

ENERGIAS ALTERNATIVAS APLICADAS AL DISEÑO

De la Energía Solar al Hidrógeno como Combustible

**Tesis que para obtener
el grado de Maestro en Diseño Industrial
presenta:**

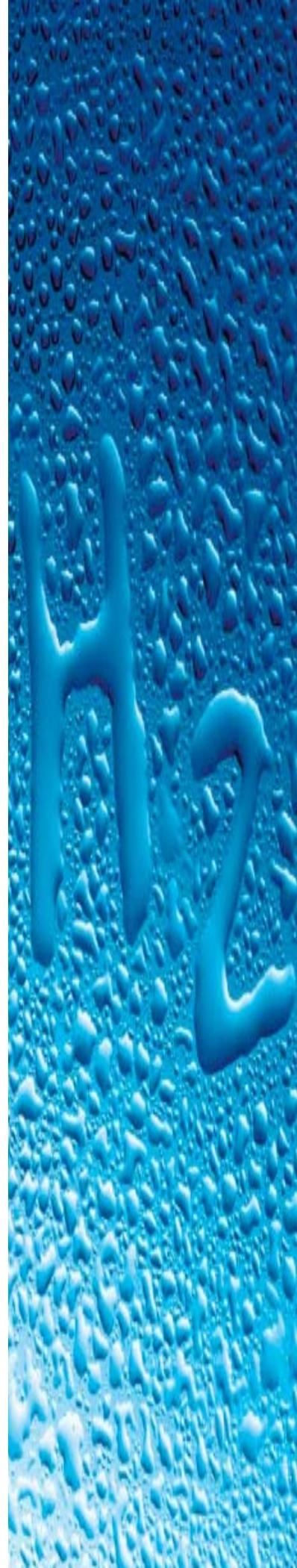
Sergio Ruiz García

POSGRADO EN DISEÑO INDUSTRIAL

MAESTRIA EN DISEÑO INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

México, 2006





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ENERGIAS ALTERNATIVAS APLICADAS AL DISEÑO

De la Energía Solar al Hidrógeno como Combustible

**Tesis que para obtener
el grado de Maestro en Diseño Industrial
presenta:**

Sergio Ruiz García

POSGRADO EN DISEÑO INDUSTRIAL

MAESTRIA EN DISEÑO INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

México, 2006



Comité tutorial:

Tutor principal: Ana María Losada Alfaro

Alejandro Rodea Chávez

Ulrich Scharer Sauberli

Sinodales:

Guillermo Gazano Izquierdo

Julio César Margáin Compéan

Dedico esta obra a Isabel, José y Diego.

*Agradezco a Anita, Alejandro y Ulrich por su dirección, dedicación y confianza
para que este trabajo sea posible.*

*También agradezco a Guillermo y Julio César por el interés
y confianza depositados en este trabajo.*

CONTENIDO

INTRODUCCION 7

1 LA ENERGIA EN LA SOCIEDAD 13

Trabajo, energía y potencia 15

Tipos de energía 18

La energía en la historia de la humanidad 22

Quema de hidrocarburos, ¿una práctica obsoleta? 24

La termodinámica en la sociedad 25

2 LA ENERGIA Y EL MEDIO AMBIENTE 31

Cambio climático 31

Los límites del crecimiento 38

Descarbonización 44

3 ENERGÍAS ALTERNATIVAS 47

El sol como fuente principal de las energías alternativas 49

Energía solar fotovoltaica 49

Energía solar fototérmica 55

Energía eólica 64

Energía de la biomasa 77

Energía hidráulica 84

Energía marina 85

Generación distribuida 94

4 CELDAS DE COMBUSTIBLE 97

Principio de funcionamiento 100

Tipos de celdas y sus aplicaciones 101

Tipos de combustibles para celdas 116

5 HIDROGENO ¿POSIBLE FUENTE DE ENERGIA DEL FUTURO CERCANO? 119

¿Por qué es importante iniciar una economía basada en el hidrógeno? 120

Formas de obtención 122

Formas de almacenamiento 126

CONCLUSIONES 131

GLOSARIO 137

REFERENCIAS 145

INTRODUCCION

Los diseñadores tenemos una importante participación en la constante reconfiguración del entorno artificial, por ello también somos en gran medida responsables de los problemas ambientales que nos tomaron por sorpresa durante el siglo anterior; después del descubrimiento del deterioro de la capa de ozono, del calentamiento global y de la lluvia ácida que provocaron un cambio climático sin precedentes debemos tomar conciencia de estos efectos a través del conocimiento de sus causas. Una de las principales causas proviene de la forma en que hemos producido la energía a través de la combustión desde la madera hasta los hidrocarburos, por ello es necesario analizar su aprovechamiento para la conformación de lo artificial. De este modo, el contenido de este trabajo de investigación tiene como hilo conductor un análisis del aprovechamiento de la energía a través del tiempo a fin de entender las consecuencias derivadas de la forma como se ha utilizado.

Al margen de su uso para nuestra supervivencia: protección, alimento, etcétera; básicamente la hemos aprovechado para cambiar el entorno natural en un entorno artificial: en este proceso, la mayor parte de los productos artificiales generados a partir de la Revolución Industrial a la fecha, consumen materias primas y energía derivadas de recursos no renovables tanto en su fabricación como en el uso mismo.

La idea central de este documento consiste en facilitar a los diseñadores la información necesaria que nos permita entender por qué están surgiendo diferentes anomalías en el sistema de lo artificial y mencionar cuál es el posible camino a seguir para subsanar estas anomalías por medio del uso de hidrógeno como combustible, producido a partir de las energías renovables. Para lograrlo, el documento se compone de la siguiente manera:

En el primer capítulo consideré necesario tomar en cuenta los diferentes conceptos que definen a la energía, conocimiento que la mayor parte de los diseñadores no dominamos. Además se explica la primera ley de la termodinámica la cual nos dice que la energía solo es posible transformarla, existiendo diferentes manifestaciones y formas de conversión; energía que hemos utilizado con fines antropocentristas que nos ayudaron a conformar en su momento las diferentes civilizaciones a través del tiempo.

Por otro lado, incluyo la segunda ley de la termodinámica que nos ayuda a entender que la energía solo puede transformarse dentro de un sistema el trabajo, que puede efectuarse con una fuente de energía primaria es irreversible, y que parte de esa energía es disipada a través de calor no útil. Esto quiere decir que para mantener en equilibrio un sistema de trabajo, siempre será necesaria más energía primaria, provocando con esto una tendencia hacia el desorden llamada entropía.

Este fenómeno es explicado con mayor detalle con dos ejemplos sobre civilizaciones pasadas para entender que ésta tendencia al caos puede observarse tanto en los sistemas socioeconómicos, como también en la conformación de lo artificial; la historia nos muestra la manera en que las civilizaciones crecen, tienen un auge y una debacle que puede ser explicada a través de la termodinámica. En el sistema de lo artificial también es posible explicar esta tendencia a través del estudio de los problemas ambientales causados por el uso desmedido de recursos naturales finitos para crear objetos sin una conciencia que considere las consecuencias de esta tendencia a la entropía.

En el segundo capítulo trato de explicar los efectos negativos en el clima producidos a escala planetaria, cuya causa fue el desconocimiento de las leyes de la termodinámica. El clima del planeta es considerado como un sistema termodinámico muy complejo que permitió la proliferación de la vida, incluyendo al ser humano; cuando éste tomó conciencia del control que podía tener sobre diversos fenómenos naturales, el planeta cambió para siempre: el confort y la ruta del crecimiento no reconocieron límites.

Sin embargo, durante el siglo anterior diversas manifestaciones adversas en el clima, además de crisis políticas y sociales causadas por la toma de conciencia del inminente agotamiento de los principales recursos energéticos basados en el carbón y en los hidrocarburos, permitieron darnos cuenta que la factura que la naturaleza nos está cobrando es la consecuencia de no entender que con recursos finitos no es posible trazar un camino sin medida.

Por otro lado, la dinámica del crecimiento económico no solo ha afectado al clima del planeta, nos ha afectado a la sociedad global, abriendo una brecha cada vez más grande entre países ricos y pobres. Este capítulo también menciona los diferentes esfuerzos por entender y fomentar acciones que contribuyan a mitigar o por lo menos a reducir las acciones que están provocando estos fenómenos adversos por medio de acciones basadas en la sustentabilidad.

El conocimiento generado por disciplinas como la química, la biología y las ingenierías capaces de desarrollar nuevas tecnologías con base al nuevo paradigma del desarrollo sustentable están ya a la mano. Por medio del trabajo multidisciplinario es posible que ingenieros, científicos y diseñadores tengamos un contacto directo para generar un nuevo modo de producción de conocimiento, aplicando tecnología sustentable a través del uso de energías renovables en productos de uso cotidiano. La historia nos muestra de forma precisa como en la línea del tiempo el uso del carbono para fines humanos, cuya emisión a la atmósfera es el principal causante del cambio climático se encuentra en franca disminución. Por ello mi planteamiento se centra en el uso de un combustible llamado hidrógeno que no emite dióxido de carbono, incluso que no funciona con la incineración, de modo se impulse el cambio que demanda la tecnología, poniendo fin a la era del fuego que inició con la humanidad.

La etapa de transición energética representa un gran reto para la humanidad. Se está trabajando principalmente en transporte y en la industria energética; el largo plazo es un problema para el escepticismo de los políticos y de los economistas cuyo poder de decisión influye en la dinámica de expansión global que afecta a nuestro planeta, el diseño junto con otras disciplinas puede generar un hilo conductor en este proceso por medio de sistemas educativos, persuasión a la sociedad por el uso de energías renovables en el hogar, en las oficinas, y en el aprovechamiento del tiempo libre. Es un canal apenas explorado, la investigación científica está aportando un enorme avance al aplicar la tecnología orientada al concepto de no atender contra el entorno natural así como en el creado por el ser humano.

Por ello, es indispensable que los diseñadores, capaces de satisfacer necesidades a través del sistema de lo artificial, tengamos conciencia de todos estos factores que de no tomarlos en cuenta, afectarán en gran medida tanto al ambiente natural como a la sociedad misma.

En el tercer capítulo, planteo cuáles son los diferentes desarrollos tecnológicos que pueden hacer realidad el cambio de paradigma energético enfocado al uso de alternativas basadas en la fuente primaria que generó la vida en el planeta que es el Sol. El Sol constituye una fuente inagotable en términos humanos de energía; al utilizarla no es necesario preocuparse por el proceso entrópico, porque esta fuente estará disponible sea aprovechada o no; de modo que las pérdidas causadas en el proceso de conversión, no presentan inconvenientes. Existen diferentes formas de conversión energética generada por la radiación del Sol:

- Energía solar fototérmica: la captación de la radiación infrarroja del Sol permite aprovechar el calor emitido imitando el efecto invernadero por medio de colectores de baja, media y alta temperatura.

- Energía solar fotovoltaica: en este caso, la radiación de luz visible es captada por celdas capaces de transformarla en energía eléctrica.
- Energía eólica: el viento, causado por la diferencia de temperatura en la atmósfera, puede ser captado por aerogeneradores, capaces de producir energía eléctrica.
- Energía marina: de igual modo que los vientos, el agua contenida en los océanos se caracteriza por generar movimientos llamados olas y mareas, las primeras provocadas por gradientes térmicos y las segunda por la influencia de la luna y el sol, en ambos casos el movimiento del agua oceánica representa un recursos energético aprovechable.
- Energía de la biomasa: la vida en el planeta se originó gracias al proceso bioquímico llamado fotosíntesis, de este proceso surge la bioenergía, cuya manifestación primaria es la generación de plantas, que representan el origen de las cadenas alimenticias, dando pie a la biodiversidad. De este modo los desechos orgánicos, producto de los seres vivos representan un gran potencial energético.
- Energía hidráulica: los ríos son caudales de agua provocados por el ciclo hidrológico; la energía cinética de este flujo puede ser convertida principalmente en energía eléctrica por medio de generadores.

La tecnología desarrollada para el aprovechamiento de estas manifestaciones energéticas representa la posibilidad de hacer realidad la transición energética, sin embargo la incapacidad de almacenar el potencial energético generado a partir de estas fuentes alternativas representa el mayor inconveniente. La electricidad por ejemplo debe ser consumida en el mismo momento en que se produce, imposibilitando también almacenar de forma eficiente la energía excedente. Por ello diferentes grupos de científicos en todo el mundo se encuentran investigando la posibilidad de desarrollar “almacenes de energía” por medio de la producción, almacenamiento y uso de hidrógeno como combustible; esos temas son desarrollados en los siguientes capítulos.

En el cuarto capítulo menciono el descubrimiento científico que en definitiva cambiará por completo el sistema de lo artificial que son las celdas de combustible. Estos son dispositivos electroquímicos que funcionan como una batería o pila, pero su diferencia radica en la capacidad de recargarla con hidrógeno. Además de ser recargable, la reacción química que ocurre en su interior produce electricidad y calor, el subproducto de esta reacción es agua.

El desarrollo de estos dispositivos representa para los diseñadores la gran oportunidad de participar de forma directa en la construcción de un mundo sustentable, donde por un lado, cada objeto sea producido con energía proveniente de los ciclos naturales; que el uso de productos eléctricos, electrónicos y medios de transporte sean alimentados por hidrógeno y como consecuencia, se mitigue la emisión de los gases responsables del cambio climático. Por otro lado el consumo de hidrocarburos servirá para otras

necesidades que no sean de carácter energético, como el desarrollo de plásticos necesarios para la industria y la salud, la producción de fertilizantes y productos petroquímicos. Es hora de planear que uso le daremos a los recursos no renovables.

En el quinto capítulo planteo el gran esfuerzo por parte de la comunidad científica que se encuentra desarrollando sistemas de producción y almacenamiento del hidrógeno. Algunos de éstos desarrollos son prometedores, otros apenas se encuentran en fase de investigación, por ello actualmente no es posible definir cual o cuales sistemas serán los más convenientes.

La redacción de este documento facilitará la lectura para que todo diseñador pueda entender los conceptos escritos en cada unidad, al tratarse de un tema parcialmente desconocido por nuestra disciplina consideré necesario incluir un glosario que facilitará la comprensión de diferentes términos. También incluyo referencias cruzadas que permiten leer de forma dinámica si el lector solo se interesa en una parte del documento, de esta forma espero que no solo sea de su interés, sino que lo motive a participar en acciones sustentables a través de su ejercicio profesional.

1 LA ENERGÍA EN LA SOCIEDAD

La vida cotidiana se compone de una serie de actividades que involucran una amplia gama de manifestaciones de la energía, el uso del gas para calentar el agua para el aseo personal; la electricidad para iluminar nuestras habitaciones o lugares de trabajo, para hacer trabajar los aparatos eléctricos y electrónicos que nos hacen la vida más fácil; los hidrocarburos son necesarios en los medios de transporte para que las distancias entre nuestros hogares y los lugares de interés no sean un inconveniente; el alimento que consumimos permite también que nuestros órganos y músculos funcionen para poder integrarnos a la dinámica social en la que nos desarrollamos: trabajar, hacer deporte, entretenernos.

La energía se encuentra presente prácticamente en todo momento de nuestras vidas; de este modo, nos encontramos en una situación peculiar: los seres humanos hemos desarrollado la capacidad de crear y usar una herramienta llamada tecnología, esta capacidad nos ha brindado los medios para modificar el entorno natural para satisfacer propósitos puramente humanos; nos hemos rodeado de una gran cantidad de objetos que utilizan diferente tipos de energía y nuestra preocupación no radica solo en la creciente demanda de combustibles y de electricidad para poder utilizarlos sino también en el problema de resolver la falta de espacio para almacenar todos aquellos aparatos y *gadgets*¹ que se hacen obsoletos en periodos de tiempo cada vez más cortos.

¹ *Gadget* proviene de las palabras en francés *gâchette*, que significa artefacto o de la palabra *gage*; pequeño mecanismo.

Por otro lado, la energía ha jugado un papel muy importante en el proceso socioeconómico, la generación de alimentos en el sector agropecuario requiere de maquinaria y equipo que funciona con combustibles y con electricidad para transformar tanto los cultivos como los productos pecuarios y posteriormente para su empaque, transportación, conservación, preparación y consumo. Los mismos objetos manufacturados que nos hacen la vida más fácil son procesados con diferentes materiales como el plástico, el metal o la madera, su transformación requiere de diferentes formas de producción y a su vez los dispositivos y la información requerida en el proceso también están involucrados en el consumo de algún tipo de energía.

Actualmente los medios de comunicación representan la gran Revolución Tecnológica que dio inicio en la recta final del siglo pasado, los medios electrónicos nos ayudan a comunicarnos en tiempo real prácticamente con el resto del mundo, la internet (World Wide Web) permite el intercambio comercial, tecnológico, cultural y social entre personas y sociedades del mundo, todo esto es posible gracias al desarrollo de diferentes tecnologías que ponen a nuestra disposición los dispositivos electrónicos cuya fuente de energía es la electricidad.

En esencia, el uso de la energía nos ha brindado la posibilidad de transformar nuestro entorno artificial por medio de dos tipos de soluciones: Sociales y prácticas². Como ejemplo de soluciones sociales, podemos citar procesos de producción que involucran: la organización de personas para trabajar colectivamente en una tarea determinada, los objetos como el mobiliario, las máquinas, la ropa; las construcciones como los centros comerciales, las oficinas, las habitaciones, las iglesias son el producto de la organización por medio de sistemas de comunicación. Por otro lado, las soluciones mecánicas involucran la invención de herramientas o máquinas para ayudarnos a llevar a cabo el trabajo determinado por los sistemas de producción.

Sin embargo, al hablar de todas las bondades que el complejo entorno artificial nos ha brindado, podemos puntualizar que solo los países industrializados son los que se han visto más favorecidos, en contraste, otros países apenas cuentan con la electricidad suficiente para energizar algunas fuentes de iluminación, sin profundizar en la escasez de los medios para poder generar alimentos y bienes suficientes para tener una mejor calidad de vida.

La disponibilidad de energéticos en los países más desarrollados les ha permitido generar un entorno artificial sin precedentes y con ello, una gran dependencia y desensibilización hacia la escasez o hacia la contingencia en el uso de combustibles o de electricidad: un ciudadano común difícilmente pensaría en la necesidad de racionar el consumo de electricidad y de gasolina, de sufrir apagones programados, de la escasez o de falta de combustibles. De este planteamiento podemos formular algunos cuestionamientos que podrían ser incómodos para la mayoría de los habitantes de las grandes ciudades pero

² Schobert Harold. *Energy and Society, an Introduction*. Taylor & Francis. N.Y. 2002. Pág. 4.

que es preciso hacerlo: ¿Qué camino podría seguir la humanidad sin los energéticos que son comunes en nuestros días?, ¿Cuáles serán nuestros alimentos?, ¿Cuáles serán nuestros medios de transporte? , ¿Cómo podríamos regular nuestros días? La falta de medios de transporte y comunicación, la falta de fuentes de iluminación de aparatos electrónicos como la televisión, el radio o las computadoras nos llevaría al uso de fuentes de energía alternativas como el uso de las bicicletas, le uso de la luz del día para llevar a cabo nuestras actividades y dejar el descanso para la oscuridad, la vida en las ciudades probablemente llegaría a su fin o se transformaría. El uso de energía es preciso para el desarrollo de la sociedad industrial en que vivimos.

Estos cuestionamientos nos guían hacia la necesidad de comprender de forma más precisa el concepto de energía desde un punto de vista socioeconómico: ¿qué es?, ¿cómo se manifiesta?, y sobre todo ¿cómo la hemos utilizado en la línea del tiempo? En este primer capítulo se pretende establecer los conceptos básicos referentes a la energía, su evolución y la situación que prevalece en la actualidad: gracias a este planteamiento, se pretende dar a entender con mayor claridad la razón por la cual la sociedades debido al desarrollo tecnológico son beneficiadas por el uso de las fuentes de energía, pero también nos servirá para entender que el camino a seguir requiere de profundos replanteamientos desde diferentes perspectivas.

TRABAJO, ENERGIA Y POTENCIA

La energía es la clave para lograr o tener la capacidad de llevar a cabo todas las actividades que forman parte de nuestra actual sociedad industrial. En términos de la física, la palabra energía es definida como la cantidad de trabajo que un sistema físico es capaz de producir; de acuerdo esta definición, la energía no puede ser creada, consumida, o destruida, sin embargo la energía puede ser convertida o transferida en diferentes formas: la energía cinética del movimiento de las moléculas de aire puede ser convertida en energía mecánica, que a su vez puede ser convertida en energía eléctrica por un generador. En cada conversión de energía, parte de la energía proveniente de la fuente es convertida en energía calorífica, es decir cada vez que una manifestación energética es convertida en otra, siempre habrá pérdidas.

Cuando utilizamos de forma poco precisa la expresión pérdida de energía (lo cual es imposible según la definición dada arriba), queremos decir que parte de la energía de la fuente no puede ser utilizada directamente en el siguiente eslabón del sistema de conversión de energía, porque ha sido convertida en calor. Sin embargo es común tener una noción lógica de que cuando se queman combustibles fósiles, de alguna forma, el potencial global para una futura conversión de energía se reduce. Los físicos utilizan una terminología diferente: ellos dicen que la cantidad de entropía del universo ha aumentado

(página 27), con esto quieren decir que nuestra capacidad de producir trabajo útil convirtiendo energía disminuye cada vez que dejamos que la energía acabe en forma de calor que se disipa en el universo³.

La referencia más común sobre el concepto de energía en términos materiales es el combustible para hacer funcionar los artefactos y los alimentos como combustible que produce energía en el caso de los seres vivos, de esto podemos afirmar que la gente o los artefactos tienen energía cuando pueden llevar a cabo una actividad o trabajo. Por otro lado el trabajo es aplicado a un objeto al moverlo de su posición, especialmente cuando éste es movido en contra de una resistencia (a la gravedad, a la fricción entre superficies, al viento o de su composición atómica o molecular). La conversión de una lámina de metal o de plástico en un objeto útil en contra de su resistencia molecular, requiere de calor y de fuerza mecánica para poder darle la configuración deseada; enviar electricidad de un generador o batería hacia los componentes de un motor en contra de la resistencia eléctrica de los cables, requiere de un potencial inicial; el mismo motor eléctrico en contra de la fricción entre engranes de un sistema mecánico que mueve las llantas de un juguete y que a su vez estas se mueven en contra de la fricción provocada entre la superficie y las llantas, requiere de un potencial eléctrico inicial. En otro ejemplo, un objeto en movimiento tiene la capacidad de efectuar trabajo, y por lo tanto se dice que tiene energía, un martillo en movimiento efectúa trabajo en el clavo sobre el que pega. En este ejemplo, un objeto en movimiento ejerce una fuerza sobre un segundo objeto y lo mueve cierta distancia.

Algunos ejemplos usuales de conversión de la energía						
A:	De:	Mecánica	Calórica	Eléctrica	Química	Luminosa
Mecánica		Molino de viento	Máquina de vapor	Motor	Motor de combustión interna	Radiómetro
Calórica		Cerillo		Parrilla, horno	Combustibles	Colector solar
Eléctrica		Hidroeléctrica	Termoeléctrica	Transformador	Pilas	Fotocelda
Química		Reacciones a presión	Reacciones endotérmicas y exotérmicas	Acumuladores		Fotosíntesis
Luminosa		Tribo luminiscencia	Termo luminiscencia	Foco	Lampara de aceite o de gas	

Fuente: Peña, Luis. Conceptos: Energía. P29

Tabla 1. Esta tabla nos muestra algunos ejemplos de transformación de energía, la fuente principal es diversa, así como su forma de pasar de un estado a otro **Fuente:** Peña, Luis.

³ Asociación danesa de la industria eólica. "Potencia". 12 de agosto de 2003.
<http://www.windpower.org/es/stat/unitsene.htm>
 Consultado el 12 de septiembre de 2006

Descrito en términos cuantitativos, el trabajo puede ser representado de la siguiente manera:

$$\text{Trabajo} = \text{Fuerza} \times \text{Distancia}$$

El trabajo se mide en Newton metros, unidad a la que se le da el nombre Joule (J).

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$$

Por otro lado, también existe el concepto de la potencia, comúnmente decimos que un automóvil es más poderoso que otro porque el primero lleva a cabo su trabajo en menor tiempo, es decir que la aceleración deseada la hace en un periodo de tiempo menor respecto al segundo, es decir, que este concepto apunta hacia la cuestión de que tan rápido (o lento) podemos realizar un trabajo. En términos cuantitativos, podemos representar el concepto de potencia de la siguiente forma:

$$\text{Potencia} = \text{Trabajo} / \text{Tiempo}$$

En el Sistema Internacional la potencia se expresa en Joules por segundo, unidad a la que se le da el nombre de watt (W):

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s.}$$

Esta forma de medición fue introducida durante la Revolución Industrial para medir la capacidad de las nuevas máquinas de vapor, el creador de la versión más eficiente fue James Watt, quien también introdujo como medida del trabajo que sus máquinas podían realizar, el producto del peso por la altura a la que es elevado, refiriendo este trabajo realizado durante un segundo al Watt (o vatio); pero en la práctica esto no era una referencia suficiente, por ello, utilizó una referencia más conocida con caballos; con una serie de mediciones concluyó que un caballo puede elevar aproximadamente un peso de 150 libras a 4 pies de altura en un segundo. Este dato es ahora utilizado para definir un caballo de fuerza (horse power)⁴.

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ watts}$$

Como se ha dicho, el trabajo está íntimamente relacionado con la generación de energía, ya que ambos son desarrollados de forma simultánea, de hecho la palabra energía proviene del vocablo *energeia*, que tiene sus raíces en *ergon*, que significa precisamente trabajo, por ello es usual definir la energía como la capacidad de producir trabajo: el trabajo que realiza una fuerza puede convertirse en trabajo y la energía puede producir trabajo, energía y trabajo son pues, dos caras de una misma moneda, el término energía fue introducido por

⁴ Peña, Luis. *Conceptos, Energía*. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades. UNAM. 1998. México. Pág. 19.

Thomas Young (1773-1829), quien la define precisamente como la capacidad de producir trabajo.

TIPOS DE ENERGIA

La energía cinética

Este tipo de manifestación de energía esta asociada tanto al movimiento como a los cuerpos físicos, es decir a la masa, es posible notar su manifestación en el movimiento de las moléculas del aire, en las olas del mar moviendo las partículas de agua.

La energía potencial

La energía potencial, tanto de combustibles fósiles como de la madera o de los residuos vegetales, proviene de la energía transmitida por el Sol cuando se originaron y crecieron las formas vegetales y animales primitivas.

La energía potencial es una energía latente asociada a la configuración de un sistema. El ejemplo más simple lo da la piedra colocada sobre una repisa; requerimos realizar un trabajo para subirla; el trabajo suministrado en ella se queda como energía almacenada mientras se la mantenga arriba. Si la soltamos caería y al caer seguiría acelerando, es decir, adquiriendo energía cinética. Cuando alcanza el suelo, todo el trabajo que le dimos al subirla se ha convertido en movimiento. Y la energía de movimiento puede a su vez realizar trabajo, sea enterrando un clavo en un trozo de madera, o transformarse en calor (de la piedra y el suelo) por el impacto⁵

Este ejemplo nos muestra como es posible “almacenar” energía generada por una fuente inicial para vencer la fuerza de la gravedad que la atrae hacia el suelo; conforme más alto sea subida, mayor energía potencial tendrá. Almacenar agua en una presa para dejarla descender hacia las turbinas es otro modo de convertir energía potencial en energía eléctrica.

Así podemos afirmar que donde existe un “almacén” de energía en un sistema estático, existe una fuente de energía potencial, con la posibilidad de ser manifestada en otra forma, por ejemplo en el caso de electricidad almacenada, se la llama potencial eléctrico⁶

La energía química es también un tipo de energía potencial y se define como el trabajo que una sustancia puede hacer o al calor que puede liberar al sufrir un cambio de

⁵ *Ibid.* Pág. 22.

⁶ *Ibid.* Pág. 23.

composición, por ejemplo la combustión. Se trata de una combinación de energía potencial eléctrica y de energía cinética de los electrones atómicos.

De hecho, cada diferente tipo de fuerza corresponde a un tipo de energía potencial: así hay energía potencial gravitacional, elástica, nuclear, química, etcétera.

La energía calorífica

Este tipo de energía está asociada al movimiento de las moléculas de cualquier sustancia, que se incrementa si es aplicado más calor. La temperatura es una medida de la energía promedio de una de las moléculas del material en cuestión, mientras que el calor suministrado mide la energía que ha ganado el conjunto de todas las moléculas de la sustancia. La energía requerida para llevar a cabo este proceso dependerá de la temperatura alcanzada y de la cantidad de material en cuestión.

El calor se transmite de tres maneras: por conducción, convección y radiación.

La conducción:

Esta forma de transmisión del calor es la más común en los sólidos, se da cuando la energía pasa directamente de un objeto a otro. Los metales en general son excelentes conductores de la energía; la madera y el plástico en cambio, no son buenos conductores del calor y por eso también son llamados aislantes.

La convección:

Consiste en la transferencia de energía calorífica a través del movimiento de gases o líquidos desde un punto que tiene cierto grado de temperatura hacia otro con un menor nivel de la misma. El viento es generado por la convección de las corrientes atmosféricas, este fenómeno es aprovechado para captar la energía cinética provocada por la convección.

La radiación:

Como se ha visto anteriormente, la radiación consiste en la transmisión de calor por ondas electromagnéticas, como ocurre con la luz y el calor del Sol que llegan a la Tierra.

La energía eléctrica

Esta manifestación de energía se debe al movimiento de los electrones de un átomo a otro. La materia existente en el universo está compuesta por partículas llamadas átomos, estos a su vez constan de otras partículas más pequeñas llamadas electrones, son partículas que giran orbitalmente alrededor de un núcleo formado por protones y neutrones. Los electrones poseen carga negativa, los protones en cambio tienen una carga positiva y los neutrones no tienen carga.

Diversos materiales están compuestos por átomos que tienen la propiedad de perder fácilmente sus electrones, pasando de un átomo a otro, este movimiento de electrones es básicamente la energía eléctrica. Los materiales que poseen esta propiedad son llamados conductores, el cobre por ejemplo es un material con excelente conductividad eléctrica. Si consideramos a la electricidad como un flujo de electrones en un material determinado, es necesario definir dos cualidades:

- La fuerza eléctrica que "empuja" los electrones es medida en volts.
- La cantidad de energía eléctrica se mide en watts-hora (wh). Un kilowatt-hora equivale a la energía que consume un foco de 100 watts encendido durante diez horas, o una plancha utilizada durante una hora.

La energía eléctrica es producida cuando un cable o cualquier material conductor de electricidad se mueven a través de un campo magnético, en un dispositivo llamado generador. El generador consta de campos magnéticos conformados por imanes y por una bobina de alambre de cobre, cuando el generador gira, se produce el campo electromagnético provocando el flujo a través del alambre.

Uno de los grandes problemas de la electricidad es que no puede almacenarse, sino que debe ser transmitida y utilizada en el momento mismo que se genera. En cuanto se produce la electricidad en las plantas, una enorme red de cables tendidos e interconectados, se encargan de hacerla llegar, casi instantáneamente, a todos los lugares de consumo⁷.

La energía radiante

Este tipo de energía es manifestada por entes físicos que carecen de materia. La radiación electromagnética también conocida como ondas electromagnéticas es un tipo de perturbación que afecta directamente al espacio físico que intercepta y puede variar de acuerdo a su forma de oscilación llamada longitud de onda. Este tipo de energía proviene de diversas fuentes tanto naturales como creadas por dispositivos artificiales que funcionan con electricidad. Las diversas formas de radiación se clasifican según la longitud de onda medida en nanómetros (nm), que equivale a un millonésimo de milímetro. Cuanto más corta sea la longitud de onda, mayor energía tendrá la radiación.

Así, la radiación solar está formada por una mezcla de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias cuya longitud de onda nos permite diferenciarlas en la luz visible, en las infrarrojas y las ultravioleta, las dos últimas no podemos verlas, pero si podemos notar sus efectos al transmitir su energía en los cuerpos que interceptan.

⁷ Secretaría de Energía, "¿Qué es la Energía Eléctrica?". <http://www.energia.gob.mx/>. Consultado el 29 de octubre de 2006.

Radiación infrarroja:

Es un tipo de radiación invisible cuyas longitudes de onda de la radiación son mayores que las de la luz visible, que comprende entre 400 y 700 nm. Este tipo de radiación puede ser detectada al medir la temperatura de cada color de la luz visible y notar sus diferencias, al colocar un termómetro más allá del rojo, en una región donde aparentemente no hay luz, el termómetro indica una temperatura alta, como si hubiera radiación incidiendo en esa zona, lo que a simple vista no es posible detectar. Así, la radiación térmica se conoce como radiación infrarroja.

Luz visible:

En esta región se encuentran las frecuencias que emiten la luz sensible a nuestros ojos, las diferencias de frecuencia en estas ondas electromagnéticas producen diferentes sensaciones en nuestro sentido de la vista que nos permite ver los objetos, llamadas colores. La luz visible es una pequeña región del espectro electromagnético cuyas ondas tienen una longitud que va desde los 780 nanómetros de la luz roja a unos 380 en la violeta. Por esto, la luz blanca es el conjunto de todas las longitudes de onda del espectro visible en proporciones iguales.

Cada longitud de onda corresponde a un color diferente del rojo al violeta, así el color es un fenómeno físico de la luz relacionado con las diferentes longitudes de onda en la zona visible que perciben las personas y algunos animales a través de los órganos de la visión, como una sensación que nos permite diferenciar los objetos del espacio con mayor precisión, los colores son: amarillo, azul, blanco, marrón, morado, naranja, negro, rojo, rosa, verde y violeta.

Radiación ultravioleta:

Existen tres categorías de radiación ultravioleta (UV): Radiación ultravioleta A (UVA), entre 320 y 400 nm es la menos nociva y la que llega en mayor cantidad a la Tierra; casi todos los rayos UVA pasan a través de la capa de ozono. Radiación ultravioleta B (UVB), entre 280 y 320 nm puede ser muy nociva pero la capa de ozono absorbe la mayor parte; sin embargo el actual deterioro de la capa aumenta la amenaza de este tipo de radiación. Radiación ultravioleta C (UVC), entre 200 y 280 nm es la más nociva debido a su gran energía. Afortunadamente, el oxígeno y el ozono de la estratosfera absorben todos los rayos UVC, por lo cual nunca llegan a la superficie de la Tierra.

Energía en los seres vivos

Existen dos fuentes básicas para preservar la vida en la Tierra: La más importante es el Sol, con la cual es posible que las plantas lleven a cabo la fotosíntesis, las demás fuentes energéticas son de origen químico. La conversión de la energía radiante se lleva a cabo en

la clorofila de las plantas verdes para disociar las moléculas de agua para sintetizar glucosa. El resultado de este proceso es generar energía potencial, también llamada alimento; éste “almacén” de energía constituye el primer eslabón de la cadena alimenticia que permitió el desarrollo de la biodiversidad del Planeta. Los seres humanos obtenemos la energía a partir del proceso de la fotosíntesis, de forma directa consumiendo vegetales y de forma secundaria consumiendo alimentos de origen animal.

Máquinas simples

Nuestra capacidad para modificar el entorno natural ha permitido que además de alimentarnos para sobrevivir, seamos capaces de utilizar una gran cantidad de fuentes de energía para satisfacer necesidades creadas en nuestra sociedad; entre ellas el uso de máquinas simples representó el inicio de una aventura que prevalece en la actualidad, a lo largo de la historia el ser humano ha desarrollado diferentes dispositivos para facilitar el trabajo realizado. Si el trabajo es el resultado de la fuerza aplicada a una distancia, al hacer más grande ésta, la fuerza necesaria se reduce; el resultado de este proceso mental dio pie al descubrimiento de la palanca, las poleas y diferentes mecanismos que se encuentran presentes tanto en las herramientas primitivas como en los modernos avances tecnológicos.

LA ENERGIA EN LA HISTORIA DE LA HUMANIDAD

Existen diferentes referentes para medir el grado de desarrollo de las sociedades en el actual esquema socioeconómico; uno de ellos, aunque cuestionable nos dice que, “el grado de civilización de cada época pueblo o grupo de pueblos se mide por su capacidad de usar la energía para promover el progreso o satisfacer las necesidades de la humanidad [...]”⁸. Otro referente que sigue la misma línea de pensamiento nos dice que “el nivel de desarrollo de una cultura está directamente relacionada con la cantidad de energía consumida per cápita” y el último, también con un enfoque puramente antropocentrista nos dice que “aprovechar y controlar la energía para ponerla al servicio del hombre”⁹.

Por otro lado, existe otro pensamiento con un enfoque diferente a los anteriores, este contraste de teorías es precisamente el hilo conductor que se encontrará presente a lo largo de este capítulo.

⁸Jardón, J.J *Energía y Medio Ambiente, Una perspectiva económico-social* Plaza y Valdéz, México,D.F. 1995. Pág. 35.

⁹ *Ibid.* Pág. 37.

Todo progreso se debe a suministros especiales de energía, y el progreso se evapora cada vez que estos desaparecen. El saber y el ingenio son medios que permiten aplicar los recursos energéticos cuando estos están disponibles y el desarrollo y la retención del conocimiento dependen también del suministro energético¹⁰.

De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar que el punto de partida de cualquier civilización es la disponibilidad de recursos energéticos, así como el consumo energético y la evolución cultural donde se toman en cuenta diversos factores: En primer lugar, la cantidad de energía consumida per cápita al año; segundo, la eficiencia de los medios tecnológicos para el control y la explotación de la energía; y tercero, la cantidad de bienes y servicios producidos destinados a cubrir las necesidades humanas. En este sentido la cultura puede evolucionar en la medida en que la energía disponible aumente y que los sistemas tanto de control como de distribución y consumo se hagan más eficientes.

Así, la energía no solo gobierna a las entidades biológicas sino también a las estructuras sociales desarrolladas por el crecimiento de la humanidad.

Un poco de historia

Los primeros asentamientos humanos dependían de la cantidad de alimentos para cubrir sus necesidades básicas, las migraciones humanas en su primera etapa se debían a la necesidad de encontrar fuentes de energía para su supervivencia. El descubrimiento del fuego tendría una gran repercusión en el estilo de vida de las sociedades primitivas, los hábitos de alimentación cambiarían para siempre, y la constante búsqueda de combustibles daría inicio a una larga carrera tecnológica que continúa hasta nuestros días. Con la aparición de la agricultura, la cantidad de energía producida generó excedentes que permitieron al hombre crear diversas formas de asentamientos sociales que se complejizaron. Estas reservas, flujos de consumo e intercambio de energía entre grupos sociales determinaron y siguen determinando el progreso o la decadencia de las culturas.

La generación y almacenamiento de energía necesaria y la restante fue obtenida primero a través del descubrimiento de la agricultura, permitiendo a las sociedades almacenar los excedentes para tiempos difíciles, o para intercambio de bienes diferentes, originando con esto, el intercambio comercial, pero el producto de la tierra no significó la única fuente de energía para el desarrollo de las civilizaciones; las conquistas, las colonizaciones y la esclavitud representaron por mucho tiempo una fuente importante de suministro energético para las culturas dominantes en todo el planeta.

Durante la Edad Media se desarrollaron una serie de sistemas de captación energética dignas de revalorar en el presente; además de las guerras, conquistas y la misma esclavitud, los sistemas de captación energética por medio de el viento, transformada en trabajo

¹⁰ Odum, H.T, *Ambiente, Energía y Sociedad*. Blume. Barcelona, 1980. Pág. 49.

directo para moler grano o para la extracción de agua de los pozos así como el aprovechamiento del caudal de los ríos para su transformación en diversas tareas de la vida cotidiana conformaron la vida feudal en villas autosuficientes¹¹.

La llegada del pensamiento renacentista se centró en el humanismo y en el desarrollo del pensamiento científico, preparó el escenario para que se llevara a cabo el descubrimiento del carbón y de la máquina de vapor para el uso industrial y la producción masiva que representó el inicio de la Revolución Industrial.

Del uso de combustibles fósiles y su derivación a electricidad; gasolinas que dieron como origen a las telecomunicaciones y los medios de transporte. Sin embargo, existen reglas que gobiernan el uso de la energía llamadas reglas de la termodinámica (página 26), que finalmente conforman el esquema que nos permite entender el proceso de la vida en el planeta, esto nos obliga a relacionarlo con nuestras actividades en la dinámica socioeconómica.

QUEMA DE HIDROCARBUROS ¿UNA PRACTICA OBSOLETA?

El descubrimiento del fuego es quizás uno de los acontecimientos más importantes en la historia de la humanidad, ya que gracias a su uso, procesos que dependían de la naturaleza, ahora podían ser controlados e incluso modificados, a partir de este acontecimiento, la energía ha sido un factor decisivo para la satisfacción de necesidades del ser humano y sus complejas formas de civilización. De este modo, las sociedades pasadas, presentes y futuras dependen de la energía por tres determinantes: por el crecimiento demográfico, por el desarrollo social y por el progreso económico (Nackicenovic, Grübler y Mc Donald, 1998). Durante la antigüedad y hasta la época feudal, los sistemas energéticos dependían de los flujos naturales de energía como la fuerza animal y humana, del uso del fuego, del aprovechamiento de la radiación solar, del viento y las corrientes de los ríos para ser transformadas en forma de calor, luz y trabajo, de éste modo se podían ofrecer los servicios requeridos.

En el caso del fuego, la única forma de transformación química consistía en la combustión de leña o de velas para proveer de energía lumínica y calorífica, sobre todo cuando las fuentes directas de energía no estaban disponibles. Sin embargo, el aprovechamiento de combustibles fósiles en desarrollos tecnológicos creados hacia los inicios del siglo XVII cambiaría por completo la forma de conformar el entorno en las sociedades.

El acontecimiento que marca la primera transición energética mundial fue durante la Revolución Industrial con el descubrimiento y desarrollo de la máquina de vapor

¹¹ Jardón, J.J. *Energía y Medio Ambiente*. Pág. 42.

alimentada por carbón. Por vez primera se hace uso de un energético de origen fósil, ubicado geográficamente en puntos específicos, que provocaría la necesidad de transportarlo de un lugar de extracción a otro donde sería consumido. Este punto de partida marcaría un radical cambio en la dinámica de la sociedad, el éxodo de los feudos y el nacimiento de zonas industriales que se convertirían en las primeras ciudades.

La segunda transición consistió en la diversificación de las fuentes de energía y en los sistemas de transformación de la misma, el descubrimiento de la electricidad, el desarrollo del motor de combustión interna provocaron el uso del petróleo como la principal fuente de generación de energía en los sistemas de transporte para de consumo doméstico e industrial.

Al hacer un análisis sobre las fuentes de energía primaria a partir de la época industrial podemos notar como las fuentes naturales casi han desaparecido en países industrializados, en contraste, la dependencia del carbón mineral, de los hidrocarburos provenientes del petróleo y la energía nuclear en la actualidad marcan un paréntesis digno de reflexión.

Por otro lado, al relacionar el consumo de combustibles fósiles con relación a la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera, podemos darnos cuenta que el deterioro ambiental es provocado en gran medida por la quema de los combustibles como el petróleo y sus derivados.

LA TERMODINAMICA EN LA SOCIEDAD

Lo primero que debemos es entender el proceso termodinámico a través de sus leyes y después relacionarlo con ejemplos claros en el auge y caída de diferentes civilizaciones. Con esto podremos entender a la termodinámica como una de las ciencias que deben adoptarse en las instituciones educativas. Los procesos termodinámicos son multidimensionales y solo pueden entenderse desde la perspectiva sistémica, del mismo modo como las sociedades no pueden entenderse con los procesos lineales propuestos desde los tiempos de Adam Smith basados en la disponibilidad de recursos finitos que tiene cada nación.

Como ya se ha mencionado, la energía es la facultad que tienen los entes físicos para producir trabajo cuya principal propiedad es su capacidad de transformación de un estado a otro a partir de una fuente primaria, pero cada transformación es regida por leyes de la termodinámica que regulan cada una de estas fases, la más importante es la primera ley que habla sobre la conservación de la energía y nos dice que ésta no se crea, tampoco se destruye, solo se transforma. La termodinámica es una disciplina compleja que se apoya en diferentes áreas del conocimiento que conforman una doctrina que ha sido uno de los

aportes más importantes para la ciencia desde el siglo XIX; explica las relaciones internas de los sistemas y su evolución, sus principales conceptos de estudio son la materia y la energía ubicadas en el tiempo y en la dirección que rige su evolución:

“Los conceptos termodinámicos proporcionan la única indicación objetiva de la dirección en la que transcurre el tiempo”¹², dicho de otro modo: marcan las pautas de la evolución situando de forma inequívoca cada estado después de los que lo antecedieron. De este modo, la termodinámica se ocupa de procesos concretos de la realidad como:

- El intercambio de energía entre los cuerpos.
- Procesos abstractos que tienen conexión con procesos en la historia de las sociedades, con planteamientos filosóficos, y sobre todo, con la evolución de la construcción de nuestro entorno artificial.

La termodinámica se basa en dos principios fundamentales que rigen los procesos de transformación de la energía, tales principios serán tratados en los siguientes puntos.

Primer principio

Expresado en términos de la física. “la energía ni se crea ni se destruye, en un sistema aislado permanece constante”. En este principio también se establece la equivalencia entre el calor y otras manifestaciones de energía como la mecánica y la eléctrica de modo que todo tipo de energía puede tener valores cuantitativos expresados en las mismas unidades (página 18). También nos dice que un trabajo mecánico realizado sobre un sistema puede aumentar la energía interna y establece un flujo de calor, de hecho, el destino de todo trabajo mecánico es el de convertirse en calor generado por fricción. Sin embargo, este principio no menciona el proceso de transformación inversa es decir de calor a energía mecánica o eléctrica; en cambio, postula que una máquina no puede hacer más trabajo que la energía de cualquier clase disponible en el sistema. De ahí que las máquinas de movimiento perpetuo sean solo un mito, un intento por contradecir este principio de irreversibilidad de la energía.

Por otro lado, existe otro aspecto importante en este principio “si la energía no se crea ni se destruye e s imposible producirla e igualmente consumirla, solo es posible utilizarla, transformarla”.¹³ Por ello, para disponer de energía, hace falta disponer de una fuente primaria como un trozo de carbón que contiene energía química utilizable y puede ser trasformada en calor, durante este proceso se genera un residuo que ya no es utilizable.

¹² Lucerna, Antonio. *Energías Alternativas y Tradicionales, sus Problemas Ambientales*. Talasa. Madrid. 1998. Pág. 102.

¹³ *Ibid.* Pág. 107.

La interpretación social de este fenómeno se traduce en contaminación y con residuos no deseables, estos son manifestados en forma de materia pero también en residuos de calor de baja temperatura no útil.

Segundo principio

Esta ley es de gran importancia tanto en la ciencia como en la dinámica social, por ello es considerada como una gran aportación a partir del siglo XIX a las ciencias y al desarrollo tecnológico. Este principio se formula en tres formas diferentes. La primera nos dice que “es imposible calentar un cuerpo con otro más frío sin producir otro efecto”; esta primera interpretación del principio afirma la idea generalizada de que el calor es transferido de los cuerpos calientes a los fríos, tendiendo a nivelar las temperaturas.

La segunda interpretación nos dice que “es imposible que un motor térmico tome calor de un foco (fuente primaria) y lo transforme íntegramente en trabajo”; toda máquina térmica funciona extrayendo calor de un foco (fuente) vertiendo parte de éste en un foco frío (dispositivo convertidor de energía) y transformando la diferencia en trabajo según el primer principio. Esto nos permite apreciar que no es posible la existencia de una máquina térmica de la que se obtenga energía mecánica sin que cuente con dos fuentes a diferente temperatura, aunque la diferencia sea mínima. Con esto podemos decir que hay una tendencia a la igualación de la temperatura y que la energía a baja temperatura es degradada.

La tercera interpretación nos dice que “los procesos naturales ocurren de manera tal que la entropía¹⁴ de un sistema aumenta”, la esencia de este segundo principio habla de la transformación de energía y cómo en un sistema aislado va reduciéndose a energía térmica, por lo tanto con una posibilidad de transformación más reducida. También habla de que no hay manera de obtener niveles térmicos superiores sin volver a transformar trabajo en más calor, esto significa el aumento de entropía en los sistemas.

Según la teoría de los sistemas termodinámicos, existen tres tipos: abiertos, cerrados y aislados. Los sistemas abiertos son aquellos capaces de intercambiar materia y energía. Los cerrados no intercambian materia pero si energía. Los aislados, en cambio, no tienen la capacidad de intercambio energético ni de materia. Nuestro planeta es considerado un sistema cerrado porque no tiene intercambio de materia, salvo algunos meteoritos que ingresan ocasionalmente, pero recibe una gran cantidad de energía proveniente del Sol. Esto quiere decir que la tierra posee una cantidad limitada de materia que es transformada constantemente por la energía solar y que gracias a ella surgió la vida. La descomposición constante de esta vida generó lo que llamamos hidrocarburos y los encontramos en forma

¹⁴ La *entropía* mide el desorden, con la característica de instalarse de forma progresiva en el Universo, por lo tanto la energía en un sistema está en su nivel nulo en cuanto a posibilidades de aprovechamiento y la entropía en su nivel más alto. Esto quiere decir que mientras más alta sea la entropía en un sistema, la utilidad de la energía será menor.

de carbón, petróleo y gas; actualmente estos residuos son utilizados como la principal fuente energética en el planeta. Esos sistemas también son regidos por leyes que nos dicen como se comporta la energía y su comprensión nos es útil para entender, corregir y planear nuestra dinámica en función del cuidado de los recursos naturales y la preservación de la naturaleza y nuestra vida social.

Como se ha visto, esta segunda ley de la termodinámica establece que la energía se transforma constantemente, sin embargo, siempre lo hace en una dirección: de disponible a no disponible, es decir, que la energía utilizada se disipa y ya no está disponible para realizar trabajo útil, este proceso unidireccional también tiene la característica de ser irreversible. Podemos citar un ejemplo: un trozo de leña es quemado para obtener calor, en cambio, es transformado en cenizas y en dióxido de carbono, esa energía es transformada, pero no volverá a ser utilizada para el mismo fin al menos en este "ciclo", puesto que como bióxido de carbono o cenizas, son compuestos químicos necesarios quizá, para la vida de plantas que, más adelante se convertirán en troncos "combustibles" para poder generar calor nuevamente. La pérdida de energía aprovechable es llamada entropía, este concepto ha tomado gran importancia en los últimos años con la llegada de las crisis energéticas provocadas por el desabasto de hidrocarburos.

Cuanto más evoluciona una especie en su escala natural, mayor es la energía que se requiere para mantenerla en un estado de homeostasis¹⁵ y mayor entropía en el proceso de mantenerla con vida, esto mismo ocurre con las sociedades.

La idea de Adam Smith fue la de comparar el mercado con un mecanismo en el que la oferta y la demanda se ajustan constantemente entre sí. Si aumenta la demanda de los consumidores sobre un bien o servicio, los vendedores subirán el precio. Esta misma lógica es aplicada al consumo de los recursos naturales. Dando por hecho que estos siempre estarán disponibles

Al final, todas las civilizaciones terminan por consumir más orden, en este caso recursos energéticos de su entorno del que son capaces de crear y dejan a la Tierra y sus recursos naturales más pobre de lo que era antes y por ende la tendencia al aumento de entropía. Este concepto y la idea de la muerte térmica del Universo basada en el proceso entrópico tienen un reflejo en diversas manifestaciones humanas, tal es el caso de la religión budista: la noción del anonadamiento del Nirvana, como cesación de todo sentimiento y sensación, tiene relación directa con la quietud absoluta referida a la imposibilidad de efectuar trabajo alguno. Existen también ejemplos claros en la evolución de las sociedades, tomando en cuenta como el proceso entrópico aumenta en cada una de sus fases de desarrollo hasta su colapso.

¹⁵ La *homeostasis* es la propiedad de un sistema que define su nivel de respuesta y de adaptación a su entorno. Los sistemas altamente homeostáticos sufren transformaciones estructurales en igual medida que el contexto sufre transformaciones, ambos actúan como condicionantes del nivel de evolución.

Casos particulares

Aún no se sabe con certeza la razón por la cual, diferentes civilizaciones desaparecieron sin dejar rastro, un ejemplo claro es la cultura Maya que dejó numerosos vestigios que demuestran que se trataba de una organización social compleja y avanzada, sin embargo la razón de su decadencia está construida con base a ciertas teorías que explican un posible éxodo masivo de la población por la insuficiencia de alimentos determinada por dos circunstancias ligadas entre sí¹⁶: la primera se refiere a la creciente demanda de alimentos en una sociedad con alta concentración de habitantes, y la segunda se refiere al hecho de que un alto ritmo productivo era insostenible bajo las especiales condiciones de cultivo en la zona, donde la selva obstruye o invade constantemente las parcelas, limitando puntualmente la actividad agrícola. Otro punto de vista se refuerza al explicar este fenómeno a través de las consecuencias sociales y económicas causadas por su actividad bélica entre poblaciones de la región. Esta actividad implicaba un desgaste constante para su economía, ya que el mantenimiento de ejércitos incluye la pérdida permanente de vidas y el gasto de recursos no productivos en la sociedad, causado por la creciente entropía generada precisamente por su crecimiento.

Otro dato mejor documentado se refiere al imperio romano¹⁷ que surge gracias a su poderío militar, que facilitó la conquista, colonización y saqueo de otras culturas. La energía no era generada, sino transmitida hacia el imperio, esta dinámica permitió el crecimiento de Roma hasta llegar a un millón de habitantes, su época de gloria se debió a la gran cantidad de esclavos y bienes conquistados, sin embargo, el poderío militar creció de forma desmedida, el aumento de la entropía creció también de forma desproporcionada con relación a la cantidad de energía que se podía extraer de los pueblos conquistados. Las tierras del imperio fueron abandonadas por la migración hacia la ciudad, además que las tierras erosionadas ya no podían satisfacer la creciente demanda de alimentos; la fuerza militar paulatinamente fue ganando edad y perdiendo su potencial para generar energía, ya que no había territorios conquistables.

La decadencia de la civilización Romana tuvo su inicio precisamente de esta forma, el esfuerzo por mantener el equilibrio del sistema socioeconómico ya no contaba con los factores necesarios para lograr su subsistencia, con la caída del imperio, daría inicio la Edad Media a través de Feudos, este nuevo sistema termodinámico duró casi diez siglos sin variaciones importantes hasta la aparición de un nueva dinámica energética durante la Revolución Industrial.

¹⁶ Nalda, Enrique. "Clásico terminal (750-1050 d.C.) y Posclásico en el área Maya", en: *Revista Arqueología Mexicana*. México. No. 76, nov-dic 2005. Pág. 31.

¹⁷ Rifkin, Jeremy, *La Economía del Hidrogeno* Paidós, Barcelona, 2002. Pág. 78.

Un posible escenario

Conocer la dinámica económica en las diferentes civilizaciones desde el punto de vista termodinámico nos puede hacer entender con más precisión que nos encontramos ante una encrucijada, pero también puede arrojar luz que nos indique a que camino no debemos dirigirnos. No todas las respuestas están a la mano, pero el uso de los recursos naturales debe tender hacia opciones para reducir la dependencia del petróleo como principal energético.

La aplicación de la termodinámica es muy amplia y como se ha visto, puede ser referida a nuestra dinámica social. Aún considerando al planeta como un sistema cerrado, la entropía no dejará de crecer, sin embargo, si apuntamos nuestra apertura hacia nuestra fuente energética principal que es el Sol, podemos evitar un crecimiento entrópico que puede tener tintes dramáticos gracias a las enormes reservas energéticas con que cuenta este astro, claro está tomando en cuenta la escala de tiempo de los seres humanos.

2 ENERGIA Y EL MEDIO AMBIENTE

EL CAMBIO CLIMÁTICO

El clima consiste en una serie de fenómenos que determinan las condiciones de temperatura, humedad y presión atmosférica necesarias para que pueda desarrollarse la vida en el planeta. Es considerado como el equivalente a un sistema circulatorio a escala planetaria donde la radiación solar es la fuente primaria de energía para dar lugar al movimiento a masas de aire y al ciclo hidrológico, que consiste en el intercambio de agua entre el océano y la tierra; ambos procesos en un equilibrio dinámico y complejo (páginas 64 y 84).

El principal factor que influye en la conformación del clima es la radiación solar en forma de ondas electromagnéticas que son filtradas por los gases existentes en la atmósfera, permitiendo que lleguen a la superficie luz visible, infrarroja y parte de la ultravioleta, reflejando aquellas que son nocivas para los seres vivos.

Mientras que la atmósfera absorbe la radiación infrarroja y ultravioleta, la luz visible llega a la superficie de la Tierra. Una parte muy pequeña de esta energía que nos llega en forma de luz es utilizada por las plantas verdes para producir hidratos de carbono, en un proceso químico conocido con el nombre de fotosíntesis. En este proceso, las plantas utilizan anhídrido carbónico y luz para producir hidratos de carbono (nuevos alimentos) y oxígeno. En consecuencia, las plantas verdes juegan un papel fundamental para la vida, ya que no sólo son la base de cualquier cadena alimenticia al ser generadoras de alimentos sino que, además, constituyen el único aporte de oxígeno a la atmósfera.

En la fotosíntesis participa únicamente una cantidad muy pequeña de la energía que llega a la superficie terrestre en forma de luz visible. El resto de esta energía es absorbida por la superficie de la Tierra que, a su vez, emite gran parte de ella como radiación infrarroja. Esta radiación infrarroja es absorbida por algunos de los componentes de la atmósfera que a su vez, es reflejada de nuevo hacia la Tierra. El resultado de todo esto es que hay una gran cantidad de energía circulando entre la superficie de la Tierra y la atmósfera, y esto provoca un calentamiento de la misma. Así, se ha estimado que, si no existiera este fenómeno, conocido con el nombre de efecto invernadero, la temperatura de la superficie de la Tierra sería de unos veinte grados bajo cero. Entre los componentes de la atmósfera implicados en este fenómeno, los más importantes son el anhídrido carbónico y el vapor de agua (la humedad), que actúan como un filtro en una sola dirección, es decir, dejan pasar energía, en forma de luz visible, hacia la Tierra, mientras que no permiten que la Tierra emita energía al espacio exterior en forma de radiación infrarroja (página 21).

El clima del planeta varía constantemente, actualmente la temperatura global promedio es de 15°C, pero existen evidencias geológicas sobre fluctuaciones desde 7 a 27°C, esto sugiere que variaciones de este tipo se deben a procesos naturales; sin embargo diferentes grupos de científicos consideran que el calentamiento actual no se debe a procesos propios de la naturaleza, sino que es resultado reciente de la actividad humana.

La mayor parte del calentamiento global en los últimos años es probable que se haya debido al aumento en las concentraciones de gases invernadero principalmente al CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas. Este fenómeno tiene implicaciones graves para la estabilidad del clima, de la que depende gran parte de los procesos biológicos en el planeta, y que además de influir en calentamiento global, se observan fenómenos como lluvias ácidas y la alteración de la capa de ozono, temas que serán tratados con mayor precisión.

Efecto invernadero

Durante muchos millones de años, el efecto invernadero natural ha mantenido el clima de la Tierra a una temperatura media relativamente estable y ha permitido el desarrollo de la vida. Los gases invernadero retenían el calor del sol cerca de la superficie de la Tierra, ayudando a la evaporación del agua superficial para formar las nubes, las cuales devuelven el agua a la Tierra formando el ciclo hidrológico. La lluvia y el calor del Sol han permitido a las plantas crecer, conformar el suelo y mantener todas las formas de vida en el proceso. Las plantas y el suelo han absorbido el dióxido de carbono y otros gases invernadero del aire. Una compleja mezcla de sistemas biológicos e hidrológicos desprenden la cantidad exacta de dióxido de carbono para mantener un equilibrio estable de estos gases en el aire.

En los últimos 160 000 años, la tierra ha pasado dos períodos en los que las temperaturas medias globales se ubicaron alrededor de 5°C más abajo que las actuales. El

cambio fue lento, transcurrieron varios miles de años para salir de la "era glacial". Si embargo, en la actualidad las concentraciones de gases invernadero en la atmósfera están creciendo rápidamente, como consecuencia de que por un lado el mundo quema cantidades cada vez mayores de combustibles fósiles y por otro destruye los bosques, que de otro modo podrían absorber CO₂.

El efecto invernadero ha provocado un cambio climático sin precedentes en el planeta debido a la presencia de diferentes gases dispersos en la atmósfera, los más importantes son:

- Vapor de agua,
- Dióxido de carbono (CO₂),
- Metano (CH₄), óxidos de azufre (S₂O),
- Óxido nitroso (N₂O),
- Ozono (O₃)
- Varias clases de halo-carbonados (químicos que contienen carbono, flúor, cloro y bromo).

Este tipo de gases tienen la capacidad de permitir la entrada de una parte de la radiación del Sol a la atmósfera terrestre, incluyendo radiación ultravioleta, el espectro visible y radiación infrarroja. Sin embargo al ser reflejada en la superficie, la radiación infrarroja queda atrapada por los gases llamados de efecto invernadero, esta radiación es en parte reflejada nuevamente hacia la superficie terrestre en forma de energía calorífica dando como resultado un calentamiento no habitual.

Por su parte, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso son específicamente los gases de efecto invernadero que provocan la mayor parte del calentamiento global.

Aunque existen grupos escépticos sobre el cambio climático en el planeta, existe un amplio consenso entre diferentes científicos afirmando que la causa principal son las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la actividad humana. Estas emisiones y su constante aumento son responsables de un aumento de las temperaturas, aumento que seguirá produciéndose en las próximas décadas, hasta alcanzar niveles de entre +1.4° C y +5.8° C en todo el planeta; estas predicciones aplican desde ahora y hasta el año 2100 comparativamente a las temperaturas de 1990, según el Grupo Intergubernamental de Expertos de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático¹.

Consecuencias del efecto invernadero:

El clima planetario es muy difícil de predecir porque existen muchos factores para tomar en cuenta: lluvia, luz solar, vientos, temperatura, etcétera interactuando entre sí en un sistema

¹ Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. "Escenarios de Emisiones. Resumen para Responsabilidades Políticas". IPCC, informe especial. PNUMA. 2004. Pág.3.

muy complejo, por eso no se puede definir exactamente qué efectos acarreará el calentamiento global. Pero según estimaciones científicas los cambios climáticos podrían ser muy severos. Las consecuencias que pueden esperarse para este siglo, en caso de que no se tomen medidas para disminuir el aumento de los gases que lo ocasionan son:

- Aumento de la temperatura promedio del planeta.
- Aumento de sequías en unas zonas e inundaciones en otras.
- Mayor frecuencia de formación de huracanes.
- Progresivo deshielo de los casquetes polares, con la consiguiente subida de los niveles de los océanos.
- Incremento de las precipitaciones a nivel planetario pero lloverá menos días y más torrencialmente.
- Aumento de la cantidad de días calurosos, traducido en olas de calor².

Elementos estratégicos sobre el cambio climático:

Tomando en cuenta los efectos que produce el efecto invernadero, una estrategia de lucha contra el cambio climático debe desarrollarse en cuatro ámbitos distintos:

- El riesgo climático en sí mismo y la voluntad política de hacer frente al mismo
- La participación internacional en la lucha contra el cambio climático
- La innovación necesaria para un cambio de los métodos de producción y utilización de la energía
- La adaptación de los países a los efectos inevitables del cambio climático.

Lluvia ácida

Diversos estudios han confirmado que el dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) lanzados hacia la atmósfera provenientes de la quema de combustibles fósiles como el carbón y los hidrocarburos son las principales causas del fenómeno llamado "lluvia ácida". La lluvia ácida ocurre cuando este tipo de gases reaccionan en la atmósfera con el agua, el oxígeno, y otros químicos que se encuentran suspendidos en el aire para formar diversos compuestos ácidos, la radiación solar aumenta la velocidad de dichas reacciones; dando como resultado la generación de ácido sulfúrico a partir del dióxido de azufre y ácido nítrico a partir del óxido nitroso. La lluvia normal es ligeramente ácida, por llevar ácido carbónico que se forma cuando el dióxido de carbono del aire se disuelve con el vapor de agua. Su pH suele estar entre 5 y 6. Pero en las zonas con la atmósfera contaminada por estas sustancias acidificantes, la lluvia tiene valores de pH de hasta 4 o 3 y, en algunas zonas en que la niebla es ácida, el pH puede llegar a ser de 2.3, es decir tan ácida como el jugo de limón o el vinagre.

² *Ibid.* Pág 3.

Deposición ácida:

Existen diversas manifestaciones de la "lluvia ácida" por eso el término más preciso es la "deposición ácida", la cual tiene dos manifestaciones: húmeda y seca.

La deposición húmeda se refiere a la lluvia, la niebla y a la nieve como principales vehículos para precipitar los ácidos a la superficie terrestre, afectando tanto a animales y plantas como a las edificaciones creadas por el hombre. La gravedad de sus efectos depende de la cantidad de ácidos suspendidos.

La deposición seca se refiere a los gases y partículas ácidas que se encuentran en el aire, el viento dispersa estas partículas y son depositadas en la superficie; aproximadamente el 50% de la acidez en la atmósfera cae de nuevo a la tierra a través de este mecanismo.

Los vientos transportan los compuestos que causan las dos formas de deposición ácida, la húmeda y la seca, dispersándola de forma aleatoria hacia diferentes lugares lejanos al punto de emisión de estos contaminantes ocasionando que sus efectos afecten zonas alejadas de las grandes ciudades.

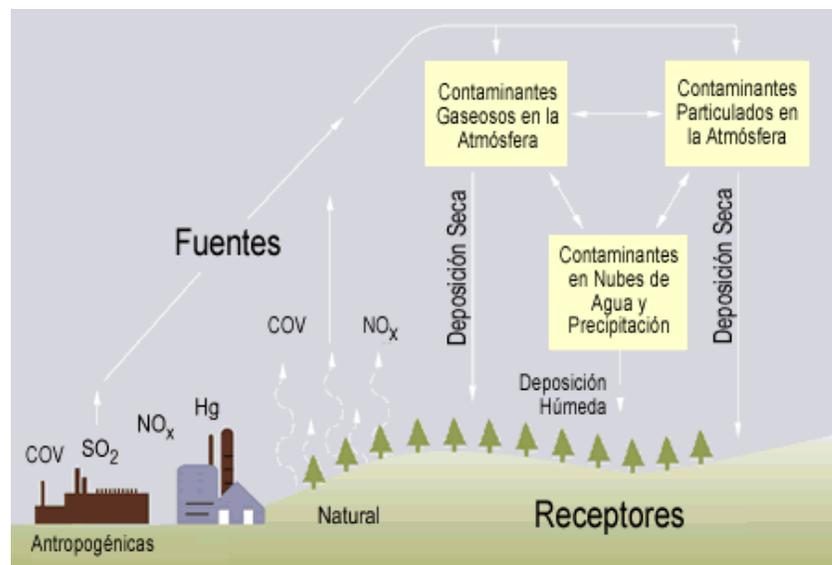


Figura 1 La mayor parte de las fuentes emisoras de contaminantes que producen la lluvia ácida son causadas por la quema de hidrocarburos.
Fuente: Tierramerica

Consecuencias de la lluvia ácida:

La lluvia ácida tiene diferentes efectos, incluyendo el daño a la vegetación, suelos, vida acuática y marina; materiales, y la salud humana.

- Ecosistemas acuáticos. En ellos está demostrada la influencia negativa de la acidificación. Por ejemplo la situación de cientos de lagos y ríos de Suecia y Noruega,

entre los años 1960 y 1970, se vio que el número de peces y anfibios iba disminuyendo de forma inusual. La reproducción de los animales acuáticos es alterada porque muchas especies no pueden subsistir en aguas con pH inferiores a 5.5. La situación es más grave donde los lagos y ríos no cuentan con roca no caliza, porque cuando el terreno es de origen calcáreo, los iones alcalinos son abundantes en el suelo y neutralizan en gran medida la acidificación; pero si las rocas son de granito, o rocas ácidas pobres en cationes, los lagos y ríos se ven mucho más afectados por una deposición ácida que no puede ser neutralizada por la composición del suelo.

- Ecosistemas terrestres. La influencia sobre las plantas y otros organismos terrestres no está tan clara, pero se sospecha que puede ser un factor muy importante de la llamada "muerte de los bosques" que afecta a grandes extensiones de superficies forestales en todo el mundo. También parece muy probable que afecte al ecosistema terrestre a través de los cambios que se producen en los suelos. Sin embargo, es necesario llevar a cabo observación y estudio sobre dichos efectos.
- Edificios y construcciones. Los ácidos provocan la corrosión en diferentes materiales de construcción como los metales, el concreto y la piedra caliza considerándolo como efecto dañino producido por la lluvia ácida. La deposición ácida afecta principalmente a los edificios y obras de arte situadas en la intemperie, degradándolos con mayor rapidez que la que se produciría condiciones de acidez natural en la lluvia.

Dstrucción de la capa de ozono

La molécula de oxígeno se encuentra en la naturaleza compuesta por dos átomos (O_2), en cambio la molécula de ozono (O_3) está conformada por tres átomos, el tercer átomo determina a este gas propiedades únicas que protegen a la tierra cuando está suspendido a grandes alturas sobre la superficie terrestre, sin embargo cuando se encuentra a nivel donde los seres vivos consumen el oxígeno del aire, este gas es venenoso aún si es respirada una mínima cantidad.

El proceso de producción del ozono tiene lugar en la estratosfera, ubicada en un rango de 15 a 50 Km. sobre la superficie de la Tierra³, sus moléculas son inestables, es decir se crean y se destruyen con relativa facilidad. El factor de producción del ozono más importante es la radiación ultravioleta (páginas 21 y 37), cuya radiación proviene de los rayos solares que descomponen a las moléculas de oxígeno dejando átomos libres que se unen a otras moléculas formando una diferente con tres átomos (O_3), estas moléculas son fácilmente disociadas por diferentes gases que se encuentran en la atmósfera como el Nitrógeno (N), el Hidrógeno (H_2), y principalmente por el Cloro (Cl).

³ Consejo de Administración del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) "¿Qué es la Capa de Ozono?". Londres. 1993. Pág. 4.

Capa de ozono:

El ozono tiene propiedades diferentes de acuerdo a la altura donde se encuentre dentro de la atmósfera de la Tierra:

- Cerca de la superficie llamada troposfera el ozono es un gas considerado como contaminante porque contribuye al fenómeno de la lluvia ácida y también entra en la clasificación de gas de efecto invernadero.
- Esparcido en los 35 Km de espesor que conforma la estratosfera forma una capa que tiene el papel de escudo protector que bloquea la mayor parte de los dañinos rayos ultravioleta⁴.

Por su inestabilidad molecular, esta capa es considerada como un escudo frágil y de muy poca densidad, ya que si fuese comprimida tendría un espesor aproximado de 1cm; sin embargo tiene la capacidad de bloquear las radiaciones ultravioleta de menor frecuencia, consideradas como las más nocivas para la vida del Planeta.

Radiación ultravioleta:

La radiación ultravioleta es un tipo de onda electromagnética con un rango de frecuencia mayor que el de la luz visible, existiendo diferentes tipos clasificados de la siguiente manera:

- Rayos ultravioleta (UV). Este tipo de radiación es considerada como la más peligrosa para la vida del planeta, la capa de ozono tiene la capacidad de bloquearla casi por completo.
- Rayos ultravioleta A (UVA). Es la radiación UV que tiene la mayor longitud de onda, considerada como la más inofensiva, la capa de ozono no puede filtrarla, de modo que la mayor parte llega a la superficie de la Tierra.
- Rayos ultravioleta B (UVB). Este tipo de radiación tiene importantes efectos sobre el sistema inmunológico de los seres vivos, cuyos cambios podrían aumentar los casos de enfermedades infecciosas, provocando que programas actuales de inmunización sean insuficientes; en adición, incide en algunos tipos de cáncer de la piel, también provocan un aumento de los males oculares como las cataratas y/o la deformación del cristalino. Además propicia cambios en la composición química de diferentes especies de plantas, cuyo resultado sería una disminución de las cosechas y la reducción de áreas boscosas. Por otro lado también afecta la vida en los océanos: al plancton, fitoplancton, y pequeñas especies de animales y plantas que constituyen el primer eslabón en la cadena alimenticia del mar. El entorno artificial también puede ser afectado, los materiales utilizados en la construcción, las pinturas y los envases y

⁴ *Ibid.* Pág 18.

muchas otras sustancias son degradados; entre ellos los plásticos utilizados al aire libre son los más afectados.

- Rayos ultravioleta C (UVC). Por su parte, la radiación UVC es más dañina que la UVB al causar la ceguera producida por el reflejo de la nieve en zonas polares⁵.

Destrucción de la capa de ozono:

Los clorofluorocarbonos (CFC) son materiales inertes, con gran estabilidad molecular, no inflamables ni venenosos, fáciles de almacenar y baratos de producir, eran considerados como ideales para diferentes finalidades.

La mayor parte de los CFC producidos en el mundo se utilizan en la industria de la refrigeración, en sistemas de aire acondicionado, aerosoles y en la producción de plásticos expandidos utilizados industrialmente o para la fabricación de envases y objetos de usos cotidiano.

La estructura de estos materiales que contienen CFC les permite atacar la inestable capa de ozono. El proceso inicia cuando este gas es liberado a la atmósfera, por su bajo peso molecular suben lentamente hacia la estratosfera donde, en presencia de los rayos ultravioleta C (UVC) es disociado dejando libres átomos de cloro. Estos átomos de cloro tienen la capacidad de asociarse con las moléculas de ozono capturando un átomo de oxígeno, convirtiendo a los restantes en oxígeno común. El cloro actúa como un catalizador que provoca la destrucción del ozono, debilitando la capa protectora, pero el mayor peligro es que se mantiene en la estratosfera entre 70 y 100 años con la posibilidad de repetir el proceso. En este caso cada molécula de cloro destruye miles de moléculas de ozono afectando principalmente la zona polar sur.

La cantidad de estos compuestos químicos destructores del ozono en la atmósfera siguieron aumentando hasta la recta final del siglo XX y la presencia del cloro en la atmósfera podría tardar hasta el año 2060 para alcanzar un volumen inferior a 2 partes por mil millones, para que se establezca la capa de ozono por completo⁶.

LOS LÍMITES DEL CRECIMIENTO

Sustentabilidad, o desarrollo sustentable es un término utilizado desde la década de los años ochenta, en términos generales es definido como aquel que se puede extender a toda la población mundial, presente y futura, sin destruir la base natural de la vida en el planeta, cuya viabilidad depende del avance de las tecnologías emergentes, capaces de ahorrar energía y preservar los recursos naturales. Nace de un análisis que incumbe a todos y que si

⁵ *Ibid.* Pág 18.

⁶ *Ibid.* Pág 20.

seguimos actuando como si no pasara nada, estamos comprometiendo el futuro de la humanidad y de los ecosistemas que prevalecen en nuestro planeta.

El crecimiento económico y el capital natural son dos conceptos que no son compatibles en las economías actuales, el primero se refiere a la necesidad de aumentar de tamaño gracias al consumo, a la asimilación y el decrecimiento de materiales y recursos del planeta; el segundo se refiere al desarrollo, lleva a cabo un despliegue de potencialidades que nos lleva a ser mejores o por lo menos a proceder de forma diferente. Por un lado el crecimiento económico tiene un carácter cuantitativo, por otro, el desarrollo tiene un carácter cualitativo⁷. El problema radica en que el primero no considera que el crecimiento se potencializará en un planeta que tiene recursos finitos, en el segundo se trata de abordar el problema de modo que esa potencialización surja de los seres humanos para poder afrontar el problema de forma integral y abandonar nuestro ritmo de vida actual. Para entender de mejor forma ésta realidad se requiere abordar el problema de forma interdisciplinaria, de observarlo desde diferentes puntos de vista.

Nuestro futuro común

La UNESCO a través de la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y Desarrollo ha reunido a los líderes de las potencias económicas del planeta. El primer encuentro de la Comisión en 1987, la señora Brundtland muestra su informe llamado "Nuestro Futuro Común"⁸, en él nace el concepto de desarrollo sostenible. Las bocas por alimentar aumentan, los recursos para alimentarlas se destruyen, ésta paradoja resume la gran problemática a la que nos enfrentamos. Este informe considera cuatro puntos esenciales en el análisis de la situación socioeconómica actual: En primer término se trata de terminar con la pobreza, indica cómo los hemisferios están polarizados, tenemos al norte rico y al sur pobre, en gran medida la situación ambiental presente se debe al crecimiento económico de los países del norte a partir de la sobreexplotación de los países pobres.

En segundo término explica que la demografía mundial ha crecido de manera exponencial, habitamos en un mundo lleno, actualmente utilizamos el 40% del producto de la fotosíntesis del planeta, si seguimos creciendo con la misma tendencia, la próxima generación necesitará el 80% lo cual es prácticamente imposible, además de indeseable; la acumulación del capital humano tiene un factor limitador que es el capital natural, pongamos un ejemplo: el factor limitador de la industria pesquera será la capacidad de reproducción de las especies marinas y no del número de pesqueros.

⁷ *Crecimiento económico*: que significa hacerse más grande (crecimiento cuantitativo).

Desarrollo económico: que significa hacerse mejor (crecimiento cualitativo) sin incrementar el consumo total de energía y material más allá de un nivel razonablemente sostenible.

⁸ En éste informe se concluye que "una expansión de 5 a 10 veces de cualquier cosa que remotamente se parezca a la economía actual simplemente nos lanzaría con mayor rapidez desde nuestra propia insostenibilidad a largo plazo hasta el colapso inminente".

En tercer término la tecnología es considerada como una cualidad humana capaz de cambiar el camino emprendido a partir de la Revolución Industrial, el caso de los recursos energéticos generados por restos fósiles y carbón mineral representan el capital natural. La Unión Europea tiene una dependencia energética que ya rebasa el 70%, es por ello que está apostando a la transición energética. “Alcanzar su prosperidad ha llevado a Gran Bretaña a consumir la mitad de los recursos del planeta, ¿cuántos planetas necesitaría un país como la India?”⁹.

En cuarto término el estilo de vida, el uso de energéticos en el planeta está totalmente polarizado, los países de primer mundo consumen de forma desproporcionada recursos energéticos, naturales y generados por la industria; mientras que en países pobres existen poblaciones que ni siquiera cuentan con energía eléctrica, por otro lado, el crecimiento demográfico es mayor en los países con menor nivel educativo, por ello es necesario que la alimentación y la educación se den de forma equitativa; el futuro de la humanidad deberá tender hacia un cambio basado en la equidad y en la conservación medioambiental¹⁰.

Como podemos darnos cuenta, estos cuatro aspectos son variables que a su vez son interdependientes, para plantear una solución se deben abordar los cuatro de forma integral, se requiere de sabiduría política y de un liderazgo excepcional.

Modelos globales

Existe un segundo momento en el análisis de la situación global referente al desarrollo sostenible, en el que también son abordados aspectos económicos, políticos, tecnológicos y sociales que interactúan de forma dependiente.

Los modelos globales son simulaciones matemáticas de los sistemas físicos y socioeconómicos mundiales, con proyecciones a futuro que son consecuencias lógicas de los datos y las suposiciones que se introducen en el modelo por primera vez en 1982. Estos modelos han sido revisados y comparados como grupo de un informe que fue publicado por la Congressional Office of Technology Assessment en 1990, que hace las siguientes consideraciones:

- El progreso tecnológico es esperado, resulta vital, pero también son necesarios cambios sociales, económicos y políticos.
- Las poblaciones y los recursos no pueden crecer indefinidamente en un planeta finito.
- Una reducción sustancial en las tasas de crecimiento de la población y del desarrollo urbano-industrial reducirá en gran medida la probabilidad de exceder la capacidad de carga o de que ocurran colapsos importantes en los sistemas de aporte vital.

⁹ Respuesta de Mahatma Gandhi dada al preguntársele, tras la dependencia de su país, si la India llegaría a alcanzar los niveles de vida de Gran Bretaña.

¹⁰ Goodland, Robert. *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Más allá de Informe Brundtland*. Editorial Trotta, Serie Medio Ambiente. Valladolid, 1997

- Dejar que las “cosas sigan igual” no conducirá a un futuro deseable, sino más bien, ampliará las brechas indeseables.
- Los enfoques cooperativos a largo plazo serán más benéficos para todas las partes que las políticas competitivas a corto plazo¹¹.

Dado que la interdependencia de los pueblos, las naciones y el ambiente es mucho mayor de lo que suele imaginarse, las decisiones deben tomarse en un contexto holista. Las medidas que se emprendan pronto (en el transcurso de los dos decenios siguientes) serán más eficaces y menos costosas que las medidas tomadas después para modificar las tendencias indeseables actuales (como la toxificación de la atmósfera). Esto hace necesario un fuerte liderazgo político y una vigorosa educación pública, ya que cuando un problema se hace obvio para todos, suele ser demasiado tarde.

La sabiduría de muchos participantes en los informes del Club de Roma¹², así como los resultados de los modelos globales (modelos prospectivos) concuerdan con la teoría básica de los ecosistemas, en especial tres de sus paradigmas: Es necesario un enfoque holista (de sistemas) cuando se estudian sistemas complejos, la cooperación tiene mayor valor de supervivencia que la competencia cuando se está cerca de los límites (en cuanto a recursos u otros aspectos); para el desarrollo ordenado y sostenible de las comunidades humanas, como en el de las comunidades bióticas¹³, se requiere retroalimentación negativa, así como positiva.

De lo anterior se desprende la necesidad de utilizar varios métodos de investigación como la prospectiva, ya que por un lado, los problemas del medio ambiente ponen en grave riesgo a la vida en el planeta.

Es necesario tomar las medidas adecuadas para tener más oportunidades de lograr un futuro deseable, “el futuro no depende necesariamente del pasado sino exclusivamente de la acción del hombre, único responsable de su propio destino”¹⁴. Cualquier aportación tecnológica debe considerar las variables que afectarán de cierto modo otros aspectos no previstos; el lado brillante de estas tecnologías nos ha llevado a un mayor nivel de vida, pero por otro lado, el deterioro ambiental, es ya insostenible¹⁵. Casi cada avance tecnológico con que se pretende mejorar nuestro bienestar y prosperidad tiene su lado oscuro y su lado brillante. Cuando se buscan nuevas tecnologías se deben tomar en cuenta que se tendrán lados oscuros que no solo deben anticiparse sino que también deben

¹¹ *Ibid*

¹² Grupo de científicos, economistas, educadores, humanistas, industriales y servidores públicos quienes vieron la urgente necesidad de que se escribiera una serie de libros sobre el futuro predicamento de la humanidad.

¹³ Se llama *comunidad biótica* al conjunto de organismos que habitan en un área específica del planeta; en esta comunidad, los organismos vivos y el medio no viviente que interacciona con ellos intercambian energía y sustancias químicas, formando un *ecosistema*.

¹⁴ Mojica, Francisco. *La Prospectiva, Técnicas para Visualizar el Futuro*. Legis Editores. Bogotá, 1995. Pág. XI.

¹⁵ Goodland, Robert. *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Más allá de Informe Brundtland*

corregirse, lo que se necesita es generar una contra tecnología que cuando menos reduzca los efectos perjudiciales en el medio ambiente. El peligro es no prever la necesidad de reacción o esperar demasiado antes de actuar, la demora en aplicar tecnologías emergentes, se debe al hecho de que existe un costo de transición para realizar el cambio. Sin embargo, en éste nuevo milenio existen ya diversas agrupaciones de instituciones educativas, sociales y gubernamentales a nivel mundial que están llevando a cabo investigaciones sobre nuevas tecnologías para generar energía limpia a partir de recursos renovables. El costo de éste tipo de investigación es alto, sin embargo, cualquier cosa que mejore la calidad de nuestro ambiente y nuestra vida beneficiará la economía a largo plazo.

Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto nace como una iniciativa de la Organización de las Naciones Unidas como un marco donde se establece un convenio sobre el cambio climático (UNFCCC) acordado por los gobiernos en el año de 1997. El objetivo principal del Protocolo de Kioto consiste en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero globales como único mecanismo donde la participación de la población mundial puede hacer frente a la causa del cambio climático, para minimizar sus impactos en la biodiversidad y sobre los efectos meteorológicos ya citados anteriormente. Como objetivo específico se establece como obligación para los países industrializados la reducción de emisiones de seis gases de efecto invernadero generados por la actividad humana:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O),
- Además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

De acuerdo con lo anterior se determinó que las emisiones de dióxido de carbono son las principales responsables del calentamiento del planeta porque este tipo de gases proceden fundamentalmente de la utilización de energía y de la combustión de combustibles fósiles; por otro lado el metano es el segundo gas en orden de importancia, donde sus principales fuentes de emisión son: la agricultura (digestión del ganado), los residuos (gasificación) y la energía (producción de carbón y distribución de gas natural); el óxido nitroso es un gas industrial generado por la producción de ácido nítrico y la utilización de abonos en la agricultura; el hidrofluorocarbono (HFC), el hidrocarburo perfluorado (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₂) son gases industriales cuya permanencia activa en la atmósfera es muy alta: las emisiones de HFC han aumentado ya que dicho gas se ha presentado como un producto de sustitución de los clorofluorocarbonos (CFC) prohibidos por el Protocolo

porque empobrecen la capa de ozono, los PFC se producen con la fusión del aluminio y el SF₆ se utiliza en los equipos de alta tensión y en la producción de magnesio.

Medidas para alcanzar los objetivos del Protocolo de Kioto:

Para lograr la reducción en al menos el 5% de estos gases invernadero, el Protocolo propone una serie de medios:

- Reforzar o establecer políticas nacionales de reducción de las emisiones (aumento de la eficacia energética, fomento de formas de agricultura sostenibles, desarrollo de fuentes de energías renovables.
- Cooperación internacional (intercambio de experiencias o información, coordinación de las políticas nacionales para lograr una mayor eficacia por medio de mecanismos de cooperación¹⁶

Para establecer reglas de operación claras, el Protocolo de Kioto contempla dos anexos en los cuales clasifica a los países de acuerdo a su desarrollo tecnológico. Por un lado el Anexo I contempla a los países industrializados y por el otro el Anexo II a los países en vías de desarrollo. Durante el periodo de 2008 a 2012 los países del Anexo I se comprometerán a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 5% respecto a los emitidos en 1990; este objetivo representa para cada país perteneciente al Anexo I diferentes retos en su actividad productiva y en su desarrollo económico, por esto el Protocolo permitirá la implementación de “mecanismos de mercado” para ayudarlos a cumplir con dicho objetivo, estos mecanismos tienen tres vertientes:

- Comercio internacional de emisiones: El comercio de emisiones es, como su propio nombre indica, una compra-venta de emisiones de gases de efecto invernadero entre países que tengan objetivos establecidos dentro del Protocolo de Kioto a partir de 2008; es decir entre los países industrializados o pertenecientes al Anexo I. De esta manera, los que reduzcan sus emisiones más de lo comprometido podrán vender los certificados de emisiones excedentes a los países que no hayan alcanzado cumplir con su compromiso.
- Aunque aún no es puesto en marcha, este mecanismo ha generado diferentes críticas y e incertidumbre por parte de grupos ecologistas que prevén un peligro en el mal uso del mecanismo.
- Implementación conjunta: Este mecanismo permite la inversión entre países del Anexo I para la implementación de proyectos encaminados a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- El país que invierte obtiene certificados para reducir emisiones a un precio menor del que le habría costado en su propio territorio, y el país donde se lleva a cabo la

¹⁶ Parlamento Europeo.(mayo, 2006) “Protocolo de Kioto sobre el Cambio Climático”, <http://europa.eu/scadplus/leg/es/lvb/l28060.htm>. Consultado el 25 de octubre de 2006.

inversión se beneficia con la tecnología y los bienes materiales producto de la inversión. En este caso, los proyectos entraron en vigor en 2000, pero la emisión de certificados será hasta 2008.

- Mecanismos de desarrollo limpio: Este mecanismo ofrece a los gobiernos y a las empresas privadas de los países del Anexo I la posibilidad de transferir tecnologías limpias a países del Anexo II, por medio de inversiones en proyectos de reducción de emisiones, recibiendo de esta forma certificados de emisión que servirán como suplemento a sus propias reducciones.

Este mecanismo representa una gran oportunidad para los países en desarrollo para ingresar a la dinámica de reducción de contaminantes al adoptar tecnologías que de otro modo no tendrían a su alcance¹⁷.

DESCARBONIZACION

¿Nos encontramos en la recta final del uso de los hidrocarburos? Existe una gama de posibilidades para dar solución a la incertidumbre energética. Regresar al uso de carbón mineral y arenas asfálticas es una de ellas, en el mundo todavía existen numerosos yacimientos, sin embargo, al ser combustibles más “sucios” que el mismo petróleo son considerados como una fuente que producirá mayores emisiones de CO₂ que nos conduciría a problemas de carácter ambiental y económico porque no es fácil extraer de ellos sus cualidades energéticas.

Analizar la historia del consumo de energéticos desde los inicios de la humanidad nos puede ayudar a entender cual es el camino más adecuado. Desde el descubrimiento del fuego, los materiales orgánicos como la leña con alto contenido molecular de carbono fueron utilizados para preservar y producir fuentes caloríficas; en el siglo XVIII, la explotación del carbón mineral junto con el desarrollo tecnológico basado en el uso de vapor permitió un desarrollo mundial sin precedentes; en el siglo XIX se desarrolló la electricidad, las grandes turbinas y el alumbrado público junto con la electrificación de la industria y lo doméstico; el siglo XX se caracterizó por el uso de derivados del petróleo llamados hidrocarburos; hacia finales del siglo XX e inicios del XXI, varias economías están apostando al uso del gas natural.

Si hacemos un análisis más profundo, notaremos que en cada una de estas etapas la presencia del carbono en los diferentes combustibles es cada vez menor; por otro lado,

¹⁷ Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. “Nuevas energías Renovables. Una Alternativa Energética Sustentable para México”. Centro de Investigaciones en Energía. UNAM. Agosto de 2004. Págs. 16, 17.

también su estado físico nos muestra una evolución muy interesante: la madera y el carbón se encuentran en estado sólido, los hidrocarburos de origen fósil en estado líquido, y finalmente el gas natural se encuentra en estado gaseoso. De todo lo anterior podemos deducir que nos encontramos inmersos en un camino de “descarbonización”¹⁸ en el uso de energéticos, por otro lado su estado físico es también determinante para su obtención y traslado, en un mundo creciente, los combustibles gaseosos serán la opción más eficiente por su ligereza.

Tipo de combustible	Estado físico	Transformación energética	Carbono emitido
Madera (antigüedad)	Sólido	Incineración	Alto
Carbón (Revolución Industrial)	Sólido	Incineración	Alto
Hidrocarburos (Siglo XX)	Líquido	Incineración	Alto
Gas natural (Siglos XX y XXI)	Gaseoso	Incineración	Medio
Hidrógeno (¿Siglo XXI?)	Gaseoso	Asociación molecular	Nulo

Tabla 2. Esta tabla nos muestra que la tendencia en el uso de combustibles apunta hacia el fin de la era del fuego mediante uso de hidrógeno.

Pero ¿cuales son las mejores opciones? El gas natural es un combustible que se utiliza desde hace más de cuarenta años, pero la dificultad de almacenaje y su escasa autonomía lo han relegado al transporte urbano y al consumo doméstico. Otra alternativa la constituyen el etanol y el metanol, dos alcoholes que cuentan a su favor con muchos argumentos: son líquidos inflamables, incoloros y de poca toxicidad, poseen un alto octanaje¹⁹ y una gran solubilidad en gasolina a la que se añade para oxigenarla porque ayuda a una mejor y más limpia combustión, además de ser producido a partir vegetales. Lamentablemente, con la tecnología actual y los altos precios de su producción, estos carburantes resultan notablemente más caros que los convencionales, por lo que su futuro es poco prometedor.

Otra posibilidad es el uso de las fuentes de energía renovable, que apuntan como candidatas para el desarrollo tecnológico que facilite su captación y conversión a fuentes energéticas como el calor, la electricidad o la producción de hidrógeno, tema que será desarrollado ampliamente en el siguiente capítulo.

¹⁸ Rifkin, Jeremy. *La Economía del Hidrogeno*. Pág. 216.

¹⁹ El *octanaje* es una escala que mide la resistencia que presenta un combustible (como la gasolina) a detonar prematuramente cuando es comprimida dentro del cilindro de un motor. Con el nivel de octanaje adecuado se evita la detonación y se logra un solo foco de llama dado para el encendido en el momento preciso, con lo cual se logra una combustión pareja y efectiva.

3 ENERGÍAS ALTERNATIVAS

El término de energía alternativa o renovable, se refiere a los recursos que podemos utilizar de forma ilimitada, es decir, la cantidad disponible en la tierra y que en la escala de tiempo humana no desaparecerá al ser aprovechada. El Sol es el recurso más importante, es la principal fuente directa e indirecta en el ciclo de transformación energética dentro de la atmósfera terrestre. Los intentos de aprovechamiento de la energía solar de forma directa, utilizando la tecnología actualmente disponible, tratan de emular lo que la Naturaleza realiza desde hace millones de años: convertir la energía electromagnética irradiada por el Sol en otras formas de energía:

- Fotovoltaica
- Fototérmica
- Eólica
- Biomasa
- Hidráulica
- Marina

Existe también otro término que se da a este tipo de energías llamado energías alternativas, usado principalmente por los medios progresistas dando al término un significado político, no tanto para indicar que estas ofrecen una alternativa a las fuentes tradicionales, sino para señalar que pueden ser el sustento de una organización social muy distinta a la actual y a

las pasadas¹. Por tanto, las energías alternativas o renovables ofrecen una gran cantidad de formas de aprovechamiento, lo interesante es que no se excluyen unas con otras, de hecho deben armonizarse para desarrollar los medios tecnológicos, organizacionales y económicos para satisfacer las necesidades humanas y producir el mínimo impacto en el entorno, que ocupen también el mínimo espacio y que no exijan de condiciones especiales como la grandes hidroeléctricas o los pozos de explotación de hidrocarburos.

Se busca generar un sistema energético lo mas humano, ecológico y diversificado posible tomando en cuenta que la producción de energía tradicional es finita, es decir, limitada por la utilización de recursos también finitos, se puede además tener una serie de argumentos de carácter ecológico, económicos y geopolíticos para llevar a cabo esta conversión, pero la razón fundamental para este cambio es de carácter termodinámico.

Transición energética

Los recursos energéticos no renovables son aquellos que se encuentra almacenados generalmente en el subsuelo y su naturaleza puede ser de origen tanto orgánico como inorgánico, sus cantidades son fijas, por ello eventualmente el consumo humano terminará por agotarlos. Los recursos energéticos no renovables más importantes son:

- Petróleo
- Gas natural
- Carbón mineral
- Uranio

Económicamente, estos recursos juegan un papel muy importante en las presentes sociedades porque por un lado, la demanda de combustibles y de electricidad presenta un periodo de crecimiento sin precedentes y por otro, su descubrimiento y extracción dependen del desarrollo de sofisticados medios tecnológicos². Sin embargo al considerar los problemas de carácter medioambiental y geopolítico, principalmente tener la certidumbre de su agotamiento en las siguientes décadas, dirigir nuestra mirada hacia las formas de energía alternativa o renovable es una necesidad de primer nivel en las sociedades del planeta.

En este capítulo se explicará en qué consiste cada uno de estos tipos de energías, cuál es la fuente primaria de cada una y cómo puede ser aprovechada por diferentes desarrollos tecnológicos que la convierten en manifestaciones útiles para satisfacer nuestras necesidades.

¹ Lucerna, Antonio. *Energías Alternativas y Tradicionales, sus Problemas Ambientales*. Págs. 50,51.

² *Ibid.* Pág. 52.

EL SOL COMO FUENTE PRINCIPAL DE LAS ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Las estrellas constituyen los más grandes emisores de energía radiante en el universo, entre ellas se encuentra el Sol; la energía que desprenden se propaga de forma esférica y se va atenuando progresivamente en el espacio, afectando solo a los cuerpos celestes que la interceptan. La radiación emitida por el Sol representa para nuestro planeta la oportunidad de recibir la cantidad de energía radiante necesaria para establecer las condiciones físico-químicas en la superficie terrestre y en los océanos para la generación de ecosistemas basados en diferentes formas de vida, incluyendo al ser humano.

El Sol es la estrella que da origen al sistema donde se encuentra nuestro planeta Tierra: está compuesto de diversos gases a alta temperatura, su radio es de aproximadamente 700, 000 Km. y se ubica a una distancia media de 15×10^7 Km con respecto a la Tierra. Su núcleo tiene una temperatura de 60×10^6 °C mientras que en su superficie de 6000 °C.

El Sol obtiene su energía a partir de reacciones nucleares de fusión, producidas en su interior. Estas reacciones dan como resultado la pérdida permanente de masa solar y se convierte en energía radiante que viaja a través del espacio y llega a la tierra por medio de fotones que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre.

De la enorme cantidad de energía radiante que genera el Sol, solo una parte es recibida en la superficie de la tierra, a pesar de ello, representa una cantidad muy grande respecto a las necesidades para mantener nuestro actual entorno artificial y su respectiva demanda de diferentes manifestaciones de energía; el problema radica en la forma en que podemos aprovecharla, ya que se encuentra dispersa alrededor de la superficie del planeta obstaculizando su aprovechamiento de manera masiva. La potencia aproximada de la radiación sobre la superficie terrestre representa cerca de de 1Kwh por cada m^2 .³

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

La intensidad de la energía radiante que proviene del sol llega a la superficie de la Tierra y se reduce por varios factores variables, entre ellos, la absorción de la radiación por los gases de la atmósfera (dióxido de carbono, ozono, etcétera), por el vapor de agua, por la partículas de polvo, moléculas, por la reflexión de las nubes y por la inclinación del plano en que recibe la radiación respecto de la superficie terrestre. Sin embargo, la energía recibida directamente en la superficie de la tierra es enorme, por ello es importante el desarrollo tecnológico para captar dicha energía equivalente a 1Kwh promedio por cada m^2 en

³ Colectivo, *La Energía Solar. Aplicaciones Prácticas*. ProgenSA. 2001, Sevilla, España. Pág. 13.

condiciones favorables para convertirla en calor o convertirla directamente en electricidad se basa en materiales con propiedades únicas que producen el efecto fotovoltaico.⁴

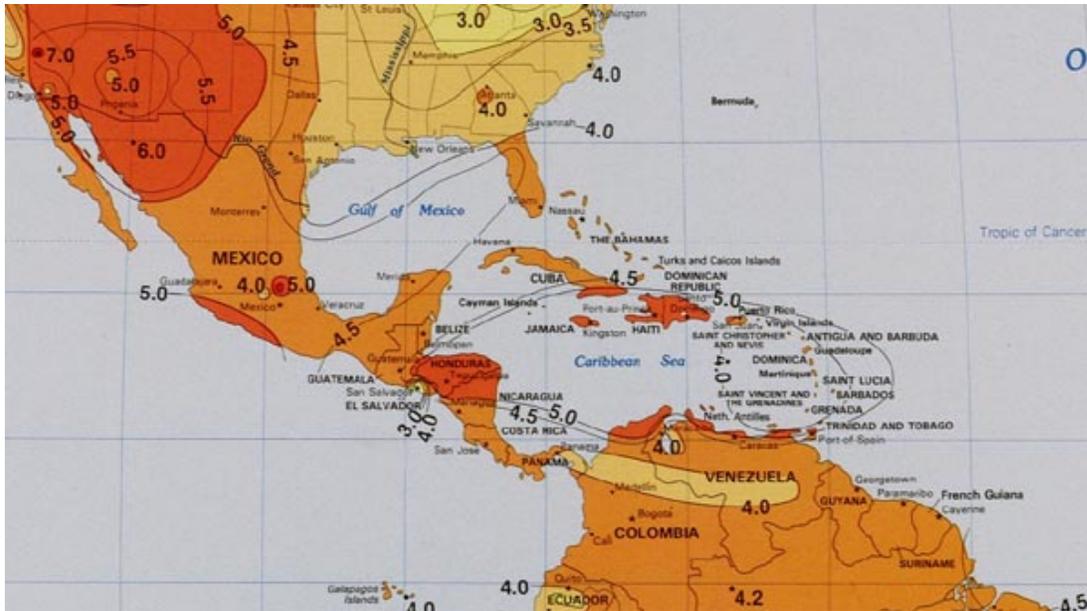


Figura 2. Mapa que indica la cantidad de Kw/m² en México por cada hora durante un día en las condiciones más favorables. **Fuente:** Solar4power.

Efecto fotovoltaico

Existen diferentes efectos físicos y químicos para convertir la energía proveniente de la radiación solar en otras manifestaciones como la eléctrica; uno de ellos consiste en la utilización de sistemas termoelectrónicos donde la corriente eléctrica se produce a partir del calor generado por la radiación solar, cuyo tema será desarrollado en el siguiente punto. En el segundo efecto, parte de la energía de los corpúsculos que constituyen la luz en la atmósfera terrestre llamados fotones que es convertida directamente en electricidad, este fenómeno es también llamado “efecto fotovoltaico”. Las investigaciones iniciales en este campo se enfocaron al desarrollo de productos para aplicaciones espaciales, siendo su primer uso exitoso los satélites artificiales; sus principales características (simplicidad, bajo peso, eficiencia, confiabilidad y ausencia de partes móviles) las hicieron ideales para el suministro de energía en el espacio exterior. El efecto fotovoltaico consiste en la producción de una fuerza electromotriz en un material semiconductor⁵ como resultado de

⁴ *Ibid.* Pág. 25.

⁵ *Semiconductor:* Sustancia que tiene una conductividad eléctrica intermedia entre un aislante (un plástico), y un conductor (cobre).

la absorción de radiación luminosa. Los semiconductores usados para estos fines son de dos diferentes composiciones moleculares: tipo p y tipo n.

Los semiconductores tipo p son materiales dotados de carga eléctrica de signo positivo principalmente y se les llama "huecos" debido a la ausencia de electrones; en cambio, los de tipo n poseen carga eléctrica pero negativa y están constituidos por electrones libres principalmente. Existen diversos materiales para construir este tipo de semiconductores pero el Silicio es el más utilizado porque al doparlo⁶, es posible que adquiera alguna de estas dos características, para convertirlo en semiconductor tipo n se dopa con fósforo o con arsénico, en cambio para convertirlo en tipo p se dopa con boro o con galio⁷.

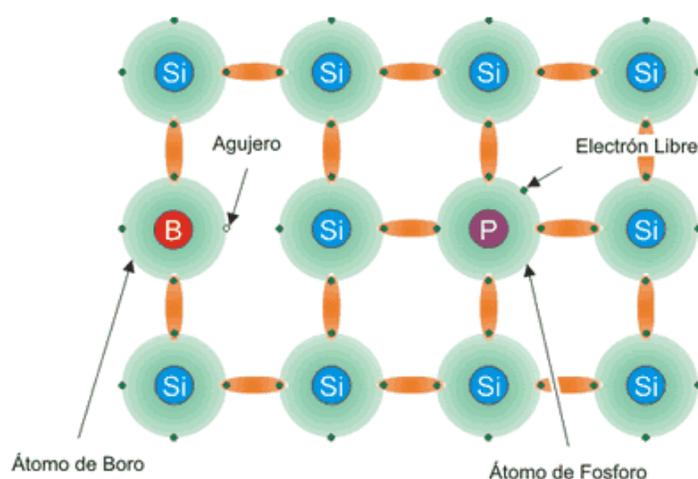


Figura 3. Esta figura nos muestra los tipos de semiconductores gracias al dopaje del silicio: con boro genera un hueco con carga eléctrica positiva **tipo p**, en cambio, el fósforo genera un electrón libre con carga negativa **tipo n**, utilizados en las celdas fotovoltaicas.
Fuente: CONAE.

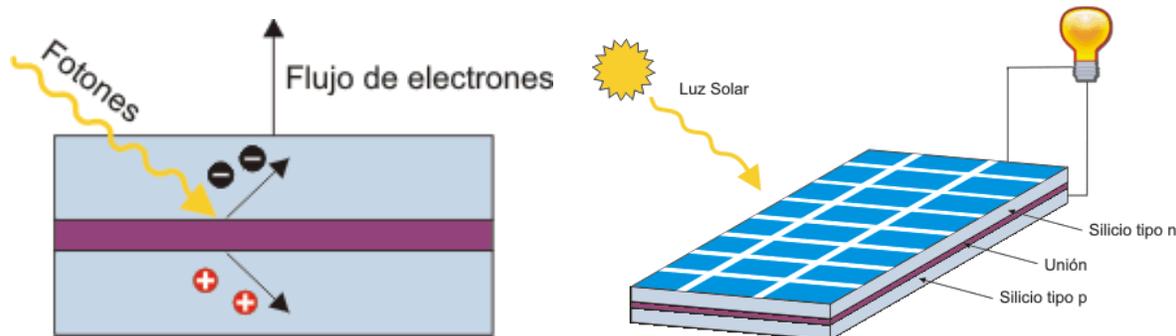
Las celdas solares

Son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, o indirectamente mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química. El principio de funcionamiento de una celda solar fotovoltaica está basado en el comportamiento de los semiconductores ya mencionados, y está constituida por un disco monocristalino de silicio, dopado en la capa superficial que en este caso se encuentra expuesta al Sol cuyas características son tipo n y su espesor es de 0.6mm, mientras que en la parte inferior, se encuentra una capa de material tipo p con un espesor de hasta 0.4 mm; a partir de esta composición, se produce una unión p-n capaz de generar

⁶ *Dopar*: Proceso de adición de impurezas controladas a una material semiconductor para afectar sus cualidades eléctricas.

⁷ Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. S.A.P.T. Ediciones Técnicas. Madrid, España. 2000. Pág. 75.

corriente eléctrica a través de un circuito externo de modo que puede producir trabajo útil. Los electrones son excitados por la luz y se mueven a través del silicio; éste es conocido como el efecto fotovoltaico y produce una corriente eléctrica directa⁸. Las celdas fotovoltaicas no tienen partes móviles, son virtualmente libres de mantenimiento y tienen una vida útil de entre 20 y 30 años. Estas celdas trabajan a un 14% de su capacidad con respecto a la cantidad de energía radiante recibida, si la radiación varía, la corriente de la celda tendrá también una variación proporcional. Adicionalmente, su variación está en función del ángulo de incidencia de los rayos solares respecto a la superficie de la celda, entonces para un uso eficiente, es importante implementar un sistema de ajuste que reciba la máxima cantidad de energía radiante.



Figuras 4 y 5. Conversión directa de la energía solar en energía eléctrica en una celda solar, donde la capa expuesta al sol es tipo n y la capa inferior es tipo p. **Fuente:** CONAE.

Paneles fotovoltaicos

Puesto que una sola celda fotovoltaica se construye para tener un voltaje de trabajo cercano a 0.5 V, estas generalmente se conectan juntas en serie (positivo con negativo) para proporcionar voltajes más grandes. Los paneles se fabrican en una amplia gama de tamaños para diversos propósitos que generalmente caen en una de tres categorías básicas:

Tipo de panel	Características	Potencial generado	Usos
Bajo voltaje	3-12 celdas	1.5- 6 Watts y algunos milivolts	Relojes, calculadoras, cámaras fotográficas
Paneles pequeños	Celdas monocristalinas	1-10 Watts y 3-12 volts	Radios, juguetes, cercas eléctricas, cargadores de baterías
Paneles de mayor voltaje	10 a 36 celdas conectadas en serie	10- 60 Watts 6-12 Volts	Energía en casas rodantes o en áreas remotas

Tabla 3. Características principales de los paneles fotovoltaicos. **Fuente:** CONAE.

⁸ *Ibid.* Pág. 77.

Módulos fotovoltaicos

Si una aplicación requiere más energía de la que puede ser proporcionada por un solo panel, pueden fabricarse sistemas más grandes combinando un mayor número de paneles. Sin embargo, se presenta una complicación en los casos que la potencia y voltaje requerido es mayor al nivel y uniformidad que puede ser proporcionado directamente de los paneles. En estos casos, se utilizan los sistemas fotovoltaicos, compuestos por las siguientes partes:

- Un conjunto de paneles fotovoltaicos, variando desde dos a varios centenares de paneles.
- Un panel de control, que regula la energía de los paneles.
- Un sistema del almacenaje de energía, constituido generalmente por un conjunto de baterías especialmente diseñadas.
- Un inversor, para convertir la Corriente Continua en Corriente Alterna (por ejemplo CA de 220 V).
- Un marco y una cubierta para el sistema.
- En forma opcional se puede contar con fuentes de alimentación de reserva tales como generadores diesel.



Figura 6. Este conjunto de paneles compuestos de 36 celdas fotovoltaicas son capaces de generar suficiente energía en un hogar.

Fuente: CONAE.

Otros elementos que pueden llegar a formar parte del sistema son mecanismos de seguimiento y sensores que son utilizados para mantener orientados los paneles fotovoltaicos en ángulo recto con respecto a la dirección de la energía radiante del Sol. Los mecanismos de seguimiento pueden casi duplicar la salida de energía de un conjunto de paneles fotovoltaicos. Se requiere de un análisis cuidadoso para determinar si el incremento en la inversión y la complejidad mecánica de un dispositivo de seguimiento es rentable en circunstancias particulares.

Formas de almacenamiento de los sistemas fotovoltaicos

Frecuentemente es necesario almacenar la energía debido a que ésta se requiere aun cuando el Sol no está brillando (ya sea durante la noche o en períodos de cielo nublado) o en cantidades mayores a las que pueden ser provistas directamente del conjunto. Se utilizan generalmente baterías de "ciclo profundo" diseñadas especialmente. A diferencia de las baterías normales, éstas pueden descargar cerca de la mitad de la energía almacenada varios miles de veces antes de que se deterioren. Cada batería para este fin generalmente se adquiere de 2 V, y el conjunto total de baterías está formado generalmente por varias baterías conectadas en serie o en paralelo para proporcionar el nivel de energía requerido. Las baterías deben ser las adecuadas para satisfacer cada uso particular, dependiendo de la radiación solar diaria total, la carga total, la carga máxima y el número de días de almacenaje requerido.

Los inversores transforman la corriente continua de la baja tensión de las baterías (12, 24, 32 o 48V) en corriente alterna de alto voltaje (por ejemplo 110 o 220V). Los inversores son necesarios si se van a utilizar electrodomésticos o instrumentos de voltaje normal. En la determinación del costo total del sistema, puede llegar a ser más económico comprar un inversor y electrodomésticos producidos para consumo masivo que utilizar electrodomésticos de corriente continua de baja tensión que pueden ser más costosos.

Algunas aplicaciones, tales como luces de alta eficacia actualmente no se encuentran disponibles para bajas tensiones. En este caso, el costo de utilizar más paneles debe ser equilibrado con el costo de un inversor.

Fuentes de potencia auxiliar o de reserva son requeridas cuando se debe garantizar la confiabilidad de la fuente de electricidad, por ejemplo cuando es poco económico proporcionar el almacenaje con baterías para períodos nublados extendidos infrecuentes, o cuando algunas aplicaciones tienen requisitos intermitentes de grandes cantidades de energía que sean poco convenientes de satisfacer con el sistema fotovoltaico.

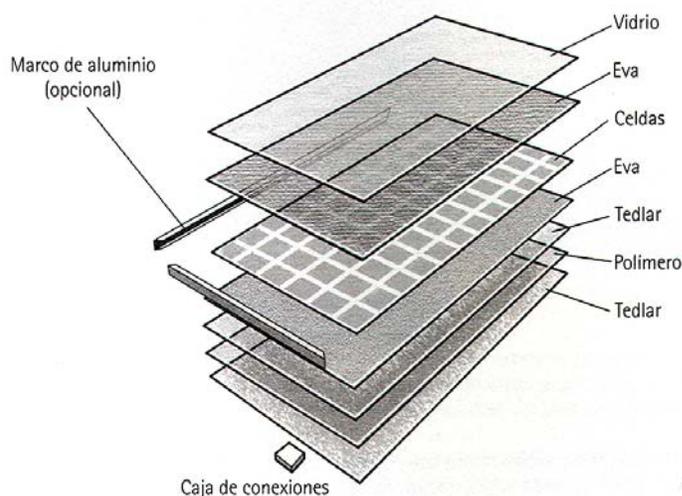


Figura 7. Generalmente un panel de celdas solares se encuentra protegido contra la intemperie por una estructura metálica y diferentes materiales que impiden el paso de la humedad, polvos contaminantes que puedan reducir su eficiencia y ciclo de vida.

Fuente: Guillén, Omar.

Aplicaciones de las Celdas Fotovoltaicas

Durante gran parte de los años ochenta y de principios de los años noventa el mayor mercado para los paneles solares estaba en las fuentes de alimentación para áreas remotas y algunos productos de consumo (relojes, juguetes y calculadoras). Sin embargo a mediados de los años noventa fue lanzado un importante esfuerzo para desarrollar paneles solares integrados en la construcción de edificios para ser conectados a la red. El tejado fotovoltaico actualmente está liderando el desarrollo del mercado en Japón, Europa y los EE.UU. Japón tiene actualmente un programa que apunta a construir 70.000 hogares solares, con lo cual para el año 2010 esperan alcanzar unos 4.820 MW producidos por sistemas fotovoltaicos. En Europa, varios países están apoyando la construcción de hogares solares, con el Parlamento Europeo proponiendo un esquema 1.000MW. En los EE.UU., durante la administración del presidente Bill Clinton fue anunciado un programa de techos solares, que pretende instalar paneles solares en un millón azoteas en antes de 2010⁹.

ENERGIA SOLAR FOTOTERMICA

Existe otra forma de aprovechamiento directo de la energía proveniente del Sol además de la captada por medios fotovoltaicos. El calor producido por la entrada de los rayos solares en la atmósfera terrestre es quizás la fuente energética mejor conocida y utilizada desde el origen del hombre. Esta forma de energía se caracteriza por tener dos cualidades que la hacen diferente de las fuentes energéticas convencionales con base en hidrocarburos, en este caso los almacenes de hidrocarburos nos permiten obtener energía siempre disponible en forma de electricidad, combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. En cambio la energía térmica del Sol se encuentra dispersa en la superficie terrestre por un lado, y está disponible solo durante el día.

La energía solar presenta una gran dispersión cuya densidad en condiciones favorables, es decir en época de poca nubosidad, alcanza 1Kwh por cada m², este valor energético es muy bajo en relación a los sistemas energéticos para satisfacer las demandas actuales; por esta razón, si se desea captar energía por este medio, es necesario crear grandes áreas de captación o bien, desarrollar sistemas de concentración.

Su intermitencia representa también un reto porque su disponibilidad se limita a las horas del día cuando se presenta energía radiante, además de que la época del año más favorable es el verano; esto obliga a incluir en el sistema de captación, subsistemas de almacenamiento de energía para ser aprovechada de forma directa o bien ser transformada en otros tipos como electricidad o vapor de agua entre otros.

⁹ Comisión Nacional de Energía. “¿Qué es la Energía Solar?”.
http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_612_energia_fotovoltaica. Consultado el 20 de octubre de 2006.

Existen en la actualidad muy diversas formas de captar la energía térmica del Sol tanto pasivos como activos que van desde su aprovechamiento en la arquitectura al orientar las habitaciones para obtener luz y calor cuando es necesario, en este caso no se desarrollan dispositivos especiales, solo basta la interacción entre la construcción y el movimiento del Sol para obtener sus beneficios; este tipo de aprovechamiento de energía fototérmica constituye el sistema pasivo. En cambio, los sistemas activos son aquellos que requieren de diferentes dispositivos para su captación, almacenamiento y conversión energética.

Uso pasivo

Un sistema pasivo de la energía térmica del Sol es por definición, aquel que es capaz de captar, almacenar y distribuirla sin la necesidad de algún dispositivo mecánico, no se requieren subsistemas de almacenaje, tampoco es necesario llevar a cabo conversión energética. El principio de funcionamiento se basa en la interacción de las edificaciones y el Sistema Solar, los materiales con que se construyen los habitáculos y en el aprovechamiento de la circulación del aire generado por la diferencia de temperatura, con esto se consigue calentamiento o refrigeración según sea el caso.

Sistemas de calentamiento y refrigeración habitacional:

Estos sistemas tienen la ventaja de funcionar para elevar o disminuir la temperatura de una edificación sea doméstica o pública por medio de dos principios básicos que son: Uno consiste en el uso de materiales translúcidos que permiten la retención del calor por efecto invernadero¹⁰ (ver capítulo 2), además de permitir la circulación de sistemas de aire, para este caso la orientación Sur es la más adecuada porque la incidencia Solar es mayor en invierno en el hemisferio Norte. Otra es el material utilizado para diferentes elementos arquitectónicos, tales como celosías, muros y domos capaces de ser almacenes de energía térmica¹¹.

En el diseño de un edificio solar pasivo el planteamiento es que sea el propio edificio el que recoja el calor necesario mediante la distribución apropiada de sus ventanas. De este modo el calor captado durante el día tiene que ser almacenado y distribuido durante las horas nocturnas.

Muro Trombe:

El muro de Trombe es un sistema creado en Francia en el año de 1957 por parte de Felix Trombe y Jacques Michel. Es un sistema pasivo de recolección de energía solar de forma indirecta, que se utiliza para el calentamiento interno de casas utilizando transferencia de

¹⁰ En este caso el material translúcido permite que la energía térmica entre a la habitación, sin dejarla escapar.

¹¹ Guillén Solís, Omar. *Energías Renovables. Una perspectiva Ingenieril*. Editorial Trillas. México. 2004. Págs. 22, 23.

calor, ya sea por conducción, convección y/o radiación. Es un sistema indirecto porque la captación la realiza un elemento dispuesto detrás del cristal y el interior de la vivienda se encuentra anexo a este dispositivo, y pasivo porque no hay elementos mecánicos para su funcionamiento.

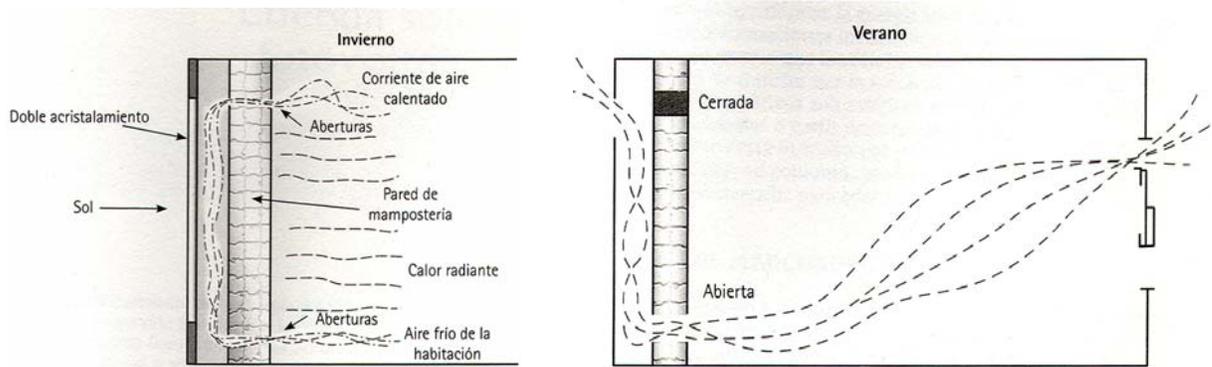


Figura 8. Durante el invierno el muro Trombe funciona como sistema de calentamiento en una construcción doméstica
Fuente: Guillén, Omar

Figura 9. En cambio, durante el verano es posible el aprovechamiento de un sistema natural de refrigeración.
Fuente: Guillén, Omar

Uso activo

Como se ha dicho, los sistemas activos que sirven para el aprovechamiento de energía fototérmica son aquellos que utilizan dispositivos especiales para su captación, almacenamiento, control y conversión energética. Ellos pueden clasificarse en tres tipos:

- Sistemas de conversión térmica de baja temperatura.
- Sistemas de conversión térmica de temperatura media.
- Sistemas de conversión térmica de alta temperatura.

Son tecnologías que tienen grandes diferencias entre sí, los materiales utilizados, su forma de captación y sobre todo, sus aplicaciones, por ello cada una será tratada de forma individual.

Sistemas de conversión fototérmica de baja temperatura

Este desarrollo tecnológico consiste en el aprovechamiento de la energía fototérmica para el calentamiento del agua por debajo del punto de ebullición y poder ser utilizada para diversas aplicaciones, sobre todo en el sector doméstico para proveer agua caliente; su característica principal es su imposibilidad de concentración energética, en este caso la relación entre la superficie externa del colector y la superficie captadora interior prácticamente se encuentran en equilibrio. Esta tecnología no genera electricidad y se basa en los principios científicos del efecto invernadero para generar calor. La radiación

electromagnética del sol, incluyendo la luz visible e infrarroja, penetra dentro del colector y es absorbida por la superficie ubicada dentro del mismo. Una vez que la radiación es absorbida por las superficies dentro del colector, la temperatura del líquido que se encuentra dentro del sistema aumenta.

Colectores planos:

Los subsistemas colectores son los dispositivos que captan y utilizan el calor del sol para aumentar la temperatura del agua hasta alrededor de los 70°C.

Estos colectores consisten en una caja herméticamente cerrada con una cubierta de vidrio o de algún otro material translúcido. En su interior se ubica una placa de absorción, que es el elemento más importante del sistema, la cual está en contacto con unos tubos por los que circula un líquido que transporta el calor; está construida de materiales metálicos pintados de color negro mate para captar el máximo de energía; una vez expuesta al Sol, se calentará elevando su temperatura hasta llegar a un equilibrio entre la radiación y el sistema¹².



Figura 10. Generalmente los colectores planos de baja temperatura son instalados en azoteas.
Fuente: CONAE.

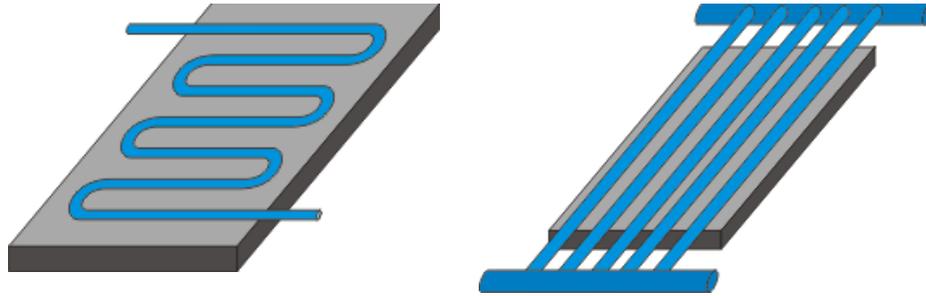


Figura11. Componentes principales de un colector plano. 1: Caja exterior, 2: Cubierta exterior, 3: Placa de absorción, 4: Aislamiento. **Fuente:** GARBITEK.

Existe un gran número de diferentes configuraciones de los tubos internos en los colectores de placa plana. Entre ellos se encuentran los de serpenteo con menor capacidad, en cambio para los de tubos paralelos, se colocan tubos de mayor sección en la parte inferior y superior, para ayudar a la extracción de agua caliente y al ingreso de agua fría para su calefacción para lograr mayor capacidad.

Para lograr su óptimo rendimiento, es necesario orientar el panel hacia el sur con un ángulo de inclinación correspondiente a la latitud del lugar, esto permite que los rayos del Sol incidan en el colector de forma perpendicular.

¹² Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. S.A.P.T. Ediciones Técnicas. Madrid. 2000. Págs. 50, 51.



Figuras 12 y 13. Los tubos que hacen circular el agua en la placa de absorción pueden presentar dos tipos de configuración, en serpentin (derecha) o en paralelo (derecha). **Fuente:** CONAE.

Colectores de vacío:

Los colectores de tubo de vacío se encuentran entre los tipos de colectores solares más eficientes y más costosos. Estos colectores son aprovechados en aplicaciones que requieren temperaturas que oscilan entre 50 y 95 °C, o en climas muy fríos. Está compuesto de una serie de colectores y a su vez cada uno de ellos consta de tres tubos concéntricos, dos son de vidrio y uno es metálico que funciona como absorbedor para capturar la radiación del sol, los tubos de vidrio forman un sistema de aislamiento al vacío permitiendo la entrada del calor pero no su salida por efecto invernadero. Las pérdidas térmicas de estos sistemas son muy bajas incluso en climas fríos.

Cada tubo de calor está unido a la placa (absorbedor) con recubrimiento selectivo que absorbe el calor de la radiación, este sistema contribuye a una importante reducción de las pérdidas de energía térmica desde el absorbedor porque cada tubo está unido a un condensador de alta eficiencia (ver figura).



Figura 14. Aspecto físico de un sistema de colectores de vacío. **Fuente:** textoscintificos.

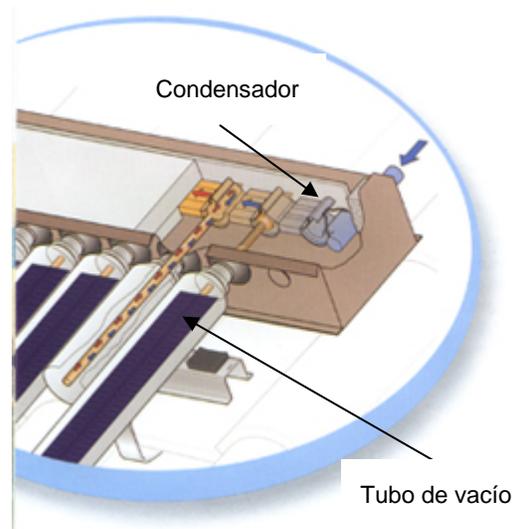


Figura 15. Tubos de vacío conectados al condensador donde se origina el flujo del líquido en el interior. **Fuente:** MAZDON.

La radiación que incide sobre la placa del colector, hace que ésta aumente su temperatura y como consecuencia, el líquido que se encuentra en el interior de cada tubo (generalmente es una mezcla de alcohol con agua) se evapora, luego la energía es absorbida por el sistema y transferida como energía térmica hacia el condensador; éste transfiere el calor al circuito primario por el que circula el líquido que porta la energía calorífica.

El condensador se une al circuito primario mediante un intercambiador, de manera que no se mezclan los fluidos. El circuito primario aumenta su temperatura al absorber calor del condensador, con lo que la mezcla alcohólica baja de temperatura, se licua y cae por gravedad, dando pie a un ciclo que se repite mientras la energía radiante afecte al sistema. Los tubos se deben ajustar para lograr una óptima orientación y con esto la máxima absorción solar.

Sistemas de almacenamiento:

Existen varios tipos de tanques de almacenamiento para agua caliente. Los utilizados más frecuentemente con colectores de placa plana en sistemas nuevos son los sistemas integrados, donde los tanques de almacenamiento son montados junto con los colectores, generalmente sobre el techo. Los tanques son ubicados sobre los colectores para aprovechar el efecto de termosifón¹³. La densidad del agua varía según la temperatura. En general, el agua es más densa a menor temperatura de lo que es a mayor temperatura. Los sistemas de termosifón hacen uso de este principio para hacer circular agua a través del colector; el agua fría proveniente de la red principal, atraviesa el colector mientras el agua caliente es extraída del tanque de almacenamiento. Las principales ventajas del uso de sistemas con tanques de almacenamiento integrados permiten que el sistema sea más rentable para quienes los usuarios y el agua caliente se suministre a la presión de la red principal.

Los sistemas de alimentación por gravedad también pueden ser utilizados para almacenar agua de los colectores de placa plana. En esta configuración, el tanque es instalado en una cavidad en el techo, y únicamente el colector es expuesto al sol. La posición de los colectores debe ser la adecuada para permitir que se produzca termosifón en forma natural.

Aunque estos sistemas son generalmente más baratos al momento de su compra, la tubería del lugar debe ser adecuada para la alimentación por gravedad. Otros sistemas que se utilizan con colectores de placa plana, aunque menos populares, son los sistemas forzados, en los cuales un tanque a la presión de la tubería es ubicado a nivel del suelo y el colector en el techo; en estos sistemas una bomba de agua es activada cuando brilla el sol y el agua fría circula atravesando el colector. Los sistemas forzados son más caros que los

¹³ Como parte de un sistema pasivo, el agua circula de forma natural debido a la diferencia de temperaturas entre el colector y la red.

sistemas integrados o de gravedad, y necesitan electricidad para accionar la bomba de circulación de agua¹⁴.

Conversión térmica de temperatura media

A diferencia de los colectores planos que requieren de grandes superficies para captar la energía fototérmica, la tecnología desarrollada para obtener mayor temperatura requiere de dispositivos colectores concentradores capaces de generar temperaturas mayores de 100°C. Su principal componente es el concentrador de radiación solar cuya finalidad es la de aumentar la radiación por unidad de superficie, en este caso es posible tener puntos focales con áreas menores. Los sistemas de concentración constan de los siguientes elementos:

- Concentrador o sistema óptico: construido con materiales cuya superficie es altamente reflejante como vidrio espejo o polímeros metalizados.
- Receptor que contiene al absorbedor: generalmente son cilindros metálicos pintados de negro o cubiertos con una capa de material selectivo que están protegidos por dos tubos de vidrio sellados al vacío, semejantes a los colectores cilíndricos de baja temperatura citados en el punto anterior.
- Mecanismo de seguimiento de los rayos solares: el principal inconveniente de estos concentradores es que solo trabajan con radiación directa, es decir orientados perpendicularmente al concentrador para obtener su máximo rendimiento, esto lleva a la necesidad de contar con un mecanismo que los oriente hacia los rayos del sol según la hora del día y de la estación del año¹⁵.

Colectores cilindro parabólicos:

Actualmente el sistema de concentración cilindro parabólico es el desarrollo tecnológico más utilizado para obtener temperaturas medias; consiste en un espejo doblado longitudinalmente cuya sección tiene la forma de una parábola, justo en el lugar de su foco geométrico, se encuentra un tubo que constituye el subsistema absorbedor que recorre longitudinalmente al espejo, este tubo absorbedor puede contener en su interior agua, o diferentes tipos de aceite según la aplicación. Con este tipo de sistemas es posible alcanzar temperaturas de 300°C utilizados para aplicaciones principalmente industriales¹⁶.

Para simplificar el subsistema de orientación, los concentradores son ubicados en posición sur respecto a la latitud del lugar para evitar mecanismos tridimensionales, en este caso, el sistema girará de oriente a poniente a lo largo del día. Sus ventajas respecto a los

¹⁴ Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. Págs. 51.

¹⁵ Guillén Solís, Omar. *Energías Renovables. Una perspectiva Ingenieril*. Pág. 18.

¹⁶ Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. Pág. 53.

colectores planos son dos: por un lado requieren menos área de absorción y por lo tanto, menos material acumulador de calor y por otro, las pérdidas de temperatura son menores.



Figura 16. Granja solar con sistemas de colectores “cilindro parabólicos” distribuidos.

Fuente: Textos Científicos.

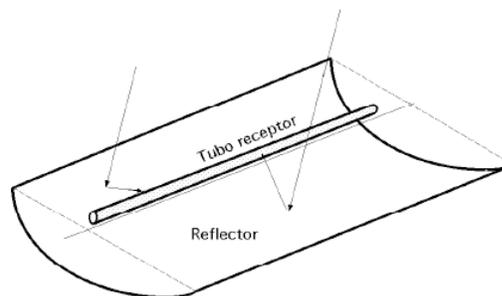


Figura 17. Esquema de un colector cilindro parabólico de media temperatura, que muestra como la incidencia de los rayos solares convergen en el foco geométrico de la parábola.

Fuente: Fernández Diéz, Pedro.

Aplicaciones:

Este tipo de concentradores pueden estar interconectados para producir grandes cantidades de energía calorífica que eventualmente puede ser transformada en electricidad al generar vapor y hacer funcionar turbinas y generadores, o bien ser utilizada directamente en forma de calor para usos industriales. El conjunto de concentradores es llamado granja solar o sistemas de colectores distribuidos

Conversión térmica de alta temperatura

Al igual que la tecnología de concentradores cilindro parabólicos, los sistemas que parten de la conversión térmica a temperaturas superiores a los 300°C, se basa en la concentración de los rayos solares. Para obtener factores de concentración mayores, es necesario recurrir a grandes paraboloides o a series de espejos enfocados a un mismo punto o la combinación de ambos.

Paraboloides:

Este sistema está conformado por un concentrador en forma de paraboloides (superficie cóncava parabólica) cuya geometría es complicada y difícil de construir. Se encarga de concentrar la luz del sol en un punto focal muy reducido, a través del cual circula un fluido responsable de absorber el calor concentrado. Este subsistema concentrador debe contar con un mecanismo de orientación de dos ejes para poder seguir al sol con un alto grado de exactitud para su óptimo rendimiento, esto permite que el receptor pueda alcanzar temperaturas aproximadas a los 4,000°C.¹⁷

¹⁷ Guillén Solís, Omar. *Energías Renovables*. Pág. 19.

Estos sistemas se pueden utilizar para generar electricidad, el calor absorbido activa un motor, que convierte el calor en energía cinética y acciona un generador eléctrico.

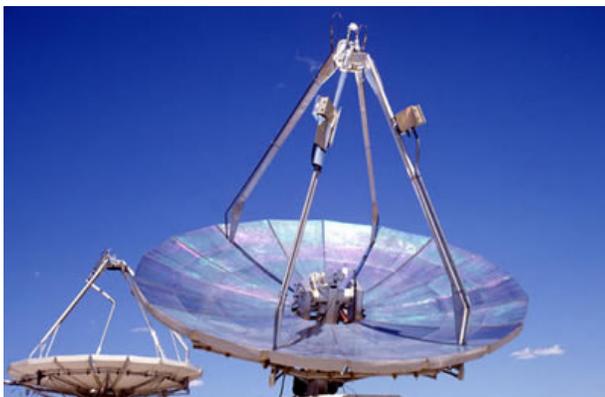


Figura 18. Colector de plato parabólico con receptor de foco puntual, lugar donde se encuentra el concentrador de energía térmica. **Fuente:** Textos Científicos



Figura 19. Colector de espejos planos con un punto común de concentración de energía. **Fuente:** Textos Científicos

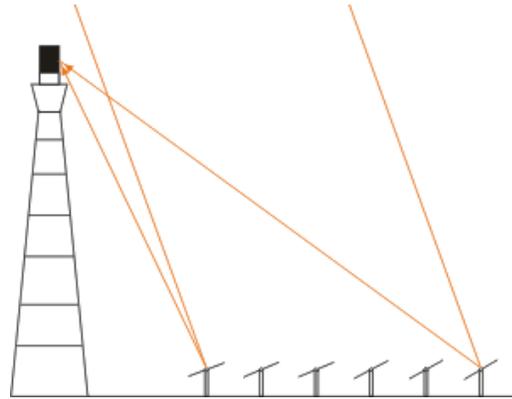
Hornos solares:

Este sistema es de gran tamaño y combina la disposición de un gran número de espejos planos llamados helióstatos que reflejan los rayos del Sol hacia un colector parabólico de gran formato, en su foco geométrico se ubica el absorbedor.

Centrales eléctricas termales solares de torre:

Las centrales eléctricas termales solares de torre son los sistemas de conversión fototérmica a altas temperaturas más utilizados por su gran capacidad, en este caso centenares o incluso millares de espejos con sistemas de seguimiento de dos ejes se instalan alrededor de una torre. Estos espejos levemente curvados también son llamados helióstatos; cada uno de estos espejos contiene un mecanismo que lo orienta hacia el sol, a su vez cada uno de ellos refleja de forma simultánea los rayos del Sol hacia un punto en la torre; donde se encuentra el absorbedor el cual se calienta hasta temperaturas de 1000°C o más. El aire caliente o sodio fundido constituyen el fluido responsable de transporta el calor desde el absorbedor hacia un generador donde se produce vapor de agua sobrecalentado y por consiguiente a alta presión, el cual acciona una turbina y un generador donde se obtiene electricidad para ser utilizada directamente o distribuirla a la red¹⁸.

¹⁸Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. Págs. 69,70.



Figuras 20 y 21: Central eléctrica termal solar de torre, los helióstatos son orientados hacia el concentrador ubicado en la parte superior de la torre. **Fuente:** Textos Científicos.

ENERGÍA EOLICA

Tanto la energía solar como la eólica son los recursos renovables que se encuentran mejor distribuidos en nuestro planeta y por lo tanto, son los que representan las mejores alternativas para ser aprovechadas por la creciente demanda energética de las sociedades actuales. Sin embargo, su dificultad radica en su irregularidad, por un lado su comportamiento es intermitente, ya que su incidencia se da en momentos cuando la dependencia energética es mayor; la energía eólica se presenta con menor regularidad en época invernal en países con climas extremos, estación del año que demanda la mayor parte de energía consumida anualmente, y por otro lado, la dificultad de combinar deferentes tecnologías para su almacenamiento¹⁹.

Actualmente existe el inconveniente de la baja producción energética en comparación con los sistemas basados en la quema de hidrocarburos; pero los factores que pueden popularizar el uso de la energía del viento son en primer lugar su gratuidad y disponibilidad a largo plazo (características principales de las energías renovables); puede utilizarse en aplicaciones domésticas o de explotación agrícola donde las fuentes actuales de energía no se encuentran disponibles generando un potencial energético descentralizado. A largo plazo, otra ventaja es la posibilidad del diseño e instalación de

¹⁹ Cadiz, Juan Carlos. *La Energía Eólica, Tecnología e Historia*. Herman Blume. Madrid, 1984. Pág. 27.

recursos tecnológicos que promuevan el crecimiento, eficiencia para su captación, conversión y almacenamiento²⁰.

La energía eólica tiene muchas ventajas que la hacen una fuente de energía atractiva para su uso tanto en gran escala como en pequeñas aplicaciones. Los beneficios de la energía eólica incluyen:

- **Energía limpia e inagotable:** La energía del viento no produce ninguna emisión y no se agota en un cierto plazo. Una sola turbina de viento de un megawatt (1 mW) que funciona durante un año puede reemplazar la emisión de más de 1.500 toneladas de dióxido de carbono, 6.5 toneladas de dióxido de sulfuro, 3.2 toneladas de óxidos del nitrógeno y 60 libras de mercurio. El consecuente gasto económico-energético requerido para su contención o recolección, esto en función de la necesidad de eliminar impactos negativos al medio ambiente.
- **Desarrollo económico local:** Las plantas eólicas pueden proporcionar un flujo constante de ingresos a los terratenientes que arriendan sus campos para la explotación del viento, y un aumento en la recaudación por impuestos territoriales para las comunidades locales.
- **Tecnología modular y escalable:** las aplicaciones eólicas pueden tomar muchas formas, incluyendo grandes granjas de viento, generación distribuida y sistemas para uso directo en la red eléctrica. Las aplicaciones pueden utilizar estratégicamente los recursos del viento para ayudar a reducir los riesgos por el aumento en la carga o consumo y los costos producidos por cortes eléctricos.
- **Estabilidad del costo de la energía:** La implementación de energía eólica, reduce la dependencia de los combustibles convencionales que están sujetos a variaciones de precio y volatilidad en el mercado internacional²¹.

Fundamentos de la energía eólica

El viento como los demás recursos energéticos renovables es también una consecuencia de la irradiación solar. La irradiación solar en cada punto planetario es distinto, generando diferencias en las áreas térmicas y desequilibrios de temperatura que a su vez se traducen en variaciones de presión atmosférica, provocando que el aire se mueva desde las zonas de alta presión cuando el aire ascendente es caliente hacia las de baja presión cuando el aire descendente se enfría.

²⁰ Comisión Nacional de Energía. ¿"Qué es la Energía Eólica?"
http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_612_energia_eolica. Consultado el 20 de octubre de 2006.

²¹ *Ibid.*

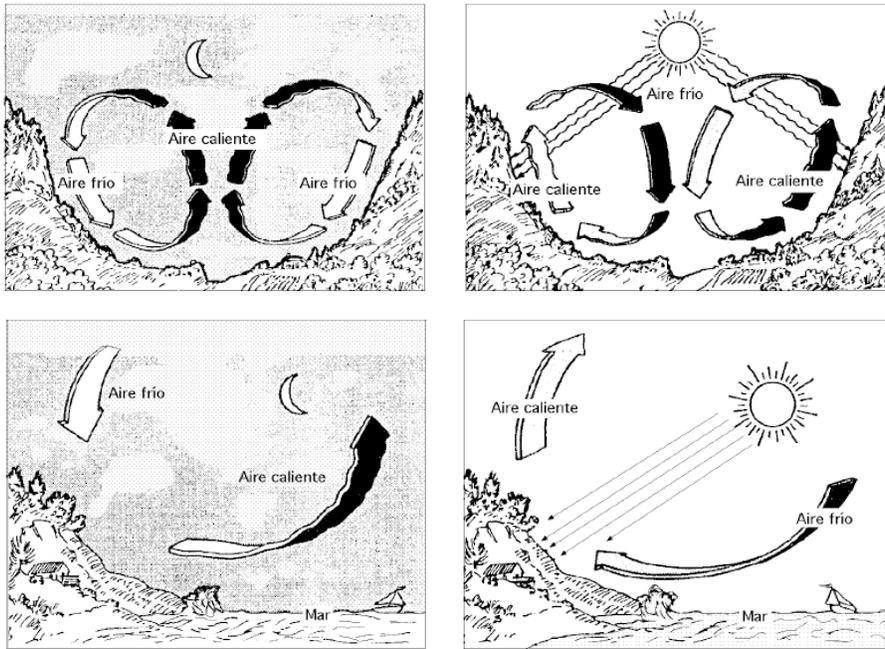


Figura 22. La circulación del aire es producida por las diferencias de temperatura tanto en tierra como en las costas, durante la noche los flujos son inversos a los que se presentan durante el día.
Fuente: Fernández Díez. Pedro.

A escala planetaria, la zona ecuatorial recibe la máxima radiación solar, mientras que en los polos apenas es recibida; suponiendo que el planeta no tiene movimiento de rotación podemos generar un modelo simplificado del movimiento del aire que se mueve en un sistema de diferencias térmicas y de presión, entre la zona ecuatorial y los polos se produciría un movimiento oscilatorio que forma las zonas de aire ascendente como descendente (figura 23a).

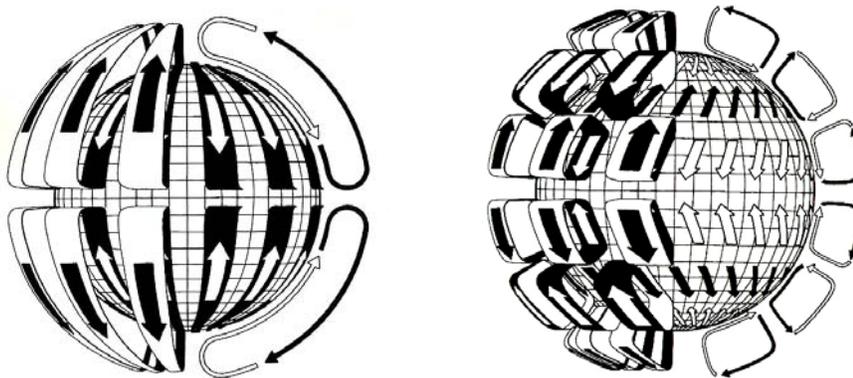


Figura 23. El modelo de la izquierda (a) muestra la circulación del aire a escala planetaria sin tomar en cuenta el movimiento de rotación, provocando que solo se produzca un circuito por hemisferio, en cambio, el esquema de la derecha (b) muestra un modelo que incluye la rotación, en el que se producen más circuitos en cada hemisferio.
Fuente: Cadiz, Juan Carlos. La Energía Eólica.

Pero si tomamos en cuenta el movimiento de rotación de la tierra, el patrón de movimiento del aire, se subdivide comportándose de una manera más compleja, donde se recomponen tres circuitos independientes en cada hemisferio; provocando a su vez sistemas no ortogonales, los movimientos oblicuos generados por el movimiento transversal de rotación; estos factores provocan el rompimiento de estos sistemas, dando pie a la generación de torbellinos que se mueven independientemente transformando totalmente el comportamiento periódico del viento en el planeta (figura 23 b). Otro factor importante para entender la irregularidad de la energía del viento en la escala del tiempo se debe a las variaciones estacionales que son provocadas por el ángulo de inclinación del eje de la tierra y de su punto focal en el movimiento de translación con respecto al Sol.

Esto es lo que rige el comportamiento de los vientos a nivel planetario y de ahí se pueden estimar algunos sitios como los más ventosos; así como los hemisferios y sus locaciones cercanas. A nivel local, es necesario tener en cuenta que los efectos ocasionados por el mar, las montañas y las condiciones orográficas del suelo pueden modificar considerablemente el movimiento de estos diferentes sistemas de presión. Las montañas representan un importante obstáculo para el desplazamiento del aire y su comportamiento puede resultar complejo, pero la principal consecuencia es la disminución de la velocidad del aire entre el 30% y el 50% en relación con los espacios abiertos²². De este modo, podemos mencionar que los factores más importantes que definen los regímenes de vientos en un lugar determinado dependerán de su situación geográfica, de las características micro climáticas locales, de la estructura topográfica de la zona, de las irregularidades del terreno y de la altura sobre el nivel del mar. Para cada lugar, la velocidad del viento se comporta de forma aleatoria, que está relacionada con variaciones estacionales, variaciones cíclicas diarias e importantes variaciones debidas a turbulencias atmosféricas ya mencionadas.

Por lo anterior, predecir el comportamiento del viento con certeza es prácticamente imposible, aunque sí es posible determinar algunos patrones que se explicarán con mayor precisión en el siguiente punto.

Recurso energético del viento

Aproximadamente el 2% del calor del Sol que llega a la tierra se convierte en energía cinética en forma de viento, de ésta solo una fracción muy pequeña puede ser aprovechada ya que la mayor parte de estos vientos ocurren a grandes alturas o sobre los océanos, mar adentro. En términos cuantitativos, el potencial energético está en función de la velocidad del aire y del área o superficie que intercepta el viento y de su densidad; el incremento de cualquiera de estas variables, aumentará el potencial disponible en el

²² Cadiz, Juan Carlos. *La Energía Eólica, Tecnología e Historia*. Pág. 29.

viento; la energía cinética de un sistema eólico está determinada en la siguiente fórmula y también es llamada como la "ley del cubo"²³:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Donde: E= energía por unidad de tiempo (W/h, watts/hora)

A= área interceptada (m²) (para el caso de molinos de viento o aerogeneradores)

ρ= densidad del aire (Kg/ m³)

v= velocidad del viento (m/s)

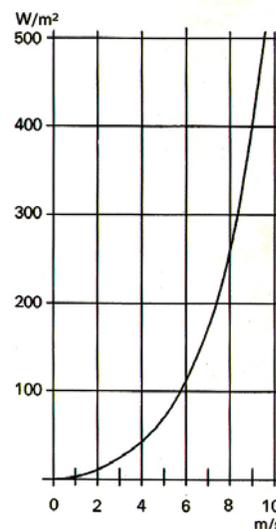


Figura 24. Incremento de la energía del viento en función de la variación de la velocidad.
Fuente: Cadiz, Juan Carlos. La Energía Eólica.

Pero en términos prácticos, lo que nos interesa es determinar el contenido energético del viento que puede ser aprovechado, que dependerá de los factores mencionados y que pueden ser determinados con información meteorológica sobre la estructura, distribución y velocidad de los vientos. La densidad del aire tendrá una variación de acuerdo con la diferencia de temperatura en la atmósfera y con la elevación del mismo, siendo el aire caliente menos denso que el frío, por lo tanto, la energía disponible será menor en verano que en el invierno, aún con la misma velocidad del viento²⁴. La velocidad debe medirse con instrumentos especiales como el anemómetro en un periodo mínimo de tres años para poder determinar un promedio anual, solo con esta medida se pueden tener datos confiables, ya que la potencia del viento según la fórmula, varía con el cubo de su velocidad; el incremento de la velocidad, aumentará de forma exponencial el potencial de energía disponible.

La selección del lugar para establecer un parque eólico es la razón más importante para poner énfasis en la importancia de instalar convertidores de energía eólica donde los vientos reúnan las condiciones fundamentales para que los gastos de instalación sean rentables. La determinación cuantitativa de estos factores permiten llevar a cabo estudios

²³ *Ibid.* Pág. 31.

²⁴ Gipe, Paul. *Energía Eólica Práctica, Una Guía para la Instalación de Pequeños Sistemas Eólicos.* ProgenSA. Sevilla, 2000. Pág. 22.

estadísticos para trazar mapas eólicos que nos proporcionan la información global o regional sobre el nivel medio de los vientos, cuyo objetivo es determinar cuales son las zonas más idóneas para establecer parque eólicos, así como predecir la distribución de velocidades²⁵.

Se requiere elaborar el inventario de cuencas eólicas y su caracterización, precisando los sitios, su extensión superficial en hectáreas, sus características topográfico eólicas, la rosa de los vientos, vientos energéticos, rumbos dominantes, etcétera, lo que permitiría configurar la distribución topográfica de los aerogeneradores, y determinar un índice de capacidad instalable por hectárea, que multiplicado por la superficie total, indicaría la capacidad total instalable en el sitio. La velocidad media del viento en el sitio, sería el indicador principal del factor y por tanto de la generación bruta esperada en potencia anual expresada en (giga watts) gWh/año.

En México ha habido poca recolección sistemática y ordenada de información del recurso eólico, por lo que la información se refiere a observaciones puntuales²⁶. Sin embargo el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Secretaría de Energía han desarrollado estudios sobre el potencial eólico para la zona del Istmo de Tehuantepec en el Estado de Oaxaca, cuyo resultado es favorable, con la posibilidad de implementar parques eólicos en la zona.

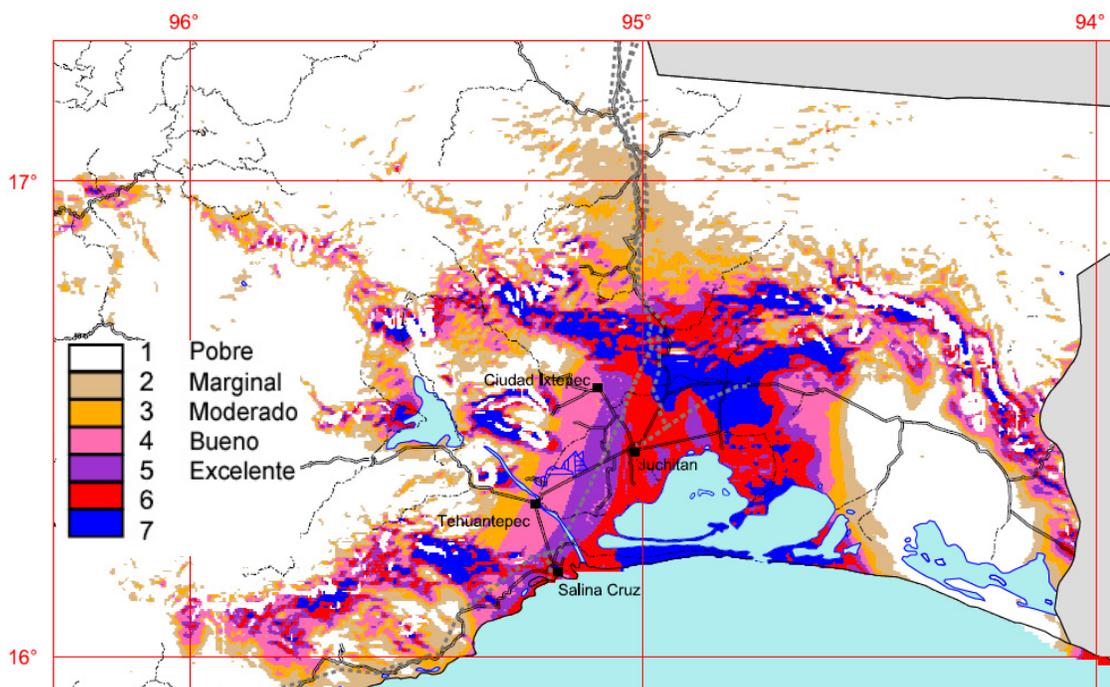


Figura 25. Mapa eólico de la zona de Tehuantepec, Oaxaca que muestra el potencial para implementar diferentes parques eólicos de gran capacidad. **Fuente:** Secretaría de Energía.

²⁵ Gipe, Paul. *Energía Eólica Práctica, Una Guía para la Instalación de Pequeños Sistemas Eólicos*. Pág. 24.

²⁶ Comisión Nacional de Energía. “¿Qué es la Energía Eólica”

Conversión de energía eólica

La cuantificación del potencial energético de un lugar determinado se indica en términos de energía disponible, la cual puede ser traducida a valores de velocidad media con sus respectivas reservas. El término más adecuado es el que se da en kW/m^2 como un dato de densidad de energía, o kWh/m^2 como un dato de densidad de potencia. 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 y acopladas a motores mecánicos, o en forma indirecta, cuando interviene un elemento intermedio para su conversión, esto significa que la energía mecánica rotacional puede ser convertida a eléctrica.

Los aerogeneradores o turbinas eólicas constituyen el principal medio de los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica, los cuales están constituidos por un rotor que consta de un juego de aspas dispuestas de forma radial, de un convertidor de energía que puede accionar bombas de émbolo o bien, accionar generadores eléctricos y una torre que tiene dos funciones, la primera consiste en soportar al rotor y al convertidor de energía, y la segunda consiste en ubicar al rotor a la altura idónea para captar los vientos que circulan con mayor velocidad a mayor elevación del suelo.

Una turbina eólica es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento en electricidad. Las turbinas eólicas se diseñan para convertir la energía del movimiento del viento (energía cinética) en energía mecánica, por medio de un rotor que, mediante el movimiento de un eje conectado a un generador ésta energía mecánica se convierte en electricidad. La electricidad generada se puede almacenar en baterías, o utilizar directamente. Hay tres leyes físicas básicas que gobiernan la cantidad de energía aprovechable del viento por medio de turbinas para producir electricidad:

- La primera ley indica que la energía generada por la turbina es proporcional a la velocidad del viento al cubo.
- La segunda ley indica que la energía disponible es directamente proporcional al área barrida de las paletas del rotor. La energía es proporcional al cuadrado de la longitud de las paletas.
- La tercera ley indica que existe una eficacia teórica máxima de los generadores eólicos del 59%.

En la práctica, la mayoría de las turbinas de viento son mucho menos eficientes que esto, y se diseñan diversos tipos para obtener la máxima eficacia posible a diversas velocidades del viento. Los mejores generadores eólicos tienen eficacias del 35% al 40%.

Variables para el diseño de aerogeneradores

La configuración de cada aerogenerador puede ser de diversas formas, sin embargo la mayor parte de los que se construyen actualmente tienen el rotor de cara al viento, es decir que se encuentran perpendicularmente con respecto a la dirección del viento y su eje horizontal, donde el rotor gira delante de la torre, alrededor de una línea paralela al horizonte. Como se ha mencionado, los tres elementos fundamentales de un generador son:

- El rotor
- El convertidor de energía
- La torre

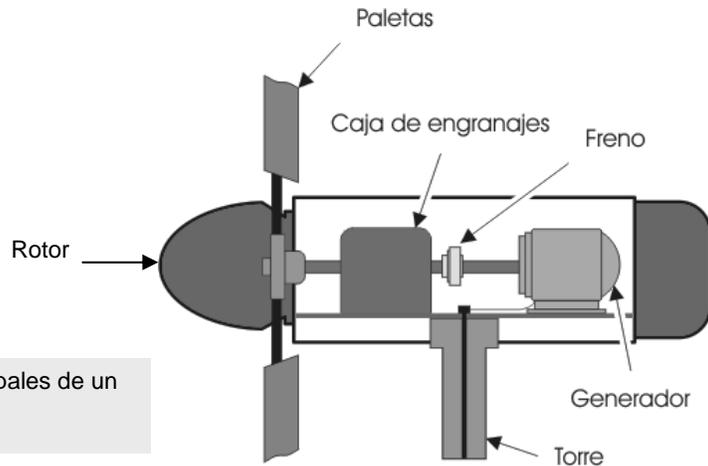


Figura 26. Componentes principales de un aerogenerador.
Fuente: CONAE.

El rotor:

Como el principal componente de un sistema conversor de energía eólica, su objetivo es el de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica (ver capítulo 1). Su evolución inició con los molinos de viento, en los que el uso de madera y telas, en donde la experiencia de siglos determinaba cual era la configuración idónea para cada lugar específico, hasta llegar a los modernos sistemas construidos con materiales híbridos como fibra de carbón reforzada con resinas epóxicas cuyas características están relacionadas con la capacidad energética del propio sistema y de las condiciones meteorológicas del sitio donde se instala. Existen una gran cantidad de formas y tamaños pero se ha establecido que mientras más capacidad tenga un sistema, el costo de la energía eléctrica generada será mayor; razón para hacer una detallada evaluación previa para la toma de decisión respecto al tamaño del aerogenerador con respecto al potencial eólico del sitio donde será instalado.

Cada sistema representa un reto de carácter estructural y tecnológico, ya que los rotores de mayor tamaño alcanzan los ciento cincuenta metros de diámetro, dimensiones que representan los límites tecnológicos disponibles en la actualidad; por otro lado, los aerogeneradores de menor tamaño permiten energizar lugares donde el acceso a la red eléctrica no está disponible sin importar el costo inicial del equipo, si su aportación permite el uso de dispositivos propios para labores en la agricultura y actividades pecuarias. Existen

diferentes capacidades, diferentes diámetros del rotor y también opciones de convertidores y con esto, diferentes configuraciones disponibles para cada caso particular.

A partir de este criterio es posible agrupar a los aerogeneradores de acuerdo a dos diferentes criterios, el primero se basa en su potencial y el segundo en su disposición del eje.

En función de su potencia:

- De pequeña potencia hasta 50 Kw.
- De mediana potencia entre 50 y 250 Kw.
- De gran potencia mayores a 250 Kw.

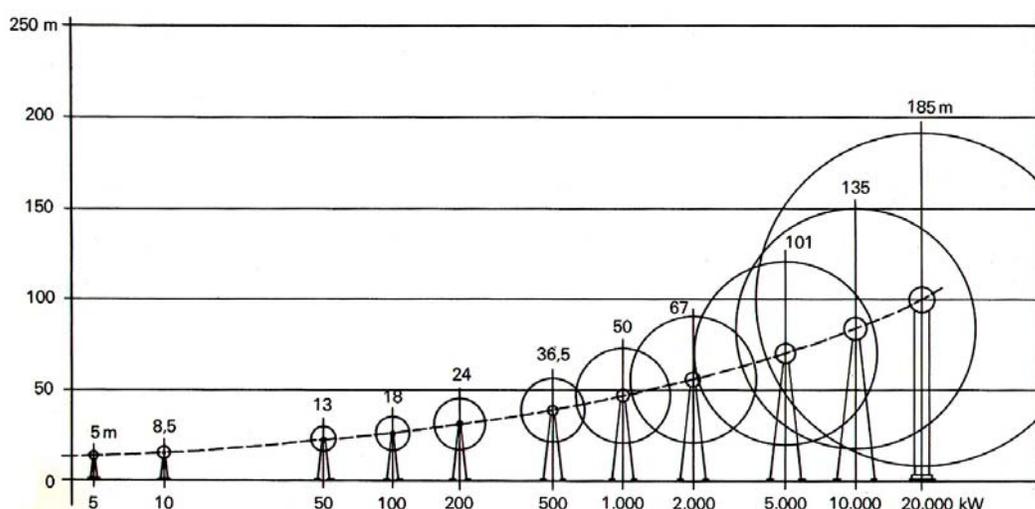


Figura 27 Esta figura muestra las dimensiones de los rotores en función de la potencia requerida
Fuente: Cadiz, Juan Carlos. La Energía Eólica.

En función la disposición de su eje:

- Horizontal: esta configuración es la más utilizada y la que cuenta con mejores cualidades aerodinámicas.
- Vertical: son utilizados por la sencillez de su diseño y por lo tanto su construcción, lo que les proporciona ventajas de carácter mecánico²⁷.

La torre:

La torre eleva el rotor y la turbina sobre las corrientes de aire turbulentas cercanas a la tierra y permite capturar un viento de mayor velocidad. El diseño de la torre es particularmente crítico, pues deben ser tan altas como sea económicamente posible (generalmente entre

²⁷ Gipe, Paul. *Energía Eólica Práctica, Una Guía para la Instalación de Pequeños Sistemas Eólicos*. Pág. 39.

40 y 100 metros), también deben ser robustas, permitir el acceso a la turbina para su mantenimiento, pero no agregar costo innecesario al sistema. Un aspecto particularmente importante del diseño de torres es la eliminación de la resonancia entre la gama de frecuencias de las paletas que rotan y la frecuencia de resonancia de la torre.

La altura de la torre afecta la cantidad de potencia que se puede obtener del viento con una turbina dada, así como las tensiones sobre el rotor. A una altura de un kilómetro sobre la superficie, las velocidades del viento no son influenciadas por el terreno que se encuentra debajo, el viento se mueve más lentamente cuanto mas baja sea la altura, con la máxima reducción de velocidad del viento situada muy cerca de la superficie. Este fenómeno, conocido como esqueleo del viento, es un factor determinante al momento de tomar la decisión sobre la altura de la torre, puesto que a mayor altura los rotores se exponen a vientos más rápidos. Además, las diferencias en la velocidad del viento entre la parte superior y la inferior del rotor disminuyen a mayores alturas, causando menor desgaste en la turbina.

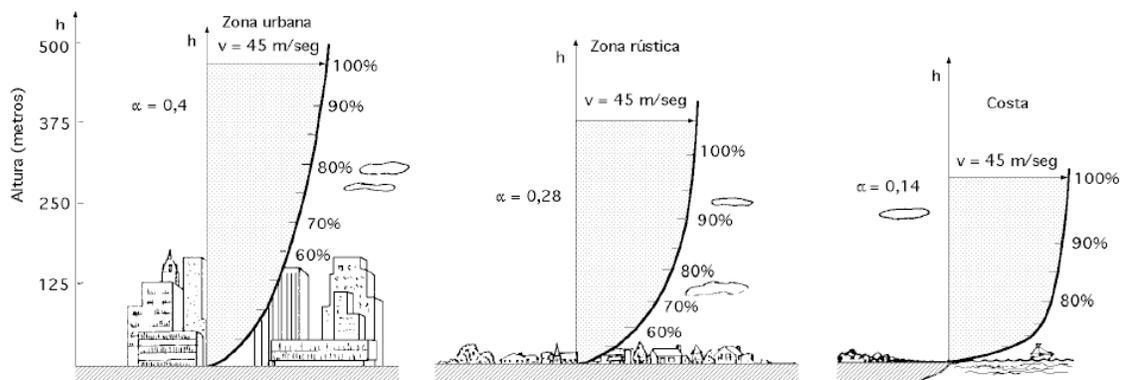


Figura 28. Los perfiles de velocidad del viento cambian considerablemente en función de las condiciones topográficas del terreno, siendo más eficiente en la superficie marítima
Fuente: Fernández Díez, Pedro

Aplicación de factores aerodinámicos para la configuración de las aspas del rotor:

La configuración de los molinos de viento primitivos respondía a las innumerables experiencias a través de siglos de prueba y error, en cambio, actualmente se han adquirido conocimientos y teorías para establecer y determinar de forma muy precisa la configuración más conveniente para el rendimiento óptimo de los aerogeneradores.

Las variables que se deben tomar en cuenta son: La corriente de aire que atraviesa el rotor, la distribución de las presiones sobre la superficie de las aspas y el resultado de las fuerzas aerodinámicas que genera el movimiento radial del rotor. Para comprender el comportamiento de un rotor moderno, es necesario entender primero el principio de

sustentación de un ala que se mueve de forma horizontal sobre la atmósfera a cierta velocidad. Las fuerzas aerodinámicas que se producen sobre una sección transversal del ala se descomponen en horizontales y verticales, dando como resultado una fuerza inclinada ascendente. Donde:

- La fuerza horizontal representa la oposición al avance.
- Y la fuerza vertical representa la sustentación del ala.

Las palas de un rotor no se encuentran en posición horizontal sino oblicua en relación a la dirección del viento, la formación de turbulencias detrás del sistema se le llama “entrar en pérdida” lo que significa perder el control de la sustentación en el caso de un avión, que para el caso de los aerogeneradores significa la generación de movimiento radial de cada una de las aspas del rotor.

Actualmente se han desarrollado diferentes formas de perfiles aerodinámicos, debido a la gran cantidad de aerogeneradores que corresponden a casos particulares como el potencial requerido y su relación con las condiciones meteorológicas del sitio.

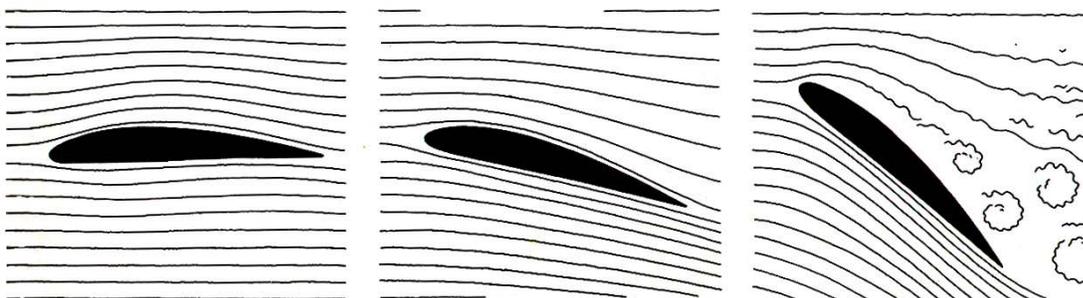


Figura 29. Comportamiento las líneas de corriente al atravesar un perfil aerodinámico en diferentes ángulos. **Fuente:** Cadiz, Juan Carlos. La Energía Eólica.

Número de aspas:

Aunque existen casos particulares de aerogeneradores que funcionan con una sola aspa (también llamadas palas), existe un debate sobre el uso de dos o tres, la única ventaja que ofrece el uso de dos es el ahorro de inversión inicial, sin embargo, usar tres significa que el rotor girará con mayor uniformidad y por lo tanto, tendrá un tiempo de vida y rentabilidad mayores. Para el caso de aerogeneradores de menor potencia, también es común encontrar diversas configuraciones multiaspas²⁸.

²⁸ Gipe, Paul. Energía Eólica Práctica, Una Guía para la Instalación de Pequeños Sistemas Eólicos. Progenza. Sevilla, 2000.

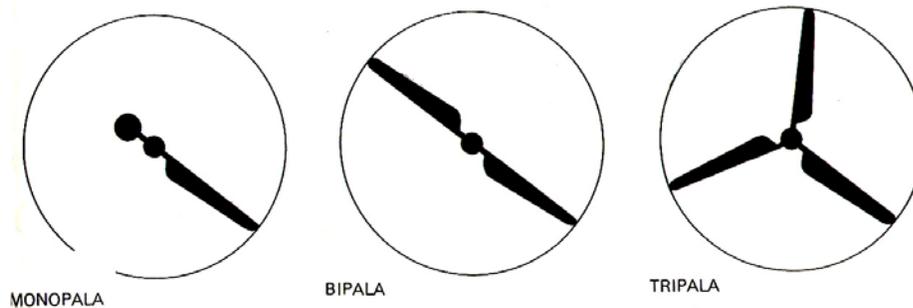


Figura 30. Tipología de rotores eólicos de eje horizontal
Fuente: Cadiz, Juan Carlos. La Energía Eólica.

Control sobre velocidad y dirección del viento:

Como se ha mencionado, la variación tanto en la intensidad como en la dirección de los vientos en un parque eólico son factores prácticamente impredecibles de analizar, por esto, fue necesario desarrollar diferentes sistemas tanto para la regulación de la energía cinética, como la adecuada orientación del aerogenerador en función de la cambiante dirección de los vientos dominantes.

Los sistemas de control de velocidades del viento responden a la necesidad de la regulación de la frecuencia en el giro de los rotores, esto contribuye a la generación de energía eléctrica más constante que puede ser incorporada a la red principal o bien, almacenada en baterías. Estos sistemas funcionan variando el ángulo de inclinación de las palas del rotor para reducir o aumentar movimiento radial, también contribuyen protegiendo al aerogenerador de los vientos excesivos capaces de dañarlo; existen diversos mecanismos para cambiar la posición aerodinámica de las palas del rotor que pueden ser sistemas de control automatizados que se encuentran en el eje, o bien mecanismos ayudados con veletas de regulación para modificar la posición del rotor con respecto a la dirección del viento, este mecanismo es utilizado para los aerogeneradores de menor formato, mientras que los primeros son utilizados para aerogeneradores de 1000 kW en adelante.

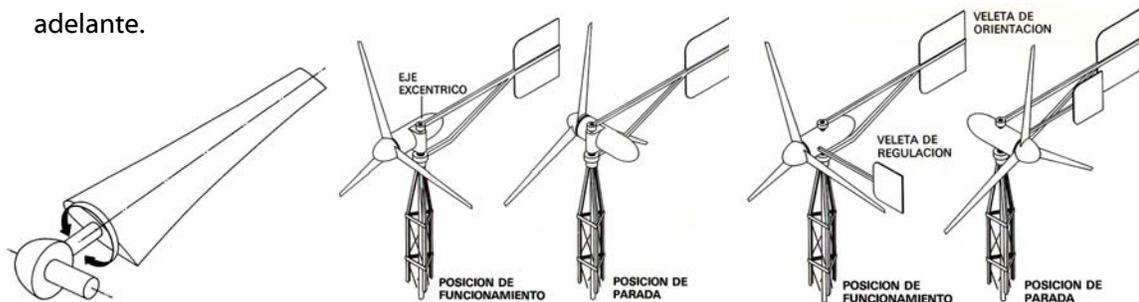


Figura 31. Estos tres esquemas muestran diferentes sistemas de control de velocidad del viento, el primero consiste en un mecanismo de paso variable del ángulo de ataque del viento, el segundo consiste en un eje excéntrico que hace girar el rotor, el tercero consta de una veleta de orientación que hace girar el rotor. **Fuente:** Cadiz, Juan Carlos. La Energía Eólica.

Los sistemas de orientación

Estos mecanismos de control responden a la necesidad de mantener al rotor en posición perpendicular respecto a la dirección del viento. Debido a la imposibilidad de prever este comportamiento, se han desarrollado sistemas que mantienen al rotor en la posición idónea para lograr un mayor rendimiento. En el pasado, la posición del rotor era regulada manualmente y representaba un gran esfuerzo por parte del operador, actualmente existen diversos sistemas, los rototes de gran formato se colocan sobre una base que cuenta con un mecanismo de giro por medio de rodamientos de baja fricción y son apoyados con sistemas automatizados capaces de modificar la posición del rotor; por otro lado, los pequeños aerogeneradores utilizan una cola aerodinámica llamada veleta que ayuda al rotor a girar de forma controlada de acuerdo a la dirección del viento.

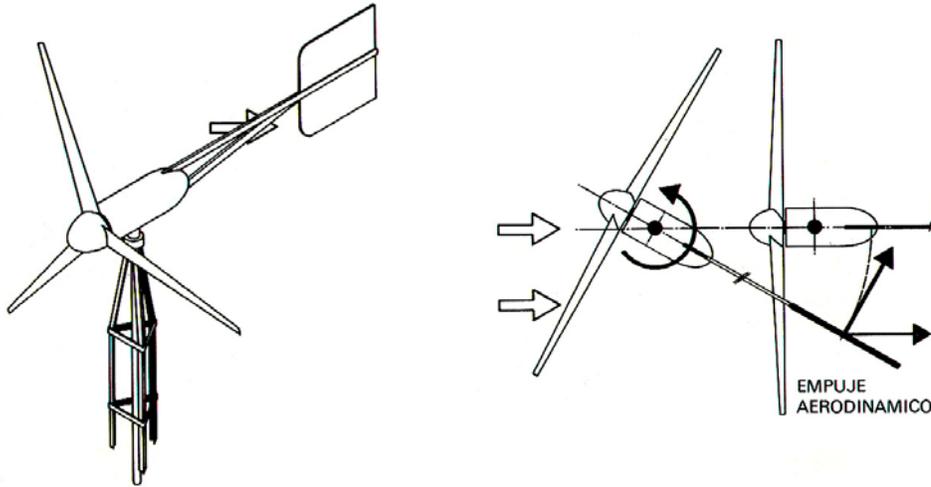


Figura 32. Sistema de orientación del rotor mediante una veleta que actúa aerodinámicamente.
Fuente: Cadiz, Juan Carlos. La Energía Eólica.

Aplicaciones de la energía eólica

La energía cinética proveniente de los vientos captada por un aerogenerador es inicialmente transformada en energía mecánica determinada por la velocidad de giro del rotor, esto es expresado como la potencia bruta del sistema. En el pasado, esta energía mecánica fue utilizada directamente para acoplar el eje del rotor a muelas de grano o a una bomba para la extracción de agua de los pozos o de los ríos. Actualmente la molienda de grano ya no es practicada, sin embargo, la extracción del agua por medio de bombas sigue siendo una alternativa en lugares lejanos a la red eléctrica. Pero el sistema de aprovechamiento de la energía eólica más importante durante la recta final del siglo pasado y como una seria alternativa para las siguientes décadas es sin duda la generación de electricidad.

Actualmente la mayor parte de los aerogeneradores están adaptados para producir electricidad directamente por medio del generador que a su vez, puede almacenarla en baterías, incorporarla a la red principal, o convertirla en hidrógeno y oxígeno por medio de electrolisis.

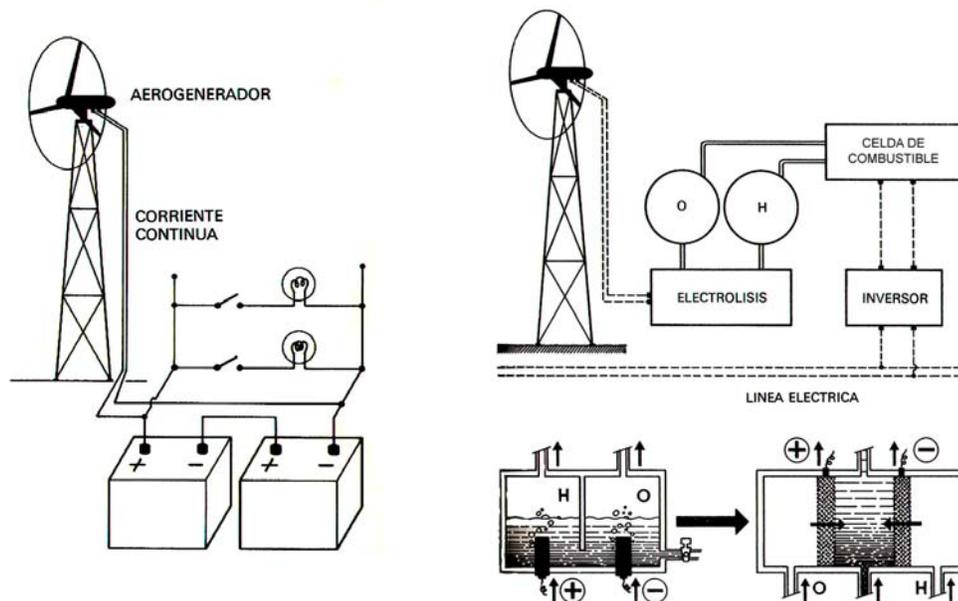


Figura 33. Sistemas de almacenamiento de energía, el primero muestra almacenamiento por baterías para instalaciones de baja potencia, el segundo muestra el proceso de electrólisis del agua para producir y almacenar hidrógeno y oxígeno. **Fuente:** Cadiz, Juan Carlos. La Energía Eólica.

ENERGÍA DE LA BIOMASA

Al igual que las formas de energía eólica, fototérmica y fotovoltaica, la biomasa forma parte de los sistemas desarrollados para captar la energía radiante que proviene del Sol, por ello también es considerada como energía renovable; las primeras son actualmente tecnologías en vías de ser rentables económicamente, esto ha hecho voltear la mirada al modelo básico de captación y almacenaje de energía solar por los vegetales verdes, cuyo proceso se remonta al origen mismo de la vida en el planeta y que se mantiene hasta nuestros días. Por ello es considerada como la única fuente renovable capaz de generar energía potencial sin la necesidad de recurrir a procesos artificiales, además de reciclar al carbón sin liberar dióxido de carbono al medio ambiente, en contraste con los combustibles fósiles. De este modo la materia orgánica representa la energía almacenada y es denominada como energía de la biomasa²⁹.

²⁹ Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. Pág. 131.

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que haya derivado de animales o de vegetales, esta manifestación energética deriva de materiales vegetales y animales, tales como madera de bosques, residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura municipal e industrial³⁰.

El valor energético de la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis. La energía química que se almacena en las plantas y los animales (que se alimentan de plantas u otros animales), o en los desechos que producen, se llama bioenergía. Durante procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía, a menudo en forma de calor, y el carbón se oxida nuevamente a dióxido de carbono para restituir el que fue absorbido durante el crecimiento de la planta. Esencialmente, el uso de la biomasa para la energía es inverso a la fotosíntesis³¹.

Fotosíntesis

Consiste en el proceso de captación de la energía solar para su acumulación en las plantas y árboles como energía química, es la forma más antigua de conversión energética en el planeta; por este medio los vegetales elaboran sus alimentos constituyendo el origen de las cadenas alimenticias. En este proceso los vegetales transforman los nutrientes minerales extraídos del suelo que no tienen valor energético, junto con dióxido de carbono extraído del aire y agua captada de la lluvia en minerales con alto contenido de energía potencial. Es importante señalar que este proceso solo pueden realizarlo las plantas verdes que contienen clorofila, componente básico para posibilitar las reacciones químicas. El resultado de la fotosíntesis es la producción de azúcar y proteínas que conserva la planta en sus tejidos, y la liberación de oxígeno necesario para la vida de los demás seres vivos en el planeta. En términos cuantitativos, cerca del 40% de la biomasa producida de forma natural en el planeta es generado por algas localizadas en los océanos y por lo tanto difícil de extraer, otro porcentaje de biomasa, la que se produce en tierra se encuentra ampliamente dispersa cubriendo una enorme área en ocasiones alejada de los sitios donde puede ser aprovechada; por esta razón la civilización actual dispone de extensiones de cultivo para generar biomasa renovable³².

Clasificación de la biomasa

En la naturaleza, toda la biomasa se descompone a sus moléculas elementales acompañada por la liberación de calor. Por lo tanto la liberación de energía de conversión de la biomasa en energía útil imita procesos naturales pero en una forma más rápida.

³⁰ *Ibid.* Pág. 132.

³¹ *Ibid.* Pág. 133.

³² *Ibid.* Pág. 132.

La energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable. De todas las fuentes renovables de energía, la biomasa se diferencia porque que almacena energía solar con eficiencia, además, la única fuente renovable de carbón, y puede ser procesada convenientemente en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

Al considerar a la biomasa como materia orgánica tanto de origen vegetal como animal incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural como artificial, puede ser clasificada de la siguiente manera:

- Natural: Llamada así porque no requiere de la intervención humana. El proceso fotosintético en los vegetales representa el primer eslabón en las diferentes manifestaciones de biomasa, los vegetales sirven de alimento para animales que a su vez generan un tipo de biomasa en otro nivel, así pues tenemos biomasa natural tanto de origen vegetal como animal sin que la mano del hombre tenga intervención alguna. Dicho de otro modo, es posible definir a la biomasa de origen natural como el conjunto de materiales orgánicos generados a partir de la fotosíntesis o bien producidos en la cadena biológica³³.
- Residual: Generada como consecuencia de cualquier actividad humana, principalmente por procesos agrícolas, ganaderos y propios del hombre, entre ellos se encuentran la basura, aguas residuales, aserrín y excrementos entre otros materiales orgánicos.
- Producida: Como su nombre lo indica, es cultivada para obtener biomasa con posibilidades de ser convertida en combustibles substituyendo la producción de alimentos; entre los vegetales más utilizados para este fin se encuentran la caña de azúcar³⁴ para la producción de Etanol como carburante; o la colza para la producción de biodiesel.

Formas de aprovechamiento de la biomasa

Existen dos formas de convertir a la biomasa en diferentes manifestaciones energéticas, obteniendo en estos procesos, una gran variedad de productos considerados como fuentes energéticas de gran valor.

- Combustión.
- Transformación química para la obtención de otro tipo de energía potencial para facilitar su transporte, almacenamiento y conversión energética. Esta transformación tiene varias vertientes térmicas o biológicas que pueden ser: Gasificación, pirolisis, fermentación alcohólica y digestión anaeróbica.

³³ *Ibid.* Pág. 133.

³⁴ Brasil es el principal productor de caña de azúcar para ser aprovechada en la producción de biocombustibles.

Combustión:

Este proceso es considerado como el sistema más elemental por ser el más antiguo, convierte la energía potencial de la biomasa en oxidación completa de la materia orgánica para generar dióxido de carbono, vapor de agua, cenizas y como principal subproducto, calor para producir trabajo.

Para poder llevar a cabo este proceso son indispensables diferentes factores como la presencia de oxígeno proveniente del aire, temperatura de ignición y de la biomasa como combustible.

Para el caso de combustión controlada, es necesario tomar en cuenta estas variables para el buen funcionamiento durante el proceso: Para el control de la presencia del oxígeno es necesario adicionar de un 20% a un 40% para facilitar la reacción y evitar la generación de carbón y monóxido de carbono. Para el caso de la temperatura de ignición será necesario elevarla hasta un rango entre 600 a 1,300° C para que la quema sea completa y evitar pérdidas de energía.

El combustible derivado de la biomasa es clasificado por sus características físicas, químicas y energéticas. Sus propiedades físicas están determinadas por su densidad, su granulometría y por el grado de humedad. Las propiedades químicas se refieren a los contenidos de sustancias no deseables durante la combustión (que pueden ser azufre, cloro o flúor y que son altamente contaminantes y dañinos para los dispositivos donde se realiza la combustión, la biomasa tiene la propiedad de no contar con estas sustancias. Sus propiedades energéticas están determinadas por su cantidad de carbono que es proporcional a su potencial energético, en este caso, la energía calorífica obtenida puede ser utilizada directamente para usos industriales o bien, para la producción de electricidad³⁵

Gasificación:

Este proceso de carácter termoquímico se lleva a cabo en la combustión, pero en condiciones diferentes al proceso anterior, en este caso se realiza con un control estricto de oxígeno, cuyo resultado es la producción de monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano e hidrógeno. Para obtener buenos resultados, la biomasa debe ser triturada de forma homogénea, elevar la temperatura de combustión en un rango entre 700 a 1500°C y contar con la presencia de humedad porque el vapor de agua favorece la formación de hidrógeno y de metano. Otro factor que determinará la calidad del combustible generado es la aplicación de aire o de oxígeno puro durante el proceso. En el caso de aplicación de aire, el resultado es la producción de gas pobre o gas gasógeno, llamado así por su poder calorífico muy bajo. En cambio al aplicar oxígeno, el resultado es un gas de síntesis, llamado así por ser una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno; su poder calorífico es mayor

³⁵ *Ibid.* Pág. 150.

y aunque no llega a los parámetros del gas natural, el propano o el butano es de gran importancia por la posibilidad de convertirlo en combustibles líquidos como metanol o gasolinas, cuya demanda en la industria es mayor.

Pirólisis:

Al igual que el anterior este proceso de conversión a partir de la biomasa requiere de calor, consiste en su descomposición en ausencia de oxígeno. La descomposición inicia a los 275°C y se completa aproximadamente a los 450°C. De acuerdo a variables como el tipo de biomasa, temperatura, presión de operación y del tiempo del proceso; los resultados pueden ser clasificados en tres:

- Gases compuestos por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos.
- Líquidos que contienen compuestos hidrocarbonatos complejos, principalmente los de carácter oxigenado.
- Residuos sólidos con alto contenido de carbón y alquitrán, así como cenizas.

En este caso la biomasa utilizada proviene de residuos agrícolas, forestales e incluso desechos urbanos, éste último caso representa la posibilidad de obtener energía por un medio en constante crecimiento y que representa también un reto para su confinamiento.

Fermentación alcohólica:

Este proceso es viable gracias a la presencia de azúcar, almidón y celulosa presentes en algunos vegetales, cuyo resultado es la producción de alcohol. Sin embargo, no es un procedimiento directo, de hecho son necesarias diferentes operaciones antes de obtener materiales fermentables y el proceso se puede representar de la siguiente manera:

- Pretratamiento de la biomasa.
- Hidrólisis.
- Fermentación alcohólica.
- Separación y purificación del alcohol.

Donde el pretratamiento es de carácter mecánico y consiste en la trituración para reducir el material a partículas más manejables; la siguiente operación es llamada hidrólisis y consiste en la ruptura de moléculas de la biomasa sumergida en un medio acuoso, cuya finalidad es reducir el almidón y la celulosa en compuestos más sencillos, en este caso azúcares. Una vez obtenida una disolución azucarada es posible someterla a la fermentación que consiste en la conversión de glucosa en etanol, la fermentación se debe a la acción de microorganismos producidos durante la reacción química que puede durar entre 2 y 3 días, una vez terminada es necesario separar el combustible del medio acuoso. La separación y purificación del etanol se lleva a cabo por destilación, proceso que genera un alcohol con

un grado de pureza del 96% bien conocido para uso doméstico, pero si se requiere un combustible mas refinado es necesario destilarlo con otros compuestos como benceno, éter o hexano, proceso que eleva considerablemente su costo de producción.

A pesar de la dificultad y costo de proceso para su obtención el metanol representa uno de los combustibles con mayor potencial para sustituir a los de origen fósil por su alto poder calorífico, su octanaje que permite utilizarlo en motores de combustión interna, además de su vaporización a menor temperatura mejorando el arranque y rendimiento. Además es compatible con la gasolina utilizada en motores convencionales, permitiendo una mezcla del 10% de metanol llamado gasohol aumentando sus propiedades y reduciendo la adición de plomo y azufre³⁶.

Digestión anaeróbica (Biodigestión):

La digestión anaeróbica o biodigestión es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico. De esta forma podemos encontrar el denominado "gas de los pantanos" que brota en aguas estancadas, el gas natural metano de los yacimientos petrolíferos así como el gas producido en el tracto digestivo de los rumiantes como los bovinos. En todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas (que producen metano) que provocan la fermentación del material en rigurosas condiciones de ausencia de oxígeno, por esta razón el proceso es llamado anaeróbico³⁷.

Cada material orgánico produce gas, sin embargo existen algunos que producen mayor energía que otros, en este caso, los productos residuales son los más utilizados. La presencia de humedad es importante, por eso los lodos residuales de la industria ganadera y de las ciudades son los recursos que aportan mayor producción de metano y ofrecen grandes ventajas por la posibilidad de encontrarlos de forma precisa en lugares predeterminados como en las ganaderías, en los sitios de confinamiento de aguas tratadas o bien, en basureros municipales; en todos los casos estos residuos ya tienen una gran cantidad de humedad y sobretodo, por su naturaleza aportan un alto contenido en nutrientes para el crecimiento de las bacterias metanogénicas. Adicionalmente, una vez tratados como biomasa útil para la extracción de energía, los residuos ganaderos pueden ser reincorporados como nutrientes en la industria agrícola. El resultado de este proceso es la síntesis de moléculas complejas que constituyen los residuos en otras más simplificadas que dan como productos finales el metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), este proceso consta de tres etapas: La primera consiste en la hidrólisis, en ella las moléculas complejas se simplifican gracias a que se encuentran en un medio acuoso; la segunda llamada acetogénesis es llamada así por la producción de un medio con base en ácidos que

³⁶ *Ibid.* Pág. 151.

³⁷ "La Biomasa" <http://www.textoscientificos.com/biomasa>. Consultado el 20 de octubre de 2006.

serán parte de los alimentos de las bacterias existentes en el material; la última etapa se llama metanogénesis llamada así por provocar la degradación de los ácidos para ser convertidos en metano y dióxido de carbono, los responsables de esta última etapa son los microorganismos metanogénicos.

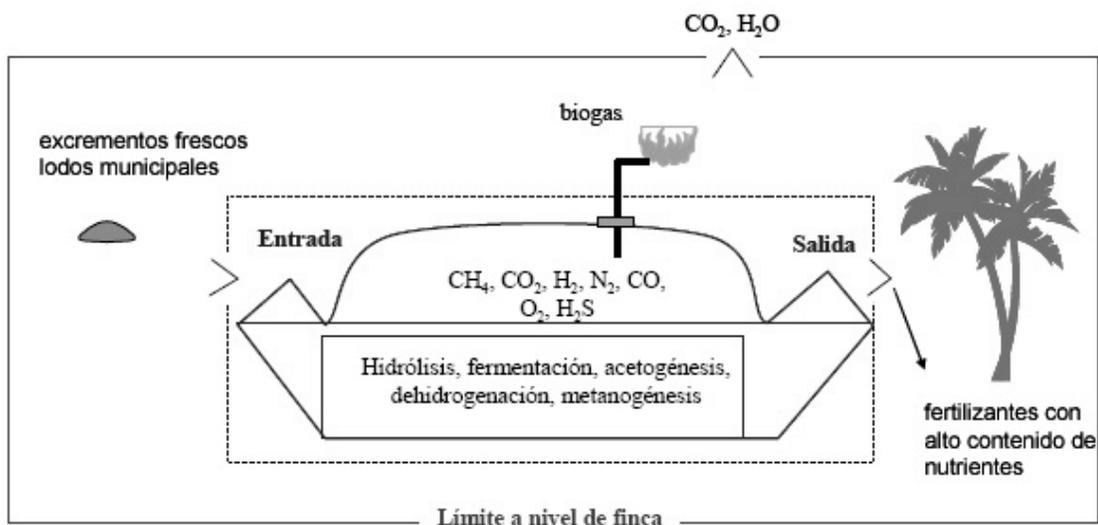


Figura 34. Proceso de generación de biogás con el uso de un biodigestor. En la parte inferior la biomasa es diluida con agua para dar inicio a la fermentación que descompondrá las moléculas en ácidos que, a su vez, las bacterias lo convertirán en metano combinado con dióxido de carbono. Los subproductos biogás y fertilizantes se muestran en la parte superior y derecha.

Fuente: Aguilar, F.X.

Sin embargo, en todo proceso bioquímico deben tomarse en cuenta diferentes factores que garanticen los resultados previstos ya que los principales actores seres vivos, para el caso de la biodigestión, o digestión anaeróbica es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

- **Temperatura:** es común tratar de controlar una temperatura media de 35°C porque en este rango se combinan las mejores condiciones para que las bacterias se desarrollen y reproduzcan con mayor rapidez.
- **Acidez:** Este factor determina la facilidad para que las bacterias descompongan los ácidos en metano o biogás, si es muy bajo o muy alto la reacción se inhibe, un rango de pH de 6.6 a 7.6 es el grado óptimo.
- **Contenidos sólidos:** La incorporación de los sólido en medio acuoso son necesarios para lleva a cabo la hidrólisis, si su contenido es mínimo, las bacterias cultivadas no tendrán el alimento necesario para desarrollarse, en cambio, si la dilución es muy sólida, dificultará la su movilidad y como consecuencia, el proceso mismo. El contenido de sólidos óptimo oscila en un 10%.

- Nutrientes. Es importante analizar el material para asegurarse que en la dilución se encuentren carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y minerales como principales nutrientes de los microorganismos responsables de la biodigestión para que la acetogénesis se lleve a cabo en óptimas condiciones³⁸.

El producto de este proceso bioquímico es el llamado biogás, cuya composición es de metano en un 50 a 70% y de bióxido de carbono con pequeñas cantidades de nitrógeno, oxígeno e hidrógeno). Su potencial energético no es el de metano puro, sin embargo, es posible utilizarlo para fines domésticos y poder sustituir el gas butano o natural, o bien para usos industriales.



Figuras 35, 36 y 37. Izquierda: construcción de un biodigestor de bajo costo con materiales de construcción y polietileno de baja densidad. Arriba: uso doméstico del biogás. **Fuente:** Ruralcostarica.

ENERGIA HIDRAULICA

La energía hidráulica también puede ser considerada como una manifestación de la energía solar y tiene su origen en el ciclo hidrológico donde intervienen tanto la energía calorífica en la atmósfera como los vientos provocados por las diferencias de temperatura. El agua de los valles y océanos es evaporada por el calor atmosférico formando nubes, estas son transportadas por el viento de un punto a otro de la Tierra, este ciclo continúa cuando el agua evaporada regresa a la Tierra en forma de precipitaciones (lluvia, nieve, niebla, etc) llenando ríos y corrientes. Este ciclo natural transporta el agua hacia lugares con mayor altura, una vez que ocurre la precipitación la energía potencial del agua se disipa generando grandes cantidades de energía cinética producida por el flujo de agua en los ríos que generalmente desembocan nuevamente en los lagos y en los océanos con menor

³⁸ Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. Pág. 166.

altura. Este tipo de corrientes tiene dos características que se deben tomar en cuenta en función de su potencial bruto energético: por un lado, su elevación provee la energía potencial del agua con respecto al lugar donde terminará su cauce y por otro, su caudal es decir, de la cantidad de agua que pueda circular en su cauce. En este caso, la potencia hidráulica puede ser aprovechada tanto en pequeños desniveles por donde circula un gran caudal, como grandes desniveles por los que circula un pequeño caudal³⁹.

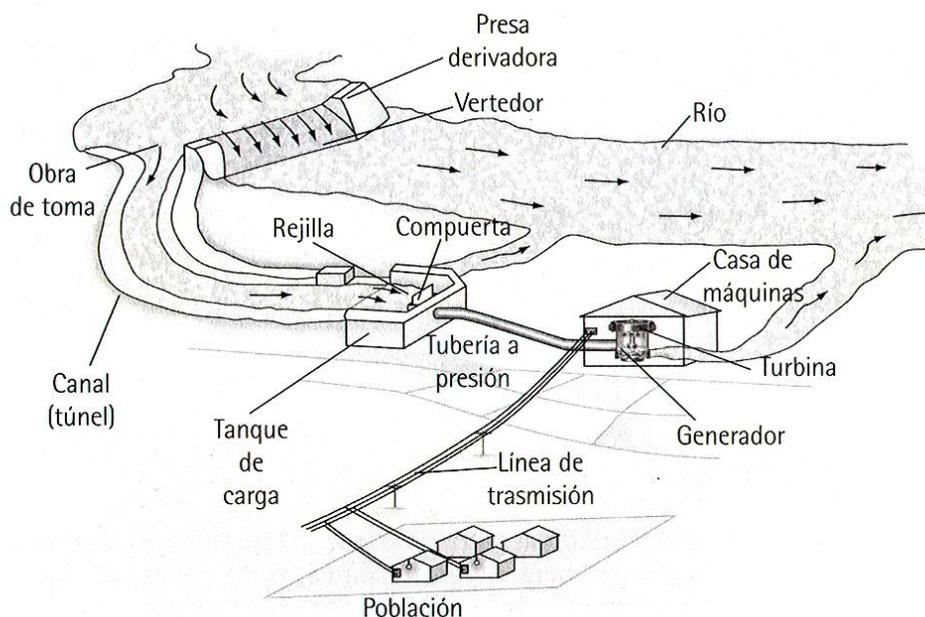


Figura 38. Entorno general de una central hidroeléctrica que muestra los dos sistemas de aprovechamiento del cauce: por conducción, o por dique o presa.

Fuente: Guillén. Omar.

Tanto el caudal como la elevación del agua pueden ser aprovechados para convertirla en fuerza hidroeléctrica por diferentes medios, puede ser almacenada en un dique o presa o dejar que el flujo natural del río pase a través de una turbina, este proceso consiste en convertir la energía cinética del agua en energía mecánica, que a su vez generará energía eléctrica útil para consumo humano.

Forma de aprovechamiento de la energía hidráulica

Las construcciones civiles necesarias para el aprovechamiento de este tipo de energía se realizan en el propio cauce del río, por esta razón deben ser cuidadosamente estudiadas, ya que estos medios tienen una mayor densidad de vida respecto a otras formas de energía renovable, por lo tanto, su aprovechamiento debe ser lo menos perjudicial⁴⁰. La fuente de

³⁹ *Ibid.* Pág. 197.

⁴⁰ Lucerna, Antonio. *Energías Alternativas y Tradicionales, sus Problemas Ambientales.* Pág. 82.

agua puede ser un arroyo, canal o río o cualquier otro tipo de corriente de agua que pueda suministrar la cantidad y la presión de agua necesarias para establecer la operación de un sistema hidráulico. Este tipo de obras civiles son principalmente construidas para aprovechar la energía cinética del cauce para generar electricidad, el conjunto de estas instalaciones y la infraestructura para aprovechar el potencial hidráulico es llamado central hidroeléctrica.

El proceso de una central consiste en el aprovechamiento de la energía cinética del agua que cae, la cual se almacena en un dique, presa o que fluye directamente a lo largo de un cauce, estos volúmenes de agua pasan a través de una turbina conectada a un generador que produce electricidad.

Sistemas hidroeléctricos

Los sistemas hidroeléctricos están condicionados principalmente por las características del lugar donde serán ubicados; La topografía del lugar tendrá influencia en la obra civil y la cantidad de energía cinética del cauce determinará su capacidad y la forma en que se utilizará la energía del agua para que llegue en las condiciones óptimas al sistema captador de energía.

Pueden ser clasificados por su capacidad energética de la siguiente manera:

- Grandes centrales hidroeléctricas. Con capacidad para producir miles de mW (mega watts)
- Centrales minihidroeléctricas. Con capacidad menor a 5 mW
- Centrales microhidroeléctricas. Con capacidad menor a 1 mW⁴¹

Por las condiciones del lugar de instalación y la forma de aprovechamiento hidráulico:

- Centrales a pie de presa: Las grandes centrales hidroeléctricas son invariablemente diques o presas cuya función es capturar y almacenar agua, la cual es liberada por un flujo que pasa a través de una turbina
- Centrales de aguas fluyentes: Estas son las centrales de menor tamaño como las mini o micro, consisten en la desviación parcial del cauce del río para conducirlo hacia una central donde la energía cinética es captada por medio de turbinas. Una vez que el cauce artificial es utilizado, es devuelto a su cauce original.

ENERGIA MARINA

El mar constituye las tres cuartas partes de la superficie del planeta, en él se llevan a cabo diferentes fenómenos causados por la radiación del sol, desde el punto de vista útil para el hombre se considera como un gran colector solar del cual puede extraerse una gran

⁴¹ Guillén Solís, Omar. *Energías Renovables. Una perspectiva Ingeniería*. Pág. 48.

cantidad de energía. Existen diferentes manifestaciones en el mar que pueden representar recursos viables para su captación y aprovechamiento:

- La primera manifestación está determinada por un fenómeno semejante al efecto que producen los vientos en la atmósfera, la radiación del Sol que incide sobre la superficie marina genera gradientes térmicos oceánicos.
- La segunda se refiere al fenómeno llamado marea, que consiste en el movimiento periódico y cíclico que tiende al ascenso y descenso del nivel del mar producido por la influencia gravitacional principalmente por el Sol y la Luna y la rotación terrestre, el ascenso del nivel es llamado pleamar y el descenso bajamar.
- La última se refiere a la interacción el viento y el agua del océano que genera movimientos como las olas o las corrientes marítimas⁴².

Estas manifestaciones en conjunto representan un recurso que podría superar la demanda energética planetaria, sin embargo la posibilidad de captarla por la tecnología disponible es poco viable por su dispersión e irregularidad, además de representar un costo económico demasiado alto.

Por otro lado, los gradientes térmicos oceánicos pueden ser aprovechados solo en lugares muy específicos que no contemplan a México. La energía cinética que proviene de las olas es el recurso marino que tiene mayor potencial hasta el momento y es el tema que será tratado.

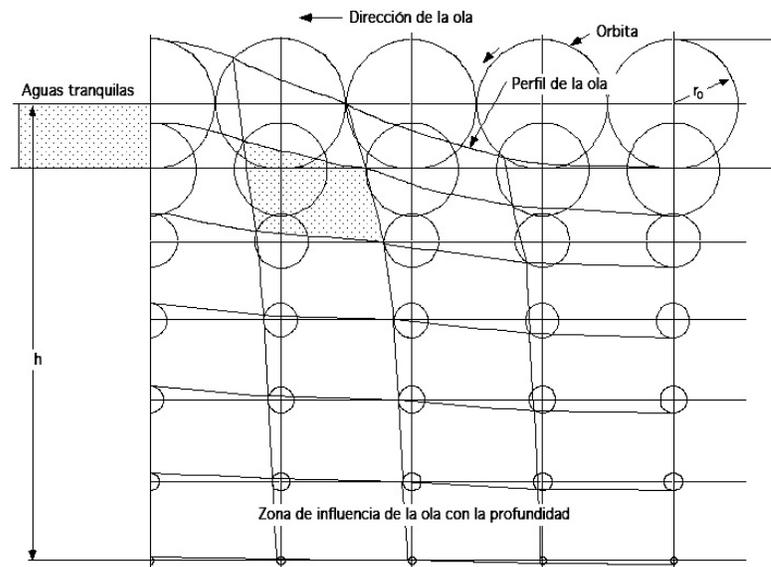


Figura 39. Movimiento de las partículas de agua en un sistema de oleaje marino.
Fuente: Fernández Díez, Pedro.

⁴² *Ibid.* Pág. 53.

Energía de las olas

Las olas son consideradas como el resultado del movimiento de la superficie marina provocado por los vientos, si tomamos como referencia a los modelos de sistemas de vientos sin irregularidades, tendríamos como resultado oleaje regular cuyo movimiento describiría patrones circulares, permanentes y con la misma frecuencia, estas trayectorias se repiten hacia la profundidad del mar de forma decreciente; tomando en cuenta este patrón hipotético es posible afirmar que estas trayectorias están dotadas tanto de energía cinética como de potencial, mientras más grande es la trayectoria circular en la superficie, mayor es la energía cinética y su potencial de conversión es también mayor.

Sin embargo el comportamiento del viento a escala planetaria es irregular y difícil de predecir como ya se dijo anteriormente, para el caso de las olas que dependen del recurso eólico, su comportamiento tampoco es regular. Al ser su densidad energética dispersa al igual que la radiación solar, también su forma de aprovechamiento es difícil. No obstante existen diversos desarrollos tecnológicos para su captación y conversión energética útil para fines humanos.

Sistemas de aprovechamiento:

Como se ha mencionado, la variación en frecuencia y magnitud de las olas es un factor determinante para entender la dificultad del diseño de convertidores que aprovechen este tipo de energía de forma eficiente. Por ello es necesario desarrollar sistemas que capten el movimiento aleatorio de las olas para convertirlo eficientemente en otro tipo de energía útil. Tomando en cuenta este reto, diferentes proyectos se encuentran en pleno desarrollo y pueden ser divididos en dos categorías: Sistemas activos y sistemas pasivos.

- Los sistemas activos para el aprovechamiento del movimiento de las olas son en términos generales estructuras que se mueven como respuesta a la ola, de éste se extrae la energía cinética de la ola utilizando el movimiento relativo que se origina entre las partes fijas y móviles del sistema.
- Los sistemas pasivos en cambio, son fijados en el fondo del lecho marino en lugares estratégicos cerca de la costa, en ellos se extrae la energía directamente del movimiento de las partículas del agua.

Sistema activo pato Salter

Este dispositivo llamado así por su aspecto puede ser considerado como un sistema activo para el aprovechamiento de las olas a mayor escala y se ubica generalmente en altamar, fue desarrollado en la década de los años 70 en Edimburgo. Consiste en un flotador alargado cuya sección más estrecha se ubica frente a la ola con el fin de absorber su movimiento lo

mejor posible, mientras que su parte posterior es cilíndrica, para evitar pérdidas de energía por rozamiento. Los flotadores son los dispositivos móviles dotados de un eje de rotación que reaccionan en relación con el oleaje cuyo movimiento de rotación acciona una bomba de aceite que se encarga de mover una turbina que genera energía eléctrica. Es una estructura flotante, el sistema consiste en péndulos invertidos, articulados en su parte inferior y montados sobre un eje que permite movimientos en dirección del oleaje, en la que una parte actúa como flotador de balanceo manteniendo una cierta rigidez, es decir, no se ve influenciada por las olas permaneciendo fija, mientras que la parte activa consiste en unos flotadores en forma de leva que se mueven accionados por el ritmo de las olas, creándose en los mismos un movimiento oscilatorio⁴³.

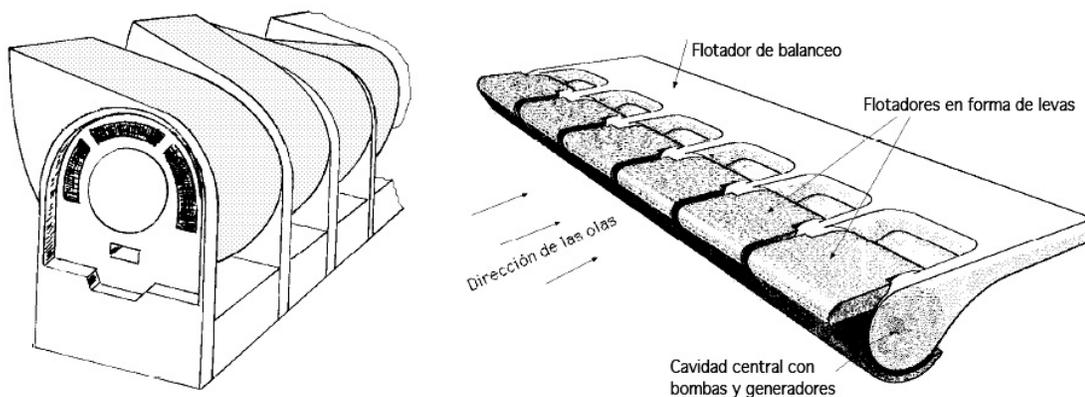


Figura 40. Esquema que muestra los componentes del sistema activo pato Salter.
Fuente: Fernández Díez, Pedro.

Esta tecnología de conversión energética se encuentra en fase de investigación y requiere ser probada para ser puesta en operación para fines prácticos. Su dificultad radica en el tamaño requerido para absorber la cantidad de energía suficiente para satisfacer necesidades humanas equivalentes a 2 gW, ya que cada módulo de una supuesta central podría estar formado por 54 cilindros flotantes de hormigón, de 14 m de diámetro y 90 m de longitud, de 11.000 toneladas de peso cada uno, anclados a 100 m de profundidad, una planta estaría conformada por 8 módulos con un total de 864 "patos", y una longitud de 38.9 km. De forma hipotética, la característica más atractiva de este sistema sería su alta eficiencia para absorber la energía primaria de las olas, alcanzando casi un 100% en condiciones óptimas⁴⁴.

⁴³ Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. Pág. 151.

⁴⁴ Fernández Díez, Pedro. "Energía de las olas" Pág. 33. Universidad de Cantabria.
<http://www.termica.webhop.info/>

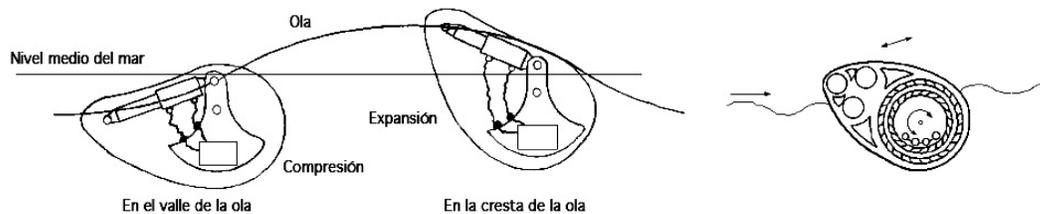


Figura 41. Movimiento oscilatorio en los flotadores en forma de leva que permiten accionar la bomba de aceite ubicada en su interior, el esquema derecho muestra la articulación que permite la oscilación. **Fuente:** Fernández Díez, Pedro.

Sistema activo balsa Cockerell

Las balsas Cockerell consisten en gigantescos flotadores, unidos entre sí por medio de articulaciones que les permiten moverse de forma independiente, al estar interconectadas reciben el impacto del oleaje, el movimiento individual permite que los émbolos hidráulicos que se encuentran en la parte superior de cada par de balsas sean accionados, permitiendo que la presión producida sea enviada hacia una turbina que a su vez, acciona un generador eléctrico. El número óptimo de flotadores es de 3 y el tamaño óptimo del sistema es de 100 m x 50 m, para conseguir potencias de 1 a 2,5 mW. El oleaje produce una rotación en las articulaciones que se podría aprovechar para accionar bombas hidráulicas. Su eficiencia teórica puede alcanzar el 90%. En ensayos con prototipos se han encontrado eficiencias que oscilan entre 40% y 50%⁴⁵. Debido a sus dimensiones inusuales y las grandes fuerzas que actúan sobre el sistema de anclaje, hacen que el sistema de balsas no resulte competitivo en relación con otros como el pato Salter.

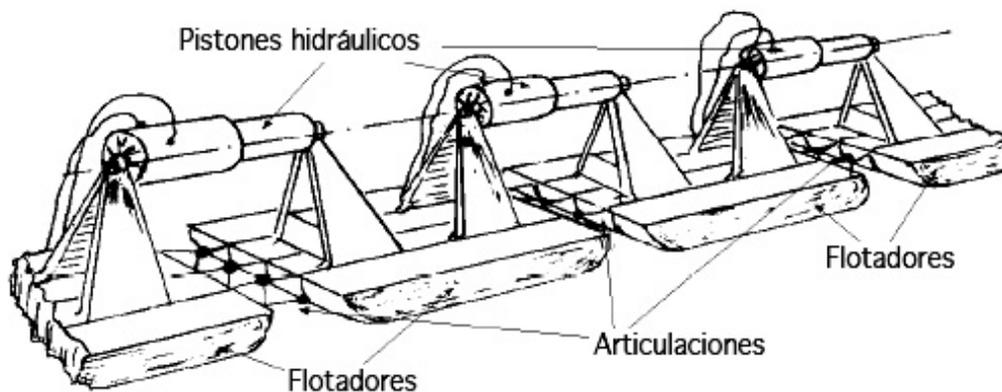


Figura 42. Balsas Cockerell. **Fuente:** Fernández Díez, Pedro.

⁴⁵ Guillén Solís, Omar. *Energías Renovables. Una perspectiva Ingenieril*. Pág. 59.

Sistema Pasivo Cilindro Bristol

Este sistema es llamado así por ser desarrollado en la Universidad de Bristol, este sistema al igual que el pato Salter fue desarrollado para grandes aplicaciones del orden de 2gW, y se espera una eficiencia cercana al 100%. Para cumplir con la capacidad proyectada, la planta deberá constar de 276 módulos, cada uno con un cilindro, ubicados a lo largo de la costa a 40 metros de profundidad, cada uno medirá 100 metros de longitud y 16 de diámetro. El cilindro representa la parte móvil del sistema, que tiene un movimiento oscilatorio relativo al oleaje, este movimiento es transmitido a la estructura de anclaje hacia bombas hidráulicas que transmiten el desplazamiento del agua hacia turbinas que convierten el flujo en electricidad⁴⁶.

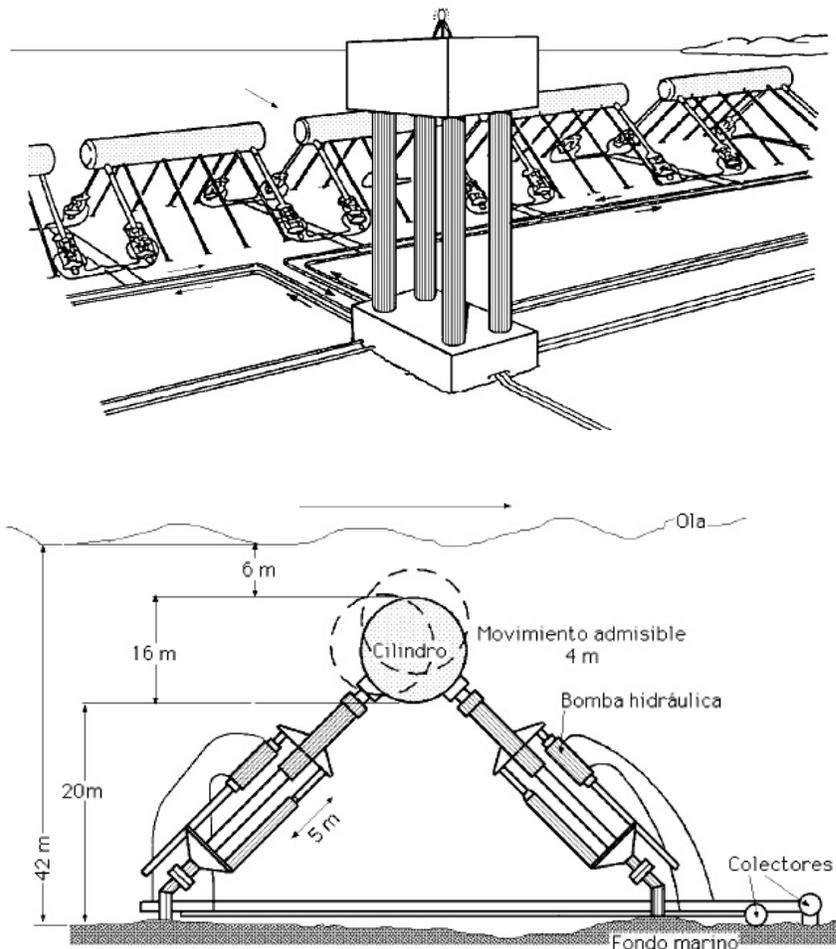


Figura 43 (arriba). Aspecto del cilindro Bristol.

Figura 44 (abajo). Diagrama de funcionamiento del sistema Bristol.

Fuente: Fernández Díez, Pedro.

Sistema pasivo rectificador Russel

El rectificador Russel es un sistema pasivo por estar anclado al lecho marino, su estructura está compuesta por dos cuerpos que funcionan como tanques, uno se encuentra en la base y el otro se ubica justo en el nivel superior de la superficie marina, cada uno consta de compuertas que ayudan a captar el movimiento de las olas. Las compuertas del tanque superior se abren con la cresta de la ola, permitiendo que el agua penetre en el tanque, mientras que las compuertas inferiores permiten la salida del agua del tanque inferior que baja por medio de la gravedad con el valle de la ola; el flujo generado por al entrada y salida el agua en ambos tanques permite el movimiento de una turbina conectada a un generador eléctrico⁴⁷.

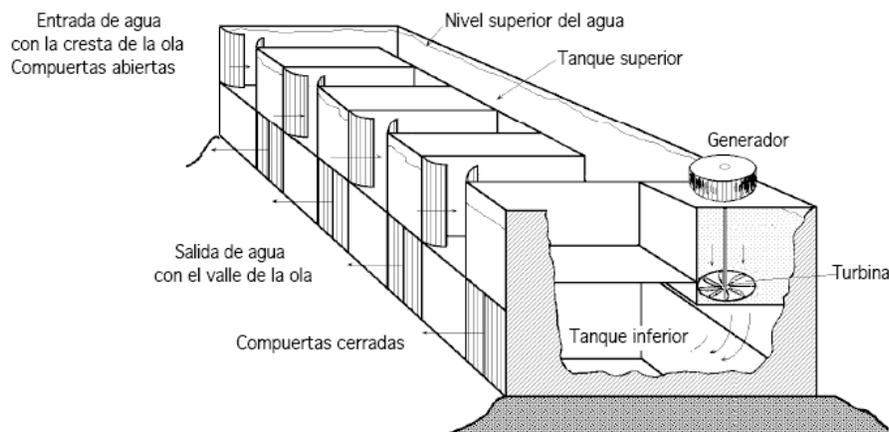


Figura 45. Rectificador Russel. **Fuente:** Fernández Díez, Pedro.

Sistema pasivo de péndulos

El sistema pasivo de péndulo es un dispositivo de forma rectangular generalmente ubicado en lugares donde rompen las olas. Consiste en una caja fabricada en concreto y fija en el fondo de la superficie marina, en la parte frontal que está dirigida hacia el mar, tiene una compuerta de acero articulada en su parte superior, que le permite un movimiento oscilatorio generado por el oleaje. En el interior de la cámara de aire, el movimiento oscilatorio de la compuerta produce un cambio de presión que acciona una turbina conectada a un generador eléctrico.

⁴⁷ Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*. Pág. 151.

Existe actualmente una planta piloto ubicada en la ciudad costera de Muroran (Japón), donde el sistema ha alcanzado eficiencias aproximadas al 50%. Las características de esta planta piloto son:

- Cajón: altura 8 m, con 2 cámaras
- Cámara: ancho 2,3 m; longitud = 7,5 m
- Potencia máxima: $N = 15 \text{ kW}^{48}$

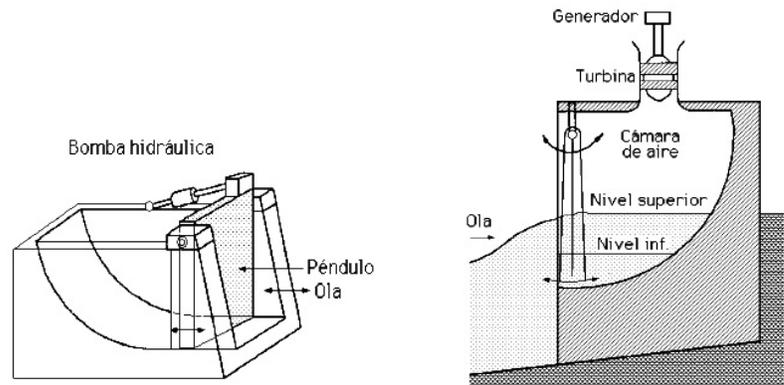


Figura 46. Sistema pasivo de Péndulos. **Fuente:** Fernández Díez, Pedro.

Sistema fijo rompeolas sumergido

Los rompeolas sumergidos fueron desarrollados inicialmente para reducir el impacto del oleaje marino en rutas marítimas cerca de las costas. Consisten en columnas ancladas en el fondo marino, equidistantes y dotadas de placas horizontales a sus lados que han demostrado su efectividad para absorber parcialmente el oleaje; en ensayos de laboratorio se ha encontrado que hasta el 35% de la energía incidente del oleaje circula por debajo de cada una de las placas, en sentido opuesto al oleaje. Este flujo puede ser aprovechado para colocar turbinas parecidas a las utilizadas en los parques eólicos y convertir la energía cinética del oleaje en electricidad.

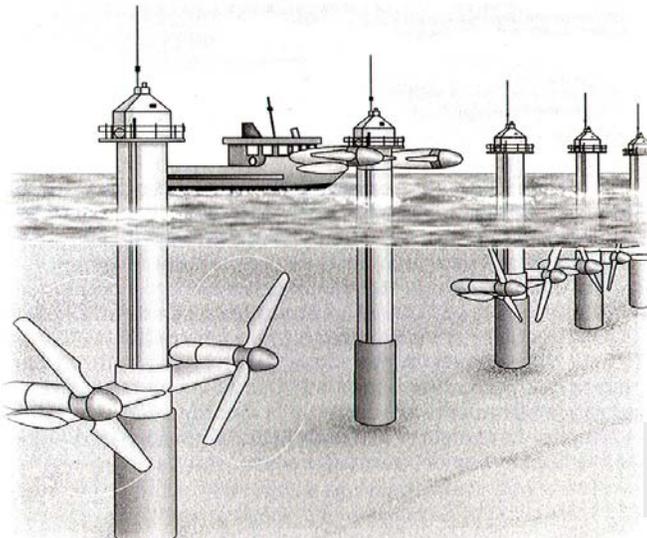


Figura 47. Rompeolas sumergido. **Fuente:** Guillén, Omar.

GENERACION DISTRIBUIDA

Durante la mayor parte del siglo XX, la producción de energía eléctrica ha sido generada por grandes centrales eléctricas y luego ha tenido que ser transportada grandes distancias mediante líneas de transmisión hasta los consumidores finales. Los altos costos necesarios para la implementación de estas redes energéticas obligaron a que dominaran el mercado regional para compensar los gastos generados por la gran infraestructura.

Este fenómeno propició la formación economías de escala y como consecuencia, el abaratamiento del servicio eléctrico, conformando grandes monopolios regulados por el gobierno. Pero los ciclos económicos en cada país afectan principalmente estas grandes economías, provocando en las tres últimas décadas del siglo pasado, crisis energéticas por la obtención de hidrocarburos, y en mayor medida en el sector eléctrico, donde los costos de mantenimiento en las grandes infraestructuras termoeléctricas, hidroeléctricas y plantas generadoras por medio de gas natural y combustibles fósiles sufrieron un encarecimiento paulatino.

Así, la eficiencia cada vez menor y la generación de contaminantes han traído como consecuencia cortes de energía y el aumento en la demanda han provocado que diferentes sectores industriales apunten su mirada hacia nuevas alternativas energéticas. En este sector también entra como factor importante la aplicación del gas natural en turbinas o microturbinas para crear pequeñas plantas, constituyendo un nuevo campo de la generación energética a pequeña escala. Los expertos coinciden cada vez más en que a largo plazo el dominio y liderazgo en el mercado de la generación distribuida corresponderá a la energía producida a través del hidrógeno.

La expresión “generación distribuida” se refiere habitualmente a un conjunto de pequeñas plantas generadoras de electricidad situadas cerca del usuario final, o en su mismo lugar de consumo, y que pueden estar integradas en una red o bien, funcionar de forma autónoma. Sus usuarios pueden ser fábricas, empresas comerciales, edificios públicos, colonias u hogares.

Por primera vez en la historia de la humanidad tenemos a nuestro alcance una forma de energía omnipresente, llamada “el combustible eterno”. El hidrógeno terminará siendo barato como las computadoras personales, los teléfonos celulares. Cuando esto suceda, se abrirá la posibilidad de democratizar verdaderamente la energía y ponerla al alcance de todos los seres humanos de la Tierra⁴⁹

⁴⁹ Rifkin, Jeremy. *La economía del hidrógeno*. 2002. Pág. 274.

El aumento del uso de la generación distribuida tiene numerosas implicaciones de carácter tanto macroeconómico como microeconómico, y se refiere a una de las claves esenciales de la flexibilidad tecnológica. Los grandes monopolios que producen energía eléctrica tienen el gran riesgo de desaparecer si no aplican una planeación estratégica para aprovechar su infraestructura tanto física como económica para poder adaptarse a esta dinámica donde la flexibilidad de una demanda cambiante exige la diferenciación en la oferta de servicios y productos, en este caso, la oferta de alternativas energéticas descentralizada constituye para estas economías de escala un gran reto.

Toda innovación tecnológica provoca crisis económicas, pero si es bien planteada para responder a la demanda en el mercado suele tender a la estabilización, también puede provocar en gran medida desempleo, sin embargo, esta nueva dinámica permite la generación de nuevos sistemas productivos entorno a la generación distribuida y ofrecer la posibilidad de reintegrar a la creciente población en empleos mas especializados.

Implicaciones sociales

Este siglo nos presenta un nuevo escenario donde el papel que juegan las economías de escala se encuentra en riesgo si no se apuesta a la transición energética, pero el factor más importante radica en el cambio estructural de los monopolios y oligopolios que se han apoderado de este sector, nos encontramos en un momento crucial y tendremos la oportunidad de ser testigos del cambio paradigmático, la transición de la quema de combustibles y su consecuente generación de CO₂ a la generación energética a partir del uso de los elementos naturales de nuestro entorno sin la producción de elementos contaminantes. La innovación tecnológica es el principal actor en este importante cambio donde se obtendrían importantes beneficios desde la democratización energética, la reducción de contaminación, el uso adecuado de la energía que nos provee nuestro entorno natural y la posibilidad de disfrutar de recursos infinitos y dejar de lado la sobreexplotación de recursos fósiles para usos más específicos y controlados.

4 CELDAS DE COMBUSTIBLE



Figura 48. Sir William Grove.
Fuente: fuelcellstoday.

El antecedente que marca el inicio de las celdas de combustible ocurrió en Inglaterra en el siglo XIX (1839) a cargo de Sir William Grove, quien contribuyó principalmente en el desarrollo de la electroquímica y de la fotoeléctrica. Durante una sesión experimental de electrólisis de ácido sulfúrico diluido con agua utilizando electrodos de platino, produjo hidrógeno (iones positivos) en el cátodo y oxígeno (iones negativos de sulfato e hidróxido) en el ánodo. Al desconectar la corriente eléctrica, notó que las burbujas de hidrógeno y de oxígeno generadas por el proceso de electrólisis se unían nuevamente a los electrodos de platino, como proceso reversible, se dio cuenta que estaba produciendo una corriente eléctrica de aproximadamente un volt. Observó que las moléculas de hidrógeno estaban proporcionando sus electrones al electrodo de platino, estos electrones generaron un flujo en el circuito, viajando hacia el electrodo positivo, reduciendo el oxígeno. Grove llamó a su descubrimiento “batería de gas”¹.

Años más tarde el mismo Grove desarrolló lo que llamaría “cadena de gas”, que consistía en un grupo de “baterías de gas” conectadas en serie, con el objetivo de generar un potencial mayor, sin embargo el flujo de gases en el dispositivo no pudo ser continuo, y consideró a su dispositivo como impráctico, dejándolo en el abandono. Paradójicamente el

¹ Berry, Martín. *Energy Through Hydrogen, Research Notes*. Heliocentris, Berlin 2000. Pág. 30.

camino que Grove siguió con su “cadena de gas” es actualmente lo que conocemos como apilamiento (stack) un desarrollo exitoso para proporcionar un voltaje mayor. La desventaja del desarrollo de la “batería de gas” radicó en la falta de materiales adecuados para hacer más estables las reacciones químicas que se producían y poder incrementar el diferencial de corriente eléctrica que no sobrepasó de un solo volt. Un acontecimiento paralelo postergaría más de un siglo el uso del hidrógeno y las celdas de combustible y fue el desarrollo del generador rotatorio eléctrico por Werner von Siemens². El uso de energéticos para satisfacer la demanda de la sociedad sería por un lado, resuelta a través de producción eléctrica por medio de generadores movidos por el flujo de los ríos, de los geotermales, pero sobre todo, por la quema de hidrocarburos y por otro lado, el desarrollo del motor de combustión interna movido por gasolina, que se convertiría el principal recurso energético para los medios de transporte del siglo XX.

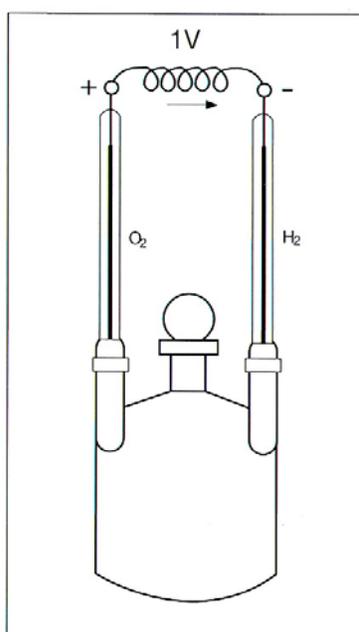


Figura 49. “Batería de Gas” desarrollada por Grove en 1839.
Fuente: Heliocentris.

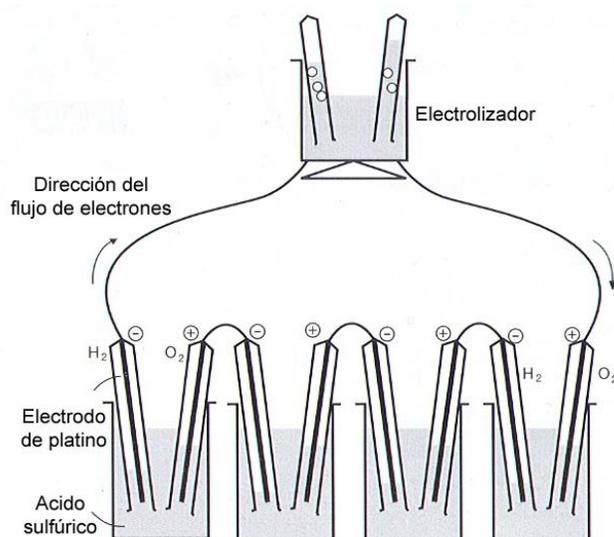


Figura 50. “Cadena de Gas” conectada a un electrolizador que provee a las “Baterías de Gas” conectadas en serie el hidrógeno y oxígeno necesarios para producir electricidad. **Fuente:** Heliocentris.

Otro antecedente dentro de la literatura de ciencia ficción hacia fines del siglo XIX, en la obra llamada La Isla Misteriosa, en ella Julio Verne narra una discusión acerca del agotamiento del carbón, y cual sería la nueva fuente de energía, mostrando de forma asombrosa la veracidad de la siguiente afirmación:

² Berry, Martín. *Chemistry Through Hydrogen, Clean energy for the future*. Heliocentris, Germany 2000. Pág. 96.

La electricidad ha permitido descomponer el agua en sus elementos primitivos, lo cual hará que se convierta en una fuerza poderosa y manejable [...] Sí, amigos míos creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor, de una intensidad de la que el carbón no es capaz [...] el agua será el carbón del futuro.³

Las celdas de combustible también llamadas pilas de combustible por su similitud con las baterías son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de reacción directamente en energía eléctrica. La diferencia principal que tienen estas celdas con las baterías convencionales es que éstas son acumuladores de energía en las que la máxima energía depende de la cantidad de reactivos químicos almacenados en ellas, dejando de producir energía cuando se consumen dichos reactivos. Las celdas de combustible, por el contrario, son dispositivos que teóricamente tienen la capacidad de producir energía eléctrica de forma indefinida mientras se suministra combustible y oxidante a los electrodos. Sólo la degradación o el mal funcionamiento de los componentes limitan la vida de operación práctica de las celdas.

El principio de funcionamiento en el que se basan las celdas de combustible es el inverso al de la reacción electrolítica; oxígeno e hidrógeno se combinan para formar agua con producción de energía eléctrica y calor. Se trata, por lo tanto, de una reacción limpia, en la que el único producto es el vapor de agua que puede ser liberado a la atmósfera sin ningún peligro para el medio ambiente.

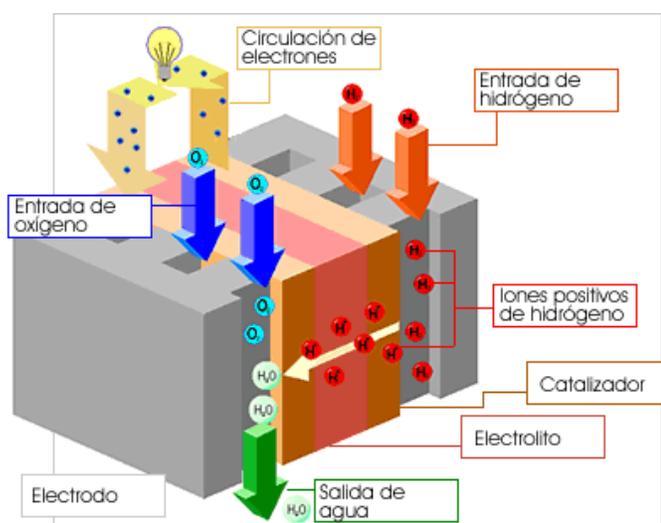


Figura 51. Esquema del principio de funcionamiento de una celda de combustible.
Fuente: APPICE.

³ Verne, Julio. *La isla misteriosa*.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La unidad básica de una Celda de Combustible se denomina "monocelda". Una celda está formada por un apilamiento de dos electrodos porosos con un electrolito sólido o líquido entre ambos.

El hidrógeno (H_2) penetra por el electrodo negativo (ánodo) y se disocia, en presencia del catalizador, en iones positivos H^+ y electrones. El oxígeno (O_2) procedente del aire penetra por el electrodo opuesto (cátodo) y se disocia igualmente en presencia del catalizador en iones de oxígeno. Los iones positivos del hidrógeno se escapan a través del electrolito en dirección al cátodo, dejando a los electrones libres en el ánodo.

Si existe un camino eléctrico entre el ánodo y el cátodo los electrones lo recorrerán, produciendo corriente eléctrica. En el cátodo los iones de hidrógeno, el oxígeno y los electrones se vuelven a combinar para formar moléculas de agua. Además de esta energía eléctrica se produce un importante desprendimiento de energía térmica en forma de calor.

Una celda de combustible produce una diferencia de potencial algo mayor que un volt en circuito abierto, por lo que para producir tensiones más elevadas, se recurre a la disposición en serie de celdas formando un apilamiento (stack). A este apilamiento de celdas debidamente implementado en una estructura que permita disipar el calor, posibilite la circulación necesaria de los gases, y ofrezca terminales positiva y negativa para la utilización de la energía eléctrica producida, se le denomina celda de combustible.

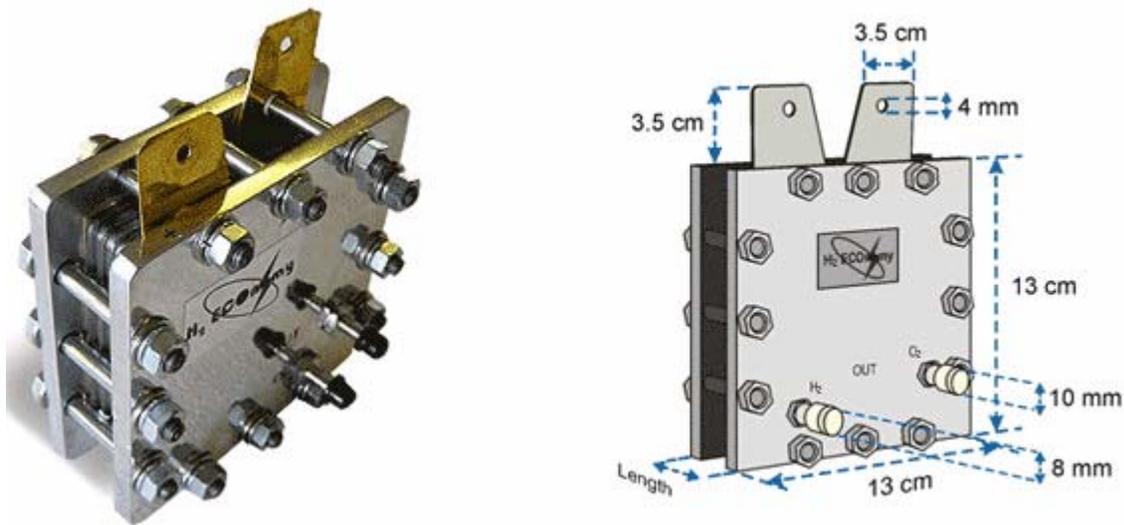


Figura 52. Esta celda de combustible tipo PEM consta de un apilamiento (stack) de cinco monoceldas, utiliza hidrógeno como combustible y es capaz de energizar una computadora portátil. **Fuente:** H2Economy.

TIPOS DE CELDAS Y SUS APLICACIONES

Existen diversas formas de clasificar los tipos de celdas de combustible, pero la más usual es por el tipo de electrolito o membrana que utilizan, que es la que ha dado lugar a su denominación. Según este criterio tendremos celdas de combustible que operan a diferentes temperaturas, que necesitan mayor o menor pureza del hidrógeno suministrado, que generan diferentes cantidades de energía eléctrica y que son más o menos adecuadas para ciertas aplicaciones.

Tipo de celda	Abreviatura	
Celda de combustible de membrana de intercambio protónico	PEMFC	(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
Celda de combustible alcalina	AFC	(Alkaline Fuel Cell)
Celda de combustible de ácido fosfórico	PAFC	(Phosphoric Acid Fuel Cell)
Celda de combustible de carbonatos fundidos	MCFC	(Molten Carbonate Fuel Cell)
Celda de combustible de óxidos sólidos	SOFC	(Solid Oxide Fuel Cell)
Celda de combustible de Metanol Directo	DMFC	Direct Metanol Fuel Cell

Fuente: Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas, Julio-agosto 2000

Tabla 4. Clasificación de las celdas de combustible por el tipo de electrolito utilizado, su abreviatura y nombre en inglés.

Aplicaciones

Hay muchos usos para las celdas de combustible, actualmente las grandes empresas de fabricantes de autos están trabajando para comercializar autos con celdas de combustible, así estarán energizando autobuses, barcos, trenes, aviones, scooters, incluso bicicletas; como sistemas estacionarios serán utilizadas en los hogares y lugares públicos. Las celdas de combustible miniatura pueden ser una fuente de energía para que los diseñadores puedan aplicarlas en diversos objetos portátiles. Los hospitales, las estaciones de policía y bancos, en lagunas partes del mundo están usando celdas de combustible para proveer de energía a sus instalaciones, al igual existen plantas de tratamiento de aguas residuales y rellenos sanitarios que convierten el gas metano para generar electricidad. Esta variedad de usos puede clasificarse de la siguiente manera:

Uso en implementos o artefactos portátiles.

Las celdas de combustible miniatura, una vez disponibles en el mercado, ayudarán a los consumidores a disponer de energía eléctrica en todo momento y lugar. Cambiarán el mundo de las telecomunicaciones y del estilo de vida, energizando todo tipo de aparatos

eléctricos y electrónicos portátiles. Actualmente diferentes investigaciones se enfocan en el desarrollo de celdas tipo PEM que utilizan hidrógeno de alta pureza, pero otra línea está desarrollando las celdas de combustible de metanol directo (DMFC), estas celdas miniatura como su nombre lo indica, operan con una mezcla de agua-metanol que la alimenta directamente sin la necesidad de reformación previa⁴, estos desarrollos representan una alternativa de energía, esperando en un futuro próximo contar con cargas de hidrógeno de forma segura y eficiente. Este tipo de celdas afectarán en gran medida el diseño de los productos que rodean el entorno artificial.



Figura 54. Hitachi está poniendo en marcha la comercialización para 2007 de teléfonos celulares energizados con cartuchos de metanol que harán funcionar celdas de combustible de metanol directo.
Fuente: Hitachi.

Uso Residencial:

Las celdas de combustible son ideales para la generación de energía, ya sean conectadas a la red eléctrica para proveer potencia suplementaria y aseguramiento de respaldo para áreas críticas, ó instaladas como generadores independientes de la red eléctrica para servicio en sitio, en áreas que son inaccesibles a las líneas eléctricas. Ya que las celdas de combustible operan de manera silenciosa, reducen la contaminación del ruido, así como la contaminación del aire. El calor subproducto de una celda de combustible puede ser utilizado para proveer agua caliente ó calefacción a una casa.



Figura 55. Microgeneradores eléctricos que funcionan con celdas de combustible cerámicas son una opción para uso estacionario doméstico. **Fuente:** fuelcellstoday.

⁴ Fuel Cell Today, Opening doors to fuel cell commercialisation. "The Applications".. Education Kit 3. www.fuelcellstoday.com. Consultado el 22 de octubre de 2006

Aplicaciones estacionarias:

Constituyen las celdas de combustible con mayor grado de desarrollo y son aquellas que proveen grandes cantidades de energía eléctrica y calor, su principal atractivo incluye su eficiencia y su trabajo a bajas temperaturas. La interrupción de energía eléctrica puede ser un problema grave en esta era de la informática, por ello estrategias como la implementación de celdas de combustible alimentadas con hidrógeno son una importante alternativa en hospitales, clínicas, hoteles, edificios y centrales de servicios como aeropuertos. También pueden utilizarse como fuentes de potencia secundaria o emergente donde la red eléctrica no está disponible. Con temperaturas de operación menores a los 80°C pueden ser instaladas en condominios y en pequeños negocios. En el futuro, las celdas de combustible que trabajan a altas temperaturas como las que utilizan carbonatos fundidos (MCFC) y las que funcionan con óxidos sólidos (SOFC) pueden ser adaptadas para aplicaciones industriales mayores. Con temperaturas de operación entre 600 y 1100°C pueden tolerar fuentes de hidrógeno con menor grado de pureza o utilizando directamente combustibles como gas natural, diesel o gasolina. Adicionalmente, el calor generado puede ser utilizado para diferentes fines como para producir más electricidad con turbinas de vapor o bien, como sistema de calefacción.



Figura 56. Planta de distribución de poder que funciona con celdas de combustible de óxidos sólidos. Esta unidad provee 250 Kw, la energía eléctrica y el calor generados son suficientes para aplicaciones industriales, una escuela o una comunidad con más de 50 hogares.
Fuente: Ballard.

Aplicación en medios de transporte:

Las firmas automotrices están desarrollando vehículos que funcionan con celdas de combustible como una estrategia para sustituir el sistema de motores de combustión interna que funciona quemando combustibles fósiles. En este caso las celdas de combustible tipo PEM son las indicadas para satisfacer estos requerimientos. Su ventaja radica en su temperatura de operación menor a 80°C además de no emitir contaminantes a la atmósfera.

Relenos Sanitarios y tratamiento de Aguas:

Tanto los relenos sanitarios como las plantas de tratamiento de agua, producen metano, éste puede ser utilizado al reformarlo o bien utilizarlo directamente en celdas de combustible, generando una gran cantidad de electricidad y energía térmica que puede ser incorporada a la red o bien, ser utilizada en el entorno urbano. La siguiente tabla muestra la relación entre los diferentes tipos de celdas de combustible, así como su capacidad de generación eléctrica para satisfacer las diversas necesidades que demanda la presente vida cotidiana.

Aplicaciones	Capacidad	Tipo de celda				
		PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Portátil, estacionaria doméstica	-1Kw*	■				
Estaciones de trabajo y automotriz	1Kw-10Kw	■	■			
Estacionaria, pequeñas comunidades	10Kw-250Kw	■		■		
Generación distribuida, uso comercial	250Kw-1Mw**				■	■
Generación distribuida, uso industrial	+1Mw					■

* Kw: Kilo watt (1000 watts)

**Mw: Mega watt (1 000 000 watts)

Tabla 4. Clasificación de las celdas de combustible por su capacidad y uso.

Celdas de combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC)

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell) tienen como característica más importante su electrolito que es una membrana polimérica muy delgada y permeable desarrollada en época reciente de forma comercial por Dupont llamada Nafion^{TM5}. Esta membrana es proporcionalmente muy pequeña en relación a los demás componentes de la celda y ligera en función de la reacción catalítica que genera. Sin embargo, para su correcto funcionamiento requiere de electrodos fabricados de platino que están ubicados en ambos lados de la membrana y el combustible requerido es hidrógeno con una pureza del 99.999% para evitar su envenenamiento⁶.

⁵ Crawley, Gema. "Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells", March 2006. www.fuelcelltoday.com Pág. 1.

⁶ *Envenenamiento* consiste la degradación de los electrodos de platino con el contacto de CO₂, que es un subproducto de la obtención de hidrógeno por reformado con grados de impureza menor al requerido (99.999%), provocando que la celda de combustible reduzca considerablemente su eficiencia energética.

Dentro de una monocelda de intercambio protónico (PEM, Proton Exchange Membrane), las moléculas de hidrógeno son suministradas en el ánodo y dissociadas en protones y electrones; los protones cruzan la membrana hacia el cátodo, mientras que los electrones son enviados hacia un circuito externo que produce energía eléctrica. El oxígeno en forma de aire es suministrado hacia el cátodo combinándose con los iones de hidrógeno para producir agua. De esta reacción química se desprenden como subproductos la electricidad, el agua y el calor.

Este sistema opera en el rango de 80°C, es decir que a diferencia de los demás tipos, su temperatura de funcionamiento es baja, lo que permite arranques instantáneos y no requiere aislamientos térmicos. Su eficiencia energética oscila entre el 40% y 60%, su potencial eléctrico se encuentra arriba de los 250 Kw, también se caracterizan por ser unidades compactas y ligeras que les permiten ser utilizadas para energizar medios de transporte como automóviles, edificios y aplicaciones estacionarias domésticas. Como el electrolito es sólido, el paso del hidrógeno del cátodo al ánodo, fluye sin riesgos de fugas o pérdida de presión, lo que facilita su manufactura, y resultando se una celda más económica, además permite que su vida útil sea más larga porque es menos propensa a la corrosión en relación con los otros tipos de electrolitos⁷.

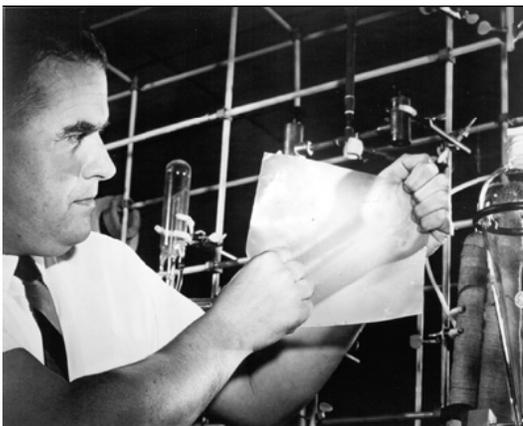


Figura 57. Russel Hogdon desarrolla por primera vez una membrana de polímero para General Electric en 1965.

Fuente: Smithsonian Institute, Fuel cell History website.



Figura 58. Celda de combustible PEM en el programa espacial Gemini.

Fuente: Smithsonian Institute, Fuel cell History website.

Origen y desarrollo de las celdas de combustible PEM:

Esta tecnología fue desarrollada por la compañía General Electric en los inicios de los años sesenta del siglo pasado, esta compañía usó unidades tipo PEM como parte de un programa de investigación de la NASA en el proyecto Gemini. Uno de los principales

⁷ *Ibid.* Pág. 2.

objetivos de este proyecto fue probar la durabilidad operacional del sistema de celdas PEM para reemplazar el uso de baterías y proveer de energía eléctrica y agua pura a la unidad espacial Gemini. A pesar de las dificultades iniciales, la compañía continuó modificando el sistema y el modelo definitivo fue usado para una gran cantidad de vuelos durante ese programa espacial. Aunque la NASA decidió operar el siguiente programa con celdas de combustible alcalinas, la General Electric continuó trabajando con sus unidades PEM y a mediados de los años setenta fue desarrollada la tecnología para el sistema de electrólisis de agua basado en este mismo principio. En él la membrana de intercambio protónico y la electricidad, en sentido inverso al sistema de celdas de combustible, facilitó la disociación del agua para producir hidrógeno y oxígeno con un alto grado de pureza y de eficiencia de operación.

Su ligereza permite apilamientos que llegan a un potencial eléctrico de 75 Kw. En los años noventa diversas compañías de automóviles mostraron gran interés en este tipo de tecnología y gracias a las mejoras que se han logrado a partir de los programas de investigación su eficiencia y durabilidad ha permitido la implementación de programas piloto para la producción comercial en este importante sector.

Aplicaciones:

El uso de estas unidades para aplicación de energía portátil ha crecido rápidamente substituyendo a las baterías convencionales, esta tecnología está considerada como la principal candidata para energizar todo tipo de aparatos portátiles. De este modo, los usos principales para este desarrollo tecnológico pueden ser clasificados en tres grupos principales:

- Transporte.
- Estacionaria.
- Portátil.



Figura 59. Celda de combustible PEM para uso doméstico.
Fuente: Fuelcellstoday.



Figura 60. Celda de combustible PEM para usos militares.
Fuente: Fuelcellstoday.

Recientemente, la mayor parte de celdas de combustible PEM instaladas en el mundo está relacionada con aplicaciones portátiles en un 88%, pero el sector transporte se encuentra en una etapa de investigación y desarrollo, y puede estar lista para aplicaciones comerciales más seguras y eficientes en los próximos años, la siguiente tabla nos muestra las proyecciones de diferentes empresas automotrices que están incluyendo a las celdas de combustible PEM para energizar sus unidades:

Compañía	Año	Número de vehículos	Observaciones
Daimler Chrysler (Alemania)	2012	10,000	Lanzamiento inicial
	2015	-	Producción masiva
Ford (EUA)	2012	-	Preparación comercial
General Motors (EUA)	2010- 2015	-	Viabilidad comercial
	2025	-	Producción masiva
Honda (Japón)	2010	12,000 (en EUA)	Producción comercial
	2020	15,000 (en EUA)	Producción comercial
Hyundai (Corea)	2010	-	Pruebas de pista
Toyota (Japón)	2015	-	Costará \$50,000 Dls

Tabla 5. Aplicaciones comerciales para las celdas PMFC en la industria automotriz que estarán listas en los siguientes años. **Fuente:** fuelcellstoday.

Celda de Combustible de Metanol Directo (DMFC)

Las celdas de combustible de metanol directo (DMFC, Direct Methanol Fuel Cell) también utilizan una membrana de intercambio protónico (PEM). Como su nombre lo indica utilizan metanol como combustible, y para que la reacción no dañe los catalizadores de platino, es necesario adicionar otros materiales en el ánodo, lugar donde el metanol se disociará en una reacción interna para formar dióxido de carbono, iones de hidrógeno y electrones libres, facilitando la reacción sin la necesidad de un reformador de combustible externo. Una vez que la reformación del combustible tiene lugar dentro del ánodo, los electrones libres fluyen desde el ánodo de la celda hacia el circuito externo del cátodo, por otro lado, los protones del hidrógeno son transferidos a través de la membrana. En el cátodo los electrones libres y los protones reaccionan con el oxígeno para formar agua; por su parte en el ánodo, durante el proceso de reformación el subproducto es dióxido de carbono⁸. Se

⁸ Cook, Brian, "An Introduction to Fuel Cells Technology and Hydrogen Technology". Heliocentris. Vancouver, 2001. Pág. 16.

espera que la eficiencia de este tipo de celdas sea de aproximadamente 40%, y que la temperatura de operación oscile entre 80 y 120°C.

Aunque las celdas de combustible de metanol directo emiten dióxido de carbono durante la reacción anódica, actualmente son consideradas como un desarrollo de gran importancia mientras los sistemas de producción, almacenamiento y transferencia de hidrógeno no estén disponibles tanto tecnológica como económicamente para utilizar las celdas de combustible PEM. Actualmente la producción de metanol es una realidad y su forma de almacenamiento es relativamente fácil.

Aplicaciones:

Al igual que las celdas de combustible PEM, el uso de las de metanol directo se orienta hacia aplicaciones tanto portátiles como aplicaciones mayores, como teléfonos celulares o computadoras portátiles; en eficiencias mayores, la temperatura de operación también puede incrementarse. De este modo, las DMFC ha crecido rápidamente para sustituir a las baterías convencionales, de hecho algunas compañías están trabajando con prototipos de este tipo de celdas para ser utilizadas en el sector militar para energizar equipo electrónico en sitio.

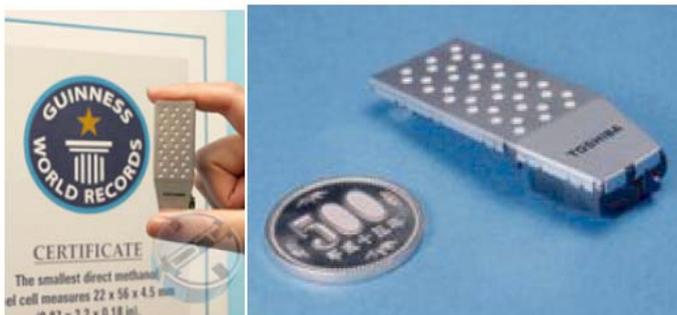


Figura 61. Las celdas DMFC son ideales para aplicaciones portátiles, Toshiba recibió un premio Guinness por la celda de combustible más pequeña que mide 22x56x10mm para energizar reproductores de música digital.

Fuente: Toshiba.



Figura 62. Celda DMFC y cartucho de metanol capaz de energizar una computadora portátil.

Fuente: Ultracell.

Celda de Combustible Alcalina (AFC)

Como hemos visto, todos los sistemas de celdas de combustible están basados en un diseño central donde los electrodos son separados por un electrolito sólido o líquido que lleva las partículas eléctricamente cargadas entre ellos. Las celdas de combustible alcalinas (AFC, Alkaline Fuel Cell) utilizan un electrolito de hidróxido de potasio (usualmente en una solución de agua) para poder operar; estos sistemas están clasificados como celdas de combustible de baja temperatura porque operan en rangos entre 60 y 90°C, como consecuencia, no es preciso el uso de metales preciosos como el platino en los electrodos,

en cambio es posible utilizar metales más económicos como el níquel, el cual puede acelerar las reacciones producidas en el sistema; este tipo de celdas muestra eficiencias entre el 45 y el 60% y pueden producir potenciales eléctricos mayores a los 20 Kw, los diseños actuales muestran temperaturas de operación con rangos entre 23 y 70°C.

La desventaja de estos sistemas radica en su alta sensibilidad al envenenamiento del electrolito por dióxido de carbono, este electrolito absorbe incluso la más pequeña partícula de CO₂ provocando la reducción de su conductividad eléctrica, por ello, al igual que la celdas PEM requieren de hidrógeno de alta pureza, en este caso con ausencia total de CO₂; por otro lado, también es necesario el uso de oxígeno purificado para la reacción catódica, aumentando considerablemente su costo de operación. Además, su sensibilidad al envenenamiento también puede reducir su vida útil, esto significa que las unidades AFC tienen que ser reemplazadas en un periodo de tiempo menor en relación con otros tipos de celdas de combustible. Otro inconveniente es el material con que está construido el electrolito, que es corrosivo y su forma líquida tiende a que el camino que sigue el hidrógeno entre el ánodo y el cátodo resulte problemático y con tendencia a la fuga tanto del líquido como del gas.

Las AFC fueron usadas originalmente por la NASA en misiones espaciales para proveer electricidad y agua pura a la nave y sus tripulantes; actualmente este sistema es utilizado en medios de transporte de carga, barcos y submarinos. Para llegar a ser competitivo en el mercado, este sistema deberá llegar a costos más asequibles y obtener tiempos de operación más prolongados que alcancen las 40,000 horas, sin embargo hasta el momento han alcanzado operaciones estables en un promedio de 8,000 horas⁹.

Origen y desarrollo de las AFC:

Este sistema fue desarrollado durante la década de 1930 por F.T. Bacon, siendo uno de los tipos de celdas de combustible más viejos. Fue hasta 1954 que Bacon demostró que un apilamiento (stack) tenía la capacidad de producir 150W y en 1956 su equipo construyó un stack de 40 celdas basado en el diseño anterior, la unidad más grande producía 6KW y fue utilizada para energizar un tractor. Bacon formó su empresa llamada Energy Conversión y comenzó a producir celdas de combustible, las cuales se comercializaron por vez primera.

En 1962 se dio inicio al desarrollo de un sistema AFC para el programa espacial Apolo de EUA, fueron utilizadas tres unidades para proveer potencial eléctrico y agua potable para la supervivencia de la tripulación y proveer a la nave espacial energía para las telecomunicaciones y otras funciones durante la expedición lunar que duró dos semanas; este sistema se convirtió en el primer tipo de celdas de combustible que fue ampliamente usado en los programas espaciales de EUA.

⁹ Crawley, Gemma. "Alkaline Fuel Cells (AFC)". March, 2006. www.fuelcellstoday.com

En 1959, la compañía Allis Chalmer manufacturó, desarrolló y mostró al mundo el primer vehículo energizado con una celda de combustible alcalina, el tractor fue utilizado exitosamente en Wisconsin; la segunda aplicación exitosa fue en un carrito de golf donde la AFC fue energizada con un combustible llamado hidrazina, una vez consolidada su eficiencia en estas demostraciones, este sistema fue utilizado para energizar medios de transporte de carga y de trabajo. En 1967 el Dr. Kart Kordesh desarrolló y construyó una motocicleta utilizando también hidrazina, la cual viajó por más de 480 Km. a una velocidad máxima de 40Km/h. Sin embargo, en la actualidad este sistema no ha gozado de las grandes aplicaciones que tuvo en sus inicios debido a la necesidad de contar con combustible de alta pureza.



Fig 63. Primer vehículo en el mundo en ser energizado por una celda de combustible alcalina.
Fuente: Edward Gillis.



Figura 64. Carrito de golf de Allis-Chalmer.
Fuente: Edward Gillis.

Aplicaciones:

El mercado actual es de alguna manera limitado comparado con las otras tecnologías, el número de unidades AFC en operación no es significativamente alto y en el 2005 solo un pequeño número de sistemas fue introducido, donde la mayor parte de las unidades son usadas en medios de transporte especializados como en motocicletas, camiones, barcos, submarinos y en aplicaciones espaciales.

A pesar de que existen en la actualidad algunas empresas que se encuentran desarrollando esta tecnología para aplicaciones en diversos mercados, está limitada, existen diversos intentos por mejorar su eficiencia y tiempo de vida y con esto reposicionar las AFC en el mercado, sin embargo, muchos científicos opinan que han llegado a los límites de su capacidad, dando paso a otros sistemas como las celdas PEM, otras que utilizan metanol directo (DMFC) o las que utilizan óxidos sólidos (SOFC)¹⁰.

¹⁰ *Ibid.*

Celda de Combustible de Acido Fosfórico (PAFC)

Las celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell) operan a temperaturas que oscilan entre 150 y 200° C, utilizan ácido fosfórico como electrolito contenido en una estructura porosa, esta matriz cubierta con teflón evita las fugas de electrolito por efecto capilar. Su principio de funcionamiento es similar a los demás tipos: los iones de hidrógeno positivamente cargados migran a través del electrolito de ácido desde el ánodo hacia el cátodo; los electrones generados en el cátodo migran a través de un circuito externo, suministrando energía eléctrica y regresan al cátodo. Al igual que las celdas de combustible PEM estas utilizan un catalizador de platino ubicado en cada electrodo de carbón poroso para acelerar la reacción. Ahí el oxígeno proveniente del aire se combina con los iones positivos de hidrógeno generando como subproductos calor y agua¹¹, la cuál debe eliminarse por medio del sistema que opera a temperaturas cercanas a los 190 °C, a temperaturas menores, el agua se disolvería en el electrolito y no se podría eliminar; a temperaturas mayores, el ácido fosfórico se descompondría; por esto las PAFC deben operar a rangos de temperatura precisos. Durante su operación también es posible tener pérdida de ácido, lo que requiere de constante monitoreo para reemplazarlo.

Por otro lado, la formación de monóxido de carbono (CO) alrededor de los electrodos puede “envenenar” los catalizadores si el rango de temperatura requerido no es controlado, la ventaja de operar a 190°C es su tolerancia a trabajar con una concentración de CO alrededor del 1.5%, lo que significa que a diferencia de las celdas PEM, hidrógeno con mayor grado de impureza puede ser utilizado. El hidrógeno obtenido por reformación de hidrocarburos es el actual combustible para este tipo de celdas, aunque si el combustible es obtenido a partir de gasolina, el sulfuro debe ser removido para evitar el deterioro de los catalizadores de platino.

Su promedio de eficiencia está en el rango del 40 al 50%, pero puede incrementarse alrededor del 80% si el calor generado es aprovechado en un sistema de cogeneración; su capacidad se encuentra alrededor de 200 Kw.

Las PAFC son hasta el momento el tipo de celda con mayor desarrollo, esto significa que actualmente están disponibles en el mercado a precios razonables. Tuvieron un crecimiento considerable hace unos años ya que se creía que de todas las tecnologías de baja temperatura, ésta era la única que podía proporcionar una tolerancia relativa a combustibles provenientes de hidrocarburos reformados, por lo que su implementación sería más fácil a corto plazo¹².

¹¹ Smithsonian Institution. “¿What is a Fuel Cell?”. <http://americanhistory.si.edu/fuelcells>. Consultado el 20 de octubre de 2006.

¹² Asociación Española de Pilas de Combustible. “¿Qué es una Pila de Combustible?”. <http://www.appice.com>. Consultado el 21 de julio de 2005.

Origen y desarrollo de las PAFC:

El uso de ácidos como electrolito, se remonta al origen de las celdas de combustible, desde el tiempo en que William Grove diseñó la primera batería de gas (ver página) en 1842. Sin embargo, el ácido fosfórico siendo un conductor eléctrico pobre, no fue atractivo y las PAFC fueron lentamente olvidadas, dando paso al desarrollo de otros tipos de celdas de combustible. Fue hasta 1961 que G. H. Elmore y H. A. Tanner desarrollaron electrolitos de ácido fosfórico en celdas de "temperatura intermedia". Experimentaron utilizando un electrolito que tenía 35% de ácido fosfórico y 65% de polvo de sílica unido a una junta de Teflón, la hicieron trabajar con aire en lugar de oxígeno puro y fue operada durante seis meses sin aparente deterioro. A mediados de la década de 1960 la Armada de Estados Unidos de Norteamérica exploró el potencial de la PAFC para operar con "combustibles logísticos", es decir comúnmente asequibles en pequeñas unidades para el campo de batalla en actividades bélicas¹³.

El desarrollo de las celdas de combustible de ácido fosfórico tuvo lugar durante el programa "TARGET" (Pratt y Whitney, 1967-1975)¹⁴, alcanzando sus objetivos en 1975 al demostrar un sistema de generación de energía para el sector residencial alimentado por gas natural. Unos años más tarde en el proyecto "Moonlight" (1981-1992), compañías japonesas desarrollaron sistemas con una eficiencia mucho mayor que la alcanzada años atrás.

En 1984, Appleby hizo que este tipo de celda de combustible fuese viable económicamente cuando descubrió que el carbón era estable en las condiciones de trabajo del sistema, por lo que utilizó este componente para desarrollar los colectores, los electrodos y los soportes de los catalizadores¹⁵.



Figura 65. Autobús equipado con una PAFC
Fuente: Smithsonian Institute, Fuel cell History website.

¹³ Smithsonian Institution. "¿What is a Fuel Cell?"

¹⁴ Asociación Española de Pilas de Combustible. "¿Qué es una Pila de Combustible?"

¹⁵ *Ibid.*

Aplicaciones:

La crisis energética de principios de la década de 1970 inspiró a diferentes investigadores a estudiar las celdas de combustible con el objetivo de desarrollar vehículos eléctricos, energizando diferentes carritos de golf como pruebas. Fue hasta 1994 que una PAFC de la empresa Fuji con un potencial de 50 Kw fue adaptada en autobuses. En 1998 fueron utilizadas PAFC de 100Kw provenientes de la Internacional Fuel Cells Corporation en conjunto con la empresa Toshiba and United Technologies para energizar nuevamente autobuses. Sin embargo, por requerir un extenso periodo de precalentamiento a temperaturas cercanas a los 200°C, el uso en automóviles para uso privado permanece limitado aún en la actualidad.

Las PAFC son utilizadas como fuentes de poder estacionarias para suministrar energía eléctrica en edificios de viviendas y para plantas de desechos municipales utilizando el metano generado por los mismos desechos, los apilamientos (stacks) de las PAFC tienen una vida aproximada de 5 a 6 años de servicio constante.

Celda de Combustible de Carbonatos Fundidos (MCFC)

Las celdas de combustible de carbonatos fundidos (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) funcionan con un electrolito compuesto por sales de carbonato calentado a 650°, normalmente se utiliza carbonato de litio o carbonato de potasio, a esta temperatura estas sales son fundidas para que adquieran la propiedad de conducir iones de carbonato (CO_3) desde el cátodo hacia el ánodo a través del electrolito que está contenido en una matriz cerámica porosa e inerte. En el ánodo el hidrógeno reacciona con los iones para producir agua, dióxido de carbono y electrones; los electrones viajan a través de un circuito externo, suministrando energía eléctrica y regresando al cátodo. Ahí el oxígeno que proviene del aire y el CO_2 son reciclados por el ánodo y reaccionan con los electrones para formar iones de CO_3 que reponen el electrolito¹⁶.

Debido a que las MCFC operan a alta temperatura pueden extraer el hidrógeno a partir de otros combustibles como el gas natural o el metano utilizando reformadores tanto externos como internos¹⁷. Esta característica las hace menos propensas al envenenamiento con CO contenido en los combustibles mencionados, esto también les permite trabajar con catalizadores menos costosos como el níquel, el cual es mucho más barato que el platino utilizado tanto en las PEMFC como en las AFC, las MCFC tienen una eficiencia aproximada del 60% y puede elevarse si el calor producido es utilizado para la cogeneración¹⁸

¹⁶ *Ibid.*

¹⁷ *Ibid.*

¹⁸ *Ibid.*

Sin embargo, existe una desventaja en las MCFC si las comparamos con las SOFC (ver siguiente punto); que consiste en la alta complejidad de trabajo con un electrolito líquido en lugar de uno sólido, ya que el riesgo de fugas a una temperatura de 650° es mayor.

Origen y desarrollo de las MCFC:

Tanto las MCFC como las SOFC son celdas de combustible que operan a altas temperaturas, esta característica se debe a que tienen un mismo origen, en la década de los años treinta, aunque veinte años después grandes diferencias entre ellas empezaron a surgir, la más importante es el electrolito utilizado.

En 1930 los científicos suizos Emil Baur y H. Preis experimentaron con electrolitos sólidos con alta temperatura, con el uso de carbonatos alcalinos, esto ocasionó problemas con la conductividad eléctrica además de reacciones químicas indeseables entre el electrolito y diferentes combustibles gaseosos entre ellos el monóxido de carbono; fue hasta la parte final de la década de 1950 cuando científicos alemanes G.H.J Broers y J.A.A. Kettelard encontraron limitaciones con el uso de óxidos sólidos y decidieron experimentar con carbonatos fundidos con mayor éxito. Para 1960 construyeron una celda que funcionó por seis meses utilizando un electrolito con una mezcla de litio, sodio y carbonato de potasio impregnado en un disco sinterizado poroso de óxido de magnesio, aunque en su operación se fue perdiendo poco a poco a través de las reacciones químicas. Finalmente, a mediados de la década de 1960 la Armada de EUA probó diferentes celdas de carbonatos fundidos con capacidades de 100w a 1Kw, construidas y diseñadas para substituir el uso de la gasolina utilizando un reformador externo para extraer el hidrógeno de diferentes combustibles

Aplicaciones:

Por su gran rendimiento a alta temperatura, las MCFC son ideales para proveer energía eléctrica de forma estacionaria, además los usuarios pueden verse beneficiados si aprovechan el calor emitido durante la reacción química para la cogeneración.

Celda de Combustible de Oxidos Sólidos (SOFC)

Las celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) son el tipo de celdas que operan a mayor temperatura, debido a esto, emplean cerámicas como elementos funcionales de cada monocelda, al igual que los demás tipos están compuestas por un ánodo y un cátodo separados por un electrolito; en este caso el electrolito es sólido e impermeable, reduce la corrosión y elimina los problemas asociados al uso de los electrolitos líquidos¹⁹, este electrolito sólido está formado por una combinación de óxido de zirconia y de óxido de calcio, juntos forman un enrejado de cristales y finalmente se

¹⁹ *Ibid.*

recubre con materiales porosos especializados para trabajar a altas temperaturas en un rango de 1000 a 1800°C ²⁰.

A este rango de temperaturas, los iones de oxígeno con carga negativa migran a través del electrolito conformado por el enrejado de cristal; cuando un gas que contenga hidrógeno o CO hace su recorrido sobre el ánodo, un flujo de iones con carga negativa se mueve a través del electrolito para oxidar el combustible. El oxígeno es suministrado por el aire en el cátodo; así los electrones liberados en el ánodo viajan a través de una carga externa hacia el cátodo, completando el circuito y suministrando energía eléctrica a lo largo del camino. La eficiencia de generación eléctrica puede estar en el rango del 60% aproximadamente. Es importante destacar que las SOFC pueden utilizar CO o hidrógeno como combustible.

Las SOFC pueden tener diferentes configuraciones, una de ellas consiste en una serie de tubos donde se encuentran los elementos funcionales como los electrodos y el electrolito, otra variación incluye la configuración más convencional que consiste en elementos planos que conforman los (stacks) apilamientos.

Debido a que las SOFC operan a altas temperaturas no se requiere un dispositivo externo para reformar los combustibles que contienen hidrógeno o el CO que son separados en el mismo proceso, además de poder utilizar el calor residual para cogeneración y aumentar así su eficiencia. Como se ha mencionado, al permitir el reformado interno, el CO no actúa como veneno en los catalizadores, sino que puede utilizarse como combustible, además de contar con la ventaja de ser resistentes al azufre contenido en la mayoría de los combustibles.

Origen y desarrollo de las SOFC:

Tanto las SOFC como las MCFC operan a altas temperaturas, esta similitud se debe a que tienen un origen común mencionado anteriormente cuando en la década de los años treinta los científicos suizos Emil Baur y H. Preis experimentaron con electrolitos sólidos con alta temperatura, con el uso de carbonatos alcalinos y óxidos.

Aplicaciones:

Debido a su funcionamiento a altas temperaturas, son utilizadas como fuentes de poder estacionarias de gran potencia para suministrar energía eléctrica en industrias o en complejos habitacionales, pero no para el sector del transporte o dispositivos portátiles ya que el tiempo de arranque es bastante grande dada la necesidad de incrementar la temperatura para su correcta operación. Además la elevada temperatura de operación abre la posibilidad de “cogenerar” utilizando el residuo de calor para producir vapor y aplicarlo en procesos industriales o bien para energizar turbinas para producir mas electricidad. La

²⁰ Smithsonian Institute, “¿What is a Fuel Cell?”

vida útil de las SOFC puede alcanzar 30,000 horas. Actualmente tienen un rendimiento aproximado del 45%, pero puede aumentar si el combustible gaseoso es suministrado a la celda a presión. Si además el calor se aprovecha para cogeneración, esta eficiencia sube considerablemente, ya que el calor residual es de alta calidad.

Celda de Combustible Reversible (RFC)

Las celdas de combustible reversibles (RFC, Reversible Fuel Cell) son dispositivos que pueden funcionar en “sentido contrario” al principio de funcionamiento de una celda de combustible, que consiste en la producción de electricidad a partir del uso de hidrógeno; es decir que pueden ser alimentadas por una fuente de energía eléctrica para producir hidrógeno: proceso llamado electrólisis (página 122). El hidrógeno producido representa una forma de energía potencial de gran valor cuando es almacenado porque tiene la capacidad de resolver el gran problema de la producción de electricidad por medios renovables que es su intermitencia: el exceso de energía generado por medio de captación del viento o de la radiación solar en temporadas favorables puede ser utilizada en las momentos desfavorables cuando existe poco recurso eólico o baja radiación solar.

Este desarrollo tecnológico se ha implementado principalmente en PEMFC, sin embargo más del 50% de la energía eléctrica se pierde en el proceso de generación de hidrógeno. Las SOFC parecen ser las más prometedoras con un 70% de eficiencia o más²¹.

TIPOS DE COMBUSTIBLES PARA CELDAS

La mayor parte de las celdas de combustible funcionan con hidrógeno de alta pureza, esto nos lleva a un serio cuestionamiento de cómo será suministrado, especialmente para aplicaciones automotrices que requieren de disponibilidad casi en cualquier lugar; por ello el objetivo a mediano plazo es producir una fuente de poder libre de emisiones contaminantes. Para alcanzar este objetivo las celdas de combustible deberán operar con un combustible generado por medios renovables (página 123). La tecnología y la infraestructura para alcanzar esta meta de forma eficiente y barata están en pleno desarrollo y estarán disponibles en los siguientes años. Mientras tanto, las celdas de combustible podrán ser operadas con hidrógeno extraído de combustibles fósiles vía reformación o bien utilizados directamente en celdas de combustible que operan a alta temperatura como las SOFC, las MCFC o las PAFC; para el caso de energía portátil, el metanol utilizado directamente en las celdas o reformado previamente es otra opción.

²¹ Romm, Joseph J. *The Hype about Hydrogen, Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*. Island Press. Washington D.C. 2005. Pág. 32.

En la tabla se pueden apreciar los diferentes combustibles que actualmente se están utilizando para ser reformados para energizar los diferentes tipos de celdas de combustible, de acuerdo a estos datos, el uso de hidrógeno renovable aún no está disponible como fuente barata y asequible, por esto se espera que en los siguientes años sea el principal combustible para estos fines²².

Combustibles						
	Diesel	Gasolina	Hidrógeno (gas)	Hidrógeno (líquido)	Metanol	Gas Natural
Requerimientos de seguridad	Medio	Medio	Medio	Alto	Alto	Medio
Facilidad de reformación	Muy difícil	Difícil	No requiere	No requiere	Fácil	Medio
Disponibilidad	Buena	Muy buena	Pobre	Muy pobre	Buena	Buena
Infraestructura actual	Muy buena	Muy buena	Pobre	Pobre	Pobre	Muy buena
Compatibilidad con el ambiente	Bajo	Bajo	Muy bueno	Medio	Medio	Medio
Aplicaciones	Automóviles y transporte pesado	Automóviles y autobuses	Automóviles y autobuses	Automóviles y autobuses	Uso residencial y portátil	Uso residencial, estacionario y vehículos

Tabla 7. Comparación entre los diferentes tipos de combustibles utilizados actualmente para energizar celdas de combustible. **Fuente:** fuelcellstoday.

Durante la última década del siglo XX ha surgido un importante interés por la promoción de las celdas de combustible. El uso del hidrógeno como combustible no es una novedad en el mundo porque ha sido utilizado desde hace años en la industria. Sin embargo, en la actualidad y a la luz de la realidad cada vez más clara del agotamiento o de la falta de disponibilidad del petróleo, esta nueva tecnología resulta muy importante en especial para sustituir a los hidrocarburos en el transporte, quizás el sector más crítico y sensible en una economía basada en el petróleo como la nuestra. El transporte requiere de fuentes de energía fácilmente transportables con alto rendimiento por unidad de energía primaria. El hidrógeno, a diferencia de las otras fuentes alternativas de energía renovables, es fácilmente envasable y transportable por ser un “fluido de poco peso”, y por tanto tiene un enorme potencial para ser utilizado como fuente de energía en el transporte (página126). Se puede extraer de la naturaleza, y si se tiene la tecnología para su separación de los productos primarios, ésta es una fuente inagotable de energía.

²² Cano, Ulises. “Infraestructura de Usos de Hidrógeno y Materiales para celdas de combustible: Clave para su Pronto Uso” Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas, Julio-agosto 2000. Pág. 163. www.iee.gob.mx. Consultado el 23 de noviembre de 2004.

Tales características del hidrógeno y las celdas de combustible actualmente lo han convertido en una de las alternativas que más trascendencia muestra en los países desarrollados. Estados Unidos, Europa y Japón han iniciado importantes programas de desarrollo e investigación. Las empresas privadas, y en especial los grandes fabricantes automotrices como General Motors, Chrysler, BMW, también están desarrollando sus propios programas de investigación con la finalidad de producir en el futuro cercano vehículos que funcionan con hidrógeno en el mercado mundial. Islandia, en una mirada estratégica, lleva a cabo una millonaria inversión en la conversión de su transporte público a un transporte con base en hidrógeno, convirtiéndose tal vez en la primera economía de hidrógeno en el mundo²³.

Si tomamos en cuenta a las celdas de combustible en la perspectiva del combate a la pobreza en los países en desarrollo (otra de las grandes preocupaciones de la humanidad, además del agotamiento de los hidrocarburos), quizás no tengan tanta trascendencia ya que las energías renovables, especialmente las más conocidas como solar, eólica, hidráulica, biomasa, se encuentran en el lugar donde se presentan las necesidades de energía. Por otro lado, las cantidades demandadas de energía en estos sectores no son tantas como para que valga la pena hacer una doble transformación de energía renovable a hidrógeno y de allí a electricidad. Sin embargo, a medida que los costos del hidrógeno vayan disminuyendo se hará interesante su aplicación para estos sectores. Es posible que en zonas donde no existe otro recurso además de la energía hidráulica o eólica, éstas sirvan para generar hidrógeno para el transporte que difícilmente se puede energizar con electricidad y con ello hacer válido el concepto de la "generación distribuida". En el futuro esto dependerá de los costos comparativos con otras fuentes. Se da por hecho que cuando el petróleo se encuentre en una etapa de franco agotamiento, que parece ser pronto, las celdas de combustible energizadas con hidrógeno serán la alternativa más económica para el transporte y para otros usos.

²³ Daza, Loreta. "Desarrollo de Celdas de Combustible en Europa". IV. Congreso Internacional de Hidrógeno. México. 2004

5 HIDROGENO ¿POSIBLE FUENTE DE ENERGIA DEL FUTURO CERCANO?

El hidrógeno es el elemento más básico y ubicuo del universo, la materia de la que están hechos las estrellas y el sol. En este inicio del siglo XXI los principales fabricantes de automóviles han destinado más de 2,000 millones de dólares al desarrollo de coches, autobuses y camiones alimentados con hidrógeno, y se espera que en pocos años salgan a la carretera los primeros vehículos producidos en serie. Además, cuando millones de usuarios conecten sus celdas de combustible a redes energéticas de hidrógeno de alcance local, regional, y nacional, basadas en los mismos principios estructurales y tecnologías inteligentes que hicieron posible la World Wide Web, podrían comenzar a compartir la energía de igual a igual y crear un modelo descentralizado[...]El hidrógeno tiene el potencial suficiente para poner fin a la dependencia del mundo respecto a las importaciones de petróleo, y contribuirá a enfriar el peligroso juego geopolítico que practican actualmente los militantes musulmanes y los países occidentales. Significaría un recorte espectacular de las emisiones de dióxido de carbono y mitigaría los efectos del calentamiento global. Y el hecho de que sea tan abundante y omnipresente en la tierra permitiría que todos los seres humanos tengan acceso al poder, con lo que se convertiría en el primer régimen energético verdaderamente democrático de la historia.¹

¹ Rifkin, Jeremy. *La economía del hidrógeno*. Pág. 21.

Sin embargo, el hidrógeno generalmente se encuentra asociado con otro elemento, el agua compartiendo molecularmente con el oxígeno y en compuestos orgánicos como los seres vivos y los hidrocarburos; para su obtención en estado puro es necesario recurrir a métodos artificiales que requieren grandes cantidades de energía, tiene un coeficiente de difusión muy alto (cuatro veces mayor que el metano) razón por la cual se diluye de manera muy rápida en el aire. Este gas presenta el átomo más pequeño de todos los elementos; es catorce veces menos pesado que el aire con una densidad relativa al aire de 0.07 g/cm^3 teniendo una facilidad para difundirse a través de las paredes metálicas y de sustancias porosas; es incoloro, inodoro, no tiene sabor y no es tóxico, bajo condiciones normales en la atmósfera, su flama es de color azul pálido casi imperceptible y su capacidad calorífica es menor que la mayoría de los hidrocarburos, sin embargo, tiene el más alto contenido energético de todos los combustibles, con una densidad energética de 120 kJ/g , que es alta comparada con la gasolina que es de 45.26 kJ/g , 50.19 kJ/g del gas natural y 45.90 kJ/g del gas butano. Sus límites de detonación en el aire son muy estrechos es decir, no es detonable en espacios abiertos, pero si es considerado como fuente de ignición, quemándose antes de alcanzar los límites de detonación. No es corrosivo aunque su átomo de menor valor que los metales es absorbido en materiales de alta resistencia promoviendo la reducción o pérdida de propiedades mecánicas, provocando también corrosión en ambientes de presión y temperatura extremos.

El hidrógeno se ubica dentro de la categoría de elementos que deben manejarse con precaución y cuidado, al igual que en la actualidad se hace con otros combustibles. Por lo anterior, su producción, almacenamiento y transporte deben de realizarse con las mayores medidas de seguridad por lo que estas actividades deben ser controladas por las autoridades regulatorias que se encuentran en fase de desarrollo.

¿POR QUÉ ES IMPORTANTE INICIAR UNA ECONOMÍA BASADA EN EL HIDRÓGENO?

Actualmente el entorno artificial que hemos creado y que se encuentra en constante expansión depende en gran medida del consumo de combustibles fósiles. Después de la crisis energética en la década de los setenta, el mundo entero ya no fue el mismo, los países que basan su desarrollo en el petróleo se encuentran en una inminente vulnerabilidad y prevén un posible colapso; por otro lado, los países del Medio Oriente que cuentan con los más grandes yacimientos en su territorio, han provocado inestabilidad política con el Occidente. Surgen diferentes especulaciones, tanto pesimistas como optimistas: ¿existirá un descenso en el suministro de petróleo?, ¿el precio se mantendrá a la alza para los mercados mundiales en los siguientes años? Lo cierto es que el petróleo barato si se está

acabando, en México, el crudo Maya tiene un grado de impurezas cada vez mayor, a diferencia del Saudí que es considerado como el de menos impurezas de azufre. Este juego geopolítico puede generar un hundimiento en las economías basadas en la explotación de petroquímicos. El mundo entero requiere de fertilizantes y pesticidas para la agricultura, estos productos generalmente provienen también de derivados del crudo. La generación de energía eléctrica se verá también amenazada porque la principal forma de generación proviene de la quema de gas natural y de combustibles fósiles. Estudios recientes confirman que el consumo per capita de petróleo esta reduciéndose, la causa es que la población mundial aumenta con mayor rapidez que la extracción del combustible. De lo anterior podemos decir que de existir un escenario previsible, la incertidumbre gobierna el estado actual en materia energética ¿es necesario generar un nuevo régimen energético? El uso de energías renovables para la producción de hidrógeno es el escenario con mayor potencial.

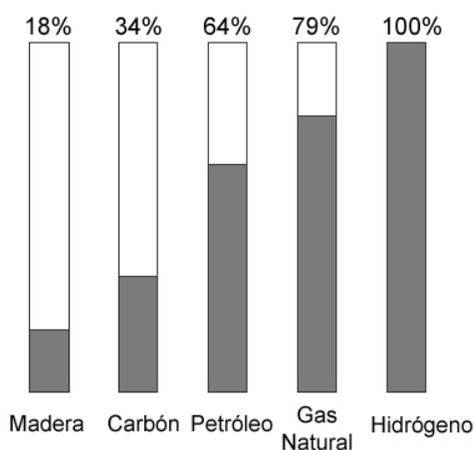


Figura 66. La tendencia en el uso de combustibles a través del tiempo muestra que el porcentaje de hidrógeno se ha incrementado hasta llegar a su totalidad. **Fuente:** Heliocentris

Actualmente, el hidrógeno es producido y explotado para usos industriales en la petroquímica, para la producción de fertilizantes y en el sector salud. Se obtiene por varios medios como la reformación catalítica de hidrocarburos, aislando las moléculas de hidrógeno y liberando el carbono y demás elementos, la desventaja de este procedimiento radica en que para obtenerlo, se requiere calor y vapor de agua, se generan residuos y la materia prima es un hidrocarburo, en este caso el fenómeno de la entropía se eleva.

El proceso que apunta como la mejor alternativa aunque por el momento es el más costoso es por medio de la electrólisis del agua, que consiste en su separación molecular obteniendo hidrógeno por un lado y oxígeno por otro, la actual desventaja radica en el uso de energía eléctrica para lograr la reacción, la energía proviene de grandes centrales que apenas satisfacen las demandas actuales, la incorporación de nuevas tecnologías basadas en energía renovable como la eólica, fotovoltaica o fototérmica permitiría abatir sustancialmente el costo de producción de hidrógeno a escala global.

FORMAS DE OBTENCION DEL HIDROGENO

La producción directa de hidrógeno, como ya se ha dicho, se lleva a cabo principalmente por dos medios: la reformación catalítica de hidrocarburos y la electrólisis del agua.

Reformación catalítica de hidrocarburos

El proceso de reformación catalítica de hidrocarburos, está basado en la descomposición de algún hidrocarburo, el cual fue mezclado previamente con vapor de agua y a una temperatura de aproximadamente 800 °C. A este proceso se le conoce también como craqueo "Craking". Generalmente se utiliza al gas natural, o una mezcla de gas propano y gas butano o propano puro como materias primas importantes, adicionalmente al vapor de agua, si observamos el esquema que muestra los subproductos de esta reacción podremos notar que se produce hidrógeno, pero también se produce monóxido de carbono, compuesto que la tecnología del uso alternativo de fuentes de energía precisamente trata de evitar, por lo tanto este proceso tenderá a desaparecer.



Electrólisis del agua

El segundo medio consiste en la electrólisis del agua para separar el hidrógeno y el oxígeno, este proceso consiste en la reacción contraria a la que se lleva a cabo en las celdas de combustible que producen electricidad a partir de hidrógeno y oxígeno. En cambio la electrólisis requiere de electricidad para poder lograr la reacción química; por medio de una corriente eléctrica se lleva a cabo la disociación de las moléculas de agua en una solución electrolítica, por ejemplo potasa cáustica, sal, álcali ó una resina de intercambio protónico. Una ventaja para el aprovechamiento de este gas en las celdas de combustible es que el hidrógeno obtenido de este proceso tiene una pureza de 99.99%, que es indispensable para el correcto funcionamiento de la membrana de intercambio protónico o de los diferentes electrolitos, también es útil para evitar el envenenamiento por otras sustancias como óxidos en los electrodos de platino, componentes internos de una celda de combustible.

Existen dos tipos de electrolizadores: los alcalinos y los más recientes que funcionan con una membrana de intercambio protónico (PEM) catalizada con platino.

Los electrolizadores de membrana de intercambio protónico están compuestos por un tipo de celda que consta de dos electrodos inmersos en un electrolito y conectados a una fuente de energía eléctrica, la cual debe suministrar suficiente potencial entre los dos

electrodos para llevar a cabo la reacción de disociación del agua y así poder liberar el oxígeno en la parte del ánodo e hidrógeno en la parte del cátodo. Este proceso resulta el más conveniente porque el hidrógeno obtenido es de gran pureza, necesario para su aprovechamiento en los diferentes tipos de celdas de combustible. (página 101).

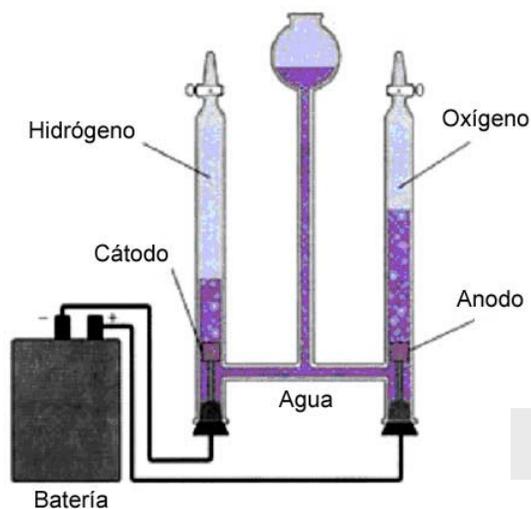


Figura 67. Electrólisis del agua.
Fuente: Lenntech.

La reacción electrolítica se lleva a cabo a temperaturas entre los 15 y 90°C y en las celdas más recientes tipo PEM la temperatura oscila entre los 120 y 350°C, este proceso impide que se mezclen los gases una vez disociados.

Fuentes de energía renovable para la obtención de hidrógeno.

Debido a que los medios directos de obtención como la electrólisis o la reformación requieren grandes cantidades de energía eléctrica, pueden combinarse con las fuentes de generación energética renovable basadas en el Sol para producir electricidad y posteriormente utilizar un electrolizador para disociar el agua, estas fuentes pueden ser:

- Proceso fotovoltaico. La eficiencia de los paneles solares oscila entre 8 y 10%, y en el caso de los electrolizadores entre el 80 y 85%.
- Concentración solar: sistemas de foco lineal, conversión termoiónica generada en el sistema de receptor central por punto focal (torre de energía), sistema de punto focal de colector parabólico (ver capítulo sobre energía solar fototérmica).
- Energía eólica transformada en energía.
- Energía hidráulica.
- Energía marina.

Por otro lado, los combustibles generados por medio de la biomasa también pueden ser reformados para la obtención de hidrógeno.

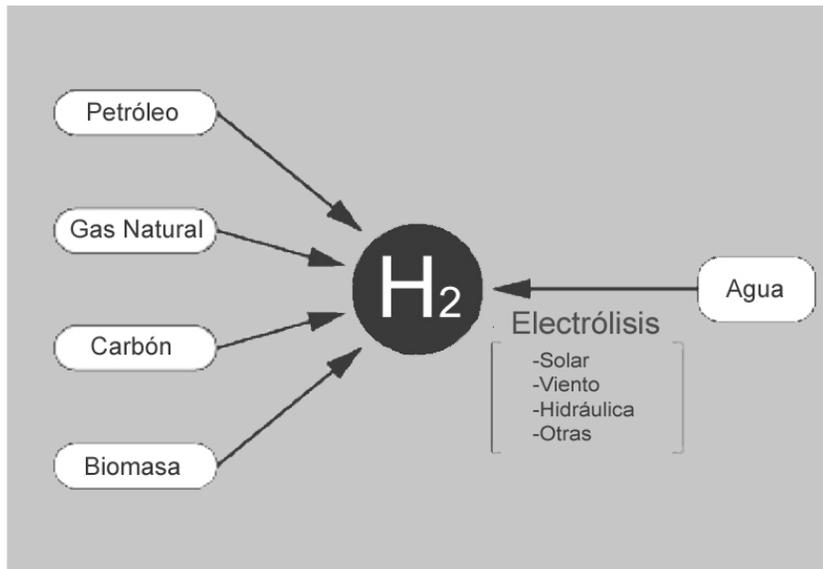


Figura 68. Diferentes alternativas con fuentes renovables y no renovables para la producción de hidrógeno.
Fuente: <http://world.honda.com>

Otros métodos de obtención

También existen métodos de obtención directa del hidrógeno, definidos como aquellos que utilizan la energía solar para producirlo en el mismo proceso:

Proceso térmico llamado también termólisis:

Consiste en el calentamiento del agua entre los 2000° y 3000°C, como resultado de este calentamiento a altas temperaturas generalmente en torres de energía de punto focal, aproximadamente el 25% del vapor obtenido puede ser disociado en hidrógeno y oxígeno².

Proceso fototérmico:

Es el más antiguo, gracias a este fenómeno, es posible la vida en la Tierra. En los primeros años de nuestro planeta, la energía ultravioleta del sol penetró en la primitiva atmósfera de la tierra, la cual contenía una mínima cantidad de oxígeno, disociando el agua (el término fotólisis se refiere a la disociación de un compuesto por medio de la luz) generando una cantidad de oxígeno y otra de hidrógeno, este último se asocia con otros elementos para formar diferentes sustancias y materiales. En la actualidad existen muchos intentos por

² Fernández, Arturo. "Hidrógeno Renovable". En el Curso Tecnologías del Hidrógeno. Cuidad Universitaria, UNAM. México, D.F. 10 de marzo de 2006.

obtener hidrógeno puro utilizando complicados sistemas catalíticos por medio de fotólisis. Sin embargo no se han logrado producir grandes cantidades para una aplicación práctica³.

Proceso fotobiológico:

Conocido también como fotosíntesis, consiste también en la disociación del agua llevado a cabo por las plantas verdes y por un gran número de algas, bacterias y residuos, la biotecnología ha contribuido modificando el ADN de algunos de estos organismos para optimizar el proceso ya que también producen dióxido de carbono (CO₂), subproducto no deseable en la obtención “limpia” de hidrógeno⁴.

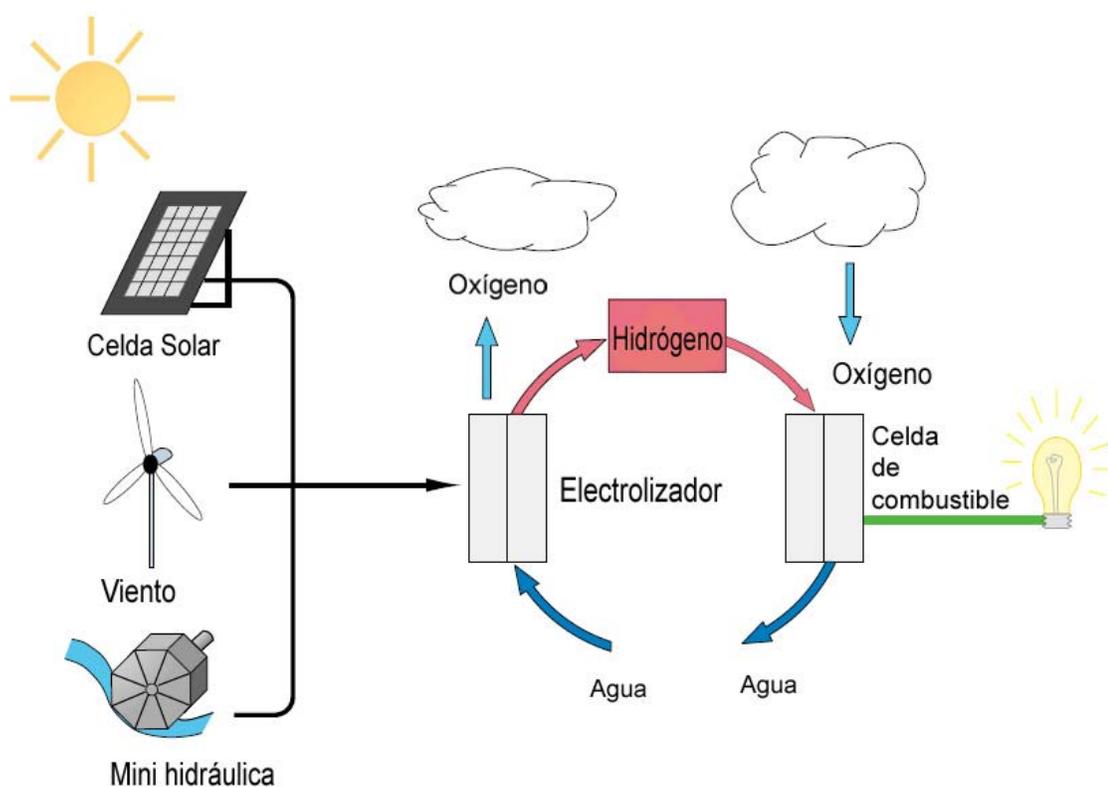


Figura 69. Energía eléctrica a partir de fuentes renovables. En el pasado, las principales limitantes para el uso de estos medios habían sido su almacenamiento y transporte. Con el uso de un electrolizador, un método para almacenar y transportar hidrógeno y una celda de combustible; la energía de recursos renovables puede ser utilizada donde y cuando sea necesaria, de forma limpia, eficiente y sustentable. **Fuente:** Heliocentris.

³ *Ibid*

⁴ *Ibid*

FORMAS DE ALMACENAMIENTO

Al ser el elemento químico más ligero, el hidrógeno ofrece la mayor cantidad de energía en relación con su peso que cualquier otro tipo de combustible, pero el mayor inconveniente para su utilización radica en su densidad de almacenamiento que es la más baja en relación con otros gases. Es posible comprimirlo y almacenarlo en contenedores a bordo de un vehículo que puede ser relleno con relativa facilidad.

El gas hidrógeno es por lo general no corrosivo, sin embargo, en condiciones de almacenamiento los materiales expuestos bajo ciertas condiciones de presión y temperatura pueden tornarse quebradizos o fracturarse por tensión superficial, resultando en su degradación por reducir la ductibilidad y la fuerza de tensión tanto de contenedores como de sistemas de conducción (ductos, mangueras y sistemas de transferencia). Los metales ferrosos y polímeros de baja densidad molecular no son recomendados, en cambio, el acero inoxidable es el más recomendado, también es posible utilizar cobre tipo L, acero con alto contenido de carbón y polímeros de alta densidad molecular como las poliamidas (Teflón™)⁵.

Sistema de almacenamiento del hidrógeno en estado sólido

En el sistema de almacenamiento de hidrógeno en estado sólido se utilizan hidruros de metal, estos hidruros son combinaciones específicas de aleaciones metálicas que actúan de forma similar a una esponja cuando es sumergida en el agua. Los hidruros metálicos tienen la propiedad de absorber el hidrógeno y después soltarlo como proceso reversible y sobretodo iterativo. La cantidad total de hidrógeno que pueden absorber oscila en un rango de 5 a 7% con respecto al peso del tanque cuya estructura es de gran peso.

Como se puede apreciar, el contenido de gas absorbido es relativamente bajo, sin embargo esta tecnología ofrece ventajas competitivas con respecto a otros sistemas que requieren de temperaturas criogénicas para su manejo, además de altas presiones, lo que supone mayor gasto de energía en el proceso; en este caso, las condiciones de seguridad en el manejo del hidrógeno son altas porque se mantiene a presión constante.

Por otro lado, el manejo de hidrógeno de alta pureza es necesario, ya que al actuar como una esponja, los hidruros absorben también las posibles impurezas como el dióxido de carbono, azufre o nitrógeno, una vez que el hidrógeno que se extrae del tanque queda libre de los contaminantes, dejándolos en el tanque ocasionando que se contamine reduciendo tanto su tiempo de vida como su capacidad disponible⁶

⁵ Fortuna, Javier. "Estación de Compresión y Llenado de Hidrógeno". En el Curso Tecnologías del Hidrógeno. Ciudad Universitaria, UNAM. México, D.F. 10 de marzo de 2006.

⁶ Hydrogen, Fuel Cell & Infrastructure Technologies Program. "Gaseous and Liquid Hydrogen Storage". http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen_storage.html. Consultado el 28 de septiembre de 2006.

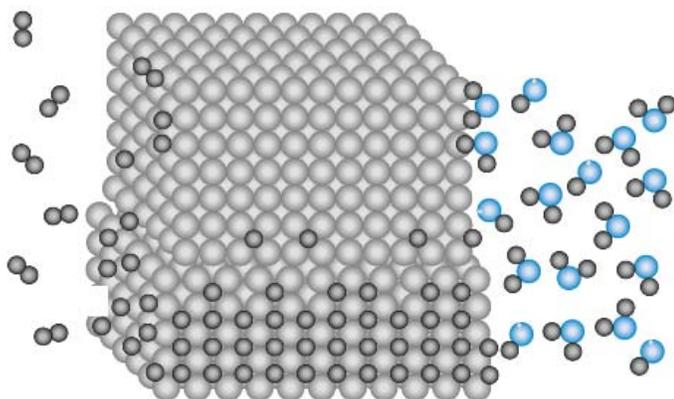


Figura 70. El hidrógeno absorbido por los hidridos metálicos por medio de presión y es soltado al aplicarles calor
Fuente: Shlapbach, Nature.

Sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido

Otro método consiste en la posibilidad de comprimir el hidrógeno en tanques de alta presión. Este proceso requiere de energía adicional porque la cantidad de gas comprimido que se almacena en este tipo de tanques, en condiciones normales utiliza grandes volúmenes. Un tanque presurizado de hidrógeno en estado gaseoso equivalente a un tanque de gasolina puede almacenar la energía 3,000 veces mayor. Sin embargo, la energía utilizada para comprimirlo hace esta tecnología poco accesible por su costo⁷.

Sistemas químicos para almacenamiento de hidrógeno

Como el elemento más abundante en el universo, el hidrógeno se encuentra en una gran cantidad de compuestos químicos. Muchos de estos compuestos pueden ser utilizados como una forma viable para su almacenamiento. El hidrógeno es combinado en una reacción química de la cual surge un compuesto estable, algunos ejemplos ya han sido mencionados como metanol, metano, biogás, biodisel, combustibles producidos de forma renovable, o los hidrocarburos convencionales. Una reacción secundaria puede ocurrir para disociarlo por medio de diferentes técnicas según el tipo de compuesto: la hidrólisis para separarlo del oxígeno, el craqueo del amoníaco, la oxidación parcial, o el craqueo de metanol entre otros.

Este tipo de métodos eliminan la necesidad de un sistema de almacenamiento del hidrógeno ya que se produce en el momento que sea necesario utilizarlo (ver página 120).

Sistema de almacenamiento de hidrógeno líquido

El hidrógeno existe en estado líquido solo en temperaturas aproximadas a -253°C . Las condiciones para almacenarlo en dicho estado suponen un gasto de energía para llevar al hidrógeno a la temperatura requerida, por otro lado, es necesario comprimirlo; de estos

⁷ *Ibid.*

dos procesos resulta una pérdida de energía de un 30% con respecto a la que contiene el hidrógeno cuando es almacenado.

El diseño de los tanques cumple con diferentes requerimientos funcionales y de seguridad, deben tener un aislante de alta eficiencia para preservar la temperatura, generalmente el vacío es la mejor vía para este tipo de aplicaciones y estar reforzados para almacenar el hidrógeno líquido bajo presión; el material más utilizado para el tanque interno es el acero inoxidable y los recubrimiento externos pueden ser diferentes tipos de acero y materiales combinados como la fibra de carbono. El margen de seguridad de este sistema está en función de mantener el tanque en óptimas condiciones y conservar la temperatura. Si se toma en cuenta la necesidad de contar con hidrógeno licuado y tanques con alto grado de eficiencia se deduce que esta tecnología es todavía cara con respecto a otros métodos. Existen líneas de investigación para el desarrollo de tanques elaborados con materiales compuestos para disminuir el peso, elevar su resistencia y mejorar sus propiedades aislantes de temperatura⁸.

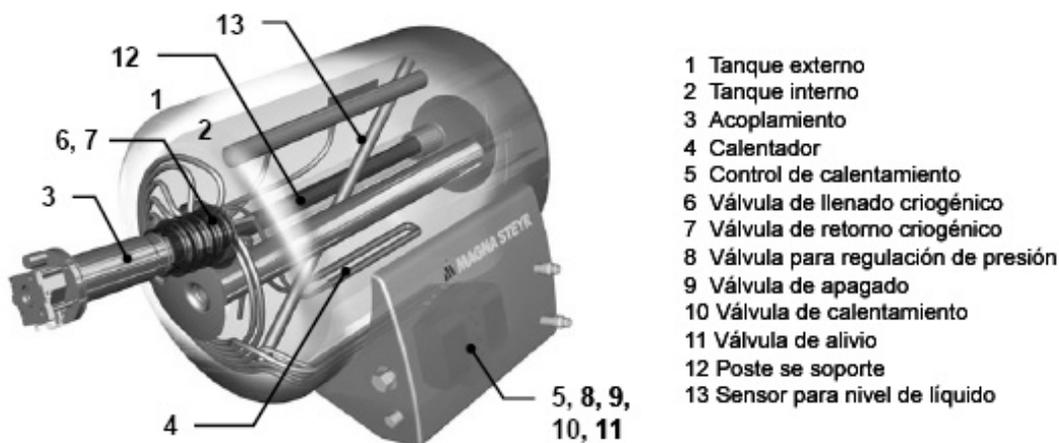


Figura 71 (arriba). Muestra los componentes principales de un tanque de almacenamiento de hidrógeno en estado líquido.

Fuente: Krainz, Gunter

Figura 72 (izquierda). Acoplamiento externo para inyectar hidrógeno líquido en un vehículo propulsado con celdas de combustible.

Fuente: Krainz, Gunter

⁸ IEA, Co-ordinated group. "Hydrogen Production and Storage, R&D Priorities and Gaps". OECD, IEA, Paris, France, 2006. Pág. 24.

Sistemas de almacenamiento del hidrógeno con nanotubos de carbono.

La nanociencia es una disciplina que incluye el trabajo interdisciplinario de la biología, física, ingeniería, antropología, química, diseño y otras. Es considerada como la Segunda Revolución Industrial que será la fuerza motriz del siglo XXI, utilizando los recursos naturales de una forma más eficiente, a fin poder mejorar los materiales existentes al combinarlos con la nanotecnología.

El desarrollo más importante en el presente de esta ciencia es la fabricación de nanotubos de carbono: Son estructuras moleculares que apenas alcanzan la dimensión de 2 millonésimas de milímetro. El carbono, principal materia prima para construir las estructuras se encuentra en forma de grafito, cuyas propiedades eléctricas son buenas y es un material maleable, por su estructura molecular plana. El descubrimiento de nuevas formas de carbono en laboratorio por David Walton, permitió en los 1976, observar estructuras en forma de geodésicas por unión atómica en forma de hexágonos y pentágonos, su combinación permite construir estructuras de todo tipo, desde planos, conos esferas, cilindros, toroides, espirales, hasta geodésicas que van desde 60 a 240 unidades atómicas (llamadas Fullerenos). Son muy resistentes, más que el acero, pero con la cualidad de ser flexibles, con ellos se pueden construir conductores, semiconductores y aislantes eléctricos⁹.

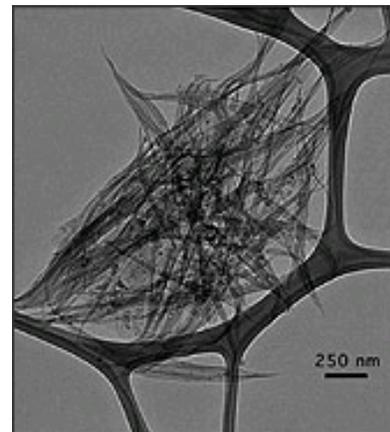
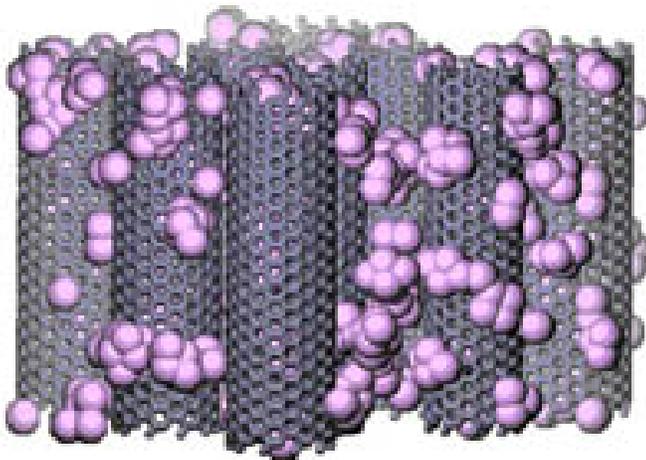


Figura izquierda 73. Nanotubos de carbono dopados con metal. El hidrógeno es atrapado por el metal para ser adherido en las celdas en forma de panal que conforman el nanotubo.

Fuente: J.K. Jonson, University of Pittsburgh.

Figura derecha 74. Fotografía de moléculas de hidrógeno atrapadas en la estructura de un nanotubo de carbono.

Fuente: University of Michigan.

⁹ Terrones, Mauricio. Nanociencias, Construcción de Nanotubos de Carbono. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. Conferencia dada en el CIDI, UNAM. Mayo, 3, 2005.

Los nanotubos de carbono pueden ser combinados con átomos de nitrógeno o moléculas de metales para ser capaces de almacenar diferentes gases como el hidrógeno en los poros microscópicos de la estructura tubular o largos filamentos huecos con las terminales abiertas por donde el hidrógeno puede ser atrapado y almacenado y en la propia cavidad cilíndrica a presiones de 10,000 atmósferas, incrementando los valores de almacenamiento respecto a otros métodos. El sistema de almacenamiento y liberación es similar al de hidridos metálicos, pero la ventaja que presentan los nanotubos es la cantidad de hidrógeno que son capaces de almacenar; estos tubos son capaces de almacenar alrededor del 4.2 al 6.5% de su propio peso en hidrógeno. Sin embargo esta tecnología se encuentra en fase de desarrollo, los trabajos de investigación se están enfocando en mejorar los sistemas de producción y la reducción de costos.

Sistemas de almacenamiento de hidrógeno con microesferas de cristal

Otro medio con potencial consiste en utilizar microesferas de vidrio; en este caso el hidrógeno puede ser permeado a través del vidrio a alta temperatura y dejarlo atrapado dentro de las microesferas que incrementan su permeabilidad en sus paredes al ser rellenadas por inmersión cuando el hidrógeno es inyectado a alta presión, una vez que la temperatura y la presión han bajado el hidrógeno queda atrapado dentro de las microesferas; en el momento de requerirlo nuevamente solo basta volver a calentar el vidrio para disponer del hidrógeno atrapado. Esta forma de almacenamiento tiene como principales características la seguridad en el manejo, resistencia a la contaminación con otros gases, y la contención del hidrógeno a baja presión incrementando con esto el margen de seguridad.

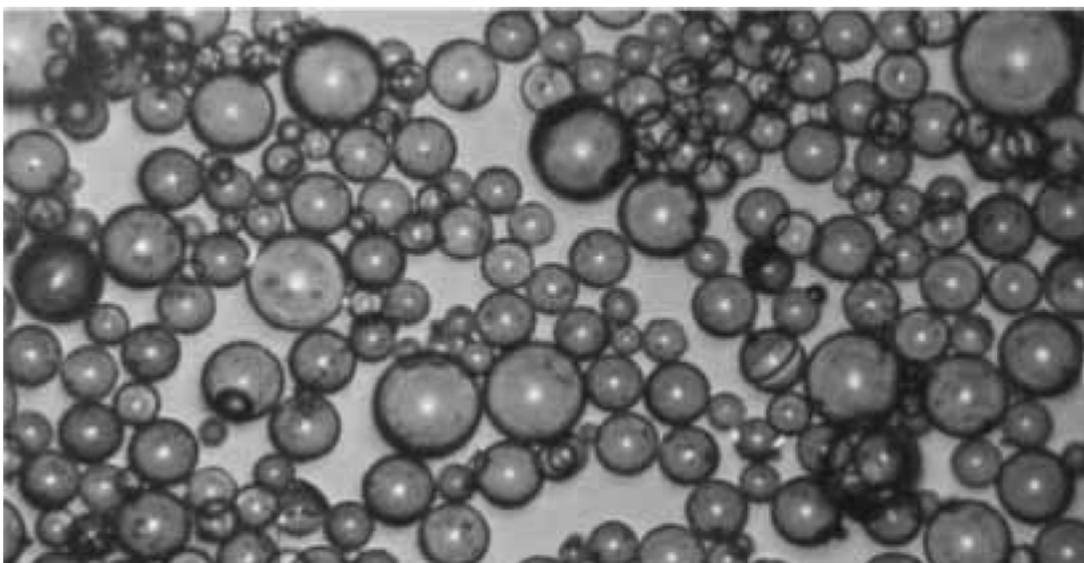


Figura 75. Fotografía de microesferas de cristal para almacenamiento de hidrógeno.

Fuente: Teitel, BNL.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el planteamiento inicial, es posible afirmar que el cambio de paradigma en el diseño no solo es posible, de hecho se está gestando al ser una necesidad urgente. Esta transición entre paradigmas consiste en la reconstrucción de un mundo artificial más amigable con los ecosistemas del planeta, que considere las leyes de la termodinámica para asegurar un espacio habitable para todos los seres vivos sobre el planeta. Los diseñadores tenemos en nuestras manos esta poderosa herramienta que es la tecnología, que aunada a la creatividad nos permitirá concebir una nueva metodología basada en diferentes restricciones, que impone el uso responsable de la energía.

Diferentes gobiernos, compañías y organizaciones en todo el mundo se encuentran buscando soluciones a este problema, lo que nos lleva a la conclusión de que los encargados de construir el entorno artificial por medio del diseño se han convertido en uno de los puntos centrales para lograr la sustentabilidad. Si a lo largo del siglo pasado y parte del presente el sistema de los objetos no reconoció límites, es el momento para empezar a considerarlos.

El rol del diseñador para contribuir con el desarrollo sustentable no es simple, de hecho es complejo; por esto es necesario generar una filosofía que nos pueda guiar a tomar las decisiones adecuadas. Todos los campos del diseño son considerados como una forma de comunicación para persuadir a la sociedad de adoptar diferentes comportamientos y formas de vida; los productos incluyen en si mismos "mensajes" que inducen al consumidor a comprar productos, sean desechables, con periodos de vida cortos, con grados de obsolescencia programados, incluso productos que satisfacen necesidades creadas a través

de la moda; todos ellos con gran éxito comercial pero con grandes deficiencias desde el punto de vista ecológico.

Richard Buchanan reconoce al diseño como “una destreza de pensamiento y comunicación que puede inducir en otros un amplio rango de creencias acerca de la forma de vida para individuos y grupos sociales”¹. Esta afirmación nos permite reconocer al diseño como una poderosa influencia que utiliza productos que generan argumentos concientes o intencionales de cómo debe vivir la gente, principal herramienta que puede ser utilizada para lograr la sustentabilidad.

Sin embargo, la primera acción a seguir para generar esos “mensajes” intencionales que modifiquen el comportamiento del consumidor para actuar de forma responsable con su entorno es el reconocimiento de valores que puedan tener un efecto consistente, positivo, pero principalmente perdurable. El comportamiento social ayudará en gran medida a la transición planteada en este documento.

Pero ¿cómo podemos generar estos mensajes? Con la inclusión de principios, nuevos objetivos y sobre todo restricciones que modificarán en gran medida el proceso de diseño.

Para poder reconocer estos principios es necesario acudir a diferentes momentos desde que la disciplina del diseño surge en los inicios del siglo anterior.

Como hemos visto, el entorno artificial que hemos creado a partir de la Revolución Industrial nos ha llevado de forma progresiva al deterioro del medio ambiente y a la sobreexplotación de recursos con el lema del bienestar, sin embargo, los diferentes temas desarrollados a lo largo de este documento nos muestran de forma contundente que el proceso de transformación de lo artificial debe tender a un cambio profundo. Podemos encontrar en el pasado algunos indicadores sobre la oposición del uso irracional de materiales y procesos; en la recta final del siglo XIX Rushkin y Morris, ya contribuían en gran medida enfatizando la reconsideración de las artes aplicadas a través de la revaloración de los modos de producción medievales y con su incesante crítica hacia las modernas y deshumanizadas expresiones industriales que imperaban en esa época.

Con la llegada de la revolución filosófica de Walter Gropius considerada por primera vez como arte liberal basado en una cultura tecnológica, se contribuyó a la reintegración de todas las formas de hacer en circunstancias de un nuevo ambiente cultural fuertemente influenciado por la ingeniería, la tecnología y el comercio. Los innovadores sistemas de producción basados en el uso racional de proceso y materiales, cuyo objetivo era lograr una conexión concreta entre la exploración artística y una acción práctica, dieron forma al dominio de lo artificial en la experiencia humana, apoyándose en nuevas tecnologías y avances de la ciencia. Los factores sociopolíticos del momento imposibilitaron a Gropius y

¹ Buchanan Richard, “Declaration by Design: Rethoric, Argument, and Demonstration in Design Practice” en Margolin, Victor. *Design Discourse*. Ed. Chicago University. Chicago, 1989. Pág. 93.

sus seguidores, obligándolos a emigrar a lugares donde pudieran difundir el naciente pensamiento del diseño.

Como consecuencia de la segunda Guerra Mundial, el uso desmedido de materiales utilizados para fines bélicos y de energía tanto de combustibles como de trabajo humano, provocó por un lado el desabasto y por otro la conciencia de que es posible la escasez de recursos. La idea de austeridad fomentó al funcionalismo que prevaleció a lo largo del siglo pasado con la premisa "menos es más", considerado como una de las corrientes que más contribuyó a la incipiente ecología de lo artificial. Fue hasta la década de los años setenta cuando la primera crisis energética sensibilizó al mundo entero, esto contribuyó a realizar las primeras acciones sobre el uso responsable de la energía para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Los problemas ambientales mencionados en el capítulo dos tomaron por sorpresa al mundo entero, incluyendo a las disciplinas del diseño orientando el desarrollo de los productos hacia al análisis de sus ciclos de vida, sí como el gasto de energía tanto para su fabricación como para cumplir su función. Fue así como surgió el diseño sustentable donde los diseñadores deben asumir tanto el impacto ambiental de sus productos a lo largo de su ciclo de vida como el impacto social y ético de los mismos.

Diferentes posturas del diseño ante los problemas ambientales

El crecimiento económico y el capital natural son dos conceptos que no son compatibles. Al respecto, Victor Margolin se refiere a dos modelos de crecimiento: por un lado una expansión global y por otro desarrollo dentro un equilibrio global; el primero se refiere a la necesidad de aumentar de tamaño gracias al consumo, y uso de recursos sin límites atendiendo el crecimiento económico de las naciones industrializadas; el segundo se refiere al desarrollo basado en racionalizar la actividad productiva del planeta, tomando en cuenta los límites del crecimiento. La división de opiniones entre naciones radica en la gran diferencia de estos dos modelos porque cada uno persigue objetivos totalmente diferentes. Sin duda el segundo es más sensible a la problemática actual. Margolin menciona las causas y los modelos globales que nos hacen pensar que lograr un equilibrio planetario no solo es deseable, sino necesario para garantizar el bienestar de las generaciones futuras, y cómo el diseño puede ser utilizado como una herramienta estratégica para el desarrollo de un mundo artificial acorde con esta proyección.

Por otro lado, Ezio Manzini y Richard Buchanan enfocan esta realidad inminente en el quehacer del diseño. Manzini establece que el problema radica en la forma de consumo; que los productos deben tener periodos de vida más largos, y que el principal escenario consiste en lograr una reducción en la producción de artefactos y con ello tener menos consumo. Sin embargo, las estrategias económicas globales apuntan en sentido totalmente

opuesto, ya que para tener un equilibrio económico sano, es necesario tender al consumo masivo.

Otro posible camino consiste en el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en la sustentabilidad como el uso responsable de recursos y energía. Es un buen momento para que el diseño sea incorporado a esta actividad como un puente entre el desarrollo científico y que la aplicación tecnológica resulte en la aplicación de estas tecnologías en objetos, permitiendo que la dinámica socioeconómica global no se vea afectada, así el estilo de vida de cada habitante del planeta deberá girar en torno al uso responsable de recursos, y los diseñadores nos encontraremos en una posición estratégica para poder participar en este tipo de soluciones².

La actitud ecológica de los diseñadores, el intento de trasladar valores personales a las actividades de diseñador puede tener lugar en diversos niveles según Ezio Manzini:

- En la selección de materiales no dañinos y reciclables.
- En la propuesta de nuevos productos provistos con mejores cualidades ambientales.
- La intervención desde “arriba” en el sistema de producción y consumo y en el rediseño basado en nuevos valores, alejados de necesidades creadas por la moda y el consumo.
- Actuar sobre nuevas propuestas de calidad y así, basarse en la imagen de nuevos estilos de vida que sean social, ecológicamente y culturalmente aceptados.

Si la ciencia y la tecnología marchan con el lema de “todo es posible”, la cultura del diseño debe saber como proyectar una nueva ruta para esas nuevas posibilidades, una dinámica que pueda ser completamente opuesta a lo que el desarrollo tecnológico científico ha seguido hasta ahora; por ello es deseable que la cultura del diseño despliegue una gama de posibilidades, diversifique escenarios que involucren a la sociedad en cuestiones medioambientales³.

El regreso a los ciclos naturales:

El enfoque reduccionista que apoya la tendencia a tomar en cuenta únicamente los aspectos formal y funcional en el proceso de diseño de productos es cada vez más obsoleto. Sin duda lo artificial es la principal fuente de los problemas ambientales durante su fabricación, uso y desecho. Lo que nos lleva a la necesidad de atender aspectos de producción con ahorro de energía y en el uso de materias primas que faciliten la perdurabilidad de los objetos, y su vez permitan ser devueltos al ciclo productivo por medio del reciclaje. Esta tendencia propone cinco principios básicos para el diseño de productos sustentables:

² Margolin, Victor. “Global Expansion or Global Equilibrium?”. Design and the World Situation”. Design Issues. Massachusetts Institute of Technology. Volume 12, Number 1, Summer 1996.

³ Buchanan, Richard & Margolin Victor. *Discovering Design, Explorations in Design Studies*. The University of Chicago. Chicago, 1995

- Cíclico: Bajo este criterio, los productos deben estar fabricados con materiales que les permitan ser parte de los ciclos naturales, en un proceso de reciclaje de circuito cerrado.
- Solar: El proceso de producción de los objetos debe incluir formas de energía basadas en la fuente primaria que es el Sol (página 49).
- Eficiencia: Retomar la premisa del funcionalismo “menos es más”, el aumento de la eficiencia en el proceso productivo significa utilizar menos material y ahorro de energía, ayudando a la disminución del daño ambiental.
- Seguridad: Los productos no deben incluir sustancias o procesos que sean considerados peligrosos durante su ciclo de vida, incluyendo su proceso productivo, tiempo de vida útil y postconsumo.
- Social: Los sistemas productivos deben ser incluyentes con el personal responsable de la producción y con los consumidores finales ofreciendo garantías de calidad⁴.

El regreso a los ciclos naturales en materia energética significa que día con día recibimos más energía proveniente del Sol que la cantidad total de energía requerida por todos los habitantes del planeta. Edwin Datschefsky, nos dice que los productos deben consumir en su fabricación y uso energía renovable considerada como cíclica y segura; esto significa que tanto en el uso de materiales como el de energía debemos apuntar nuestra mirada hacia la fotosíntesis, la energía muscular y todas las formas de conversión energética renovable vistas a lo largo de este documento.⁵

El regreso a estos ciclos naturales supone el uso eficiente y responsable de los recursos energéticos, tema central de este trabajo, por ello fueron abordados los diferentes estudios sobre la conversión energética proveniente del sol en manifestaciones renovables que en definitiva, pueden ser el vehículo para modificar el actual entorno artificial para lograr otro que ofrezca mejores condiciones de vida (página 47).

Es importante mencionar que la sustentabilidad plantea también diferentes prácticas y valores para las sociedades dependiendo de sus condiciones sociales, políticas y económicas por un lado, por otro que dependen de su ambiente local, por eso los valores y prácticas serán diferentes para cada región.

El papel del diseñador debe estar por un lado orientado hacia los preceptos mencionados anteriormente, pero atendiendo las particularidades que surgen en cada región; para lograrlo, el diseñador debe reconocer su propia situación local y proponer soluciones verdaderamente sustentables.

⁴ Datschefsky, Edwin. *Productos Sustentables, El Re-Diseño De Productos, El Regreso a los Ciclos Naturales*. McGraw Hill. México. 2002. Pág. 28.

⁵ *Ibid.* Pág. 40.

GLOSARIO

Aeróbica: En presencia del aire; se aplica a las reacciones que se producen en presencia de oxígeno atmosférico. En particular la fermentación de materia orgánica puede realizarse aeróbicamente, produciendo composta.

AFV: (Alternative fuel vehicle). Vehículo que utiliza combustible alternativo.

Anaeróbica: Reacción en ausencia de aire y oxígeno, protagonizada por grupos de bacterias que transforman moléculas complejas en compuestos simples. Puede ser origen para la obtención de combustibles gaseosos con gran contenido de metano.

Ánodo: El ánodo es el electrodo dentro de una celda de combustible donde tiene lugar la oxidación del combustible. Electrodo negativo en el que se produce la oxidación.

Aportación: Volumen de agua captado por una presa durante cierto periodo, para generar electricidad o para otros fines (riego, recreación, consumo humano, etc)

Capacidad: Medida de aptitud o posibilidad de generar potencia eléctrica, generalmente expresada en watts (W), kilowatts (kW) o megawatts (mW), este término puede referirse a la potencia suministrada por un generador, una central, un sistema local o un sistema interconectado.

Capacidad base: Capacidad de generación para satisfacer la carga base.

Capacidad de generación: Máxima carga que un sistema de generación puede alimentar en condiciones establecidas en un periodo dado.

Capacidad pico: Capacidad de generación de un sistema destinada a operar en las horas de máxima demanda.

Carbón mineral: El carbón mineral es principalmente carbono, también de origen fósil, que se encuentra en grandes yacimientos en el subsuelo. En el ámbito mundial el carbón

mineral es abundante, sin embargo en México no lo es. Los problemas ecológicos que causa son aun mayores que los inherentes al petróleo y sus derivados.

Carga: Cantidad de potencia que debe entregarse en un punto dado de un sistema eléctrico.

Carga base: Carga mínima en un periodo dado.

Carga interrumpible: Demanda de ciertos usuarios que puede ser cortada o interrumpida por el operador del sistema con base en contratos vigentes.

Catalizador: Sustancia que sin alterarse tras una reacción ha servido para activarla. Sustancia química que aumenta el índice de una reacción sin consumirse; después de la reacción, potencialmente puede recuperarse de la mezcla de la reacción químicamente inalterado. El catalizador reduce la energía de activación requerida, permitiendo que la reacción se produzca más rápidamente y a una temperatura más baja.

Cátodo: El cátodo es el electrodo dentro de una celda de combustible, lugar donde el combustible es reducido en iones y electrones. Electrodo positivo en el que se produce la reducción.

Celda de combustible: Dispositivo electroquímico que puede convertir de forma continua la energía química de un combustible y un oxidante en energía eléctrica. El combustible y el oxidante se almacenan generalmente fuera de la celda y son transferidas a la celda a medida que se consumen los reactantes.

Central generadora: Conjunto de instalaciones utilizadas para producir energía eléctrica. Están incluidas las obras de ingeniería civil y las deificaciones necesarias.

Cogeneración: Sistema que suministra dos energéticos simultáneamente, a partir de un energético primario.

Combustión: Consiste en reacción química de una sustancia con oxígeno para producir luz y calor. Sin embargo, en una celda de combustible la reacción de del hidrógeno con oxígeno usualmente tiene lugar a baja temperatura.

Conexión en serie: Conexión de sistemas eléctricos de forma que los lados positivos se conectan con los lados negativos, de tal manera que se suman los voltajes de cada sistema.

Confiabilidad: Aptitud de un sistema eléctrico para satisfacer la demanda de manera continua. En su análisis interviene distintas medidas de probabilidad como valor esperado de la energía no suministrada, probabilidad de carga, frecuencia y duración de las fallas del sistema.

Conservación: Implantación de medidas que disminuyen el consumo de energía en usos finales y que dan como resultado cambios benéficos en el patrón de variación de la carga.

Consumo de energía: Energía eléctrica utilizada por toda o parte de una instalación durante un periodo de tiempo determinado.

Consumo específico disponible: Cantidad de combustible necesario para generar 1 kW de energía eléctrica.

Costo: Uso del dinero destinado a obtener bienes y servicios.

Costo financiero: Costo en que incurre un proveedor al solicitar recursos económicos a alguna entidad financiera (bancos generalmente) para poder fabricar o comprar productos o bien proporcionar y/o solicitar servicios.

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Bióxido de carbono

Degradación: Reducción obligada de la potencia de la central generadora como consecuencia de la falla de uno de sus componentes o por cualquier otra causa.

Demanda eléctrica: Demanda instantánea de energía, normalmente expresada en W, kW o mW.

Demanda máxima o pico: Demanda máxima registrada en un sistema en un periodo determinado.

Economía del hidrógeno: Es una visión que plantea la posibilidad que el mundo pueda moverse en función del uso de hidrógeno como una alternativa energética que suplantaría el uso de combustibles fósiles. En este caso, el hidrógeno podrá ser utilizado para proveer energía eléctrica y calorífica en los hogares, industrias y transportes. Eventualmente, el hidrógeno podría ser generado por energía renovable, apuntando hacia la ausencia de emisiones, principalmente de bióxido de carbono.

Eficiencia: Porción de energía utilizada que se convierte en trabajo útil.

Electrodo: El electrodo es el elemento de una celda de combustible donde tiene lugar la reacción química y donde los electrones son dirigidos hacia un circuito externo. Conductor eléctrico a través del cual una corriente eléctrica entra o sale de un medio, ya sea una solución electrolítica, un sólido, una masa derretida, gas o un vacío.

Electrólisis: Proceso químico en el cual, por medio de electricidad, el agua es separada en hidrogeno y oxigeno.

Electrolito: Es una sustancia donde se produce la corriente eléctrica debido a la migración de iones. Junto con conexiones externas de una celda de combustible, contribuyen a la creación de un circuito eléctrico. Conductor eléctrico no metálico en el que se transporta la corriente por el movimiento de iones.

Energía: Capacidad de realizar trabajo. Representada en potencia (W) durante un periodo (h).

Energía cinética: Es aquella que presenta un cuerpo por su estado de movimiento. Su valor se expresa como $\frac{1}{2}mv^2$, siendo m su masa y v su velocidad.

Energía potencial: Se refiere a la que contiene un cuerpo en función del lugar que ocupa. En general se mide por la expresión gmh, siendo g la aceleración de la gravedad, m su masa y h su altura respecto a un plano de referencia.

Energía primaria: Se refiere a la energía total que se consume en un estado. Siendo energía final menor que la primaria considerando las pérdidas.

Energía renovable: Los recursos de energía renovable son aquellos que no requieren la utilización de combustibles fósiles. Estos incluyen el poder del viento, hidroeléctricas, o poder geotermal, fotovoltaico o fototérmico. Estos pueden ser una alternativa para producir hidrógeno renovable.

EV: (Electric vehicle) Vehículo eléctrico.

EZEV: (Equivalent to zero emissions vehicle) Vehículo con ausencia de emisiones.

Factor de potencia: Relación entre la cantidad de potencia (W) consumida por un dispositivo eléctrico y la potencia aparente medida kVA.

FCEV: (Fuel cell electric vehicle) Vehículo equipado con celdas de combustible.

Frecuencia: Número de ciclos a través de los cuales una corriente alterna cambia de sentido durante un segundo. Se mide en hertz (Hz) que equivalen a ciclos por segundo. Se ha normalizado en México a 60 Hz y en Europa a 50Hz.

Fuentes de energía no renovable: Energía almacenada en cantidades inicialmente fijas, comúnmente en el subsuelo. En medida en que se consume un recurso no renovable, se agota. Las reservas disponibles dependen de la factibilidad técnica y económica de su aprovechamiento, del descubrimiento de nuevos yacimientos y del ritmo de extracción y consumo.

Fuentes de energía fósil: Energía obtenida de la combustión (oxidación) de ciertas sustancias que, según la geología, se produjeron en el subsuelo a partir de la acumulación de grandes cantidades de residuos de seres vivos hace millones de años.

Gas natural: Está compuesto principalmente por metano y corresponde a la fracción más ligera de los hidrocarburos, por esto se encuentra en los yacimientos de forma gaseosa.

Generación: Cantidad de energía producida en una central.

Generación distribuida: Básicamente, la generación distribuida involucra la producción de energía eléctrica cerca del consumidor final, sin la necesidad de recurrir a la red principal.

Generador: Máquina que convierte energía disponible en energía eléctrica.

Gradiente térmico: Diferencia de temperaturas en un sistema de vientos o de flujos oceánicos.

Joule: Unidad de trabajo o de energía que representa la cantidad de trabajo realizado por 1 newton (N) a lo largo de una distancia de 1 metro (m).

$$1 \text{ joule (j)} = 1\text{Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$$

$$1 \text{ j/s} = 1 \text{ watt (W)}$$

H₂: Hidrógeno

HC: Hidrocarburo

HEV: (Hybrid electric vehicle) Vehículo eléctrico híbrido. Que funciona con motor de combustión interna y con electricidad.

Hidrocarburo: Los hidrocarburos son compuestos químicos que contienen principalmente hidrógeno y carbono. Estos son utilizados comúnmente como combustibles tradicionales.

IEA: (International Energy Agency) Agencia Internacional de Energía.

Intercambiador de Calor: Recipiente en que se transporta el calor de un medio a otro.

Ión: Átomo u otra partícula con carga eléctrica positiva (catión) o negativa (anión), como los existentes en una disolución.

LEV: (Low emissions vehicle) Vehículo de bajas emisiones. Son vehículos que cumplen con estrictas normas de emisiones en California.

Membrana: Capa de separación en una celda de combustible que actúa como electrolito (intercambiador de cationes) así como de película que hace de barrera para separar los gases en los compartimientos del ánodo y el cátodo de la celda de combustible.

Membrana de Intercambio Protónico: Capa separadora en una celda de combustible PEM que actúa como un electrolito (que es conductor del protón) así como una película que constituye una barrera, separando el suministro rico en hidrógeno en el compartimiento del cátodo de la celda de la parte del ánodo rica en oxígeno. Membrana con la capacidad de transportar protones (H⁺) desde el ánodo al cátodo en una celda de combustible.

Modelo: Representación analítica o matemática de un sistema físico y de la manera en que ciertos fenómenos ocurren en dichos sistemas.

NEBUS: (New electric bus) Nuevo autobús eléctrico.

NECAR: (New electric car) Nuevo automóvil eléctrico.

Newton (N): Unidad que representa la fuerza que aplicada a una masa de 1kg, le produce una aceleración de 1 m/s².

NO_x: Oxido de nitrógeno

NGV: (Natural gas vehicle) Vehículo que funciona con gas natural.

NZEV: (Near-zero emissions vehicle) Vehículo cercano a cero emisiones.

Oxidación Parcial: Reacción de la transformación del combustible por la que el combustible se oxida parcialmente hasta producir monóxido de carbono e hidrógeno en lugar de oxidarse completamente y producir dióxido de carbono y agua. Esto se realiza por medio de una inyección de aire en el flujo de combustible antes del reformador. La ventaja de la oxidación parcial del combustible frente a la reformación del combustible por vapor es que se trata de una reacción exotérmica más que de una reacción endotérmica y, por lo tanto, genera su propio calor.

Pérdidas: Término aplicado a la energía (kWh) o potencia (kW) que no se utiliza en un sistema eléctrico. Se debe principalmente al calor en conductores y aparatos.

Petróleo: Mezcla de gran variedad de hidrocarburos (compuestos de carbono e hidrógeno) en fase líquida, mezcaldos con una gran variedad de impurezas. Por destilación y otros procesos se obtienen diversos tipos de gasolinas, diesel, turbosina, tractolina, chapopote, etc. México cuenta con grandes yacimientos de este recurso, sin embargo, está sobre explotado con fines energéticos y de carácter financiero. Está considerado como un recurso energético no renovable y también como fuente de energía fósil.

pH: Medida de la acidez de una dilución, si esta es neutra el valor del pH es de 7, siendo ácida para cifras menores y básica para las superiores.

Placas Bipolares: Placa de conducción en un stack (montón) de células de combustible que actúa como un ánodo para una monocelda y como un cátodo para la monocelda adyacente. La placa puede ser de metal o un polímero conductor (que puede ser un compuesto relleno de carbono). La placa incorpora normalmente canales de flujo para la alimentación de fluidos y puede contener también conductos para la transferencia de calor.

Potencia eléctrica: Tasa de producción o generación de electricidad expresada en watts.

Potencial bruto: Potencia media a la salida del generador que toma en cuenta los dispositivos auxiliares de consumo y pérdidas en general del sistema.

Red: Conjunto definido de circuitos eléctricos conectados entre sí y eventualmente conectados por otros circuitos.

Reformación externa: Producción de hidrógeno a partir de un combustible hidrocarburo (metanol, gasolina, etc.) antes de su entrada en la celda de combustible o el stack de unidades aisladoras. La reformación externa ocurre cuando un combustible es reformado para obtener hidrógeno, el cual una vez separado de otras sustancias es introducido a una celda de combustible

Reformación interna indirecta: La sección del reformador está separada del ánodo de la celda de combustible, aunque es adyacente a ella. Esta celda aprovecha el beneficio térmico estrechamente asociado por el que el calor exotérmico de la reacción celular puede utilizarse para la reacción de reformación endotérmica. Un inconveniente es que la conversión del metano en hidrógeno no se realiza con la misma eficacia que con el enfoque directo. Algunas celdas de combustible operan a suficiente alta temperatura para ser capaces de convertir un hidrocarburo a hidrógeno dentro de una celda de combustible.

Reformado: Conversión térmica o por catalizador de nafta de petróleo en productos más volátiles con índices más altos de Unidades Térmicas Británicas (BTU).

Reformado por vapor: Proceso para separar el hidrógeno de un combustible de hidrocarburos, normalmente gas.

Reformador: Recipiente dentro del cual el gas combustible y otro(s) flujo(s) de reciclaje de gas (en el caso de que estén presentes) reaccionan con el vapor del agua y el calor, normalmente a través de un catalizador, para producir un gas rico en hidrógeno para su uso dentro de la central de energía de celdas de combustible.

Simulación: Método de estudio del comportamiento de un sistema físico mediante un modelo matemático del mismo.

Stacking: Proceso de colocación de forma contigua de las celdas de combustible individuales para que formen un stack de celdas de combustible. Normalmente, el stack está conectado en serie.

Watt: Unidad de potencia equivalente a un flujo de corriente de un ampere a tensión de un **Volt**. También equivale a 1 j/s.

Watt-hora: Energía consumida por un dispositivo de un watt de potencia que opera de manera continua durante una hora.

ZE (Zero emission vehicle): Vehículo con cero emisiones, es aquel que carece de escape o de emisiones gaseosas de combustibles. Un vehículo con celdas de combustible es considerado como un claro ejemplo.

REFERENCIAS

Berry, Martín. *Chemistry Through Hydrogen, Clean energy for the Future*
Heliocentris, Berlín, 2000.

Cadiz, Juan Carlos. *La Energía Eólica, Tecnología e Historia*
Herman Blume. Madrid, 1984.

Carless, Jennifer. *Energía Renovable, Guía de Alternativas Ecológicas*
Edamex, México, 1995.

Colectivo Centro de Estudios de la Energía Solar. *La Energía Solar, Aplicaciones Prácticas*
Progensa. Sevilla, 2001.

Cook, Brian, "An Introduction to Fuel Cells Technology and Hydrogen Technology".
Heliocentris. Vancouver, December, 2001.

Consejo de Administración del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
(PNUMA) "¿Qué es la Capa de Ozono?". Londres. 1993.

Crawley, Gema. "Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cells", March 2006.
www.fuelcelltoday.com

Crawley, Gema. "Voller Energy Company Profile Update Report", April 2006.
www.fuelcelltoday.com

Datschefskey, Edwin. *Productos Sustentables, El Re-Diseño De Productos, El Regreso a los Ciclos Naturales*. McGraw Hill. México, 2002.

Elliot, David. *Energy, Society & Environment*
Routledge. Nueva York, 1997

Energía A Debate. Revisa mensual
Editorial Mundi Comunicaciones. Año 1/Volumen 1/ No. 1. México, Febrero de 2004.

Energía A Debate. Revisa mensual
Editorial Mundi Comunicaciones. Año 1/Volumen 1/ No. 2. México, Abril de 2004

Energía A Debate. Revisa mensual
Editorial Mundi Comunicaciones. Año 1/Volumen 1/ No. 5. México, Octubre de 2004.

Findeli, Alain. Design Issues. "Ethics, Atesthetics, and Design"
Massachusetts Institute of Technology. Volume 17, Number 1, Winter 2001.

Gipe, Paul. *Energía Eólica Práctica, Una Guía para la Instalación de Pequeños Sistemas Eólicos*
Progensa. 1º Edición en español. Sevilla, 2000

González, Julia. *Energía Solar*
Alhambra. Madrid, 1980

Goodland, Robert. *Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Más allá de Informe Brundtland*
Editorial Trotta, Serie Medio Ambiente. Valladolid, 1997

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. "Escenarios de Emisiones. Resumen para Responsables políticas". IPCC, informe especial. 2004.

Guillén Solís, Omar. *Energías Renovables. Una perspectiva Ingenieril*
Editorial Trillas. México. 2004.

IEA, Co-ordinated group. "Hydrogen Production an Storage, R&D Priorities and Gasps".
OECD, IEA, Paris, France, 2006.

Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. "Nuevas energías Renovables. Una Alternativa Energética Sustentable para México. (Análisis y Propuesta). Centro de Investigaciones en Energía. UNAM. Agosto de 2004.

Fernández Díez, Pedro. "Energía de las Olas".
Universidad de Cantabria. <http://www.termica.webhop.info>, Octubre, 2006.

Jardón, J.J. *Energía y Medio Ambiente, Una Perspectiva Económico-social*
Plaza y Valdéz, México. 1995.

Jarabo, Francisco. *Energías Renovables*
S.A.P.T. Ediciones Técnicas. Madrid. 2000.

Lucerna, Antonio. *Energías Alternativas y Tradicionales, sus Problemas Ambientales*.
Talasa Ediciones. Madrid, 1998.

Manzini Ezio. *Artefactos, Hacia una Nueva Ecología del Ambiente Artificial*
Domus Academy, Milán. 1990.

McDonald, Averil. *Energy Trough Hydrogen*
Heliocentris. Germany, 2000

Moctezuma, David. *La Promoción Ecológica en el Campo Mexicano*
Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, UNAM. Cuernavaca. 1992

Odum, H.T. *Ambiente, Energía y Sociedad*
Blume. Barcelona, 1980.

Odum, P. Eugene. *Ecología, Peligra La Vida*
Mc Graw Hill. 2° edición, México. 1995.

Peña, Luis de la. *Conceptos, Energía*. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en
Ciencias y Humanidades. UNAM. México. 1998.

Rifkin, Jeremy. *La Economía del Hidrógeno, Cuando se Agote el Petróleo*
Editorial Paidós. Barcelona. 2002.

Romm, Joseph J. *The Hype about Hydrogen, Fact and Fiction in the Race to Save the Climate*. Island Press. Washington D.C. 2005.

Scheer, Hermann. *Economía Solar Global, Estrategias para la Modernidad Ecológica*. Galaxia Gutemberg. Madrid. 2000

Schobert, Harold. *Energy and Society, an Introduction*. Taylor and Francis. Nueva York. 2002

<http://www.anes.org>

<http://www.smh2.org>

<http://www.appice.com>

<http://www.conae.gob.mx>

<http://www.fuelcellstoday.com>