² /s]	0.61	0.16	0.05
Velocidad de difusión en el aire * [cm/s]	2.00	0.51	0.17

* A presión normal y 20 ° C.

** En vol. - % H₂.

***En kg de TNT (m³ H₂ a presión normal y 20 ° C).

De la tabla se ve que el hidrógeno presenta las desventajas de su amplia zona de inflamación en mezclas con el aire (4 - 75 vol. - %H₂), de su extremadamente pequeña energía de inflamación (0.02 mJ a 29.53 vol.- %H₂), así como de sus elevadas velocidades de combustión y detonación.

Como propiedades que disminuyen los peligros potenciales al usar hidrógeno, se podrían señalar su baja densidad 0.08 kg/m³ (en condiciones normales) y su elevada

temperatura de inflamación (585°C). Debido a su baja densidad, el hidrógeno se eleva y por lo tanto se diluye en el aire. En caso de incendio su elevada temperatura de encendido lo hace más seguro que la gasolina. También son ventajas del hidrógeno su pequeño calor de combustión por volumen y la baja emisión de radiación de la llama de H_2 .

Las consecuencias de que el hidrógeno posea una velocidad de difusión en el aire (2 cm/s) más elevada que el metano y la gasolina, dependen de cada caso; así, mientras que en una habitación cerrada las mezclas explosivas de hidrógeno - aire se formarán muy rápidamente, en el aire libre un escape de hidrógeno se diluirá muy rápidamente, impidiendo que se alcance la concentración necesaria.

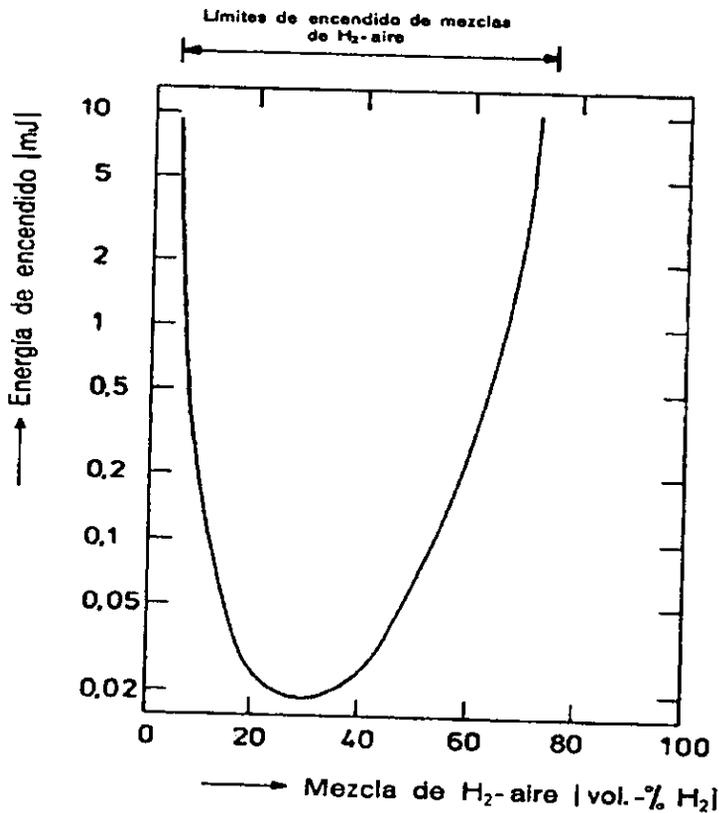
Peligros físicos

En el uso del hidrógeno se presenta un peligro físico importante, que es el de la rotura de piezas metálicas por acción del hidrógeno (por ejemplo tuberías). Esto se debe a que el hidrógeno tiene un volumen molecular tan pequeño que se puede disolver en metales y esta solución puede afectar mucho a las propiedades del metal. Esta disolución de H_2 , aparte del metal, depende de la temperatura y de la presión, materiales que son dúctiles, al disolver hidrógeno se pueden convertir en frágiles y romperse con la más pequeña carga. Está comprobado que, con experimentos a la misma carga, la velocidad de aparición de microfracturas aumenta al existir H_2 disuelto en el metal. Además, en el caso de los aceros al carbono, existe el peligro de la formación de CH_4 , o sea de descarbonación, la cual afecta a las propiedades mecánicas del acero. Si las temperaturas y las presiones son normales, el peligro de roturas debido al hidrógeno es pequeño, por lo cual la elección cuidadosa de los materiales y un diseño constructivo adecuado permiten minimizar mucho estos riesgos. No obstante, la utilización del H_2 a escala industrial implica un conocimiento previo importante de las propiedades metalúrgicas del sistema hidrógeno - metal.

Peligros químicos

El mayor peligro en el empleo del hidrógeno lo representa su gran reactividad. En este sentido hay que referirse a la conocida reacción de la mezcla detonante de gas. La energía necesaria para encender una mezcla de hidrógeno y aire depende fuertemente

de la proporción de la mezcla y de la temperatura. Tal como se ve en la siguiente figura, las desviaciones de la relación estequiométrica (29.53 Vol. - % H₂) hacen aumentar mucho la energía de encendido y así por ejemplo, cerca de los 10 y de los 58 vol. - % H₂ ésta se duplica. Al aumentar la temperatura disminuye la energía de encendido mínima, llegando a autoencenderse por los 500° C.



También al aumentar la temperatura aumentan los límites de encendido de la mezcla hidrógeno - aire. Es importante referirse al comportamiento del hidrógeno en la combustión: el H₂ quema con una llama muy caliente (2045° C) e incolora. Generalmente se considera como un riesgo la invisibilidad de la llama de H₂, la cual emite mucho menos radiación que la llama del CH₄. Pero esta propiedad hace que disminuyan considerablemente los riesgos alrededor de la llama, puesto que el calor propagado por la radiación es bajo. Los problemas pueden presentarse en la detección de pequeñas llamas producidas en pequeños escapes de hidrógeno.

Los grandes riesgos técnicos desde el punto de vista de la seguridad se deben a los peligros de detonación y de explosión, pero éstos, pueden evitarse a través de medidas administrativas y técnicas que afecten a los procedimientos y métodos de construcción.

5.6 ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Una de las ventajas del sistema del hidrógeno, es que las tuberías de hidrógeno que sirven de transporte desde el centro productor a los de consumo, también sirven automáticamente para acumularlo y almacenarlo. En la demanda de la corriente eléctrica existen variaciones muy características que determinan una infrautilización de las instalaciones eléctricas en las horas centrales de la noche, mientras que al atardecer y en las primeras horas de la noche se exige de los generadores eléctricos y durante poco tiempo una carga máxima. Estas instalaciones eléctricas, por otra parte, requieren grandes inversiones de capital. Las turbinas de gas, que con este fin se están utilizando, tienen un grado de transformación relativamente elevado pero necesitan aceites minerales o combustibles que produzcan gas.

El H_2 sería un método muy apropiado para almacenar energía con la finalidad de poder suministrar en un momento dado estas cargas máximas. Ante una posible limitación en el suministro de petróleo, el H_2 puede ser una alternativa económicamente buena de acumular energía para poder cubrir la demanda en los momentos de carga máxima, y además la utilización de H_2 minimizaría los costos de funcionamiento del sistema energético. El H_2 se obtendría electrolíticamente en los momentos de carga baja, se almacenaría y, en caso necesario, para poder cubrir las demandas de carga máxima se transformaría en electricidad mediante celdas de combustible.

5.7 EL OXIGENO

Es interesante la respuesta económica de si es factible o no la construcción del gasoducto del subproducto del H_2 , o sea del O_2 ya que su transporte y venta podría representar una ganancia adicional que rebajaría el precio del H_2 .

La implantación del sistema económico del H_2 aportará como consecuencia la disponibilidad de grandes cantidades de oxígeno, tanto los métodos químicos como los métodos electroquímicos de obtención del H_2 producen O_2 como subproducto. Hasta el momento no se ha prestado mucha atención a la utilización del O_2 . Las posibilidades de esta utilización dependen de su precio y este depende en definitiva de los costos de su transporte a través de tuberías desde el centro de producción al de consumo.

5.7.1 POSIBLES UTILIZACIONES DEL O_2

- El O_2 se emplea en grandes cantidades en la industria del acero.
- Tratamiento aeróbico de aguas fecales: las depuradoras de aguas fecales han trabajado hasta ahora con oxígeno atmosférico, o sea con aire, pero las ventajas del empleo del O_2 puro ya han sido comprobadas. Para la misma cifra de agua a tratar, el empleo de O_2 puro permite instalaciones entre tres y cuatro veces más pequeñas, lo cual significa también una inversión mucho menor.
- Inversión de la polución: En muchas zonas del mundo es necesaria una purificación, por ejemplo en muchos ríos. Estos ríos perecen porque los organismos que en ellos vivían y mantenían el equilibrio ecológico normal destruyendo las sustancias perjudiciales han desaparecido a causa de la falta de oxígeno. Esta falta de oxígeno se produce por la competencia que sobre él mismo ejercen los organismos y las sustancias perjudiciales, si éstas son las que dominan los organismos desaparecen. El agua del lago pasa a través de unos tubos en los cuales se inyecta O_2 a alta presión, el agua cargada de O_2 se devuelve al lago y su acción oxidante devuelve la vida al mismo.
- Basuras y desperdicios: Si las instalaciones de incineración de basuras en lugar de aire utilizaran O_2 puro, la temperatura de la llama aumentaría y la combustión de la basura sería más efectiva, evitando de este modo la producción de CO y disminuyendo la producción de humos. Los metales quedan en el residuo de la combustión en forma de óxidos y en esta forma de óxidos metálicos se pueden recuperar el Zinc, el Estaño y el Aluminio.

5.8 Reformador

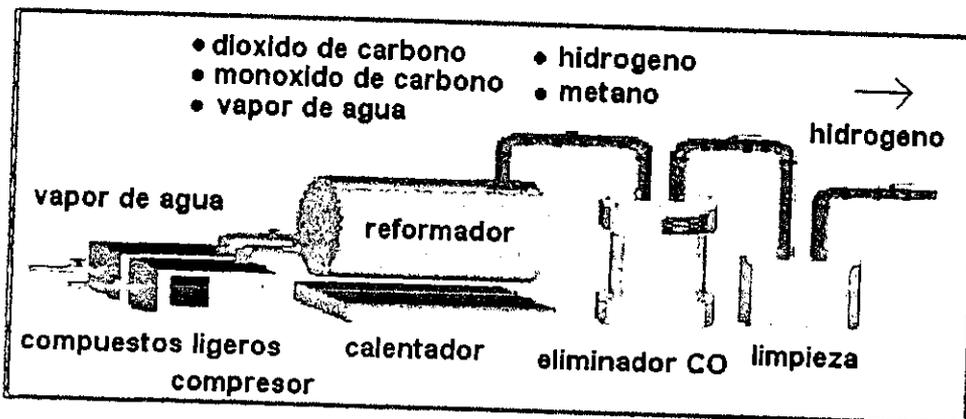
Al proceso de obtención de hidrógeno a partir de un compuesto químico es a lo que genéricamente se le denomina reformado. Una celda puede ser alimentada directamente a partir del hidrógeno almacenado en estado líquido o gaseoso, aunque por razones de seguridad y facilidad pueda ser más conveniente transportar el hidrógeno en algún compuesto e ir "reformando" dicho compuesto para obtener hidrógeno a medida que este vaya siendo consumido por la celda.

En este caso se requerirá un caudal relativamente elevado de H_2 siendo necesarias ciertas condiciones de pureza del gas. A continuación se exponen dos tipos básicos de reformadores, dependiendo de si se desea obtener el hidrógeno a partir de compuestos ligeros o pesados.

• Reformado mediante vapor

Este reformador es el comúnmente empleado para obtener el hidrógeno a partir del gas natural. En este caso se combina el compuesto que se va a reformar con vapor de agua en una reacción endotérmica (habitualmente ha de elevarse la temperatura a unos $850^\circ C$) que producirá metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor de agua e hidrógeno.

En seguida se emplea un "eliminador de CO" que hace reaccionar el CO con vapor de agua para producir dióxido de carbono e hidrógeno; por último, se limpia el gas, dejando únicamente el hidrógeno puro.



- Reformado mediante oxidación parcial

Para este proceso se combinan compuestos pesados con oxígeno y vapor de agua en una reacción que no requiere aporte externo de calor; las fases de eliminación y limpieza son similares a las anteriores.

Conclusiones

El desarrollo de la presente investigación, nos permitió llegar a las siguientes conclusiones:

Las celdas de combustible se han desarrollado principalmente para la industria automotriz, ésta es su aplicación más difundida y en la que se está teniendo el mayor desarrollo tecnológico, sin embargo pueden ser diseñadas y construidas en general, para generar el voltaje y la potencia deseada, lo que les permitirá competir con las tecnologías actuales de generación de energía eléctrica.

La eficiencia al generar energía eléctrica con celdas de combustible sobre todo, en modo de cogeneración, resulta ser mayor que la que se obtendría al generar energía eléctrica por cualquiera de las tecnologías convencionales, pudiendo llegar hasta el 85% dependiendo de las características del tipo de celda que se utilice. Eso es posible debido a que las tecnologías de generación convencionales, usan primero procesos de combustión para convertir el combustible en calor, éste en energía mecánica con la que se produce finalmente la energía eléctrica, en cambio las celdas de combustible convierten la energía química de un combustible en energía eléctrica directamente, sin procesos de conversión intermedia y produciendo adicionalmente, calor.

Otro de los beneficios de esta tecnología, es que tendrá la oportunidad de generar energía eléctrica en el lugar mismo de consumo, lo cual ahorrara el costo del tendido de las líneas de transmisión, es decir, conductores, torres y derecho de vía, siendo este último un problema importante cuando se trata de zonas urbanas. Además, en caso de falla del sistema se tendrá independencia de la red y en caso de que una celda llegara a fallar, su modularidad permite mayor facilidad en el intercambio de partes, lo que implica un corto tiempo de reparación, obteniendo con esto un servicio de mayor calidad.

La razón por la cual las celdas de combustible, no son en la actualidad utilizadas a gran escala, es debido a que es comercialmente nueva, pues si bien esta tecnología ya ha alcanzado un desarrollo importante en que ha demostrado ser segura y limpia, aun tiene limitantes como son el costo y la falta de infraestructura para el abastecimiento del hidrógeno. El costo disminuirá a medida que los volúmenes de producción aumenten, propiciando el desarrollo de la infraestructura necesaria.

Se debe eliminar o bien reducir gradualmente el uso del combustible fósil, por dos razones, la primera que es obvia porque se trata de un combustible no renovable y la segunda es que al utilizar este tipo de combustible, se generan fenómenos ambientales perjudiciales.

La contaminación se ha combatido con soluciones educativas, que en la práctica se reducen a que pocos asumen la responsabilidad sobre el tema. A este tipo de estrategias se suman las actitudes legalistas tales como la definición de restricciones vehiculares. Desgraciadamente todas esas campañas de tipo voluntarioso no han sido del todo exitosas y es dudoso que algún día lo sean.

Más éxito ha tenido la política de forzar los cambios tecnológicos. La utilización masiva de las celdas de combustible en el sector del transporte principalmente, permitirá reducir de manera sustancial la contaminación ambiental, pues al utilizar al hidrógeno como combustible, no se produce ningún tipo de emisión contaminante, si bien, es cierto que las celdas que utilizan reformador presentan emisiones contaminantes, éstas son muy bajas.

No podemos mejorar el medio ambiente con leyes ni voluntad. Lo que se necesita es una evolución tecnológica, de la cual las celdas de combustible forman parte.

Bibliografía y referencias

Centrales Hidroeléctricas I: Conceptos y componentes hidráulicos.

Grupo Formación de Empresas Eléctricas

Editorial Paraninfo

España, 1984.

Centrales Eléctricas I :

Orille Fernández, Angel Luis

Ediciones UPS

España, 1993

Las fuentes de energía

Comisión Federal de Electricidad

Museo Tecnológico

México 2000

Generación México, Octubre del 2000

Comisión Federal de Electricidad

México 2000

Unidades generadoras en operación (Sistema eléctrico nacional) 1994

Comisión Federal de Electricidad

Sugerencia y estudios de producción

México, 1995

Informe de operación 1998

Comisión Federal de Electricidad

México 1999

El Sector Energético en México

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática

México, 2000

Memoria del Simposio "Energía y medio ambiente"

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

México, 1984

Alternativas Energéticas

Alonso Concheiro, Antonio

CONACYT

México, 1985

Células de Combustión

Vielstich, Wolf

Ediciones URMO

España, 1973

Hidrógeno solar. Energía para el futuro

Justi, Edward W.

Editorial Marcombo

España, 1985

Páginas consultadas en internet

Instituto de Investigaciones Eléctricas

Dr Ulises Cano Castillo

Cuernavaca, Morelos, México.

El Centro de Investigación de Energía Schatz

Marc Marshall

Universidad Estatal Humboldt