



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Eléctrica

APUNTE EL6000

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON FUENTES RENOVABLES

Otoño 2009

Índice

Capítulo 1 Introducción.....	1
Capítulo 2 Conceptos Básicos de Máquinas Rotatorias	3
2.1 Introducción.....	3
2.2 Consideraciones Generales.....	4
2.2.1 Máquinas sincrónicas elementales.....	4
2.2.2 Máquinas elementales de Corriente Continua (C.C.).....	8
2.2.3 Máquinas elementales de inducción.....	9
2.3 Tensiones inducidas.....	10
2.3.1 Máquinas de Corriente Alterna (C.A.)	10
2.3.2 Máquinas de Corriente Continua (C.C.).....	12
2.4 Fuerzas magnetomotrices de los devanados distribuidos	13
2.4.1 Devanado de paso completo	13
2.4.2 Devanado de paso fraccionario.....	17
2.5 Torque en máquinas de polos no salientes	23
Capítulo 3 Energía Eólica	26
3.1 Introducción.....	26
3.1.1 Desarrollo histórico de la generación eólica.....	27
3.1.2 Desarrollo en Chile.....	29
3.2 Caracterización del recurso eólico.....	30
3.2.1 Condiciones del emplazamiento.....	30
3.2.2 Variabilidad del viento	32
3.2.3 Potencia extraíble del viento.....	34
3.3 Control de una central eólica.....	37
3.3.1 Control sobre la operación de los aerogeneradores	37
3.3.2 Control sobre la Potencia inyectada a la red.....	40
3.4 Generación Eólica y Calidad de Suministro.....	41
3.4.1 Impacto en el voltaje en régimen permanente	42
3.4.2 Variaciones dinámicas de voltaje	42
3.4.3 Inyección de reactivos	42
3.4.4 Distorsión armónica.....	43
3.5 Calidad de Suministro para diferentes Tipos de generadores.....	44
3.5.1 Calidad de suministro en aerogeneradores de velocidad fija	44
3.5.2 Calidad de suministro en aerogeneradores de velocidad variable	45
Capítulo 4 Energía Solar	49
4.1 Introducción.....	49
4.2 Conceptos Fundamentales	49
4.2.1 Generalidades	50
4.3 Fundamentos de las celdas solares	52
4.3.1 Características constructivas.....	52
4.3.2 Efecto Fotovoltaico	54
4.3.3 Potencial Fotovoltaico	55
4.4 Sistemas Solares Fotovoltaicos	56

4.4.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos	56
4.4.2 Sistemas solares fotovoltaicos autónomos	57
4.5 Dimensionamiento de Sistemas Fotovoltaicos	58
4.6 Aplicaciones	58
Capítulo 5 Energía Hidráulica.....	61
5.1 Introducción.....	61
5.2 Historia	61
5.3 Desarrollo de la Energía Hidroeléctrica	62
5.4 Centrales hidroeléctricas	63
5.5 Tipos de centrales hidroeléctricas.....	64
5.5.1 Central Hidroeléctrica de Pasada.....	64
5.5.2 Central Hidroeléctrica con Embalse de Reserva	65
5.5.3 Centrales Hidroeléctricas de Bombeo	67
5.6 Turbinas Hidráulicas.....	67
5.7 Ventajas y desventajas.....	70
Capítulo 6 Energía Geotérmica	72
6.1 Introducción.....	72
6.2 Tipos de Energía Geotérmica	74
6.3 Generación Eléctrica a partir de Geotermia	76
6.3.1 Explotación Convencional.....	76
6.3.2 Plantas Tipo Flash	76
6.3.3 Tecnología de Ciclo Binario.....	77
6.4 Situación Internacional	78
Capítulo 7 Energía del Mar	82
7.1 Introducción.....	82
7.2 Características Físicas del Medio Marino	83
7.2.1 Temperatura.....	83
7.2.2 Luz	83
7.2.3 Densidad	84
7.2.4 Presión	85
7.2.5 El Sustrato	85
7.3 Corte de una Cuenca Oceánica.....	85
7.4 Características químicas del medio marino	87
7.4.1 Salinidad	88
7.4.2 Distribución de la salinidad en los mares	88
7.4.3 Otras sustancias disueltas	89
7.4.4 Gases Disueltos	90
7.4.5 Valores del pH	90
7.5 Movimiento de las Aguas Oceánicas.....	90
7.5.1 Mareas	91
7.5.2 Corrientes Marinas	92
7.5.3 Ondas y Olas.....	94
7.6 Formas de Energía presente en Aguas Marinas	96
7.7 Sistemas de Extracción de Energía del Océano.....	97
7.7.1 Ondas	97

7.7.2 Olas.....	98
7.7.3 Temperatura.....	100
7.7.4 Mareas	100
7.7.5 Corrientes	101
7.7.6 Gradientes de salinidad.....	102
7.7.7 Efecto osmótico por métodos mecánicos	104
7.8 Sistemas de Generación en Operación Actual.....	105
7.8.1 Mareotérmica.....	105
7.8.2 Mareomotriz	106
7.8.3 Corrientes	107
7.8.4 Ondas y Olas.....	108
7.9 Ventajas y desventajas de la energía a partir del océano.....	114
Capítulo 8 Biomasa	115
8.1 Introducción.....	115
8.2 Utilización de la Biomasa.....	115
8.2.1 Bosques.....	115
8.2.2 Residuos agrícolas y deyecciones y camas del ganado	116
8.2.3 Cultivos energéticos	116
8.3 Conversión de la biomasa en energía	117
8.3.1 Métodos termoquímicos	117
8.3.2 Métodos biológicos	117
8.3.3 La biomasa en las fuentes de energía	118
8.4 Conceptos sobre la Biomasa.....	119
8.4.1 Biogás	119
8.4.2 Digestor	119
8.4.3 Combustibles Alcohólicos.....	119
8.4.4 Compostaje	120
8.4.5 La Biomasa y la Economía.....	120
8.4.6 La Biomasa y el Medio Ambiente.....	120
8.5 Ventajas y Desventajas.....	120
Referencias y Bibliografía.....	122
Anexo: Celdas de Combustible	128
8.6 Introducción.....	128
8.7 Principio de Funcionamiento de las Celdas de Combustible Tipo “PEM”	129
8.8 Tipos de Celdas de Combustible	131
8.8.1 Celda de Ácido Fosfórico (PAFC)	132
8.8.2 Celda de Carbonatos Fundidos (MCFC)	132
8.8.3 Celdas de Oxido Sólido	133
8.8.4 Celda de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)	134
8.8.5 Celdas Alcalinas	135
8.8.6 Otras Celdas de Combustible	135
8.8.7 Clasificación de las Celdas de Combustible.....	135
8.9 Aplicaciones	136
8.9.1 Generación de Electricidad Masiva	136
8.9.2 Generación de Electricidad de Pequeña Escala.....	141

8.9.3 Celda de Combustible en la Telefonía Móvil.....	145
8.9.4 Industria Automotriz.....	145
8.9.5 Industria Aeroespacial	149
8.9.6 Aplicaciones Varias	150
8.10 Ciclo del Hidrogeno	151
8.11 Almacenamiento del Hidrógeno.....	152
8.11.1 Hidruros de metal	152
8.11.2 Nanotubos de carbón	153
8.11.3 Hidrogeno comprimido	155
8.11.4 Almacenamiento químico.....	156
8.11.5 Almacenamiento liquido	156
8.11.6 Esferas de vidrio	157
8.11.7 Transporte liquido	157
8.11.8 Poros atractores de hidrogeno	157
8.12 Formas de Generación Hidrogeno.....	157
8.12.1 Generación Típica.....	158
8.12.2 Generación Biotecnológica.....	159
8.12.3 Fotoproduccion de hidrogeno	159
8.13 Comentarios.....	161

Capítulo 1 Introducción

Para la Física, la energía es la capacidad potencial que tienen los cuerpos para producir trabajo o calor, y se manifiesta mediante un cambio. Es energía el esfuerzo que hace una persona cuando pedalea sobre una bicicleta. También lo es el movimiento continuo del agua de un río, o el calor que desprende el carbón cuando se quema.

Desde siempre, el hombre ha utilizado las fuentes de energía a su alcance para hacer un trabajo o para obtener calor. Primero su propia fuerza física o la de los animales domésticos. Luego la energía del viento y del agua. Más tarde llegaría la explotación de los combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) y de la energía nuclear. En el futuro es probable que puedan aparecer nuevas fuentes pero, sea como fuere, la disponibilidad de energía ha sido siempre esencial para la humanidad. Tan esencial como pueda serlo, por ejemplo, el agua potable.

De entre las distintas fuentes de energía, las renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana, aunque habría que decir que, para fuentes como la biomasa, esto es así siempre que se respeten los ciclos naturales. El sol está en el origen de todas las energías renovables porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica. El sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que predispone la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica. Las plantas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa. Por último, el sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica.

Las fuentes de energía renovables que se incluyen en este apunte son la eólica, la solar, celdas de combustible, la geotérmica, las energías procedentes del mar y la de biomasa.

En forma previa, se revisarán los conceptos más importantes relativos a máquinas rotatorias pasando por su principio de funcionamiento y formas de operación de las mismas. Se estudiarán las máquinas de Corriente Continua (CC), de inducción y sincrónica.

Capítulo 2 Conceptos Básicos de Máquinas Rotatorias

2.1 Introducción

En este capítulo, se describen en forma breve y elemental, tres tipos de máquinas rotatorias (sincrónica, de inducción y de corriente continua), cuyos principios básicos son esencialmente los mismos. En ellas, las tensiones se inducen debido al movimiento relativo de un campo magnético respecto a un devanado (grupos de bobinas girando dentro de un campo magnético fijo o viceversa, o bien variando la reluctancia al girar el rotor) y el torque se produce por la interacción entre los campos magnéticos del estator (parte fija de la máquina) y del rotor (parte móvil). La Figura 2.1 muestra en forma esquemática estos tres tipos de máquinas.

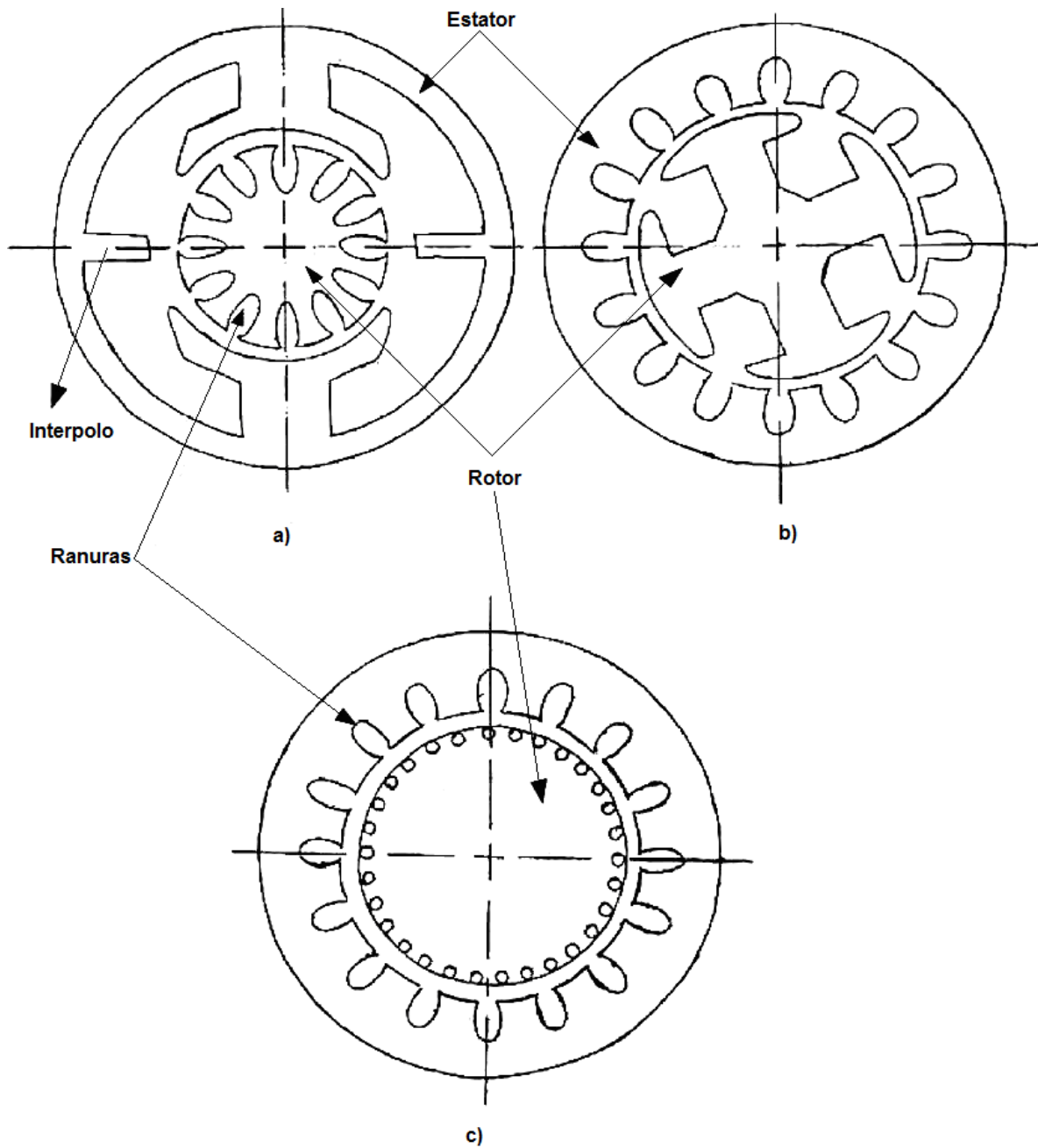


Figura 2.1.- Estructuras magnéticas de Máquinas Eléctricas Rotatorias: a) Corriente Continua; b) Síncrona o Sincrónica; c) Asíncrona o de Inducción

2.2 Consideraciones Generales

2.2.1 Máquinas síncronas elementales

La Figura 2.2 muestra una máquina síncrona elemental de dos polos (operando como generador de corriente alterna). En la mayoría de los casos, el devanado inducido,

está ubicado en el estator. El inductor se excita con corriente continua (C.C.) a través de contactos o “escobillas” de carbón apoyadas sobre “anillos rozantes”. Como el inductor es de menor potencia, es más práctico que esté ubicado en el rotor.

El devanado inducido está formado por N espiras, representada en la Figura por a y a' , alojadas en dos ranuras diametralmente opuestas practicadas en la parte interior del estator.

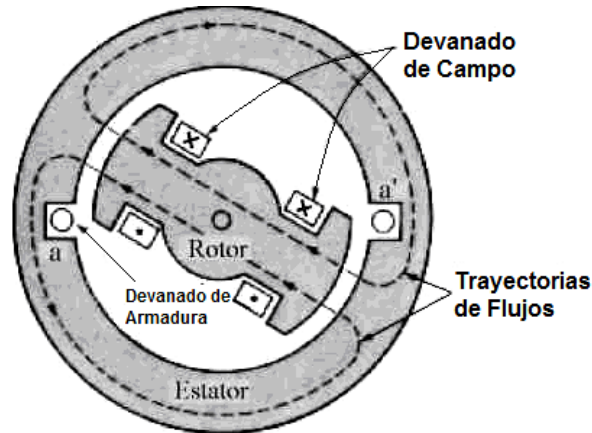


Figura 2.2.- Generador síncrono elemental de polos salientes

Los conductores que forman los laterales de esta bobina son paralelos al eje de la máquina y están conectados en serie. El rotor gira a velocidad uniforme en virtud de una potencia mecánica aplicada a su eje. La distribución radial de la densidad de flujo B en el entrehierro, es función de la posición del rotor. En las máquinas reales, puede conseguirse que la onda de B tenga una forma aproximadamente sinusoidal, tal como se muestra en la Figura 2.3 a), perfilando adecuadamente las expansiones polares. Al girar el rotor, la onda de flujo barre los laterales a y a' de la bobina, induciéndose en ella una tensión que es función del tiempo y que tiene la misma forma que la distribución espacial de B , (Figura 2.3 b))

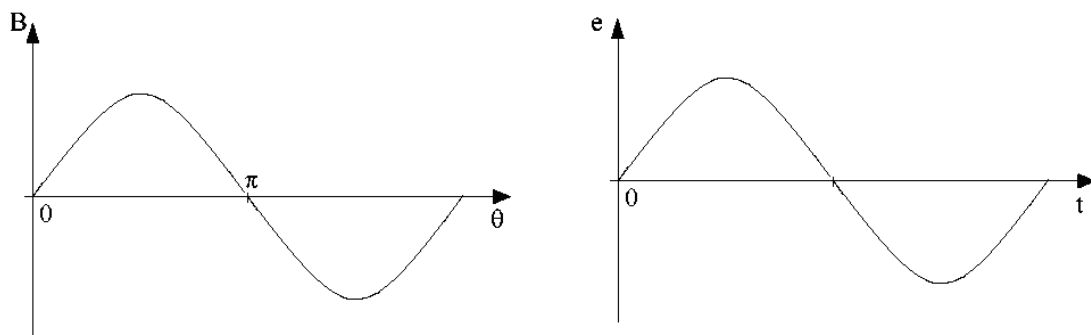


Figura 2.3.- a) Distribución espacial de B ; b) Onda de tensión inducida

La tensión inducida pasa por un ciclo completo de valores por cada revolución de la máquina de dos polos de la Figura 2.2.- Su frecuencia en ciclos por segundo (hertz) es igual a la velocidad del rotor en revoluciones por segundo, es decir, la frecuencia eléctrica está sincronizada con la velocidad mecánica, razón por la cual, estas máquinas se denominan sincrónicas. De acuerdo con esto, una máquina sincrónica de dos polos debe girar a 50 rps (revoluciones por segundo) es decir 3000 rpm (revoluciones por minuto) para generar una tensión con una frecuencia de 50 Hz.

La mayor parte de las máquinas sincrónicas tienen más de dos polos, en cuyo caso puede considerarse únicamente un par de ellos, teniendo en cuenta que las condiciones eléctricas, magnéticas y mecánicas relativas a cada uno de los restantes, no son más que una repetición de las existentes para el par considerado. Por este motivo resulta más conveniente expresar los ángulos como θ en grados o radianes eléctricos, más que como θ_m en unidades geométricas o mecánicas corrientes. Un par de polos o un ciclo de distribución de flujo en una máquina de P polos equivale a 360° eléctricos o a 2π radianes eléctricos, y puesto que en una revolución completa existen $P/2$ ondas o ciclos, se tiene que:

$$\theta = \frac{P}{2} \theta_m \quad (2.1)$$

La frecuencia angular ω de la tensión inducida se puede obtener derivando la expresión (2.1) respecto al tiempo, es decir:

$$\omega = \frac{P}{2} \omega_m \quad (2.2)$$

De donde la frecuencia f de la onda de tensión inducida en Hz y la velocidad mecánica n en rpm quedan relacionadas como:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \quad (2.3)$$

El rotor mostrado en la Figura 2.2 es de polos salientes con los devanados concentrados, mientras que el de la Figura 2.4 es de polos no salientes o cilíndrico, en el que el bobinado está distribuido, alojado en ranuras y dispuesto de manera que el campo es de dos polos y aproximadamente sinusoidal. El uso de uno u otro tipo de rotor depende del tipo de aplicación de la máquina.

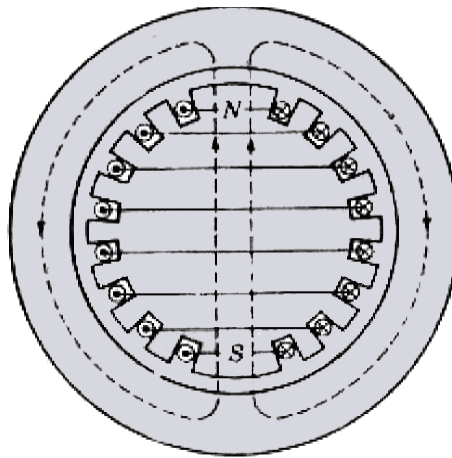


Figura 2.4.- Devanado inductor elemental de dos polos sobre rotor cilíndrico

El rotor de polos salientes se utiliza en generadores hidroeléctricos, debido a que las velocidades de las turbinas hidráulicas son bajas y se requiere un número de polos relativamente alto para conseguir la frecuencia normalmente usada en los sistemas de potencia (50 Hz). En cambio, los turboalternadores (movidos por turbinas a vapor o gas) funcionan a gran velocidad, por lo que acostumbran a tener 2 ó 4 polos, siendo el rotor cilíndrico.

Los generadores sincrónicos mostrados son monofásicos; sin embargo, la gran mayoría es de tipo trifásico, debido a las ventajas que este sistema tiene en la producción, transmisión y utilización de grandes potencias. Para la creación de tres tensiones desfasadas 120 grados eléctricos entre sí, se necesitan por lo menos tres bobinas desplazadas 120° eléctricos, tal como se muestra en la Figura 2.5.

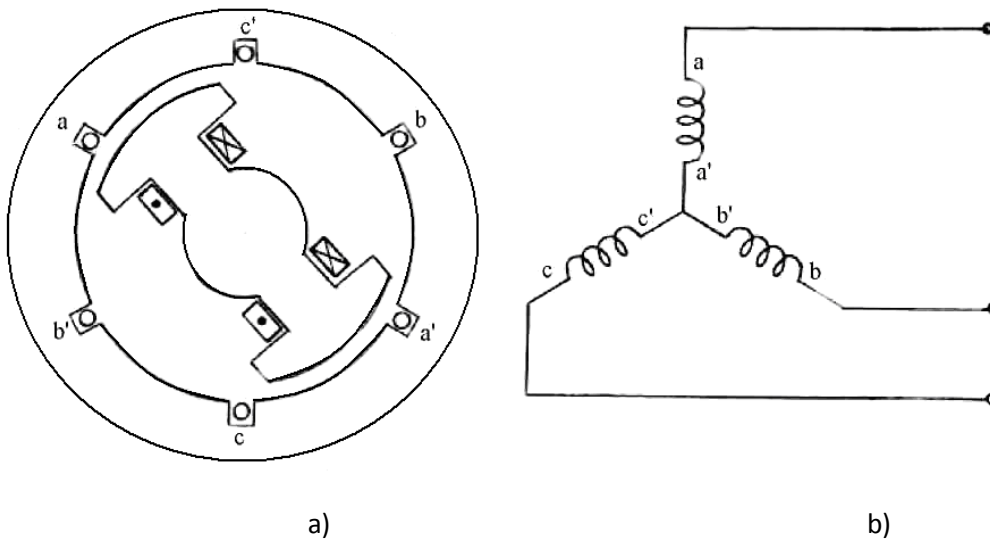


Figura 2.5.- Generador trifásico elemental a) Representación esquemática, b) Conexión en estrella de los enrollados

La máquina síncrona, puede también utilizarse como motor síncrono, cuya velocidad depende del número de polos y de la frecuencia de la corriente de alimentación, de la misma forma que lo expuesto para el generador síncrono, es decir, según las expresiones (2.2) y (2.3). Por lo tanto, un motor síncrono alimentado por corriente alterna de frecuencia constante girará a velocidad constante (velocidad síncrona).

En ambos casos, funcionando como motor o como generador, existe un torque electromagnético y una fuerza contraelectromotriz, siendo éstos los fenómenos más importantes en la Conversión Electromecánica de la Energía.

2.2.2 Máquinas elementales de Corriente Continua (C.C.)

El devanado inducido de un generador de C.C. ó dínamo está situado en el rotor, tomándose la corriente de él, a través de escobillas de carbón. El devanado inductor está en el estator y se excita con Corriente Continua. En la Figura 2.6 a) se representa esquemáticamente una dínamo muy elemental de dos polos. El bobinado inducido consiste en una única bobina de N espiras, cuyos laterales a y a' están situados paralelamente al eje y diametralmente opuestos en el rotor. Este gira a velocidad uniforme, arrastrado mecánicamente por su eje. El flujo en el entrehierro se distribuye según una onda aproximadamente plana como se muestra en la Figura 2.6 b), en lugar de hacerlo en forma sinusoidal como en las máquinas de corriente alterna. La rotación de la bobina induce en ella una tensión que es función del tiempo y cuya forma de onda es semejante a la de la distribución espacial de la densidad de flujo.

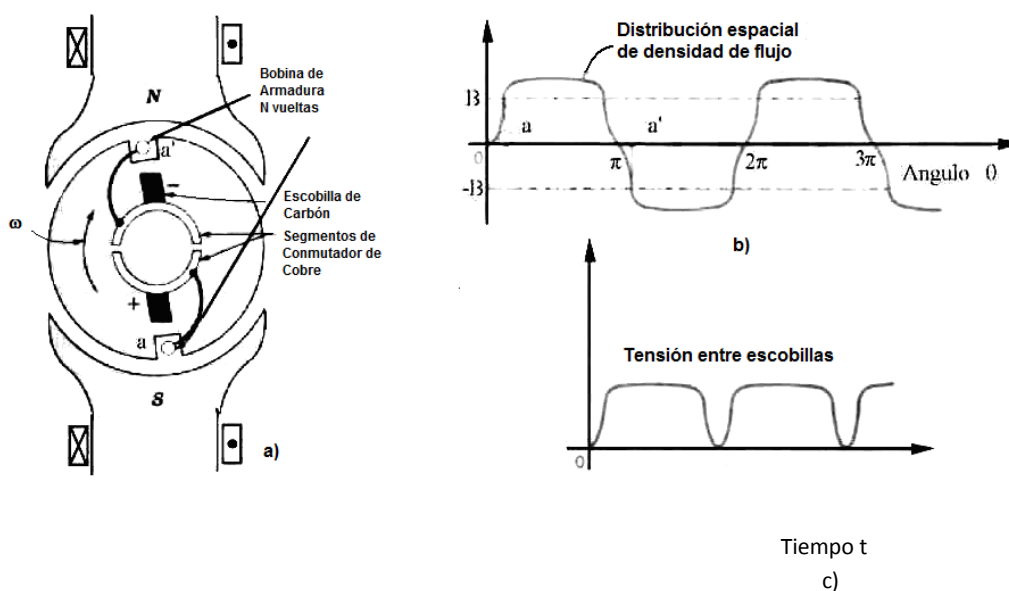


Figura 2.6.- a) Esquema de una dínamo elemental; b) Distribución espacial de B ; c) Onda rectificada de tensión entre escobillas

Como el objetivo de la máquina es generar una tensión continua, es necesario rectificar la alterna producida, lo que se puede hacer exteriormente, a través de rectificadores de semiconductores, por ejemplo, en cuyo caso la máquina es un alternador. En las máquinas clásicas, la rectificación se hace mecánicamente por medio del colector, que es un cilindro formado por segmentos de cobre, denominados delgas

aislados entre si y montados sobre el mismo eje del rotor (aunque eléctricamente aislado de él). A través de unas escobillas fijas que se apoyan sobre la superficie del colector se conecta el devanado inducido con el circuito exterior. Esta es la razón por la cual las máquinas de C.C. tienen el inducido en el rotor.

Para la máquina elemental de la Figura 2.6 a), la onda de tensión entre escobillas, es la que se muestra en la Figura 2.6 c), considerando una distribución espacial de B , tal como la de la Figura 2.6.b).

La máquina descrita puede funcionar también como motor, en cuyo caso se debe aplicar una corriente continua al inducido a través del colector. Tanto si funciona como motor o como generador, se producirá una fuerza electromotriz inducida y un torque electromagnético.

2.2.3 Máquinas elementales de inducción

En estas máquinas, circulan corrientes alternas tanto en el rotor como en el estator. Se utilizan habitualmente como motores, en los que la corriente alterna se aplica directamente al devanado del estator y por inducción (al igual que el transformador) en el rotor, produciéndose un cambio de frecuencia y apareciendo una potencia mecánica. Raramente se utilizan como generadores, debido a que son inadecuados para muchas aplicaciones. Se emplean también como cambiadores de frecuencia.

La Figura 2.7 muestra en forma esquemática, una máquina de inducción con “Rotor tipo Jaula de Ardilla”. El devanado del estator es semejante al de la máquina síncrona. En el rotor, el devanado está habitualmente cortocircuitado y es frecuente que no tenga terminales exteriores. La relación entre la velocidad y el torque es tal, que al aumentar la carga en el eje, la velocidad disminuye ligeramente (deslizamiento).

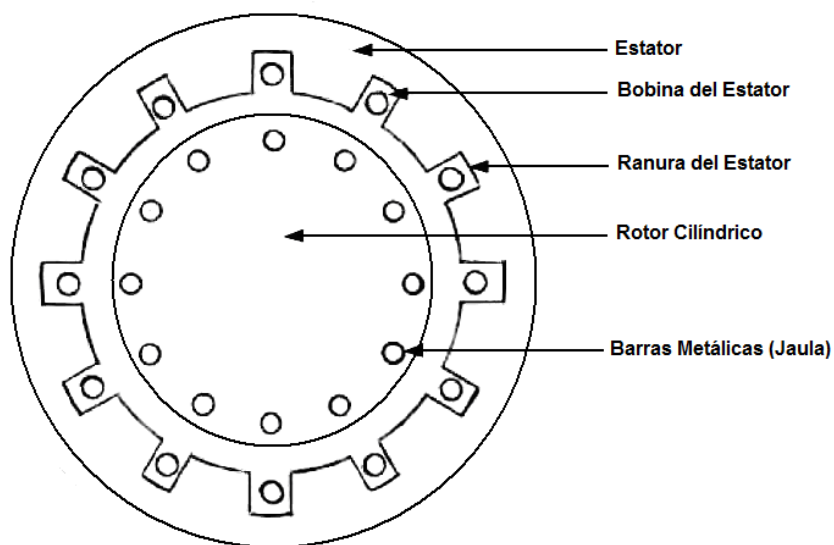


Figura 2.7.- Esquema de una máquina de Inducción con rotor tipo Jaula de Ardilla

2.3 Tensiones inducidas

El estudio de las tensiones inducidas en cualquiera de los devanados de una máquina rotatoria, se reduce a determinar la tensión inducida en las bobinas simples, sumando luego las tensiones individuales de todas las que forman el devanado completo, considerando la forma en que están conectadas entre si. La naturaleza de las tensiones inducidas se estudió en 2.2. A continuación se determinará su magnitud utilizando la ley de Faraday.

2.3.1 Máquinas de Corriente Alterna (C.A.)

La Figura 2.8 muestra la sección de una máquina elemental de CA. El bobinado inducido está formado por una bobina única de N espiras, que abarca 180° eléctricos, o sea, un paso polar completo. La densidad de flujo B creada por el devanado inductor del rotor se puede suponer con una distribución sinusoidal a lo largo de la superficie del estator. El rotor gira a la velocidad angular uniforme de ω rad eléctricos/seg.

Cuando los polos del rotor están alineados con el eje magnético de la bobina del estator, el flujo enlazado con ésta es $N\phi$, siendo ϕ , el flujo por polo en el entrehierro. Para la distribución de B supuesta, se tiene:

$$B(\theta) = B_{m\acute{a}x} \cos \theta \quad (2.4)$$

donde $B_{m\acute{a}x}$ es el valor máximo de B (en el centro del polo del rotor) y θ es el ángulo en radianes eléctricos medido desde el eje magnético del rotor. El flujo ϕ , por polo en el entrehierro se puede determinar como:

$$\phi = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} l r B_{m\acute{a}x} \cos \theta d\theta = 2 l r B_{m\acute{a}x} \quad (2.5)$$

En que l es la longitud axial del rotor y r su radio en el entrehierro.

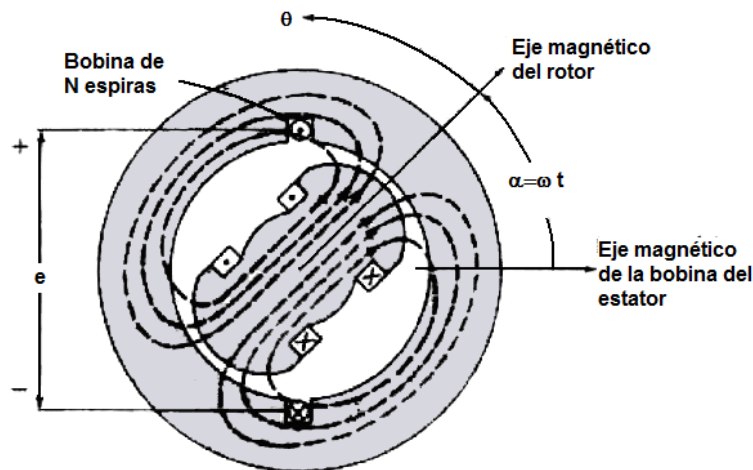


Figura 2.8.- Flujos en una máquina elemental de Corriente Alterna de 2 Polos

En una máquina de P polos, el área correspondiente a cada polo es $2/P$ veces la que tendría una máquina de dos polos de igual longitud y diámetro; luego, el flujo ϕ , es de la forma:

$$\phi = \frac{2}{P} 2lrB_{m\acute{a}x} \quad (2.6)$$

Al girar el rotor, el flujo enlazado varía con el coseno del ángulo α . Si el rotor gira a la velocidad angular ω , $\alpha = \omega t$ y el flujo enlazado por la bobina del estator X es:

$$\lambda = N\phi \cos \omega t \quad (2.7)$$

donde $t=0$ cuando la máxima densidad de flujo coincide con el eje magnético de la bobina del estator. Según la ley de Faraday; la tensión inducida en la bobina es:

$$e(t) = -\frac{d\lambda}{dt} = \omega N\phi \sin \omega t - N \frac{d\phi}{dt} \cos \omega t \quad (2.8)$$

El signo menos que aparece en esta expresión tiene relación con las referencias direccionales de la Figura 2.8, es decir, que al disminuir el flujo enlazado por la bobina, se induce en ella una tensión de signo tal que tienda a producir una corriente que se oponga a esa disminución.

El primer término del segundo miembro de la ecuación (2.8) es la tensión inducida por el movimiento relativo entre la bobina y el campo. El segundo término corresponde al efecto de transformador, que existirá únicamente si hay variación del flujo ϕ , respecto al tiempo, lo que en la mayor parte de las máquinas rotatorias no ocurre. Por ello, se tiene simplemente que:

$$e(t) = \omega N\phi \sin \omega t = E_{m\acute{a}x} \sin \omega t \quad (2.9)$$

$$E_{m\acute{a}x} = \omega N\phi = 2\pi f N\phi \quad (2.10)$$

$$E_{ef} = \frac{E_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} = 4,44 f N\phi \quad (2.11)$$

Estas ecuaciones son idénticas a las obtenidas en los transformadores. Es decir, el movimiento relativo entre la bobina y una onda de distribución espacial de densidad de flujo de amplitud constante en una máquina rotatoria, produce los mismos efectos, en cuanto a tensiones se refiere, que la variación de flujo y bobinas fijas de un transformador.

La tensión inducida es monofásica. Para obtener un sistema trifásico de tensiones, se requiere tres bobinas desplazadas 120° eléctricos entre si, tal como se indicó en la Figura 2.5. En este caso, la ecuación (2.11) da la tensión efectiva por fase si N es el número total de espiras en serie por cada fase.

Todos estos devanados elementales son concentrados y abarcan un paso polar, ya que los dos lados de cualquier bobina están separados 180° eléctricos y todas sus espiras están concentradas en un par de ranuras. En la práctica, las bobinas del inducido

correspondiente a cada fase se distribuyen en un cierto número de ranuras, con el fin de aprovechar mejor el material del núcleo y de los conductores y además mejorar la forma de onda. En ese caso, las tensiones inducidas en cada una de las bobinas que forman un grupo de fase, quedan algo desfasadas entre sí, por lo que al conectarlas en serie, su suma vectorial es menor que la suma aritmética, siendo necesario introducir un factor de reducción K_w , el que en general, para bobinados trifásicos, se acota entre 0,85 y 0,95. Así entonces, para devanados distribuidos, de N_f espiras en serie por fase, la expresión (2.11) queda:

$$E_{ef} = 4,44 f K_w N_f \phi$$

2.3.2 Máquinas de Corriente Continua (C.C.)

Con el colector elemental de la Figura 2.6 a), se produce una rectificación mecánica de onda completa. Suponiendo siempre una distribución sinusoidal del flujo, la onda de tensión entre escobillas tiene la forma indicada en la Figura 2.9. La tensión media (continua) entre escobillas E_a es:

$$E_a = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \omega N \phi \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \omega N \phi \quad (2.13)$$

$$E_a = \frac{2PN\phi n}{60} \quad (2.14)$$

Para una máquina de P polos y expresando la tensión en función de la velocidad mecánica ω_m se tiene, según (2.2)

$$E_a = \frac{PN\phi\omega_m}{\pi} \quad (2.15)$$

Si la velocidad mecánica se expresa en rpm se tiene:

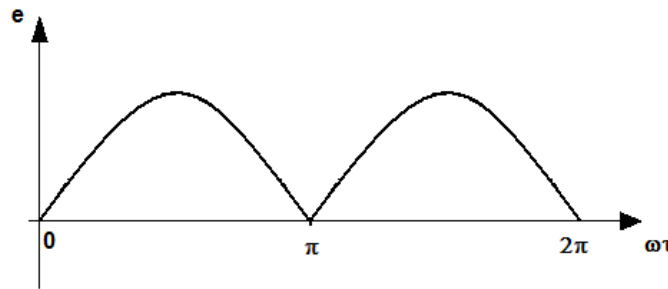


Figura 2.9.- Tensión entre escobillas de una máquina de C.C. elemental

A pesar de que la bobina única aquí supuesta no es lo que se tiene en la realidad, las ecuaciones (2.14) y (2.15) son válidas para la mayor parte de los devanados de C.C., siempre que N corresponda al número total de espiras en serie comprendida entre los terminales del inducido.

Normalmente, la tensión se expresa en función del número total de conductores activos “Z” y del número “a” de circuitos en paralelo del devanado. De esta forma, el número total de espiras en serie N es:

$$N = \frac{Z}{2a} \quad (2.16)$$

Por lo tanto,

$$E_a = \frac{\omega Z}{\pi a} \phi = \frac{PZ \omega_m}{2\pi a} \phi = \frac{PZn}{60a} \phi \quad (2.17)$$

2.4 Fuerzas magnetomotrices de los devanados distribuidos

2.4.1 Devanado de paso completo

La mayor parte de los inducidos tienen el devanado distribuido; es decir, repartido sobre un determinado número de ranuras alrededor de la periferia del entrehierro. Las bobinas individuales se conectan entre sí de forma que el campo magnético resultante tenga el mismo número de polos que el devanado inductor.

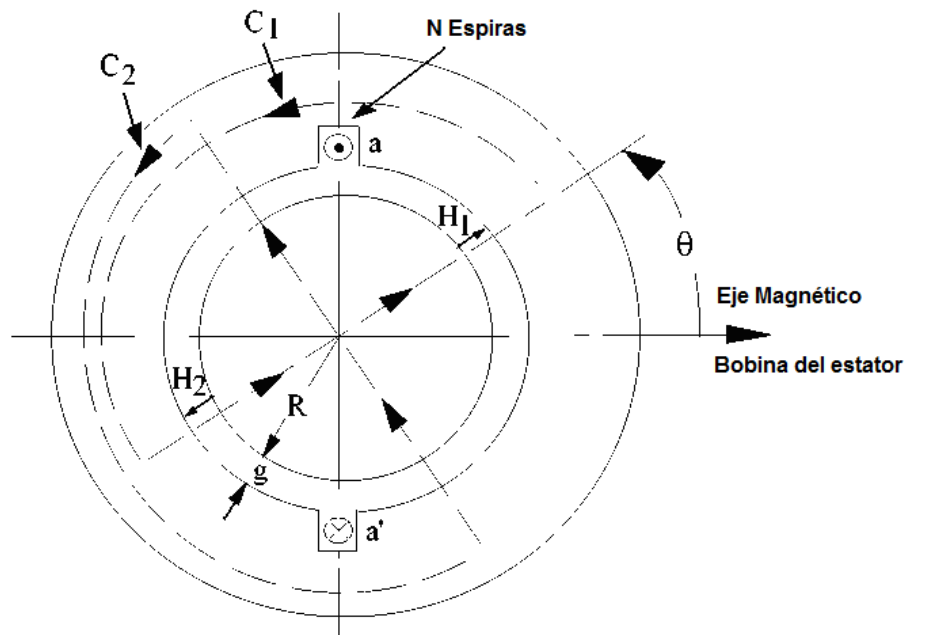


Figura 2.10.- Determinación de la fmm de una bobina concentrada de paso diametral

De la misma forma que se hizo para el estudio de las tensiones inducidas, los campos magnéticos de los devanados distribuidos pueden estudiarse por aproximación, analizando el campo producido por una bobina única de N espiras tal como se muestra en la Figura 2.10. Como la permeabilidad del núcleo del inducido y del inductor es muy

superior a la del aire, se puede suponer que la energía almacenada se encuentra confinada sólo en los entrehierros ($H_{Fe}=0$). Por otra parte, se pueden despreciar los flujos de dispersión y considerar además, que el rotor y el estator tienen superficies lisas, es decir, no tomar en cuenta el efecto de las ranuras. Para entender mejor como determinar la fuerza magnetomotriz (fmm) a partir de las leyes de campos y de las condiciones de simetría, consideremos la Figura 2.10.

Aplicando ley circuital de Ampere en la trayectoria cerrada C_1 se tiene:

$$H_1 g - H_2 g = Ni \quad (2.18)$$

Por condiciones de simetría, $H_1 = -H_2$, donde:

$$H_1 = H(\theta) \text{ y } H_2 = H(\theta + \pi) \quad (2.19)$$

Resolviendo estas ecuaciones se obtiene:

$$F(\theta) = H(\theta)g = -\frac{Ni}{2} \quad \text{para} \quad -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \quad (2.20)$$

Considerando la trayectoria C_2 , el resultado es:

$$F(\theta) = H(\theta)g = \frac{Ni}{2} \quad \text{para} \quad -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} \quad (2.21)$$

Desarrollando en forma rectilínea (2.20) y (2.21) se obtiene la onda de distribución de fmm mostrada en la Figura 2.11.

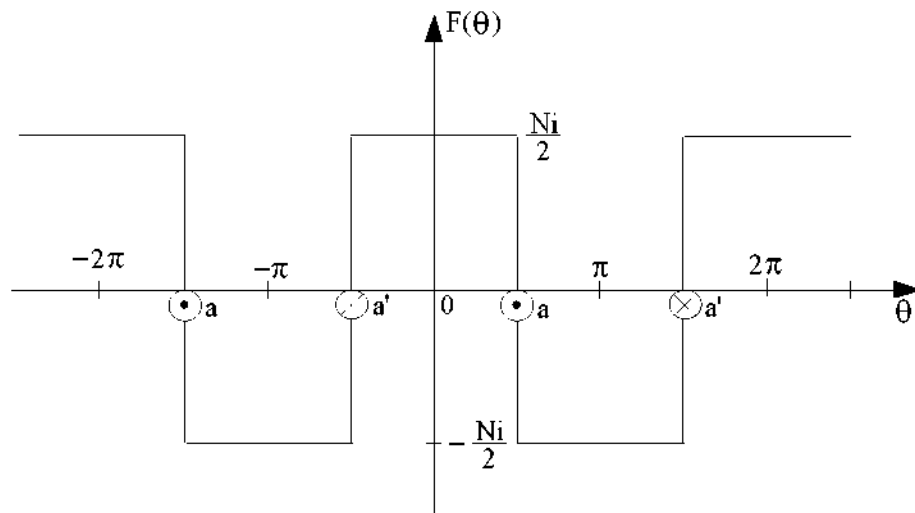


Figura 2.11.- Distribución de fmm en una bobina concentrada de paso diametral

En cuanto a la distribución de la inducción magnética $B(\theta)$, dado que el entrehierro es uniforme y su permeabilidad es μ_0 , tiene la misma forma de $F(\theta)$, es decir:

$$B(\theta) = \frac{\mu_0}{g} F(\theta) = \frac{\mu_0 Ni}{2g} \quad \text{para} \quad -\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$$

$$B(\theta) = \frac{\mu_0}{g} F(\theta) = -\frac{\mu_0 Ni}{2g} \quad \text{para} \quad \frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3\pi}{2}$$
(2.22)

Consideremos ahora, una máquina con cuatro bobinas de paso completo (diametral), tal como se muestra en la Figura 2.12.

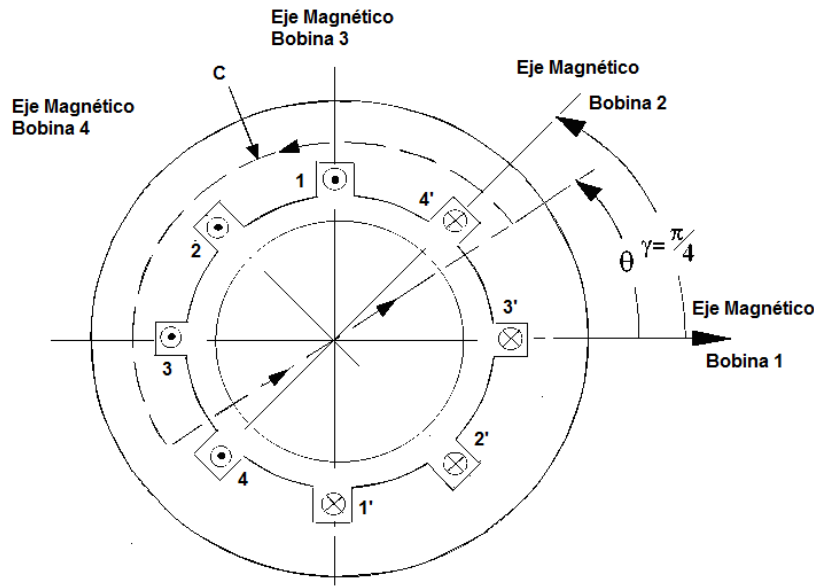


Fig. 2.12.- Cuatro bobinas concentradas de paso completo

Al aplicar la ley circuital de ampere, se deben considerar 8 trayectorias distintas, ya que la separación entre bobinas γ es de $\pi/4$ radianes, lo que hace bastante engorroso el proceso. Sin embargo, como se ha supuesto que el sistema es lineal, puede calcularse separadamente al aporte de cada bobina, sumando los resultados. De todas formas, al aumentar el número de bobinas, el proceso de cálculo por cualquiera de los dos métodos es largo y complejo.

Como se aprecia en la Figura 2.12; el eje magnético de la bobina 2 está desplazado en $\pi/4$ radianes, respecto al de la bobina 1, por lo que según (2.20) y (2.21) podemos escribir, la fmm de la bobina 2 como:

$$F_2(\theta) = \frac{Ni}{2} \quad \text{para} \quad -\frac{\pi}{4} < \theta < \frac{3\pi}{4}$$

$$F_2(\theta) = -\frac{Ni}{2} \quad \text{para} \quad \frac{3\pi}{4} < \theta < \frac{7\pi}{4}$$
(2.23)

Para la bobina 3, el eje queda desplazado en $\pi/2$ radianes, luego:

$$\begin{aligned} F_3(\theta) &= \frac{Ni}{2} \quad \text{para } 0 < \theta < \pi \\ F_3(\theta) &= -\frac{Ni}{2} \quad \text{para } \pi < \theta < 2\pi \end{aligned} \quad (2.24)$$

Para la bobina 4, el eje queda desplazado en $3\pi/4$ radianes y por lo tanto:

$$\begin{aligned} F_3(\theta) &= -\frac{Ni}{2} \quad \text{para } \frac{\pi}{4} < \theta < \frac{5\pi}{4} \\ F_3(\theta) &= -\frac{Ni}{2} \quad \text{para } \frac{5\pi}{4} < \theta < \frac{9\pi}{4} \end{aligned} \quad (2.25)$$

Los desarrollos rectilíneos para cada bobina, así como la suma, se muestran en la Figura 2.13. A partir de estos resultados podemos concluir que la fmm total tiene un valor máximo $F_{\text{máx}}$ dado por:

$$F_{\text{máx}} = 4 \frac{Ni}{2} \quad (2.26)$$

Es decir, siendo n el número de bobinas podríamos escribir en forma general:

$$F_{\text{máx}} = n \frac{Ni}{2} \quad (2.27)$$

El método presentado es una forma gráfica de obtención de la fmm resultante y se puede esperar que a medida que el número de bobinas aumenta, la onda de fmm se asemeje a una onda triangular. Es importante señalar que al proyectar máquinas de corriente alterna, se trata en lo posible que el devanado se distribuya en forma tal, que la fmm resultante se aproxime a una onda senoidal.

La onda rectangular de fmm mostrada en la Figura 2.11, puede descomponerse por el método de Fourier en una componente fundamental y una serie de armónicos, de la forma general:

$$F(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{2} \frac{\cos k\theta}{k} \quad \text{para todo } k \text{ impar} \quad (2.28)$$

La fundamental, es decir para $k=1$, es:

$$F_1(\theta) = \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{2} \cos \theta \quad (2.29)$$

Cuyo valor máximo se tiene cuando $\theta=0$, es decir, en el eje magnético de la bobina.

$$F_{1R}(\theta) = \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{2} nK_{d1} \cos \theta \quad (2.30)$$

Como el devanado se distribuye en varias ranuras, la fmm total (resultante) debe ser menor que la suma de los componentes de cada una de las bobinas individuales, ya que los ejes magnéticos de ellas no coinciden. Así entonces, la fundamental de la fmm resultante $F_{1R}(\theta)$, considerando n bobinas, queda:

$$\text{Si por ejemplo: } i = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \varphi) \rightarrow F_{1R}(\theta) = 0,9NnIK_{d1} \cos(\omega t - \varphi) \cos \theta \quad (2.31)$$

Donde K_{d1} es el coeficiente de distribución para la fundamental y vale:

$$K_{d1} = \frac{\text{sen} \frac{n\gamma}{2}}{n \text{sen} \frac{\gamma}{2}} \quad (2.32)$$

En que γ es el ángulo eléctrico de desplazamiento entre las bobinas, cuyo valor, en este caso es:

$$\gamma = \frac{\pi}{n} \text{ rad} \quad (2.33)$$

2.4.2 Devanado de paso fraccionario

Consideremos la Figura 2.14, que muestra una bobina cuyos lados están a menos de 180°.

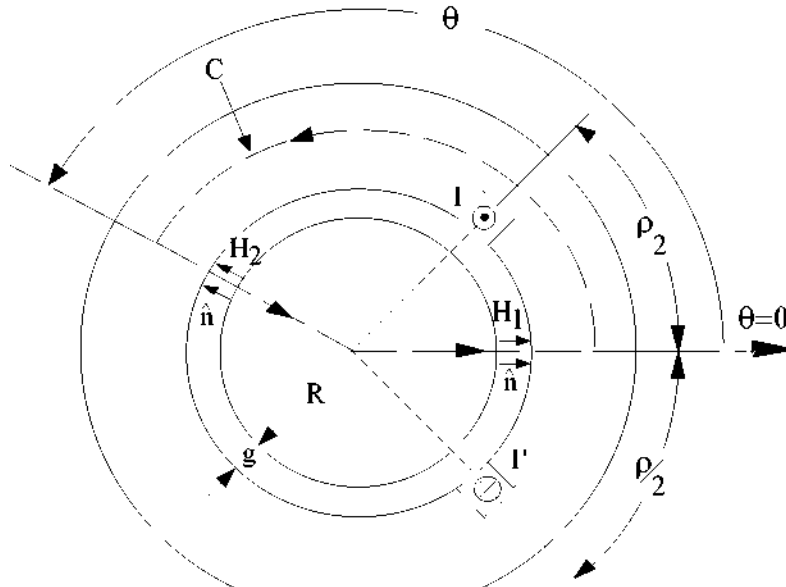


Figura 2.14.- Bobina de paso fraccionario

Aplicando la ley circuital de Ampere en C, se tiene:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni \Rightarrow \vec{H}_1 \cdot \vec{l}_1 + \vec{H}_2 \cdot \vec{l}_2 = Ni \quad (2.34)$$

Pero, en la Figura 2.14 se observa que:

$$\begin{aligned} \vec{H}_1 &= H(\theta=0)\hat{r} = H(0)\hat{r} & \vec{H}_2 &= H(\theta=\theta)\hat{r} = H(\theta)\hat{r} \\ \vec{l}_1 &= l(\theta=0)\hat{r} = g\hat{r} & \vec{l}_2 &= l(\theta=\theta)(-\hat{r}) = -g\hat{r} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Por lo tanto, en (2.34) se tiene:

$$H(0)g - H(\theta)g = Ni \quad (2.36)$$

o bien:

$$F(0) - F(\theta) = Ni \quad (2.37)$$

Evaluando para distintos valores de θ , se obtiene:

$$F(\theta) = F(0) \quad \text{para} \quad -\frac{\rho}{2} < \theta < \frac{\rho}{2} \quad (2.38)$$

$$F(\theta) = F(0) - Ni \quad \text{para} \quad \frac{\rho}{2} < \theta < 2\pi - \frac{\rho}{2}$$

Para determinar $F(0)$, usaremos la ley de conservación de flujo en el rotor, de largo l .

$$\oint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (2.39)$$

donde:

$$\begin{aligned} \vec{B} &= B\hat{r} \\ \hat{n} &= \hat{r} \\ dA &= R l d\theta \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot \hat{n} dA = \int_{-\frac{\rho}{2}}^{\frac{\rho}{2}} B(\theta) R l d\theta + \int_{\frac{\rho}{2}}^{2\pi - \frac{\rho}{2}} B(\theta) R l d\theta = 0 \quad (2.41)$$

pero en el entrehierro, $B(\theta) = \mu_0 F(\theta) / g$ y por lo tanto a partir de (2.41) se obtiene $F(0)$ y de esta forma, $F(\theta)$ queda:

$$\begin{aligned} F(\theta) &= Ni \frac{2\pi - \rho}{2\pi} \quad \text{para} \quad -\frac{\rho}{2} < \theta < \frac{\rho}{2} \\ F(\theta) &= -Ni \frac{\rho}{2\pi} \quad \text{para} \quad \frac{\rho}{2} < \theta < 2\pi - \frac{\rho}{2} \end{aligned} \quad (2.42)$$

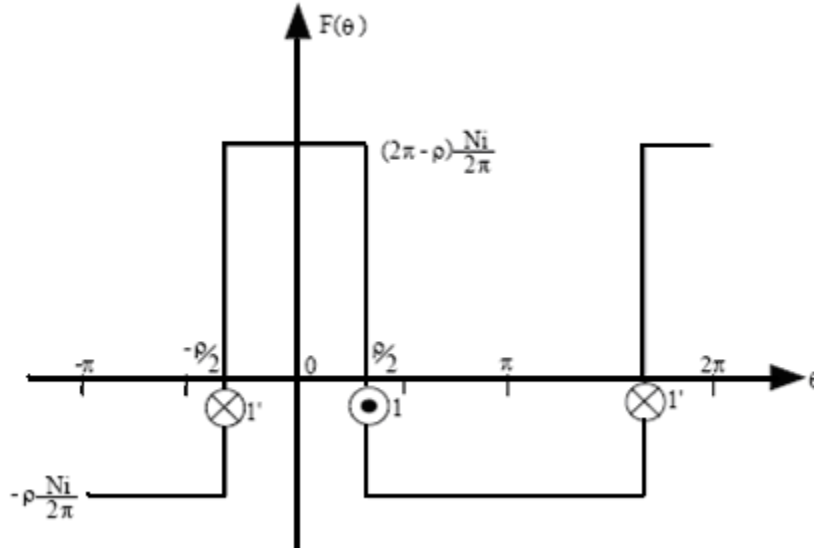


Fig. 2.15.- Distribución de fmm para una bobina de paso fraccionario

La Figura 2.15 muestra la distribución de fmm, que como se aprecia es asimétrica. Al desarrollarla en serie de Fourier se obtiene:

$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{K_{pk}}{k} \cos k\theta \quad (2.43)$$

donde el “Factor de Paso” K_{pk} para el k-ésimo ($k=1,2,3,\dots$) armónico es:

$$K_{pk} = \text{sen} \frac{k\rho}{2} \quad (2.44)$$

La importancia del Factor de Paso está en que a través de él, es posible eliminar o reducir la amplitud de algún armónico y sus múltiplos. En efecto, si $K_{pk}=0$ se tiene que:

$$\text{sen} \frac{k\rho}{2} = 0 \Rightarrow \rho = \frac{2\pi m}{k} \quad \text{con } m = 1,2,3,\dots \quad (2.45)$$

Se utiliza bastante el concepto de paso fraccionario, que corresponde a la razón entre el paso de bobina ρ y π (ρ/π). De acuerdo con esto, si se quiere eliminar, por ejemplo, el quinto armónico, el paso fraccionario debe ser:

$$\frac{\rho}{\pi} = \frac{2\pi m}{5\pi} \quad (2.46)$$

Con $m=1$ se tiene que $\rho/\pi = 2/5$ y con $m=2$; $\rho/\pi = 4/5$. En este caso, se toma la fracción más cercana a la unidad, por lo tanto el paso fraccionario será de 0,8; es decir, el paso de bobina ρ es de 144°.

Si se quiere eliminar el séptimo armónico, $\rho/\pi = 6/7$ ($m=3$). En la práctica, se usa un paso intermedio que permita disminuir ambos armónicos. Este paso es 5/6.

Aún cuando la distribución del campo para una bobina de paso fraccionario es asimétrica, es posible lograr simetría de campo, si se realiza el devanado, de manera que frente a cada bobina, se tenga otra igual y recorrida por la misma corriente. La Figura 2.16 muestra la disposición de las bobinas.

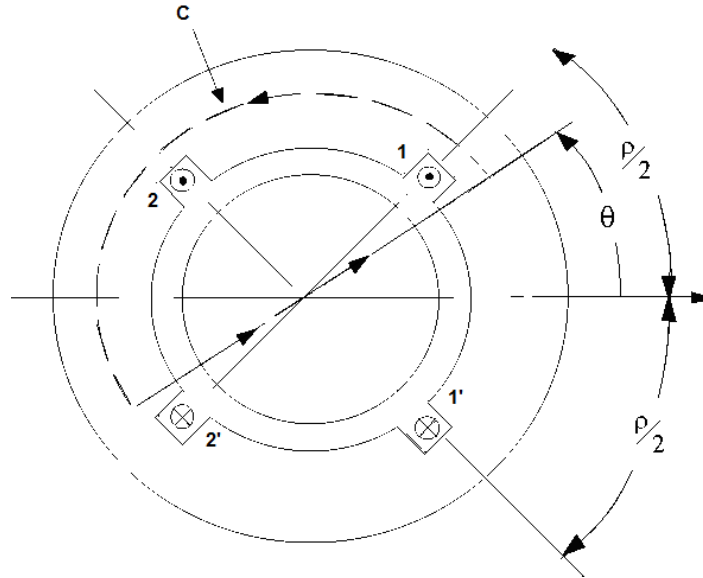


Fig. 2.16.- Dos bobinas de paso fraccionario que producen una distribución de fmm simétrica.

Al evaluar la fmm total para los diferentes tramos se puede obtener por inspección:

$$\begin{aligned}
 F(\theta) &= 2 \frac{Ni}{2} & 0 < \theta < \frac{\rho}{2} \\
 F(\theta) &= 0 & \frac{\rho}{2} < \theta < \pi - \frac{\rho}{2} \\
 F(\theta) &= -2 \frac{Ni}{2} & \pi - \frac{\rho}{2} < \theta < \pi + \frac{\rho}{2} \\
 F(\theta) &= 0 & \pi + \frac{\rho}{2} < \theta < 2\pi - \frac{\rho}{2} \\
 F(\theta) &= 2 \frac{Ni}{2} & 2\pi - \frac{\rho}{2} < \theta < 2\pi
 \end{aligned} \tag{2.47}$$

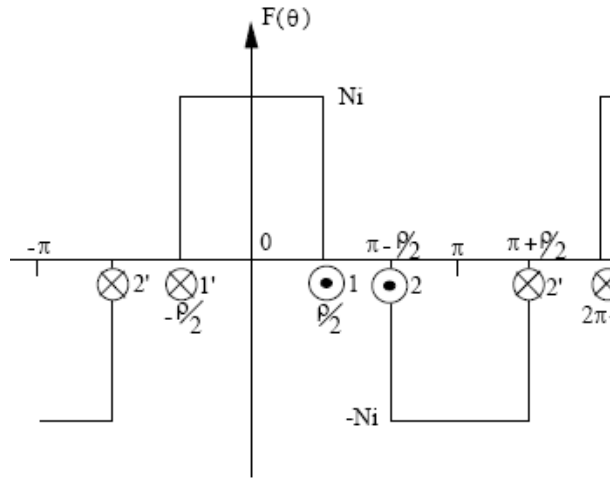


Fig. 2.17.- Distribución de fmm de dos bobinas de paso fraccionario

La Figura 2.17, corresponde a la distribución de la fuerza magnetomotriz que, como se puede apreciar, es simétrica, en cuyo caso el desarrollo en serie de Fourier no contiene armónicos pares. Por lo tanto, para n bobinas de paso fraccionario, la fmm resultante se puede escribir:

$$F(\theta) = \frac{4}{\pi} \frac{Ni}{2} n \sum_{k=1}^{\infty} K_{pk} K_{dk} \frac{\cos k\theta}{k} \quad (2.48)$$

Donde el Factor de Paso K_{pk} fue definido en (2.44) y el Factor de Distribución para el k -ésimo armónico K_{dk} es:

$$K_{dk} = \frac{\frac{\sin \frac{nk\gamma}{2}}{2}}{n \frac{\sin \frac{k\gamma}{2}}{2}} \quad (2.49)$$

Por otra parte se puede definir ahora el Factor de Devanado K_{wk} , para el k -ésimo armónico como el producto entre el Factor de Distribución y el Factor de Paso, es decir:

$$K_{wk} = K_{dk} K_{pk} \quad (2.50)$$

2.5 Torque en máquinas de polos no salientes

El funcionamiento de cualquier dispositivo electromagnético, como componente de un sistema electromecánico, puede definirse en función de las ecuaciones de tensión (Ley de Kirchhoff) y su torque electromagnético. Deduiremos aquí, las ecuaciones de tensiones y torque considerando una máquina elemental; sin embargo, los resultados pueden aplicarse luego, a máquinas más complejas. Para la deducción, se puede partir de dos puntos de vista distintos, a saber, el punto de vista de circuitos magnéticos acoplados, o bien haciendo el estudio directamente del campo magnético. Se puede demostrar que básicamente, ambos conducen a resultados semejantes. En este curso obtendremos el torque, considerando solamente el punto de vista de circuitos magnéticos acoplados.

Consideremos la máquina elemental de la Figura 2.18, con un devanado en el estator (s) y otro en el rotor (r), distribuidos en un cierto número de ranuras de forma que la onda de distribución de fmm espacial sea aproximadamente senoidal. En la Figura 2.18 a), los lados de bobina s, s' y r, r'; señalan la posición central de la zona abarcada por los conductores distribuidos, pudiéndose representar también éstos, en la forma mostrada en la Figura 2.18 b), donde se ha indicado además, la dirección de las tensiones y corrientes (flujos).

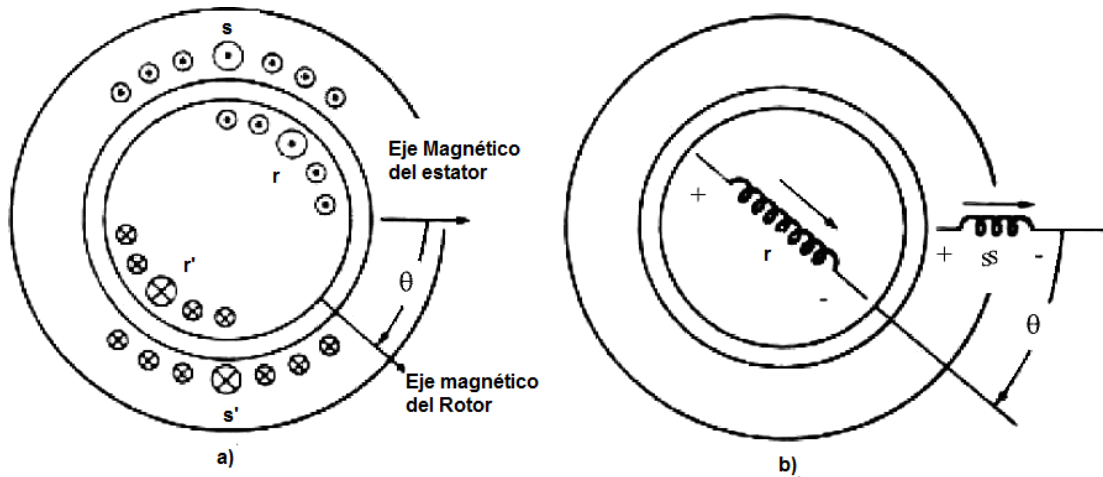


Figura 2.18.- Máquina elemental de dos polos con entrehierro uniforme. a) Distribución de los devanados, b) representación esquemática

Con las mismas consideraciones hechas en 2.4.1, podemos decir que las autoinductancias del estator L_{ss} y del rotor L_{rr} son constantes, pero la inductancia mutua estator-rotor L_{sr} depende del ángulo θ , de manera que tiene un máximo positivo cuando $\theta = 0$ ó 2π ; se anula para $\theta = \pm\pi/2$ y tiene un máximo negativo cuando $\theta = \pm\pi$. Si las ondas de distribución de fmm son senoidales y el entrehierro es uniforme se tendrá que:

En que L_{sr} es el valor máximo (constante) de $L_{sr}(\theta)$, el que se obtiene cuando coinciden los ejes magnéticos del estator y rotor.

$$L_{sr}(\theta) = L_{sr} \cos \theta \quad (2.51)$$

Por otra parte, los flujos enlazados por el estator λ_s y rotor λ_r son, respectivamente:

$$\begin{aligned}\lambda_s &= L_{ss}i_s + L_{sr}(\theta)i_r \\ \lambda_r &= L_{sr}(\theta)i_s + L_{rr}i_r\end{aligned}\quad (2.52)$$

o bien, en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr}(\theta) \\ L_{sr}(\theta) & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}\quad (2.53)$$

Las tensiones en los terminales, considerando que los devanados tienen resistencias R_s y R_r para el estator y rotor respectivamente son:

$$\begin{aligned}v_s &= R_s i_s + \frac{d\lambda_s}{dt} \\ v_r &= R_r i_r + \frac{d\lambda_r}{dt}\end{aligned}\quad (2.54)$$

es decir:

$$\begin{aligned}v_s &= R_s i_s + L_{ss} \frac{di_s}{dt} + L_{sr} \cos(\theta) \frac{di_r}{dt} - L_{sr} i_r \sin\theta \frac{d\theta}{dt} \\ v_r &= R_r i_r + L_{rr} \frac{di_r}{dt} + L_{sr} \cos\theta \frac{di_s}{dt} - L_{sr} i_s \sin\theta \frac{d\theta}{dt}\end{aligned}\quad (2.55)$$

en que $d\theta/dt$ es la velocidad instantánea en radianes eléctricos por segundo. Los segundos y terceros términos del segundo miembro de (2.55) son tensiones inducidas semejantes a las que se obtienen en circuitos estáticos acoplados, tales como los devanados de transformadores. Los cuartos términos se deben al movimiento mecánico y relacionan el intercambio de potencia entre los sistemas eléctrico y mecánico.

El torque electromagnético puede evaluarse a partir de la coenergía del campo magnético en el entrehierro, en que ésta vale:

$$W'_m(i_s, i_r, \theta) = \frac{1}{2} L_{ss} i_s^2 + \frac{1}{2} L_{rr} i_r^2 + L_{sr} i_s i_r \cos\theta \quad (2.56)$$

Luego, el torque eléctrico T^e es de la forma:

$$T^e = \frac{\partial W'_m(i_s, i_r, \theta_m)}{\partial \theta_m} = \frac{\partial W'_m(i_s, i_r, \theta)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{d\theta_m} \quad (2.57)$$

Las derivadas se deben hacer respecto al ángulo mecánico θ_m , debido a que se está operando variables mecánicas. Aplicando (2.57) a (2.56) y considerando (2.1) se obtiene finalmente:

$$T^e = -\frac{P}{2} L_{sr} i_s i_r \sin\left(\frac{P}{2} \theta_m\right) \quad (2.58)$$

El torque queda expresado en newton-metro y el signo negativo indica que actúa en un sentido tal, que tiende a alinear los campos magnéticos de estator y rotor.

Las ecuaciones (2.55) y (2.58) constituyen un conjunto de tres ecuaciones diferenciales que relacionan entre si las variables eléctricas v_s , i_s , v_r , i_r y las variables mecánicas T^e y θ . Estas ecuaciones, junto con las limitaciones impuestas a las variables eléctricas por la red exterior conectada a sus terminales (alimentación o carga e impedancias exteriores) ó a las variables mecánicas (torques aplicados, inercias, roces, etc.) determinan el comportamiento del dispositivo.

En el caso en que la máquina tenga varios devanados tanto en el rotor como en el estator, se pueden aplicar los mismos principios generales del modelo elemental de la Figura 2.18. Cada devanado tiene su propia autoinducción y su inducción mutua con los restantes. Las inductancias propias y mutuas entre devanados situados en el mismo lado del entrehierro serán constantes bajo las suposiciones hechas. Pero entre devanados situados a uno y otro lado del entrehierro, la inductancia mutua varía con el coseno del ángulo formado por sus respectivos ejes. El torque se puede expresar como suma de términos semejantes a la ecuación (2.58).

En las máquinas de entrehierro no uniforme (de polos salientes), también es posible aplicar estos mismos principios para la determinación del torque. Sin embargo, en este caso, las inductancias propias del estator ó del rotor ó de ambos, dependerán de la posición del rotor; es decir, también serán funciones del ángulo formado por sus respectivos ejes.

Capítulo 3 Energía Eólica

3.1 Introducción

La producción de energía eléctrica mediante el uso de generadores eólicos, se basa en el mismo principio que los molinos de viento: aprovechar la energía el viento para hacer girar una turbina, la cual está convenientemente acoplada a un generador eléctrico. Existen diversas turbinas con diseños y tamaños adecuados para diferentes perfiles de viento, a modo de ejemplo se pueden nombrar los aerogeneradores con velocidad fija, velocidad variable, modelos bi-pala, tri-pala, etc.

Una planta de generación eólica se compone de un conjunto de turbinas o generadores eólicos debidamente controlados, con el fin de obtener un efecto aditivo sobre las potencias que genera cada turbina individualmente. En este aspecto el sistema de control posee una componente de control individual para cada turbina y una componente de control supervisor del parque eólico en su conjunto (que coordina y da cursos de acción sobre los controles individuales).

Actualmente existen granjas eólicas operando en forma independiente o conectadas a la red eléctrica. Algunos datos técnicos que motivan la investigación de generación eléctrica a partir de la energía eólica se resumen a continuación:

- Si bien la generación eólica era prácticamente nula en la década del 80, ha existido un crecimiento importante en el último tiempo: en 1986 se generaron más de 10TWh y en la actualidad (2004) se han superado los 20TWh de generación en parques eólicos. Este crecimiento hace prever que en un par de décadas, el 12% de la producción mundial de electricidad tendrá su origen a partir de los recursos eólicos. En el caso de Europa se espera que este porcentaje llegue al 20%.

- Desde el punto de vista de integración al sistema, se estima que no existen obstáculos sustanciales para que la energía eólica alcance porcentajes de penetración de mercado del 20%. Para quienes apoyan este tipo de tecnologías, esta cifra es incluso conservadora, al respecto la experiencia práctica obtenida en la zona occidental de Dinamarca muestra que es posible alcanzar niveles punta de hasta el 50% durante períodos de mucho viento.
- Alemania, España, Dinamarca y Estados Unidos lideran la producción eólica, sin embargo otros países no desarrollados como China, India o Marruecos también han incorporado esta forma de generación. Por ejemplo, China tiene 10.000 microturbinas, que si bien producen poca electricidad en términos absolutos, cubren en forma completa importantes servicios.
- En términos técnicos, la confiabilidad de los sistemas eólicos ha cambiado sustancialmente de un 60% en 1980 a un 97-99% de las turbinas están disponibles en la actualidad. Adicionalmente, los avances tecnológicos han permitido optimizar el tamaño de las turbinas, con lo cual las exigencias de terreno han dejado de ser una restricción para este tipo de centrales. En la actualidad las plantas eólicas no consumen más terreno que una central de carbón, incluyendo la mina. En algunas centrales europeas los granjeros cultivan el suelo hasta la base de las torres, e inclusive pastorean en las calles de servicio.

3.1.1 Desarrollo histórico de la generación eólica.

Durante el invierno de 1887-88 Charles F. Brush construyó la que hoy se cree es la primera turbina eólica, que operaba a través un dínamo para generación de electricidad. La turbina, situada en Cleveland, Ohio, poseía un diámetro de rotor de 17 metros y 144 aspas fabricadas en madera de cedro, pese a su tamaño, el generador era solamente un modelo de 12 [kW] (ver figura 3.1). Esto se debe al hecho de que las turbinas eólicas de giro lento del tipo americano no tienen una eficiencia media particularmente alta.



Fotografía 3.1: Generador de Brush

Posterior a Charles Brush, fue el danés Poul la Cour quién continuó con la investigación de las turbinas eólicas. Su trabajo fue particularmente relevante en la experimentación de las características aerodinámicas mediante túneles de viento. Fue él quién fundó la "Society of wind electricians" en 1905 y quién descubrió que las turbinas eólicas de giro rápido con pocas palas de rotor son más eficientes para la producción de electricidad que aquéllas de giro lento.

El desarrollo de la industria eólica se mantuvo sin muchos cambios hasta 1940 cuando F.L Smidth experimentó con modelos de aerogeneradores bi-pala y tri-pala. Posteriormente Johannes Juul (alumno de Poul la Court) fue quién inició el desarrollo de los primeros aerogeneradores a través de generadores eléctricos de corriente alterna.

El 1980, la industria eólica producía modelos comerciales de hasta 55 [kW], en la actualidad los modelos comerciales llegan hasta los 2.5 [MW]. Innovaciones tanto en los materiales de las turbinas, geometrías aerodinámicas, sistemas de control aerodinámicos y electrónicos han hecho posible el desarrollo de la generación eólica en forma cada vez más eficientes y con un costo de kilowatt-hora muy cercano a niveles competitivos de centrales de generación tradicionales.



Fotografía 3.2: Parque eólico de Nysted, Dinamarca

3.1.2 Desarrollo en Chile

En el caso de Chile, la experiencia de generación eólica fue impulsada hace pocos años por la empresa de electricidad SAESA a través de la central eólica Alto Baguales. Esta central entró en operación en noviembre del 2001 y se encuentra situada aproximadamente a 5 Km. de Coyhaique.

La central cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 1980 [MW] distribuida en tres turbinas eólicas idénticas modelo V47 de la empresa VESTAS de 660[KW] cada una, que representan aproximadamente el 10% de la capacidad total instalada en el Sistema de Aysén.

Las turbinas del parque tienen a una altura de 40 metros sobre el nivel del suelo y un diámetro del rotor que alcanza los 47 metros (tres aspas), poseen generadores asíncronos de velocidad variable y están diseñadas para operar directamente conectadas hacia la red con frecuencia de 50 [Hz]. Puesto que las turbinas generan a un nivel de tensión de 690 [V] deben conectarse al sistema a través de un transformador elevador de tensión de 690/33000 [V].

Cada unidad posee sistemas de control de potencia de tipo aerodinámico y eléctrico, cuenta con un sistema aerodinámico tipo pitch que le permite orientar las aspas para un mejor aprovechamiento de los vientos. Adicionalmente, los aerogeneradores cuentan con un sistema de control OptiSlip, que básicamente consiste en controlar el deslizamiento del generador en un rango del 1% al 10% variando el valor de la resistencia rotórica. De este modo se puede tener una velocidad de giro variable entre las 1515 [RPM] y las 1650 [RPM].

Para el correcto control de reactivos, cada unidad cuenta con un banco de condensadores de cuatro pasos inteligentemente conmutados, lo cual permite operar las

turbinas con factor de potencia prácticamente unitario (0.98 inductivo). Los condensadores son conectados poco después de la conexión de la turbina y desconectados poco antes que ellas, esto es debido a que la conexión y desconexión de los aerogeneradores se lleva a cabo mediante partidores suaves en base a tiristores que evitan las sobrecorrientes de entrada y consecuentemente las perturbaciones sobre la red.

La experiencia en estos 15 meses de operación indica que no han existido perturbaciones significativas del sistema con la operación del parque eólico. La producción de energía anual del parque (considerando las tres unidades) ha alcanzado los 6.5 [GWh] durante el año 2002.

De acuerdo con la información presentada es posible observar que la experiencia de la incorporación de tecnologías de generación eólica en el Sistema de Aysén ha sido exitosa. Lo que esto sienta un precedente favorable para el desarrollo de futuros proyectos eólicos en nuestro país.

OJO. Hablar del Canelo

3.2 Caracterización del recurso eólico

3.2.1 Condiciones del emplazamiento

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las aspas del rotor de los aerogeneradores. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire y de la velocidad del viento, ambos factores se encuentran fuertemente condicionados por el emplazamiento elegido para el parque eólico, en lo que se refiere a la altura y rugosidad del terreno, temperaturas y humedad registradas y presencia de obstáculos o efectos aceleradores que son propios de la geografía.

- Densidad del aire: un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso). Así, la energía cinética del viento depende en una relación directamente proporcional de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen. A presión atmosférica normal y a 15 [°C] la densidad del aire es 1,225 [Kg/m³] (medida de referencia estándar para la industria eólica). Esta densidad aumenta ligeramente con el aumento de humedad y disminuye con el aumento de la temperatura. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso.
- Rugosidad: En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento. Se caracteriza mediante dos parámetros, los cuales están relacionados entre si: Clase de Rugosidad y Longitud

de Rugosidad. La Clase de Rugosidad es una escala cualitativa de las condiciones del terreno, donde 0 corresponde al caso ideal y 4 al terreno con máxima oposición al viento. Por su parte, la Longitud de Rugosidad, medida en metros, cuantifica la significancia de los obstáculos. Así, los bosques y las grandes ciudades (clase de rugosidad 3 a 4) ralentizan mucho el viento, mientras que las superficies de agua tienen una influencia mínima sobre el viento (clase de rugosidad cercana a 0). Dependiendo del tipo de rugosidad se condiciona la variación de la velocidad del viento con la altura (cizallamiento) de acuerdo con la fórmula:

$$u(z) = \frac{\ln(z/R_0)}{\ln(z_R/R_0)} u(z_R) \quad (3.1)$$

Donde:

Z es la altura donde estará situado el rotor de la turbina.

$u(z)$ es la velocidad del viento a la altura Z.

z_R es altura de referencia donde está situado el sensor.

R_0 : rugosidad del terreno.

- Influencia de los obstáculos: En áreas cuya superficie es muy accidentada se producen turbulencias (flujos de aire, ráfagas, remolinos y vórtices) que cambian tanto en velocidad como en dirección del viento. Las turbulencias disminuyen la posibilidad de utilizar la energía del viento de forma efectiva en un aerogenerador, así como también provocan mayores roturas y desgastes en la turbina eólica. Adicionalmente, cuando el obstáculo se sitúa a menos de un kilómetro de una turbina, se produce un efecto de frenado del viento que aumenta con la altura y la longitud del obstáculo, este efecto es más pronunciado cerca del obstáculo y cerca del suelo.
- Efectos aceleradores: La influencia del contorno del terreno, también llamado orografía del área, incide en la calidad de los vientos. Por ejemplo, si se elige un emplazamiento en un paso estrecho o entre montañas, el aire tiende a comprimirse en la parte alta de la montaña que está expuesta al viento produciéndose un efecto acelerador conocido como "efecto túnel". En general, situar un aerogenerador en un túnel de este tipo es una forma de obtener velocidades del viento superiores a las de las áreas colindantes. Sin embargo, el túnel debe estar suavemente enclavado en el paisaje para que no existan turbulencias que anulen su efecto. Por otro lado, el viento atravesando las cimas de las montañas aumenta su velocidad y densidad, en tanto que cuando sopla fuera de ellas se vuelve menos denso y veloz, este fenómeno se denomina "efecto

de la colina”. Es muy común ubicar turbinas eólicas en colinas o estribaciones dominando el paisaje circundante, donde las velocidades de viento son superiores a las de las áreas circundantes.

Otras consideraciones que hay que tener en cuenta a la hora de elegir el emplazamiento definitivo del parque eólico es su cercanía con la red eléctrica de modo que los costos de cableado no sean prohibitivamente altos. Los generadores de las grandes turbinas eólicas modernas generalmente producen la electricidad a 690 [V], por lo cual se hace necesaria la instalación de un transformador de tensión cerca de la turbina o dentro de la torre de la turbina para convertir la tensión al valor de la red.

Finalmente, el terreno debe permitir realizar las cimentaciones de las torres de las turbinas así como la construcción de carreteras que permitan la llegada de camiones pesados hasta el emplazamiento.

3.2.2 Variabilidad del viento

La producción de potencia a partir del recurso eólico se encuentra condicionada por la variabilidad de la velocidad del viento, esta variabilidad puede definirse bajo distintos horizontes de tiempo: variabilidad instantánea o de corto plazo (segundos), variabilidad diaria (día y noche), variabilidad estacional (invierno y verano) y variabilidad a través de los años.

➤ *Variabilidad instantánea del viento (o corto plazo)*

La velocidad del viento está fluctuando constantemente y por ende su contenido energético, las magnitudes de la fluctuación depende por una parte de las condiciones climáticas así como también de las condiciones de superficie locales y de los obstáculos. A continuación se muestra un gráfico típico de estas variaciones.

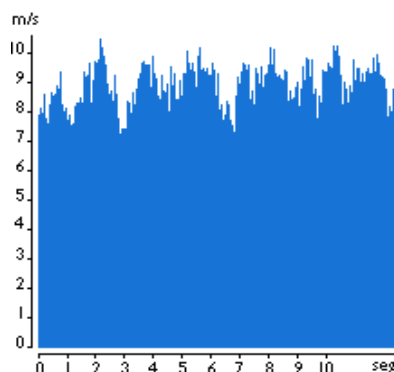


Figura 3.3: Variabilidad de la velocidad del viento en el corto plazo

La figura muestra que las variaciones instantáneas oscilan en torno al 10% del valor promedio. En general, las variaciones de corto plazo, es decir aquellas fluctuaciones más rápidas, serán compensadas por la inercia del rotor de la turbina eólica.

➤ Variaciones diurnas (noche y día) del viento

En la mayoría de las localizaciones del planeta el viento sopla más fuerte durante el día que durante la noche, esta variación se debe principalmente a las diferencias de temperatura, las cuales son mayores durante el día (presencia del sol). Adicionalmente, el viento presenta también más turbulencias y tiende a cambiar de dirección más rápidamente durante el día que durante la noche.

El gráfico siguiente muestra el efecto de la variabilidad del viento diurna para estudios realizados en Dinamarca (Beldringe), el eje de las abscisas representa el Tiempo Universal Coordinado (UTC).

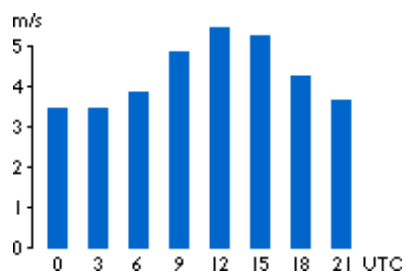


Figura 3.4: Variabilidad de la velocidad del viento diurna (Beldringe, Dinamarca)

➤ Variaciones Estacionales del Viento

El viento también sufre variaciones dependiendo de las estaciones del año, en zonas templadas los vientos de verano son generalmente más débiles que los de invierno. El siguiente gráfico ilustra el efecto de la variabilidad del viento estacional para estudios realizados en Dinamarca (el eje de las ordenadas corresponde al índice de energía eólica, parámetro proporcional a la velocidad del viento).

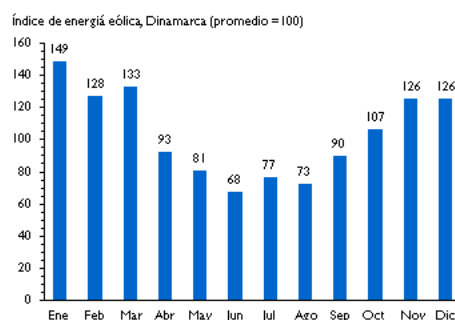


Figura 3.5: Variabilidad de la velocidad del viento estacional

➤ *Variaciones anuales en la energía eólica*

Las condiciones eólicas pueden variar de un año al siguiente, típicamente, estos cambios son menores. Estudios realizados en Dinamarca muestran que la producción de los aerogeneradores tiene una variación típica de alrededor de un 9% a un 10%.

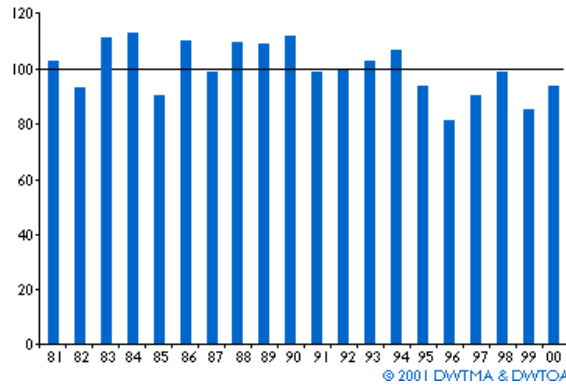


Figura 3.6: Variaciones anuales de la velocidad del viento

3.2.3 Potencia extraíble del viento

Describir la variación de las velocidades del viento resulta muy importante tanto desde el punto de vista de los proyectistas de turbinas (optimización del diseño de aerogeneradores y minimización de los costos de generación), como para los inversionistas que necesitan esta información para estimar los ingresos por producción de electricidad.

➤ ***Distribución de Weibull***

En forma empírica se ha comprobado que en la mayoría de las localizaciones del mundo, si se miden las velocidades del viento a lo largo de un año, en la mayoría de las áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes. En general el comportamiento de los vientos se modela a través de una distribución de probabilidades llamada Distribución de Weibull, según se muestra en el siguiente gráfico:

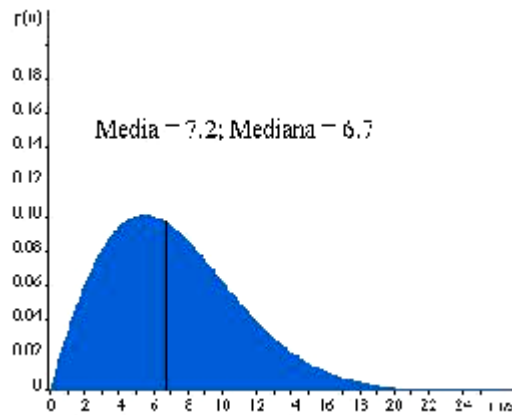


Figura 3.7: Distribución de Weibull

➤ **Curvas de potencia de entrada, disponible y generada**

A partir de la distribución de Weibull, es posible calcular la potencia de entrada de un aerogenerador, para ello se toma la distribución de los vientos y se calcula el valor de la potencia (función cúbica de la velocidad del viento) para intervalos definidos de velocidad (cada 0.1 m/s por ejemplo) de acuerdo con la fórmula:

$$p = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot r^2 \quad (3.2)$$

Donde:

p es la potencia factible de ser extraída del viento.

ρ es la densidad del aire.

v es la velocidad del viento.

r es el radio del rotor.

Los resultados obtenidos son ponderados por las frecuencias con las que se produce cada uno de los intervalos de viento, generándose una nueva curva (similar a la distribución de Weibull) denominada “Curva de Potencia de Entrada”, es decir, representa la potencia de entrada del aerogenerador. Esta curva normalmente se encuentra normalizada por el barrido del rotor¹, obteniéndose una densidad de potencia eólica por metro cuadrado.

Una vez generada la curva anterior, para calcular la potencia disponible (útil) de la turbina, debe considerarse que existe un límite máximo equivalente al 59% (Ley de Betz), para que el aerogenerador convierta la potencia de entrada en potencia eléctrica. Este límite considera una turbina ideal, de modo que para obtenerse la potencia neta generada por un aerogenerador real, debe tomarse la “Curva de Potencia del Aerogenerador”

(entregada por el fabricante) y multiplicarla por la probabilidad de ocurrencia de las distintas velocidades de viento según la distribución de Weibull (ver gráfico).

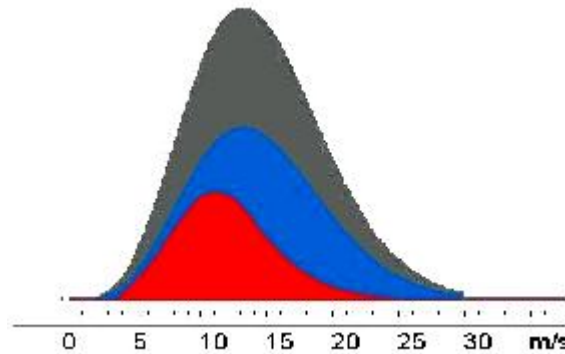


Figura 3.8: Potencia de entrada, disponible y de salida de un aerogenerador

Cabe notar que la relevancia de estos cálculos radica en poder calcular los valores de potencia promedio que pueden ser obtenidos de aerogeneradores situados en emplazamientos específicos. En general, el valor de la potencia promedio obtenida con las curvas de potencia difiere del valor que se obtiene al calcular la potencia como función cúbica de la velocidad promedio del viento (error de calculo bastante frecuente y que puede conllevar a errores serios de dimensionamiento).

➤ **Curva de potencia de un aerogenerador**

La “Curva de Potencia” de un aerogenerador es la relación de potencia que es capaz de generar una turbina bajo distintas condiciones de viento, se compone de un tramo inicial desde velocidades de viento hasta la velocidad de cut-in donde la generación es nula (de hecho si se conecta el aerogenerador actúa como motor), seguido de un tramo casi lineal de pendiente positiva que deriva en un tramo de potencia constante para un rango determinado de velocidades (en el gráfico entre los 15[m/s] y los 25 [m/s]). Finalmente para velocidades de viento superiores al límite de cut-out, la turbina se desconecta y la generación de potencia vuelve a ser nula.

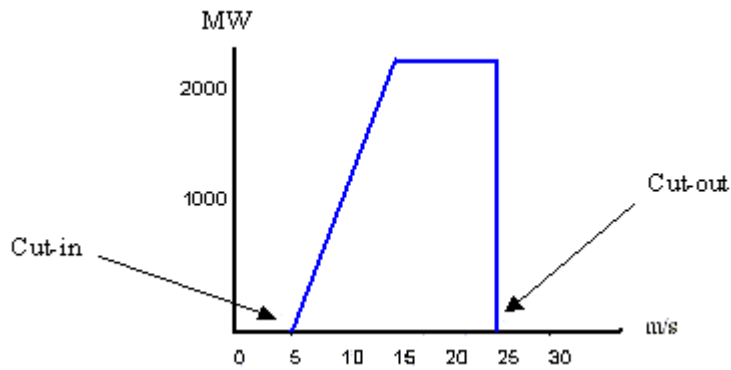


Figura 3.9: Curva de potencia de un aerogenerador

3.3 Control de una central eólica

Los aspectos más relevantes de control para una planta de generación eólica tiene relación con dos aspectos fundamentales: Control sobre la operación de los aerogeneradores y Control de la potencia eléctrica inyectada a la red

3.3.1 Control sobre la operación de los aerogeneradores

A continuación se presentan los mecanismos de control más utilizados actualmente:

➤ Mecanismo de orientación (“yaw control”):

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento de modo de evitar un error de orientación.

Se dice que la turbina eólica tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento, por lo cual una menor proporción de la energía del viento pasará a través del área del rotor. A simple vista, esto parece ser una excelente forma de controlar la potencia de entrada al rotor del aerogenerador, sin embargo, la parte del rotor más próxima a la dirección de la fuente de viento estará sometida a un mayor esfuerzo (par flector) que el resto del rotor. Por tanto, las turbinas eólicas que estén funcionando con un error de orientación estarán sujetas a mayores cargas de fatiga que las orientadas en una dirección perpendicular al viento.

Casi todos los aerogeneradores de eje horizontal emplean orientación forzada, es decir, utilizan un mecanismo que mantiene la turbina orientada en contra del viento

mediante motores eléctricos y multiplicadores. El mecanismo de orientación se activa por un controlador electrónico que vigila la posición de la veleta de la turbina varias veces por segundo, cuando la turbina está girando.

Adicionalmente, los aerogeneradores cuentan con un contador de la torsión de los cables. Esto debido a que los cables que llevan la corriente desde el generador de la turbina eólica hacia abajo a lo largo de la torre estarán cada vez más torsionados si la turbina, por accidente, se sigue orientando en el mismo sentido durante un largo periodo de tiempo. Así pues, el contador de la torsión en los cables que avisará al controlador de cuando es necesario destorsionar los cables.

Como en todos los equipos de seguridad en la turbina, este sistema es redundante. En este caso, la turbina está equipada también con un interruptor de cordón que se activa cuando los cables se torsionan demasiado.



Fotografía 3.10: Mecanismo de orientación de un aerogenerador

➤ *Regulación por cambio del ángulo de paso ("pitch controlled")*

En un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, el controlador electrónico de la turbina comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor fuera del viento. A la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo.

El diseño de aerogeneradores controlados por cambio del ángulo de paso requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado. En este tipo de aerogeneradores, el sistema de control generalmente girará las palas unos pocos grados cada vez que el viento cambie, para mantener un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento a todas las velocidades de viento.

El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica y los ángulos típicos de operación se encuentran entre los 0° y los 35°.

➤ *Regulación por pérdida aerodinámica ("stall controlled (passive)")*

Los aerogeneradores de regulación (pasiva) por pérdida aerodinámica tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se creará turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor.

La geometría de diseño hace que la pala esté ligeramente torsionada a lo largo de su eje longitudinal, esto es así en parte para asegurar que la pala pierde la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento alcanza su valor crítico.

La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Por otro lado, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño aerodinámico muy complejo, y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación. Alrededor de las dos terceras partes de los aerogeneradores que actualmente se están instalando en todo el mundo son máquinas de regulación por pérdida aerodinámica.

➤ *Regulación activa por pérdida aerodinámica ("stall controlled (active)")*

Un número creciente de grandes aerogeneradores (a partir de 1 MW) están siendo desarrollados con un mecanismo de regulación activa por pérdida aerodinámica.

Técnicamente, las máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, en el sentido de que ambos tienen palas que pueden girar. Para tener un momento de torsión (fuerza de giro) razonablemente alto a bajas velocidades del viento, este tipo de máquinas serán normalmente programadas para girar sus palas como las de regulación por cambio del ángulo de paso a bajas velocidades del viento (a menudo sólo utilizan unos pocos pasos fijos, dependiendo de la velocidad del viento).

Sin embargo, cuando la máquina alcanza su potencia nominal, este tipo de máquinas presentan una gran diferencia respecto a las máquinas reguladas por cambio del ángulo de paso: si el generador va a sobrecargarse, la máquina girará las palas en la dirección contraria a la que lo haría una máquina de regulación por cambio del ángulo de paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.

Una de las ventajas de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación

pasiva, con el fin de evitar que al principio de una ráfaga de viento la potencia nominal sea sobrepasada. Otra de las ventajas es que la máquina puede funcionar casi exactamente a la potencia nominal a todas las velocidades de viento. Un aerogenerador normal de regulación pasiva por pérdida aerodinámica tendrá generalmente una caída en la producción de potencia eléctrica a altas velocidades de viento, dado que las palas alcanzan una mayor pérdida de sustentación.

El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele operarse mediante sistemas hidráulicos o motores eléctricos paso a paso, éstos deben tener gran precisión puesto que los ángulos típicos de control en este caso son entre 0° y 4°.

La elección de la regulación por cambio de paso es sobretodo una cuestión económica, de considerar si vale o no la pena pagar por la mayor complejidad de la máquina que supone el añadir el mecanismo de cambio de paso de la pala.

➤ *Otros métodos de control de potencia*

Algunos aerogeneradores modernos usan alerones (flaps) para controlar la potencia del rotor, al igual que los aviones usan aletas para modificar la geometría de las alas y obtener así una sustentación adicional en el momento del despegue.

Otra posibilidad teórica es que el rotor oscile lateralmente fuera del viento (alrededor de un eje vertical) para disminuir la potencia. En la práctica, esta técnica de regulación por desalineación del rotor sólo se usa en aerogeneradores muy pequeños (de menos de 1 kW), pues somete al rotor a fuerzas que varían cíclicamente y que a la larga pueden dañar toda la estructura.

3.3.2 Control sobre la Potencia inyectada a la red

Dado que el recurso eólico genera potencia eléctrica con frecuencia y voltaje variables, al momento de conectarlo al sistema eléctrico, la planta debe contar con un sistema de control sobre la frecuencia de modo que sea compatible con la de la red, además mantener sincronismo y una regulación adecuada de las tensiones en el punto de conexión, adicionalmente se requiere un control sobre los reactivos inyectados a la red.

Ya que algunas de las metodologías usualmente empleadas se basan en la utilización de equipos convertidores inteligentes, es necesario considerar el contenido armónico que estos equipos típicamente inyectan a la red.

Todos los factores anteriormente mencionados pueden enmarcarse dentro de un concepto de calidad de potencia inyectada a la red que debe ser controlada por el control supervisor del parque eólico. En términos generales, el impacto sobre la calidad de la potencia puede subdividirse en dos temas conforme a las condiciones de operación: conexión del parque a la red y calidad de suministro en régimen permanente.

En general, la mayoría de controladores de aerogeneradores están programados para que la turbina funcione en vacío a bajas velocidades de viento (si estuviese conectada a la red eléctrica a bajas velocidades de viento, de hecho funcionaría como motor). Una vez que el viento se hace lo suficientemente potente como para hacer girar el rotor y el generador a su velocidad nominal, es importante que el generador de la turbina sea conectado a la red eléctrica en el momento oportuno (si no es así, tan solo estarán la resistencia mecánica del multiplicador y del generador para evitar que el rotor se acelere, y que finalmente se embale).

Los generadores modernos tienen un arranque suave, se conectan y se desconectan de la red de forma gradual mediante tiristores. Puesto que los tiristores pierden alrededor de un 1 a un 2 por ciento de la energía que pasa a través de ellos, existe además un interruptor derivante (interruptor mecánico) que es activado después de que la turbina ha efectuado el arranque suave. De esta forma se minimiza la cantidad de energía perdida.

Adicionalmente a la conexión y/o desconexión programada de las turbinas eólicas, existe la situación en que una sección de la red eléctrica se desconecta de la red eléctrica principal, como ocurriría por el disparo accidental o intencionado de un gran disyuntor en la red (p.ej. debido a paros en el suministro eléctrico o a cortocircuitos en la red). En ese caso, los aerogeneradores que operan a través de un generador síncrono excitado a través de baterías y equipos convertidores pueden seguir funcionando en la parte de la red que ha quedado aislada, sin embargo, es muy probable que las dos redes separadas no estén en fase después de un breve intervalo de tiempo.

El restablecimiento de la conexión a la red eléctrica principal puede causar enormes sobretensiones en la red y en el generador de la turbina eólica. Esto también causaría una gran liberación de energía en la transmisión mecánica (es decir, en los ejes, el multiplicador y el rotor), tal como lo haría una "conexión dura" del generador de la turbina a la red eléctrica.

Por este motivo, el controlador debe estar constantemente vigilando la tensión y la frecuencia de la corriente alterna de la red. En el caso de que la tensión o la frecuencia de la red local se salgan fuera de ciertos límites durante una fracción de segundo, la turbina se desconectará automáticamente de la red, e inmediatamente después parará (normalmente activando los frenos aerodinámicos), para proceder posteriormente a conectarse en forma "suave".

3.4 Generación Eólica y Calidad de Suministro

Bajo condiciones normales de operación los principales temas de interés en términos de la calidad de suministro tienen relación con el impacto en el voltaje en régimen permanente, las variaciones dinámicas de éste, la inyección o absorción de reactivos y la distorsión armónica en la red. Adicionalmente, si se emplean sistemas de compensación de reactivos basados en conexión y desconexión de bancos de

condensadores debe considerarse los transientes de voltaje y corriente producto de la conmutación de estos elementos.

3.4.1 Impacto en el voltaje en régimen permanente

El impacto que provoca la operación de una planta de generación eólica en el voltaje del punto de acoplamiento común con la red es uno de los problemas más frecuentes. Este problema, propio de cualquier central generadora, se ve acrecentado debido a que las plantas de generación eólica tienen por lo general una capacidad de generación pequeña, que no justifica un costo adicional en líneas de transmisión que minimicen los efectos de caída de tensión en la impedancia de línea. Conforme a lo anterior, la controlabilidad del voltaje en régimen permanente se lleva a cabo por medio del manejo de la potencia reactiva de acuerdo al tipo de turbina.

3.4.2 Variaciones dinámicas de voltaje

Las variaciones dinámicas de la tensión en el punto de acoplamiento común y su vecindad es otro tópico de calidad de suministro que conviene analizar. Las variaciones de tensión son consecuencia del flujo de potencia a través de la red eléctrica al igual que el caso anterior, la diferencia se establece al considerar el horizonte de tiempo definido para examinar las variaciones. De este modo, el concepto de régimen permanente implica un tiempo de monitoreo desde minutos hasta horas, en tanto que las variaciones dinámicas conllevan bases de tiempo de mucho menores del orden de segundos o fracciones de segundo. Uno de los efectos más notables de los cambios dinámicos de voltaje es el llamado efecto “flicker” o parpadeo el cual es evaluado en centrales de generación eólica a través del índice de severidad de parpadeo. El control que tiene la planta sobre este índice, es mínimo en el caso de tecnología de generación a velocidad fija, sin embargo al emplear turbinas con velocidad variable los efectos de “flicker” pueden minimizarse hasta rangos aceptables.

3.4.3 Inyección de reactivos

En términos generales, una turbina eólica es diseñada para suministrar potencia activa a la red eléctrica, la potencia reactiva intercambiada entre la red y la turbina va a depender del diseño de ésta, pudiendo existir consumo inyección o bien intercambio nulo de reactivos con la red.

Un parque eólico puede ser ejemplificado en términos gruesos por la siguiente figura:

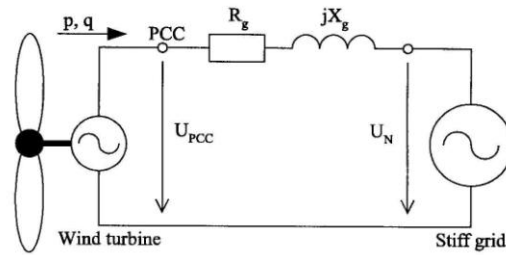


Figura 3.11: Esquema simplificado de un parque eólico conectado a la red

La interacción en este circuito se representa por:

$$U_{PCC} = R_g \cdot (P/U_n) + X_g \cdot (Q/U_n) + U_n \quad (3.3)$$

Donde:

U_{PCC} : tensión en el punto de acoplamiento común

U_n : voltaje nominal de la red

P : potencia activa generada

Q : potencia reactiva consumida

R_g : resistencia equivalente de la red

X_g : reactancia equivalente de la red

La ecuación anterior muestra como el voltaje en el punto de acoplamiento común es influido por la inyección o consumo de reactivos.

De este modo, resulta vital la estrategia de control para los reactivos en la planta de generación eólica puesto que adicionalmente es un mecanismo de control para regular el voltaje en el punto de acoplamiento común y tiene una pequeña incidencia en reducir los efectos de flicker en el caso de turbinas de velocidad fija.

3.4.4 Distorsión armónica

Este problema se presenta al emplear turbinas eólicas con equipos de acoplamiento basados en dispositivos de electrónica de potencia. En el caso de generadores conectados directamente a la red, este problema por lo general no es relevante. En caso de existir contaminación armónica sobre los límites permisibles, la

solución consiste en incorporar un filtro de armónicas (pasivo sintonizado) previo al transformador elevador de tensión de la planta.

3.5 Calidad de Suministro para diferentes Tipos de generadores

Los problemas anteriormente mencionados determinan las necesidades de control sobre el parque eólico, no obstante la forma de llevar a cabo la estrategia de control de las variables se encuentra fuertemente influida por el tipo de turbinas presentes en la planta. Básicamente, los aerogeneradores pueden clasificarse en dos tipos: aerogeneradores de velocidad fija y aerogeneradores de velocidad variable, esta última también se subdivide de acuerdo al tipo de generador eléctrico: asíncrono o síncrono.

3.5.1 Calidad de suministro en aerogeneradores de velocidad fija

Los aerogeneradores de velocidad fija usan casi en su totalidad generadores asíncronos de inducción para convertir la energía del viento en energía eléctrica, las características operacionales de la máquina de inducción así como también su robustez y bajo costo son las principales razones que justifican este hecho.

Un esquema simplificado de conexión se muestra en la siguiente figura:

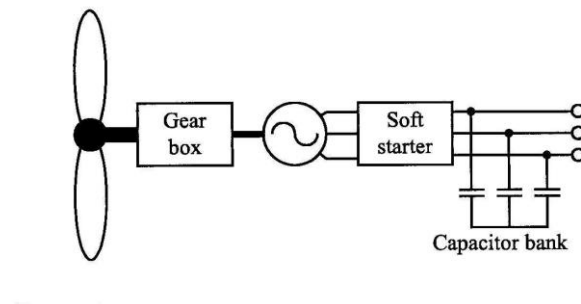


Figura 3.12: Aerogenerador de velocidad fija conectado a la red

Los aerogeneradores de velocidad fija pueden emplear estrategias de control de Regulación por cambio del ángulo de paso y regulación por pérdida aerodinámica activa o pasiva (pitch y stall control). Adicionalmente, el sistema requiere de un mecanismo de partida “suave”, un banco de condensadores y una caja de cambios, puesto que la velocidad rotacional de la turbina es considerablemente menor a la velocidad del generador.

Todos los aerogeneradores de velocidad fija tienen en común problemas de calidad de suministro asociados al impacto sobre el voltaje en régimen permanente, las variaciones dinámicas de voltaje y perturbaciones por la conexión del banco de condensadores.

El problema de la regulación del voltaje en régimen permanente está dado por la incapacidad de controlar el consumo de reactivos a través de generador, por lo cual el impacto sobre el voltaje en el punto de acoplamiento común está predeterminado por la función de potencia activa entregada a la red.

En el caso de las variaciones dinámicas del voltaje, éstas dependen de la eficiencia del control de regulación por ángulo de paso y regulación por pérdida aerodinámica. En el caso de esta última estrategia de control, la regulación por pérdida aerodinámica pasiva prácticamente no ofrece impacto sobre las variaciones dinámicas del voltaje (tal como lo demuestran las instalaciones que operan en la actualidad), por lo cual el uso de regulación activa no se emplea con el objeto de mejorar este aspecto sino más bien de tener un control más fino sobre la potencia activa inyectada.

Para aquellos sistemas que utilizan únicamente una estrategia de regulación del ángulo de paso de las aspas (pitch), el problema de la regulación de voltaje es más importante puesto que, en general, una pequeña fluctuación en la velocidad del viento induce variaciones considerables en la potencia de salida, además la velocidad de respuesta del mecanismo de control no es lo suficientemente rápida para evitar las fluctuaciones de voltaje.

La mejor forma de control para este tipo de aerogeneradores es a través de la conexión y desconexión del banco de condensadores para poder regular así el consumo de reactivos de generador. Pese a que el banco se encuentra diseñado para conmutar por pasos (generalmente 4) la regulación de reactivos no es tan precisa como en el caso de otras tecnologías presentes en la actualidad.

3.5.2 Calidad de suministro en aerogeneradores de velocidad variable

Una de las grandes desventajas que presentan las turbinas de velocidad fija es que casi la totalidad de las oscilaciones de potencia tales como, cambios en la distribución del viento u oscilaciones mecánicas, son traspasadas hacia la red, por el contrario, las turbinas de velocidad variable tiene la particularidad de mantener un torque prácticamente constante en el eje (consecuentemente la potencia eléctrica generada) ajustando las oscilaciones de potencia mecánica a través del cambio en la velocidad del eje del generador.

Para poder tener control sobre la velocidad del generador se emplean varias estrategias dependiendo si el tipo de generador de la turbina es asíncrono (máquina de inducción) o síncrono, estas estrategias comparten en común la incorporación de regulación por ángulo de paso y el uso de equipos de electrónica de potencia.

- *Generador de inducción con control sobre la resistencia del rotor:* en esta configuración el estator de la máquina va directamente conectado a la red, en tanto que los devanados del rotor se encuentran equipados con interruptores y

resistencias, que evitan el uso de anillos rozantes y escobillas. En este caso el control de la velocidad del generador se consigue variando la resistencia rotórica.

- *Generador de inducción con convertidor en el rotor*: un diagrama simple de este sistema se muestra en la figura, básicamente consiste en conectar los anillos rozantes del rotor de la máquina a un convertidor (“Power Electronic Converter”) el cual es el encargado de regular la velocidad del eje a través de la frecuencia de las corrientes con las que se está alimentando el rotor. Adicionalmente, esta configuración permite un control sobre los reactivos consumidos por el generador.

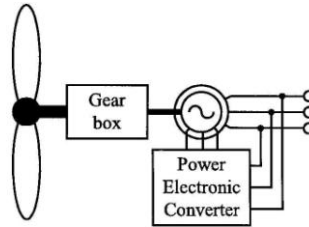


Figura 3.12: Generador de inducción con convertidor en el rotor

- *Generador de inducción jaula de ardilla*: en este caso el control sobre la potencia inyectada a la red se lleva a cabo conectando el generador de inducción a la red a través de un convertidor (rectificador-inversor), de esta forma no existe una imposición sobre la velocidad del eje, pudiendo girar libremente desde velocidad de partida (cut-in) hasta la máxima velocidad impuesta por las características constructivas de la turbina de viento (cut-out). Una ventaja adicional de este sistema es el control natural de la potencia reactiva.

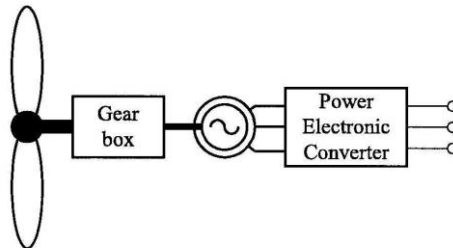


Figura 3.13: Generador de inducción jaula de ardilla

- *Generador sincrónico*: una última posibilidad para la operación de velocidad variable en turbinas eólicas es mediante un generador síncrono conectado a la red a través de un convertidor de potencia (grupo rectificador inversor al igual que el caso anterior). Posee las mismas ventajas anteriormente mencionadas (velocidad variable en el eje y control de reactivos) más aquellas propias de la máquina síncrona, las cuales en este caso en particular tiene relación con optimizar el diseño del generador con una modalidad multipolar que permita evitar el uso de la

caja de cambios. Esta ventaja es muy relevante dado que la caja de cambios es uno de los elementos que tiende a fallar con mayor facilidad. Adicionalmente, la introducción de generadores con imanes permanentes permite simplificar aún más los modelos de turbinas y su eficiencia.

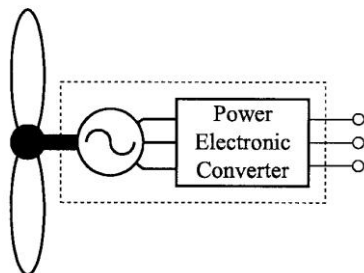


Figura 3.14: Generador sincrónico

La siguiente tabla presenta un análisis comparativo resumen de las distintas tecnologías empleadas en aerogeneradores en términos de calidad de suministro.

Tipo de turbina	Perturbación al conectar a la red	Regulación de Voltaje	Flicker	Distorsión armónica	Control de reactivos
Velocidad fija / active stall-control	Moderado	No controlado	Moderado	-	Banco de condensadores
Velocidad fija / pitch-control	Moderado	No controlado	Alto	-	Banco de condensadores
Velocidad variable / generador de inducción con control de resistencia rotórica	Moderado	Controlado	Moderado	-	Banco de condensadores
Velocidad variable / generador de inducción con convertidor en el rotor	Moderado	Controlado	Bajo	Moderado	Controlado
Velocidad variable / generador conectado a través de un convertidor de potencia	Bajo	Controlado	Bajo	Moderado-Alto	Controlado

Es posible que los aerogeneradores de velocidad variable no representan un deterioro de la calidad de servicio en la red eléctrica, ya que dispone de controles adecuados para mitigar los efectos de la distorsión armónica, por ejemplo mediante filtros pasivos y los de flicker ya que son muy bajos en intensidad, etc.

En relación a los reactivos, se encuentran controlados mediante la operación propia de la turbina, pudiéndose generar o absorber potencia reactiva según convenga.

Además, se pueden instalar bancos de condensadores adicionales en la conexión a la red para asegurar valores mínimos de inyección o algún factor de potencia deseado.

Capítulo 4 Energía Solar

4.1 Introducción

"El Sol no brilla sobre nosotros, sino dentro de nosotros" (John Muir)

La economía mundial se basa principalmente en recursos energéticos no renovables como el carbón, el petróleo, el gas y el uranio. En la actualidad, la dependencia del petróleo alcanza un 46%, del carbón a un 27% y del gas a un 17%, lo que hace que la dependencia total de los combustibles fósiles llegue al 90%.

Uno de los principales argumentos que justifica el cambio de estrategia a favor de las energías renovables es la creciente degradación ambiental de la biosfera, en especial, la amenaza cada vez más evidente del cambio climático y el riesgo en las plantas nucleares y el manejo de desechos radioactivos. Por otra parte, en el curso de las dos últimas décadas, se ha intensificado el uso del petróleo y del gas, y sus reservas comienzan a decrecer rápidamente, calculándose su extinción a mediados del siglo 21.

La energía solar es una de las fuentes de abastecimiento energético más amigable con el medio ambiente y por ello constituye una interesante opción frente a las energías convencionales.

4.2 Conceptos Fundamentales

La energía solar es la energía radiante producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión, en los cuales átomos de hidrógeno se convierten en helio. Parte de esta energía llega a la Tierra a través del espacio mediante la radiación solar, o en partículas de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres.

Esta energía puede ser aprovechada de diferentes modos, ya sea produciendo calor o electricidad. El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados paneles o módulos fotovoltaicos.

La energía solar varía de un lugar a otro dependiendo de factores geográficos, época del año y condiciones de la atmósfera local. La información de la energía solar en diferentes lugares de un determinado país, es recolectada por el servicio meteorológico.

4.2.1 Generalidades

El sol emite constantemente enormes cantidades de energía debido a las reacciones nucleares que ocurren en su centro. Una gran parte de esta energía llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética. La cantidad de energía solar que se recibe en un solo día resulta más que suficiente para cubrir la demanda mundial de todo un año.

El sol se encuentra aproximadamente a 150 millones de kilómetros de la tierra y tiene un diámetro de 1,4 millones de kilómetros.

A medida que la radiación atraviesa la atmósfera terrestre sufre atenuación por los procesos de absorción, reflexión y refracción. Tales procesos se verifican cuando los rayos de luz chocan con las nubes o con el vapor de agua existente en la atmósfera. La radiación que llega a la superficie terrestre se puede clasificar en directa y difusa. La radiación directa es la radiación solar recibida del sol sin que haya sido difractada por la atmósfera y la radiación difusa es la radiación solar recibida del sol después de que su dirección ha sido cambiada debido a los procesos de reflexión y refracción que ocurren en la atmósfera.

La atmósfera terrestre recibe una cantidad casi constante de energía solar radiante equivalente a $1,37 \text{ KW/m}^2$, magnitud que se conoce con el nombre de constante solar.

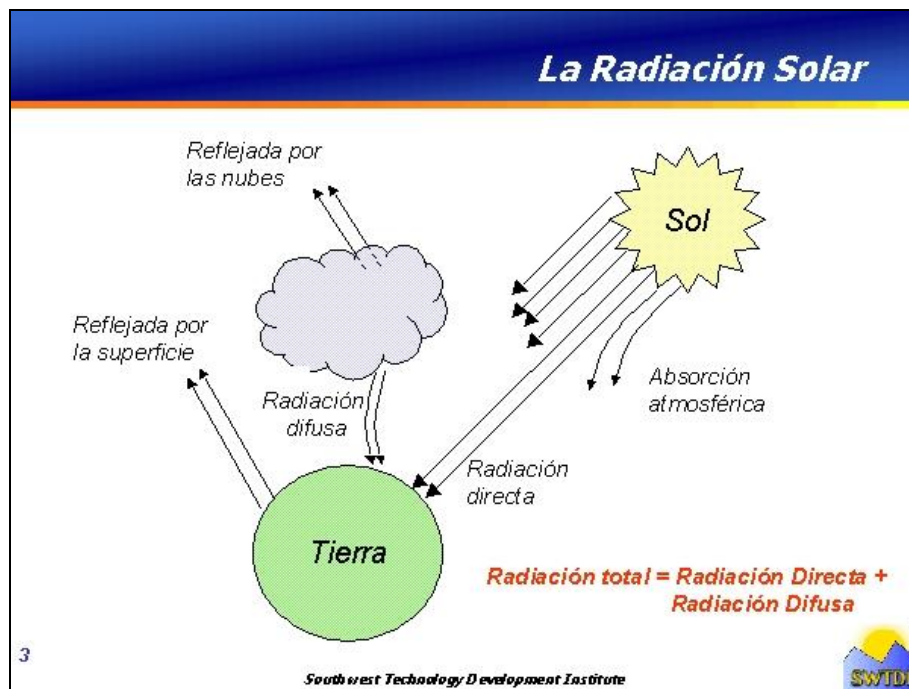


Figura 4.1: Radiación solar

La energía de la radiación solar que recibe una superficie determinada en un instante dado se conoce como Irradiancia y se mide en unidades de W/m^2 . La irradiancia tiene un valor distinto para cada instante de tiempo, esto se debe al movimiento de rotación de la tierra (movimiento sobre su propio eje). Normalmente los datos de irradiación se presentan como promedios diarios o por mes. La irradiación máxima es la disponible al mediodía solar de un día dado.

Otro concepto importante es el de *Insolación*, éste corresponde a la integración de la irradiancia en un período determinado. En otras palabras, es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. Este término tiene unidades de energía por área, comúnmente Watts-hora por metro cuadrado (W-h/m^2). Generalmente se reporta este valor como una acumulación de energía horaria, diaria, estacional o anual.

El término *horas de sol máximo* se define como el número equivalente de horas diarias en que la irradiación solar alcanza un promedio de 1 KW/m^2 . Seis horas de sol máximo significa que la energía recibida, durante el total de horas de sol durante el día, es igual a la energía recibida si el sol hubiera brillado sólo durante seis horas a 1 KW/m^2 . Las horas de sol máximo corresponden directamente a la insolación y todas las tablas y bases de datos se pueden leer de esta forma. La energía útil que produce el arreglo fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación que recibe.

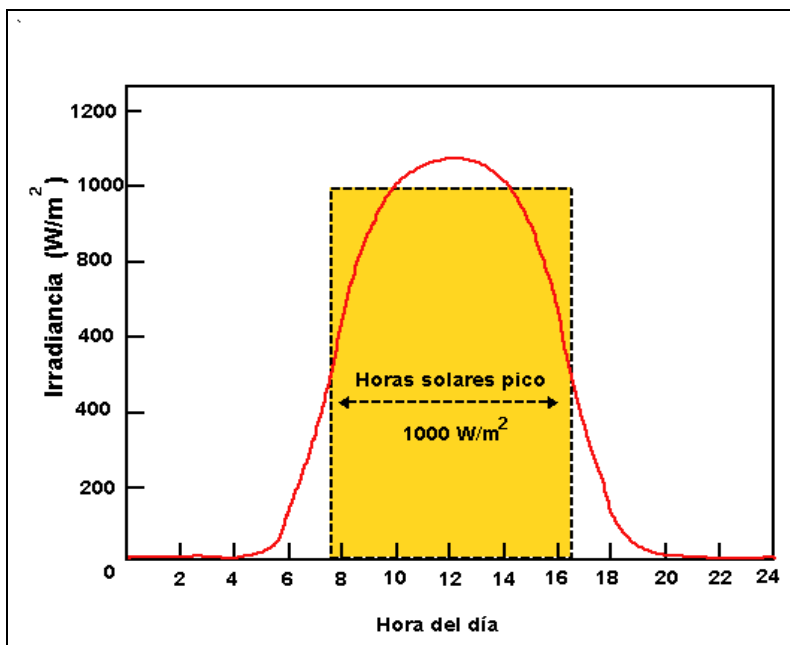


Figura 4.2. Irradiancia y horas solares pico (insolación) durante un día soleado

Además de las condiciones atmosféricas hay otro parámetro que afecta radicalmente a la incidencia de la radiación sobre un panel solar, este es el movimiento de la tierra a lo largo del día y a lo largo del año. La Tierra tiene dos tipos de movimientos: uno alrededor de su propio eje (movimiento rotacional), el cual da lugar al día y la noche, y el otro alrededor del sol (movimiento traslacional) siguiendo una trayectoria elíptica, el cual da lugar a las estaciones del año.

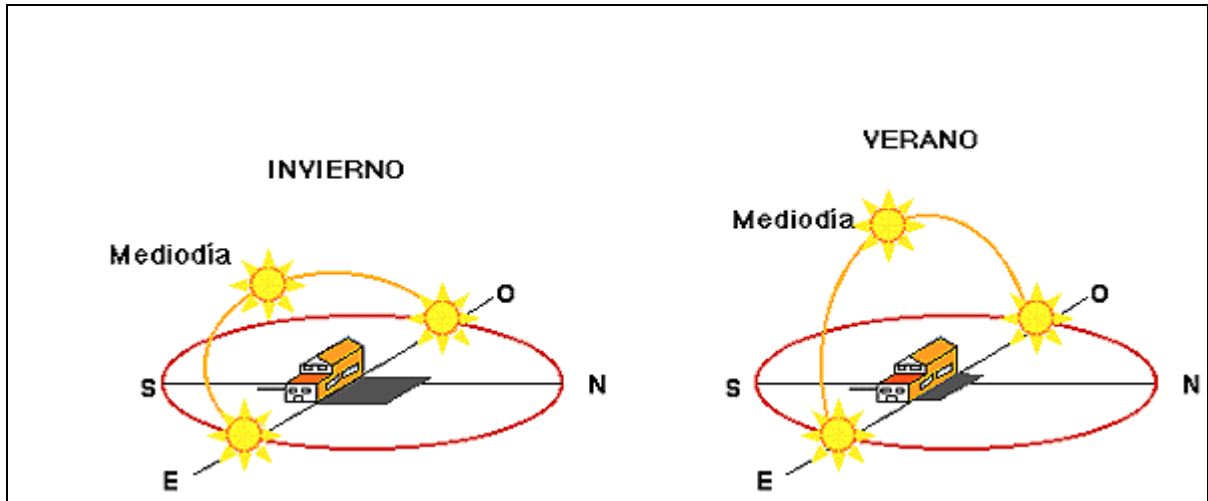


Figura 4.3: Trayectoria solar

Un arreglo fotovoltaico recibe la máxima insolación cuando se mantiene apuntando directamente al sol. Esto requeriría el ajuste de dos ángulos del arreglo: el azimut para seguir el movimiento diario del sol de este a oeste, y el ángulo de elevación para seguir el movimiento anual de la trayectoria solar en la dirección norte-sur.

Dado que las condiciones óptimas de operación implican la presencia de luz solar plena y un panel orientado lo mejor posible hacia el sol, en el Hemisferio Norte, el panel deberá orientarse hacia el sur y en el Hemisferio Sur, hacia el norte. Existen también estructuras de soporte del arreglo que ajustan automáticamente el azimut y/o la elevación llamados seguidores, sin embargo, generalmente el ángulo de elevación del arreglo es fijo

El ángulo entre el plano horizontal y el panel solar se denomina ángulo de inclinación.

Cada latitud presenta un ángulo de inclinación óptimo, sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones de sistemas fotovoltaicos, el máximo de energía anual se obtiene con un ángulo de inclinación de ± 15 grados por sobre la latitud geográfica de instalación.

Ligeras desviaciones de unos 5 grados con respecto del ángulo de inclinación óptimo tienen sólo un efecto menor en la producción de energía. Las diferencias a causa de las condiciones climáticas son más importantes en esta producción.

4.3 Fundamentos de las celdas solares

4.3.1 Características constructivas

La celda F.V. (fotovoltaica) es la unidad básica en un sistema fotovoltaico, transforman la potencia del sol en potencia eléctrica DC. Una sola celda produce

típicamente entre 1 y 2 [Watts], en muchos casos insuficientes para diversas aplicaciones. Esto se soluciona conectando celdas entre sí para formar unidades más grandes las cuales son llamadas módulos o paneles. Estos a su vez, pueden ser conectados entre sí para formar unidades mayores llamadas arreglos. Teniendo en cuenta esto es posible formar arreglos de celdas para llenar los requisitos de prácticamente cualquier sistema sin importar que tan grande o pequeño sea.

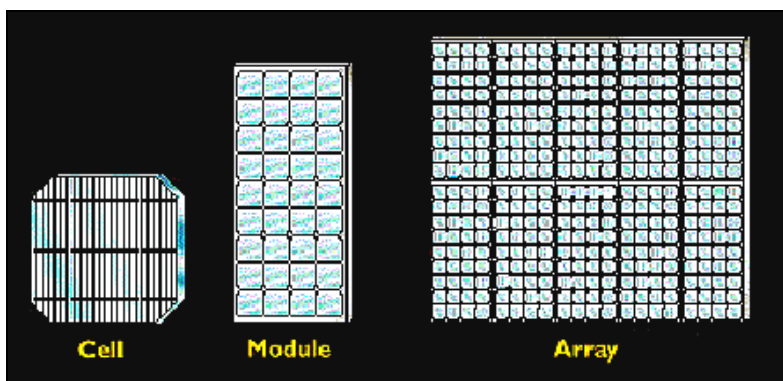


Figura 4.4: Celda, módulo y arreglo solar

Las más importantes partes de una celda solar son las capas de material semiconductor. Hay diversos materiales para confeccionar estas capas de semiconductores, pero el que se utiliza comúnmente es el silicio (material muy abundante en la arena) en sus diferentes formas de fabricación. Las celdas solares de silicio pueden ser de tipo monocristalinas, policristalinas o amorfas. La diferencia entre ellas radica en la forma como los átomos de silicio están dispuestos, es decir, en la estructura cristalina. Existe, además, una diferencia en la eficiencia (porcentaje de luz solar que es transformado en electricidad). A continuación se señalan las principales características de cada una de estas formas:

Silicio Monocristalino: Las celdas están hechas de un solo cristal de silicio de muy alta pureza. La eficiencia de estos módulos ha llegado hasta el 17%.

Silicio Policristalino: Su nombre indica que estas celdas están formadas por varios cristales de silicio. Dichas celdas presentan eficiencias de conversión un poco inferiores a las monocristalinas pero se ha encontrado que pueden obtenerse hasta un orden de 15%.

Silicio Amorfo: La palabra amorfo significa carencia de estructura. La estructura cristalina de estas celdas no tiene un patrón ordenado característico del silicio cristalino. En la actualidad su eficiencia ha subido hasta establecerse en el rango de 5 a 10%.

También es posible encontrar células de arseniuro de galio (GaAs) y telurio de cadmio. Todos tienen sus ventajas y desventajas.

Además de los materiales semiconductores las celdas solares consisten de una malla metálica frontal u otro contacto eléctrico (plata y/o aluminio), que permite la recolección de electrones del material semiconductor y los aplican a la carga externa. La parte superior de la celda se encuentra típicamente cubierta de vidrio u otro tipo de encapsulante transparente para sellar la celda y aislarla de las inclemencias climáticas,

luego se tiene un adhesivo transparente y luego una capa de material antireflectivo para evitar que este fenómeno suceda con la luz solar, una película delgada de Si-n de típicamente 0,3 mm, la junta, un sustrato Si-p del orden de 0.25 mm y un contacto inferior.

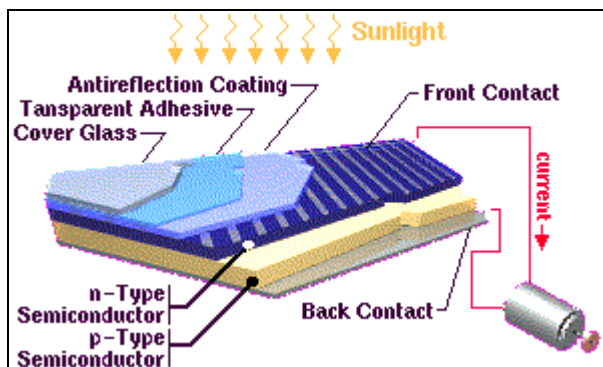


Figura 4.6

Los módulos o arreglos por si solo no conforman un sistema fotovoltaico. Se deben tener estructuras en las cuales instalarlos y direccionarlos hacia el sol y se requieren también componentes para tomar la corriente producida por los módulos o arreglos y acondicionarla para ser utilizada en la aplicación específica.

4.3.2 Efecto Fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es el proceso físico básico por medio del cual un panel solar convierte energía solar en corriente eléctrica.

Cuando los fotones (radiación electromagnética) golpean la celda fotovoltaica, la energía de estos es transferida a los electrones presentes en los átomos del material semiconductor. Con esta energía se generan en su interior pares de cargas positivas y negativas (electrones (e^-) y huecos (h^+)), que una vez producidos se mueven en forma aleatoria en el volumen del sólido. Si no hay ningún condicionante externo ni interno, las cargas de signos opuestos se recombinan neutralizándose mutuamente. Por el contrario, si mediante algún procedimiento se crea en el interior del material semiconductor un campo eléctrico permanente, las cargas positivas y negativas serán separadas. Esta operación conduce al establecimiento de una diferencia de potencial entre dos zonas del material que, si son conectados entre sí mediante un circuito externo al mismo tiempo que la radiación electromagnética incide sobre el material, darán origen a una corriente eléctrica que recorrerá el circuito externo. Este fenómeno es lo que se conoce como efecto fotovoltaico.

El campo eléctrico interno se crea siempre que se ponen en contacto un semiconductor tipo N con otro tipo P, es decir, donde existe una unión P-N. En la práctica dicha unión se logra mediante diferentes procedimientos, aunque los más convencionales son las técnicas de difusión de impurezas dentro del material.

4.3.3 Potencial Fotovoltaico

Si se aplica una polarización directa, la barrera de potencial disminuye y la corriente de mayoritarios aumenta rápidamente. Cuando esta corriente de mayoritarios iguala a la de minoritarios, la corriente total queda reducida a cero. La tensión a la que la corriente resultante es cero, se denomina potencial fotovoltaico. Puesto que en circuito abierto no circula corriente, en los terminales abiertos de una unión P-N se obtiene una fuerza electromotriz fotovoltaica.

El efecto fotovoltaico es de la siguiente forma: La barrera de potencial de una unión P-N, en circuito abierto, se ajusta por si misma para que la corriente resultante sea cero, siendo el sentido del campo eléctrico en la unión tal que repele los portadores mayoritarios. Si se ilumina la superficie, se inyectan portadores minoritarios, y puesto que estos descienden por la barrera, la corriente de minoritarios aumenta. Ya que en condiciones de circuito abierto la corriente total debe permanecer nula, la corriente de mayoritarios (por ejemplo la de huecos en el lado P) debe aumentar en la misma cantidad que la de minoritarios. Este aumento de corriente de mayoritarios sólo es posible si el campo retardador de la unión se reduce. Por lo tanto, la altura de la barrera disminuye automáticamente debido a la radiación. En los extremos del semiconductor aparece una tensión justamente igual al valor que ha descendido la barrera de potencial. Este potencial es la *fem* fotovoltaica y su orden de magnitud es para las celdas de Silicio 0,5 V y para las celdas de Germanio 0.1 V.

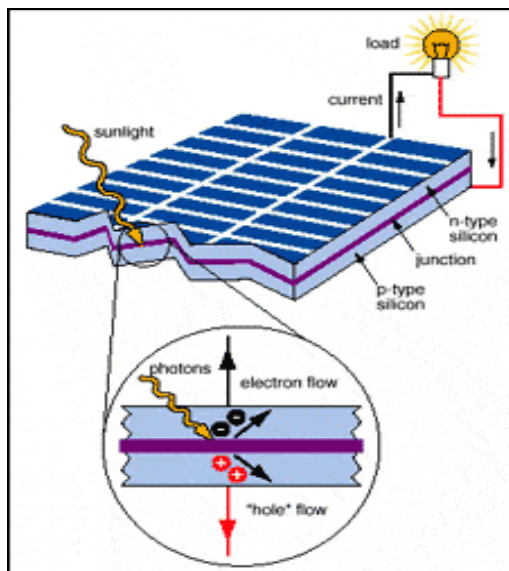


Figura 4.7

Las tensiones Fotovoltaicas $V_{\max}$ corresponden a diodos en circuito abierto, y se expresa en la siguiente ecuación:

$$V_{\max} = nV_T \ln\left(1 + \frac{I_S}{I_0}\right)$$

Donde:

- I_0 : Corriente de saturación inversa en un diodo P-N, y es proporcional a la concentración de portadores minoritarios de P y de N. Al someterse a una irradiación luminosa la unión - es decir, polarizamos inversamente - el número de nuevos pares electrón-huecos, es proporcional al número de fotones incidentes.
- I_S : Corriente en corto circuito (es proporcional a la intensidad de la luz).

4.4 Sistemas Solares Fotovoltaicos

4.4.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas de generación en base a energía fotovoltaica se dividen principalmente en:

- *Sistemas sin conexión a la red o autónomos*: Pueden diseñarse para alimentar cargas DC, AC o ambas. En el caso más general, están compuestos de varios componentes interconectados como módulos solares, diodos de by-pass y de bloqueo, reguladores de carga, inversores, banco de baterías y las cargas. Cada uno con una determinada función.
- *Sistemas híbridos*: Combinan un sistema fotovoltaico con otro generador eléctrico como por ejemplo un generador diesel, eólico o hidráulico.
Los sistemas híbridos pueden ser rentables frente a un sistema puramente fotovoltaico porque en un sistema híbrido no es necesario hacer el dimensionamiento de los paneles solares para las peores condiciones meteorológicas.
Cuando las baterías se han descargado, el generador se pone en marcha y proporciona la corriente a las cargas y a la batería.
- *Sistemas conectados a la red*: La energía generada por el sistema fotovoltaico se almacena en el banco de baterías y es la que se utiliza normalmente. Cuando las baterías se han descargado pasa a utilizarse la electricidad de la red.
Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica están compuestos por un generador fotovoltaico que se encuentra conectado a la red eléctrica convencional a través de un inversor, produciéndose un intercambio energético entre ésta y el

sistema fotovoltaico. Así, el sistema inyecta energía en la red cuando su producción supera al consumo local, y extrae energía de ella en caso contrario.

En los sistemas conectados a red, el inversor deberá estar en fase con la tensión de la red.

Uno de los factores favorables de los sistemas conectados a la red, es la posibilidad de mejorar la calidad del servicio de la energía suministrada por la red, ya que la máxima producción del sistema fotovoltaico coincide con horas en que los problemas de suministro para las compañías eléctricas son más graves.

4.4.2 Sistemas solares fotovoltaicos autónomos

➤ Principales componentes

Los sistemas de generación PV autónomos se componen de varios componentes interconectados, cada uno con una función específica.

Pueden diseñarse para alimentar cargas DC, AC o ambas.

Los sistemas autónomos más generales (aquellos que alimentan ambos tipos de carga) consisten en arreglo de módulos, diodos de by-pass y de bloqueo, reguladores de carga, inversores, banco de baterías y las cargas.

- **Baterías**
- **Reguladores de carga**
- **Inversores**
- **Diodos by-pass**

Los diodos by-pass (de paso) se usan para proteger los módulos del daño que puede ocurrir por efecto del sombreado parcial

La sombra sobre pequeñas partes de un módulo puede reducir considerablemente la energía de salida del conjunto. Los módulos conectados en serie deben conducir una misma cantidad de corriente. Si algunas células quedan bajo sombra, no podrán producir corriente y pasarán a una polaridad inversa. Esto significa que las células disiparán energía en forma de calor y fallarán después de cierto tiempo. En este caso se recomienda colocar diodos de paso o derivación alrededor de los módulos conectados en serie pues permiten un paso alternativo a la corriente e impiden que la célula bajo sombra disipe grandes cantidades de energía. Si bien este procedimiento posterga la falla eventual, no impide la pérdida de producción causada por la sombra. Antes de instalar un conjunto fotovoltaico es importante verificar en el sitio si hay posibilidad de que se produzcan sombras ya que éstas pueden reducir considerablemente la producción del conjunto.

Los conjuntos fotovoltaicos se componen de paneles y cadenas. El panel consiste en un grupo de módulos colocados en un solo marco o bastidor. La cadena es una conexión de módulos en serie para producir la tensión del sistema. Los paneles se pueden conectar eléctricamente para formar una cadena.

- **Diodos de bloqueo**

Los diodos de bloqueo previenen la descarga de las baterías a través de los módulos durante la noche y la inversión de corriente que puede ocurrir en un arreglo de varias series en paralelo, cuando una de las series de algún módulo es parcialmente sombreada.

Estos se emplean en sistemas con baterías y en arreglos con módulos conectados en serie.

En los sistemas con baterías conectadas a los módulos, durante la noche, la tensión en los bornes genera una corriente inversa en el módulo que disipa potencia y descarga la batería. Estos diodos bloquean este flujo de corriente.

Cuando en un arreglo, un grupo de celdas o un módulo está parcialmente sombreado, la tensión en los restantes induce una corriente inversa a través de la serie de módulos sombreados. Nuevamente estos diodos bloquean esta corriente.

- **Paneles solares**

4.5 Dimensionamiento de Sistemas Fotovoltaicos

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico (SFV) consiste en determinar su capacidad a fin de que satisfaga la demanda de energía requerida. En sistemas aislados o autónomos (sin sistemas auxiliares de suministro de energía), el SFV debe atender la demanda con una buena confiabilidad.

4.6 Aplicaciones

Las posibles aplicaciones de la energía solar fotovoltaica son numerosas, pero en general se distinguen entre aplicaciones aisladas de la red de distribución eléctrica y aplicaciones conectadas a la red.

1. Instalaciones fotovoltaicas aisladas de la red: Este tipo de instalaciones dan suministro eléctrico en regiones donde no se puede disponer de red eléctrica. La instalación se compone principalmente del grupo de paneles solares fotovoltaicos que producen la energía, un banco de baterías estacionarias que almacena la energía producida por los paneles fotovoltaicos, y adaptadores de corriente que adaptan la energía acumulada en las baterías a la línea de consumo.

2. Instalaciones fotovoltaicas de conexión a la red: Las nuevas tendencias de la política mundial, que dan prioridad a la preservación del medio ambiente, promueven la sustitución de parte de la energía eléctrica producida actualmente a partir de fuentes contaminantes, por energía eléctrica producida a partir de fuentes renovables y limpias.

Este tipo de instalaciones se componen del campo de paneles fotovoltaicos que producen la energía, y de un adaptador de corriente que realiza la inyección de esta energía en la red eléctrica.

A continuación se señalan algunos ejemplos de cada uno de los casos anteriores:

- Electrificación rural y de viviendas aisladas: La mitad de la población mundial está situada lejos de las redes eléctricas. Este tipo de situación se encuentra tanto en países industrializados - para ciertas regiones de montaña, por ejemplo - como en regiones menos favorecidas. Más que una alternativa tecnológica, la energía solar constituye muchas veces la única posibilidad de electrificación de éstos sitios aislados.
- Bombeo de agua directo: La extracción de agua para riego es una de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica de más amplia aceptación. Estas instalaciones se componen de un campo de paneles fotovoltaicos que producen la energía y de una bomba que con esta energía extrae agua. La energía solar permite sacar la cantidad de agua que se necesite de pozos de cualquier profundidad. La introducción de sistemas de riego por energía solar permite la realización de automatizaciones, que no son posibles de realizar con otros tipos de sistemas.
- Sistemas de protección catódicos: La protección catódica es un método de proteger las estructuras de metal contra la corrosión. Es aplicable a los puentes, a las tuberías, a los edificios, a los tanques, a los pozos y a las líneas ferroviarias. La protección catódica contra la corrosión se consigue aplicando una pequeña diferencia de potencial entre el metal y el suelo. Las células solares fotovoltaicas se utilizan a menudo en posiciones remotas como parte de ésta protección.
- Telecomunicaciones y sistemas de supervisión alejados: Las comunicaciones son esenciales para mejorar la calidad de la vida en áreas alejadas. Los generadores fotovoltaicos son una excelente solución cuando hay necesidad de transmitir cualquier tipo de señal o información desde un lugar aislado donde los costos de otro tipo de energía serían elevados. Algunos ejemplos son: teléfonos de emergencia en autopistas y sistemas de supervisión. Los sistemas de supervisión alejados se pueden utilizar para recoger datos del tiempo

(estaciones meteorológicas) u otra información sobre el medio ambiente para transmitirla automáticamente vía radio a la base de origen.

- Sistemas de iluminación alejados: La iluminación se requiere a menudo en posiciones remotas donde el costo de llevar energía tradicional es demasiado alto. Tales usos incluyen iluminación de seguridad como señales de tráfico, luces y semáforos; señalización en vías de tren y señalización en aeropuertos, ayudas de navegación como por ejemplo las boyas, balizas y los faros.

Capítulo 5 Energía Hidráulica

5.1 Introducción

La energía hidroeléctrica es la que se obtiene de la caída del agua desde cierta altura a un nivel inferior lo que provoca el movimiento de ruedas hidráulicas o turbinas. La hidroelectricidad es un recurso natural disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua. Su desarrollo requiere construir pantanos, presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad. Todo ello implica la inversión de grandes sumas de dinero, por lo que no resulta competitiva en regiones donde el carbón o el petróleo son baratos, aunque el coste de mantenimiento de una central térmica, debido al combustible, sea más caro que el de una central hidroeléctrica. Sin embargo, el peso de las consideraciones medioambientales centra la atención en estas fuentes de energía renovables.

5.2 Historia

Los antiguos romanos y griegos aprovechaban ya la energía del agua; utilizaban ruedas hidráulicas para moler trigo. Sin embargo, la posibilidad de emplear esclavos y animales de carga retrasó su aplicación generalizada hasta el siglo XII. Durante la edad media, las grandes ruedas hidráulicas de madera desarrollaban una potencia máxima de cincuenta caballos. La energía hidroeléctrica debe su mayor desarrollo al ingeniero civil

británico John Smeaton, que construyó por vez primera grandes ruedas hidráulicas de hierro colado.

La hidroelectricidad tuvo mucha importancia durante la Revolución Industrial. Impulsó las industrias textil y del cuero y los talleres de construcción de máquinas a principios del siglo XIX. Aunque las máquinas de vapor ya estaban perfeccionadas, el carbón era escaso y la madera poco satisfactoria como combustible. La energía hidráulica ayudó al crecimiento de las nuevas ciudades industriales que se crearon en Europa y América hasta la construcción de canales a mediados del siglo XIX, que proporcionaron carbón a bajo precio.

Las presas y los canales eran necesarios para la instalación de ruedas hidráulicas sucesivas cuando el desnivel era mayor de cinco metros. La construcción de grandes presas de contención todavía no era posible; el bajo caudal de agua durante el verano y el otoño, unido a las heladas en invierno, obligaron a sustituir las ruedas hidráulicas por máquinas de vapor en cuanto se pudo disponer de carbón.

5.3 Desarrollo de la Energía Hidroeléctrica

La primera central hidroeléctrica se construyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad.

La tecnología de las principales instalaciones se ha mantenido igual durante el siglo XX. Las centrales dependen de un gran embalse de agua contenido por una presa. El caudal de agua se controla y se puede mantener casi constante. El agua se transporta por unos conductos o tuberías forzadas, controlados con válvulas y turbinas para adecuar el flujo de agua con respecto a la demanda de electricidad. El agua que entra en la turbina sale por los canales de descarga. Los generadores están situados justo encima de las turbinas y conectados con árboles verticales. El diseño de las turbinas depende del caudal de agua; las turbinas Francis se utilizan para caudales grandes y saltos medios y bajos, y las turbinas Pelton para grandes saltos y pequeños caudales.

Además de las centrales situadas en presas de contención, que dependen del embalse de grandes cantidades de agua, existen algunas centrales que se basan en la caída natural del agua, cuando el caudal es uniforme. Estas instalaciones se llaman de agua fluente.

A principios de la década de los noventa, las primeras potencias productoras de hidroelectricidad eran Canadá y Estados Unidos. Canadá obtiene un 60% de su electricidad de centrales hidráulicas. En todo el mundo, la hidroelectricidad representa aproximadamente la cuarta parte de la producción total de electricidad, y su importancia sigue en aumento. Los países en los que constituye fuente de electricidad más importante

son Noruega (99%), República Democrática del Congo (97%) y Brasil (96%). La central de Itaipú, en el río Paraná, está situada entre Brasil y Paraguay; se inauguró en 1982 y tiene la mayor capacidad generadora del mundo. Como referencia, la presa Grand Coulee, en Estados Unidos, genera unos 6.500 MW y es una de las más grandes.

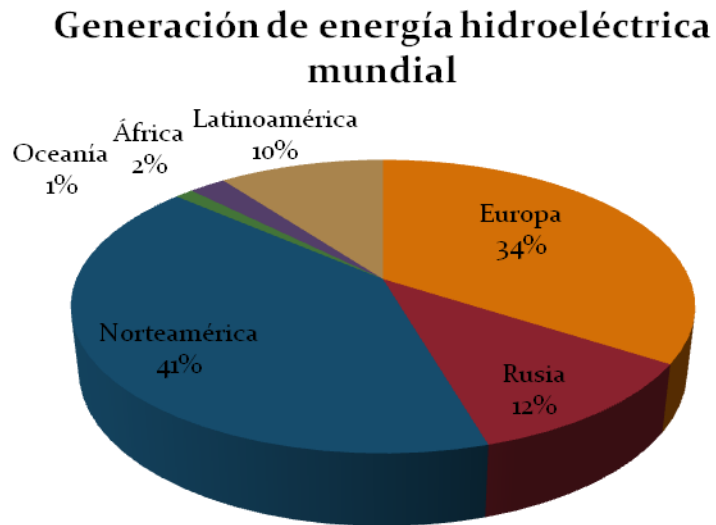


Figura 5.1: Generación de energía hidroeléctrica mundial

5.4 Centrales hidroeléctricas

La energía hidroeléctrica es una de las más rentables. El costo inicial de construcción es elevado, pero sus gastos de explotación y mantenimiento son relativamente bajos. Aún así tienen unos condicionantes:

- Las condiciones pluviométricas medias del año deben ser favorables
- El lugar de emplazamiento está supeditado a las características y configuración del terreno por el que discurre la corriente de agua.

El funcionamiento básico consiste en aprovechar la energía cinética del agua almacenada, de modo que accione las turbinas hidráulicas.

En el aprovechamiento de la energía hidráulica influyen dos factores: el caudal y la altura del salto para aprovechar mejor el agua llevada por los ríos, se construyen presas para regular el caudal en función de la época del año. La presa sirve también para aumentar el salto.

Otra manera de incrementar la altura del salto es derivando el agua por un canal de pendiente pequeña (menor que la del cauce del río), consiguiendo un desnivel mayor entre el canal y el cauce del río.

El agua del canal o de la presa penetra en la tubería donde se efectúa el salto. Su energía potencial se convierte en energía cinética llegando a las salas de máquinas, que albergan a las turbinas hidráulicas y a los generadores eléctricos. El agua al llegar a la turbina la hace girar sobre su eje, que arrastra en su movimiento al generador eléctrico.

La tecnología de las principales instalaciones se ha mantenido igual durante el siglo XX.

Las turbinas pueden ser de varios tipos, según los tipos de centrales: Pelton (saltos grandes y caudales pequeños), Francis (salto más reducido y mayor caudal), Kaplan (salto muy pequeño y caudal muy grande) y de hélice.

Las centrales dependen de un gran embalse de agua contenido por una presa. El caudal de agua se controla y se puede mantener casi constante. El agua se transporta por unos conductos o tuberías forzadas, controlados con válvulas para adecuar el flujo de agua por las turbinas con respecto a la demanda de electricidad. El agua sale por los canales de descarga.

El agua es devuelta al río en las condiciones en que se tomó, de modo que se puede volver a utilizar por otra central situada aguas abajo o para consumo.

La utilización de presas tiene varios inconvenientes. Muchas veces se inundan terrenos fértiles y en ocasiones poblaciones que es preciso evacuar. La fauna piscícola puede ser alterada si no se toman medidas que la protejan.

Se mide en metros o hectómetros cúbicos. Los embalses tienen pérdidas debidas a causas naturales como evaporación o filtraciones.

5.5 Tipos de centrales hidroeléctricas

Se pueden clasificar según varios argumentos, como características técnicas, peculiaridades del asentamiento y condiciones de funcionamiento.

En primer lugar hay que distinguir las que utilizan el agua según discurre normalmente por el cauce de un río, y aquellas otras a las que ésta llega, convenientemente regulada, desde un lago o pantano. Se denominan:

5.5.1 Central Hidroeléctrica de Pasada

Una central de pasada es aquella en que no hay acumulación apreciable de agua para accionar las turbinas.

En una central de este tipo las turbinas deben aceptar el caudal natural del río, con sus variaciones de estación en estación. Si este es mayor a lo necesario, el agua sobrante se pierde por rebalse.

En ocasiones un embalse relativamente pequeño bastará para impedir esa pérdida por rebalse.

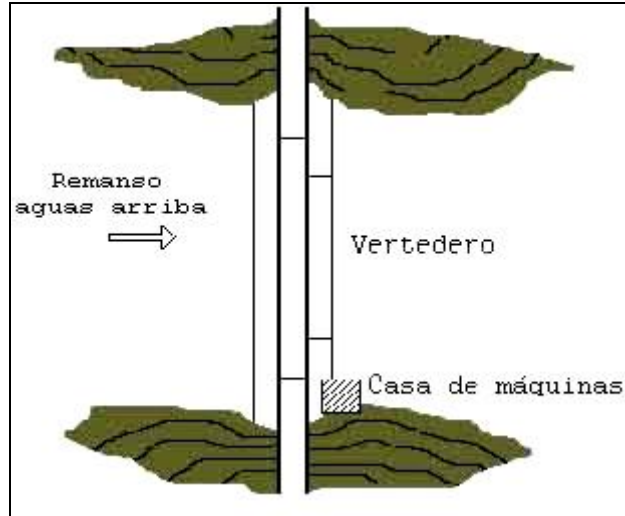


Figura 5.2: Esquema de una central de Pasada



Figura 5.3: Corte vertical

Normalmente, en una central de pasada, se aprovecha un estrechamiento del río, y la obra del edificio de la central (casa de máquinas) puede formar parte de la misma presa.

El desnivel entre "aguas arriba" y "aguas abajo", es reducido, y si bien se forma un remanso de agua a causa del necesario embalsamiento mínimo (azud), no es demasiado grande.

Este tipo de central requiere un caudal suficientemente constante para asegurar durante el año una potencia determinada.

5.5.2 Central Hidroeléctrica con Embalse de Reserva

En este tipo de proyecto se embalsa un volumen considerable de líquido "aguas arriba" de las turbinas mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales.

El embalse permite graduar la cantidad de agua que pasa por las turbinas. Del volumen embalsado depende la cantidad que puede hacerse pasar por las turbinas.

Con embalse de reserva puede producirse energía eléctrica durante todo el año aunque el río se seque por completo durante algunos meses, cosa que sería imposible en un proyecto de pasada.

Las centrales con almacenamiento de reserva exigen por lo general una inversión de capital mayor que las de pasada, pero en la mayoría de los casos permiten usar toda la energía posible y producir kilovatios-hora más baratos.

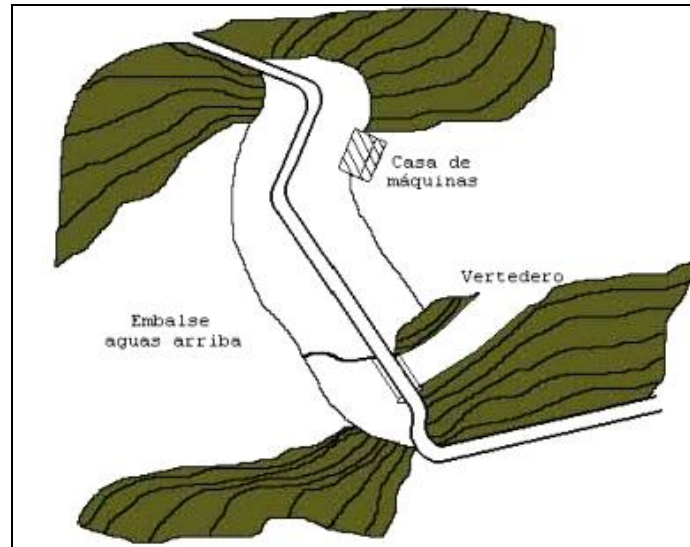


Figura 5.4: Esquema de una central con embalse

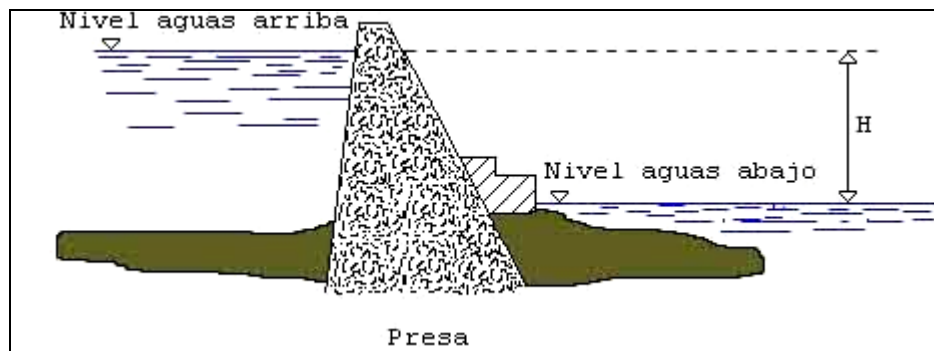


Figura 5.5: Corte vertical

La casa de máquinas suele estar al pie de la presa, como ilustra el dibujo superior; en estos tipos de central, el desnivel obtenido es de carácter mediano.

5.5.3 Centrales Hidroeléctricas de Bombeo

Las centrales de bombeo son un tipo especial de centrales hidroeléctricas que posibilitan un empleo más racional de los recursos hidráulicos de un país.

Disponen de dos embalses situados a diferente nivel. Cuando la demanda de energía eléctrica alcanza su máximo nivel durante el día, las centrales de bombeo funcionan como una central convencional generando energía.

Al caer el agua, almacenada en el embalse superior, hace girar el rodete de la turbina asociada a un alternador.

Después el agua queda almacenada en el embalse inferior. Durante las horas del día en la que la demanda de energía es menor el agua es bombeada al embalse superior para que pueda iniciar el ciclo productivo nuevamente.

Para ello la central dispone de grupos de motores-bomba o, alternativamente, sus turbinas son reversibles de manera que puedan funcionar como bombas y los alternadores como motores.

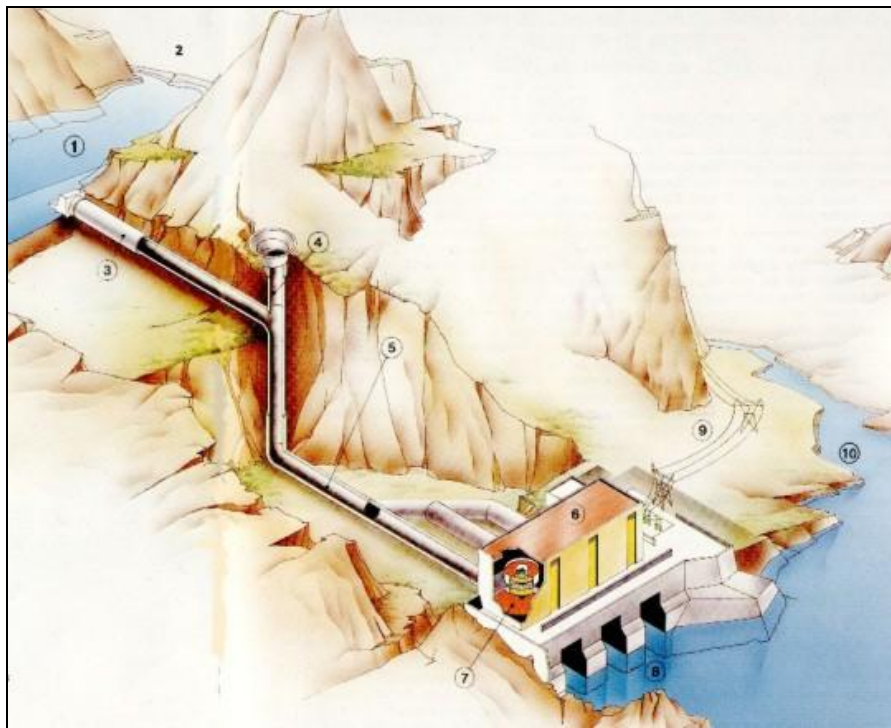


Figura 5.6: Central de Bombeo Tipo: 1. Embalse superior, 2. Presa, 3. Galería de conducción, 4-5. Tubería forzada, 6. Central, 7. Turbinas y generadores, 8. Desagües, 9. Líneas de transporte de energía eléctrica, 10. Embalse inferior o río.

5.6 Turbinas Hidráulicas

Hay tres tipos principales de turbinas hidráulicas:

- La rueda Pelton, que es adecuada para saltos grandes
- La turbina Francis, adecuada para salto medianos
- La de hélice o turbina Kaplan, muy útil en saltos pequeños.

El tipo más conveniente dependerá en cada caso del salto de agua y de la potencia de la turbina.

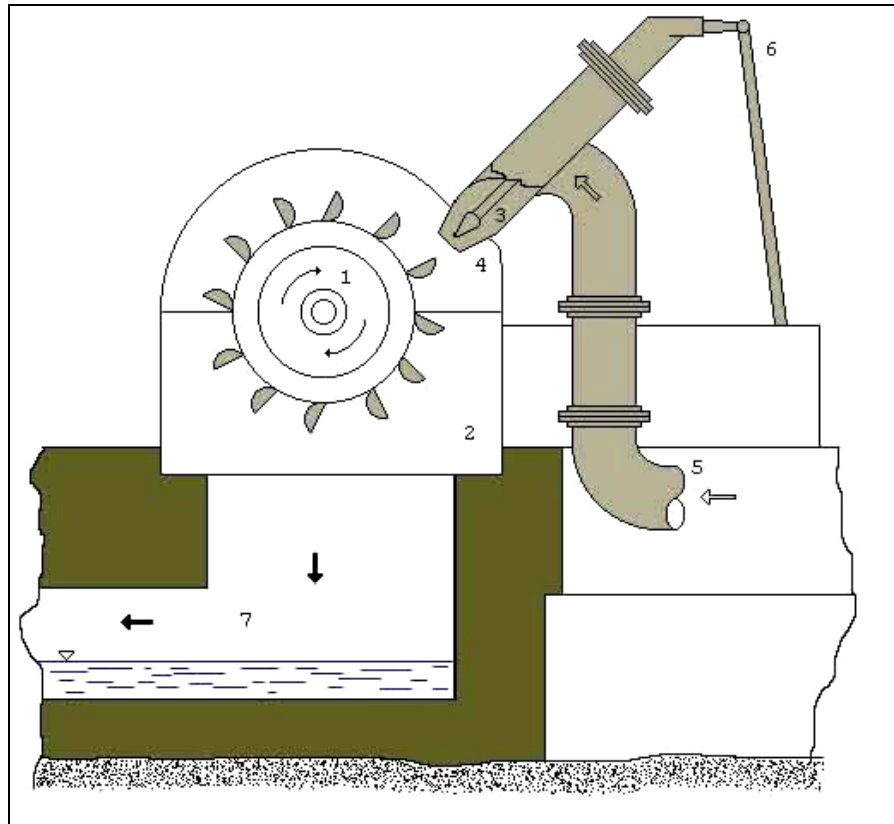


Figura 5.7: Esquema de la rueda Pelton: 1. Rodete, 2. Cuchara, 3. Aguja, 4. Tobera, 5. Conducto de entrada, 6. Mecanismo de regulación, 7. Cámara de salida.

Un chorro de agua, convenientemente dirigido y regulado, incide sobre las cucharas del rodete que se encuentran uniformemente distribuidas en la periferia de la rueda. Debido a la forma de la cuchara, el agua se desvía sin choque, cediendo toda su energía cinética, para caer finalmente en la parte inferior y salir de la máquina. La regulación se logra por medio de una aguja colocada dentro de la tobera.

Este tipo de turbina se emplea para saltos grandes y presiones elevadas.



Figura 5.8: a) Rodete y cuchara de una turbina Pelton; b) Turbina Pelton y alternador

Para saltos medianos se emplean las turbinas Francis, que son de reacción.

En el dibujo podemos apreciar la forma general de un rodete y el importante hecho de que el agua entre en una dirección y salga en otra a 90° , situación que no se presenta en las ruedas Pelton. Las palas o álabes de la rueda Francis son alabeadas.

Un hecho también significativo es que estas turbinas en vez de toberas, tienen una corona distribuidora del agua.

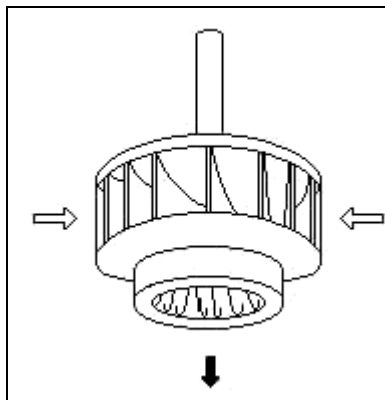


Figura 5.9: Turbina Francis

Esta corona rodea por completo al rodete. Para lograr que el agua entre radialmente al rodete desde la corona distribuidora existe una cámara espiral o caracol que se encarga de la adecuada dosificación en cada punto de entrada del agua.

El rodete tiene los álabes de forma adecuada como para producir los efectos deseados sin remolinos ni pérdidas adicionales de carácter hidrodinámico.

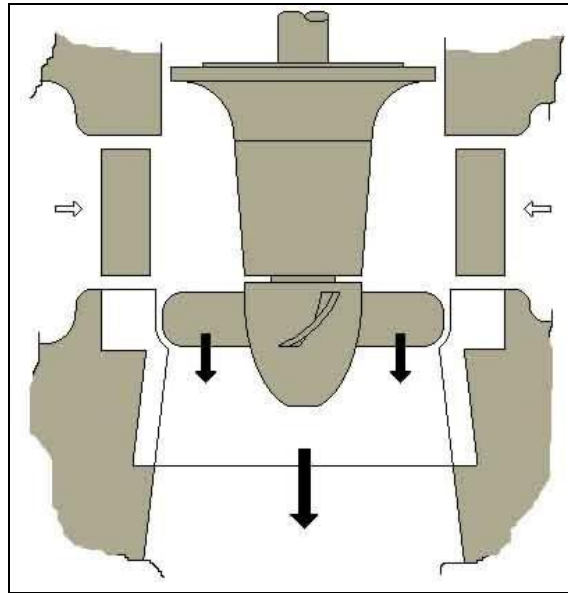


Figura 5.10: Turbina Kaplan

En los casos en que el agua sólo circule en dirección axial por los elementos del rodete, tendremos las turbinas de hélice o Kaplan. Las turbinas Kaplan tienen álabes móviles para adecuarse al estado de la carga.

Estas turbinas aseguran un buen rendimiento aún con bajas velocidades de rotación.

5.7 Ventajas y desventajas

La energía hidroeléctrica en general, y su uso en particular, presenta ciertas ventajas sobre otras fuentes de energía, como son:

- Disponibilidad: Es un recurso inagotable, en tanto en cuanto el ciclo del agua perdure.
- No contamina" (en la proporción que lo hacen el petróleo, carbón, etc.): Nos referimos a que no emite gases "invernadero" ni provoca lluvia ácida, es decir, no contamina la atmósfera, por lo que no hay que emplear costosos métodos que limpien las emisiones de gases.
- Produce trabajo a la temperatura ambiente: No hay que emplear sistemas de refrigeración o calderas, que consumen energía y, en muchos casos, contaminan, por lo que es más rentable en este aspecto.
- Almacenamiento de agua para regadíos
- Permite realizar actividades de recreo (remo, bañarse, etc.)
- Evita inundaciones por regular el caudal.

Del mismo modo, algunas desventajas que se encuentran en este tipo de generación eléctrica:

- Puede causar inundación
- La construcción
 - 10-15 años
 - Muy caro
- Cambia el flujo natural del agua
 - Inhibición de movimiento de peces
 - Peor calidad de agua
 - Contaminaciones en los embalses artificiales

Capítulo 6 Energía Geotérmica

6.1 Introducción

La tierra se define como un sistema de fluidos en mutua interacción. Los hay rápidos y lentos, pero el planeta, en su conjunto, se mantiene en un estado de equilibrio. Como consecuencia, la Tierra tiene distintas formas de energía intrínseca. Entre ellas, las de mayor interés son la cinética, elástica y térmica, entre las cuales además existe un intercambio permanente. La geotermia corresponde a la energía térmica interna de la Tierra. La tecnología actual permite diversas formas de aprovechamiento de esta energía con el fin de convertirla en energía útil (calor, electricidad).

El recurso geotérmico explotable se encuentra a profundidades que oscilan entre algunos cientos de metros y 3 kilómetros de profundidad. Existen dos aplicaciones principales de la energía geotérmica (GT), la utilización del calor de la tierra para producir electricidad y la entrega de servicios directos de calor (como por ejemplo, agua caliente o calefacción). Como consecuencia de esto, se diferencian las unidades de medida asociadas al uso de la geotermia. Para aplicaciones en electricidad se hace uso de la unidad MWe, mientras que el resto de las aplicaciones utilizan la unidad usual de potencia MW o bien MWt para reconocer aplicaciones térmicas directas.

Es importante recalcar que la GT constituye una alternativa energética a los energéticos de tipo fósil. Lo anterior la define como una alternativa de diversificación de la matriz energética en países fuertemente dependientes de fuentes energéticas no renovables.

Para el uso de la geotermia en la producción de electricidad se han desarrollado y están en desarrollo distintas tecnologías, entre las que destacan la de tipo “Flash”, “Vapor seco”, “Binaria” y de “Roca Seca”. La elección de una de estas tecnologías depende de la conjunción de distintas características del yacimiento geotérmico, entre las que cabe mencionar:

- Existencia o no de agua en forma natural en la fuente de calor geotérmico,
- Características químicas del agua existente en el yacimiento,
- Temperatura de la fuente de calor geotérmico,
- Profundidad de la fuente de calor.

Actualmente existe polémica por la categoría de energía renovable que se le atribuye a la energía geotérmica, entendiéndose por ésta, aquella forma de energía derivada de procesos naturales que son reestablecidos constantemente. La energía geotérmica es considerada una fuente de energía renovable, en tanto la tasa de extracción de calor y/o agua sea menor a la tasa de reposición por parte de la tierra. Una vez agotada una fuente de generación geotérmica, la restauración de sus condiciones térmicas puede durar entre 30 y 200 años.

Asimismo, en yacimientos geotérmicos, donde no se reinyecta el agua utilizada, la posibilidad de utilización del recurso vapor de agua necesario en el proceso puede agotarse, quedando inutilizado el yacimiento.

El uso de tecnología GT es un medio eficiente para minimizar la contaminación en la producción de energía. Una planta de este tipo produce 1/6 de las emisiones de CO₂ de una central térmica a gas natural por kWh producido, por lo que generalmente cumple con los límites de emisión establecidos [1]. Este tipo de yacimientos utiliza vapor cuya composición incluye gases no condensables, tales como CO₂, H₂S, NH₃, CH₄, N₂ y H₂ en valores entre 2.5 y 47 g/kg (gramos de contaminante por Kg de vapor). Además, este tipo de centrales no contamina (NOx) ni (SOx). El Ácido sulfhídrico H₂S es el contaminante de mayor preocupación en centrales GT. Su concentración, en el vapor extraído del yacimiento oscila entre 0.1 y 1.5 g/kg en distintas plantas generadoras en el mundo, mientras que las emisiones lo hacen entre 0.5 y 6.8 g/kWh. Sin embargo, no se ha establecido una relación directa entre las emisiones de H₂S y el fenómeno de lluvia ácida. De acuerdo a información preliminar estudiada para el caso chileno, se estima que los niveles de concentración de los contaminantes se encontrarían por debajo de los promedios internacionales. En este contexto, el problema de contaminación del aire no aparece como crítico en los proyectos geotérmicos

La tecnología de GT Flash sin reinyección de agua es la que provoca mayores niveles de emisión de los contaminantes antes mencionados. Una medida eficiente, desde el punto de vista de contaminación del aire, es utilizar un mecanismo de reinyección en la tecnología Flash, con lo cual se reduce de manera drástica las emisiones. Este aspecto es de especial importancia en Chile, dado que se tienen antecedentes de un posible uso de tecnología Flash sin tener detalles sobre el tratamiento del vapor extraído. Adicionalmente, la reinyección del vapor utilizado en la generación de energía eléctrica en forma de agua, es un aspecto crítico desde el punto de vista ambiental. El déficit de agua en el yacimiento puede provocar hundimiento de terreno y una disminución de la vida útil del yacimiento. El tratamiento de las aguas residuales del proceso de generación GT, puede constituir un aspecto ambiental crítico en la medida que afecte napas o el abastecimiento de agua potable.

Estas cifras se ven mejoradas con el uso de tecnología de última generación en GT (particularmente binaria) y su impacto se ve disminuido en yacimientos que usualmente se encuentran alejados de conurbaciones. En este contexto, las centrales de tipo binario, presentan ventajas importantes respecto de contaminación atmosférica, al no exponer los gases contaminantes a la atmósfera. Esta característica podría tener importancia en países donde se ha implementado la transacción de bonos o cupos de emisión para gases de efecto invernadero.

6.2 Tipos de Energía Geotérmica

Básicamente, una central geotérmica consta de una perforación realizada en la corteza terrestre con el fin de alcanzar una fuente geotérmica. El funcionamiento se realiza mediante un sistema simple: un tubo que ha sido introducido en la perforación practicada, conduce un fluido acuoso desde la fuente de calor hacia la superficie, en donde una turbina, acoplada al tubo, con un generador de energía eléctrica se encargan de transformar la energía calórica en energía eléctrica. Para la realización de esta idea básica se han desarrollado distintas tecnologías que tienen como común denominador el uso de un fluido en estado de vapor que es capaz de accionar una turbina a vapor y consecuentemente un generador eléctrico.

Una primera clasificación de los recursos GT distingue entre los llamados hidrotérmicos naturales (Vapor Seco, Flash y Binaria) y los de roca caliente seca (Hot Dry Rock, HDR).

Una segunda clasificación de las tecnologías se puede realizar a partir de aquellas tecnologías que hacen uso directo del vapor proveniente de la fuente GT, utilizando vapor seco producido en forma natural (tecnología Dry Steam) o a través del bombeo en tanques de vapor a menor presión (tecnología Flash), de aquellas que utilizan un ciclo binario que aprovecha fluidos útiles con temperaturas de vaporización menores. El atractivo de una u otra tecnología dependen de las características del yacimiento: temperatura del agua, permeabilidad de la formación rocosa, química del agua y profundidad de la perforación. La composición química del vapor en los yacimientos es muy variada, pudiendo contener CO₂, H₂S, NH₃, CH₄+H₂, etc.

Actualmente se busca explotar puntos de alta temperatura de rocas secas (HDR) a mucha mayor profundidad que las plantas convencionales, a los cuales es necesario inyectar agua con el fin de extraer vapor. Estos recursos y la tecnología asociada, aún no explotados comercialmente, se encuentran generalmente a profundidades del orden de los 4 km, con un diámetro de las perforaciones de 7" aprox., siendo su potencial energético y vida útil mucho mayor al de los recursos GT hidrotérmicos. Un detalle sobre esta tecnología emergente y en vías de desarrollo se encuentra en las referencias.

A continuación se resumen un conjunto de características técnicas relevantes adicionales de la tecnología de generación geotérmica:

- La eficiencia térmica del proceso GT para la generación de electricidad se supone, dependiendo del yacimiento y tecnología utilizada, entre un 10% y un 17%.

- En general un pozo de perforación GT posee una capacidad de producción eléctrica de entre 6 y 8 MWe, existiendo situaciones excepcionales con pozos de hasta 40 MWe.
- La característica anterior señala un grado de robustez desde el punto de vista de la operación de un denominado parque geotérmico. Cada unidad de generación opera en forma independiente, por lo que la salida intempestiva de una unidad no debiera afectar la operación del resto. Consecuentemente un análisis de seguridad de operación de tipo n-1 de unidades de generación debiera considerar la salida de operación del pozo de mayor generación existente en el parque.
- Aplicaciones de GT para la generación de energía eléctrica (sobre 10 MWe) son una realidad comercial hace más de 30 años en USA e Italia. La primera planta GT de generación eléctrica en USA fue inaugurada en 1922.
- La vida útil de un yacimiento geotérmico para generación de electricidad es de entre 30 y 50 años. Sin embargo, es relevante señalar que esta vida útil depende de forma importante de las características geológicas del yacimiento y del tratamiento que se le de al vapor extraído dependiendo de la tecnología empleada. Cabe señalar que esta vida útil no necesariamente coincide con el horizonte de tiempo del análisis económico de un proyecto GT.
- Las bombas geotérmicas de calor Geothermal heat pumps (GHPs), comúnmente mencionadas en la literatura sobre GT, corresponden a una tecnología en pleno desarrollo que permite el uso de fuentes de GT para la calefacción y refrigeración de viviendas. Un sistema de cañerías, dependiendo de su sentido de operación permite la transferencia de calor desde o hacia la fuente de GT.

Es probable que en Chile se haga uso de un sistema de GT hidrotérmico tipo Flash, compartiendo la mayoría de las características particulares antes mencionadas. No se dispone de información sobre la existencia de reinyección de agua del vapor extraído en los proyectos para Chile. Lo más probable es que se utilice reinyección parcial de agua. Los aspectos más técnicos relativos al control se presentan en Anexo A.

En países con investigación en GT (USA, Italia, Islandia, Nueva Zelanda, Japón, Alemania, entre otros), los recursos de investigación, con el fin de disminuir costos de esta tecnología durante la próxima década, se focalizan en los siguientes ámbitos:

- Tecnologías avanzadas de prospección y perforación,
- Eficiencia y vida útil de plantas de generación,
- Tecnología HDR (hot dry rock),
- Diagnósticos geofísicos y modelación y
- Caracterización de formaciones.

Como centros de excelencia en GT se identifica: Instituto Internacional de Investigaciones Geotérmicas de Italia; Instituto de Geología General y Aplicada de la Universidad de Múnich, Alemania; Instituto Geotermal de la Universidad de Auckland, Nueva Zelanda.

6.3 Generación Eléctrica a partir de Geotermia

Dependiendo del yacimiento geotérmico, existen distintas formas de explotación del recurso energético: explotación convencional, explotación flash y explotación de ciclo binario.

En general, las tres tecnologías mencionadas requieren un sistema de control de la presión de entrada de la turbina, de los flujos que son extraídos e inyectados hacia el recurso geotérmico, la alimentación de la excitatriz del generador eléctrico y finalmente de un control de fallas del sistema. Otros tipos de control son requeridos en forma particular para cada una de las tecnologías anteriormente mencionadas.

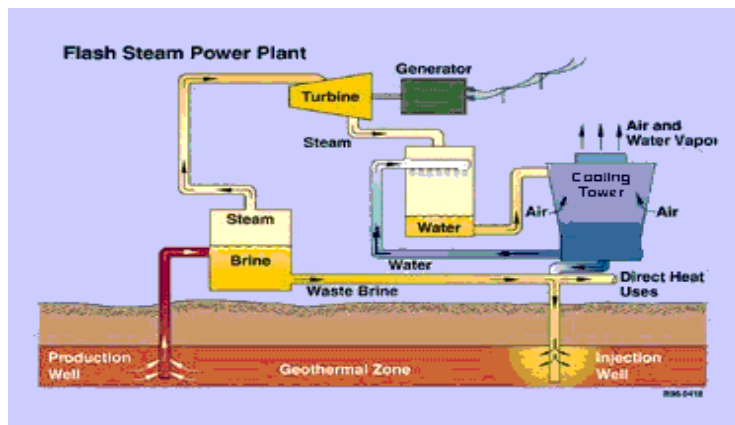
6.3.1 Explotación Convencional

La explotación convencional se realiza cuando es posible obtener vapor directamente del recurso natural, de esta manera la conversión energética térmica-eléctrica se realiza mediante un esquema de planta de vapor tradicional. En el caso en que el fluido sea agua a alta temperatura (sobre los 200°C) se prefieren la tecnología Flash en la cual el líquido es volatilizado a través de tanques de vaporización de baja presión. Por otra parte, si el agua tiene una menor temperatura (por debajo de los 200°C) se emplea la tecnología de ciclo binario que emplea un fluido con un punto de vaporización más bajo que el agua, estableciéndose dos ciclos independientes con transferencia energética a través de un intercambiador de calor.

Básicamente, el uso de plantas convencionales se encuentra limitado a que el recurso geotérmico sea capaz de proveer vapor de características deseadas para que la conversión energética sea eficiente. Sumado a esto se tiene que este tipo de yacimientos es escaso, por lo que en general se prefiere la puesta en operación de plantas tipo Flash o Binaria.

6.3.2 Plantas Tipo Flash

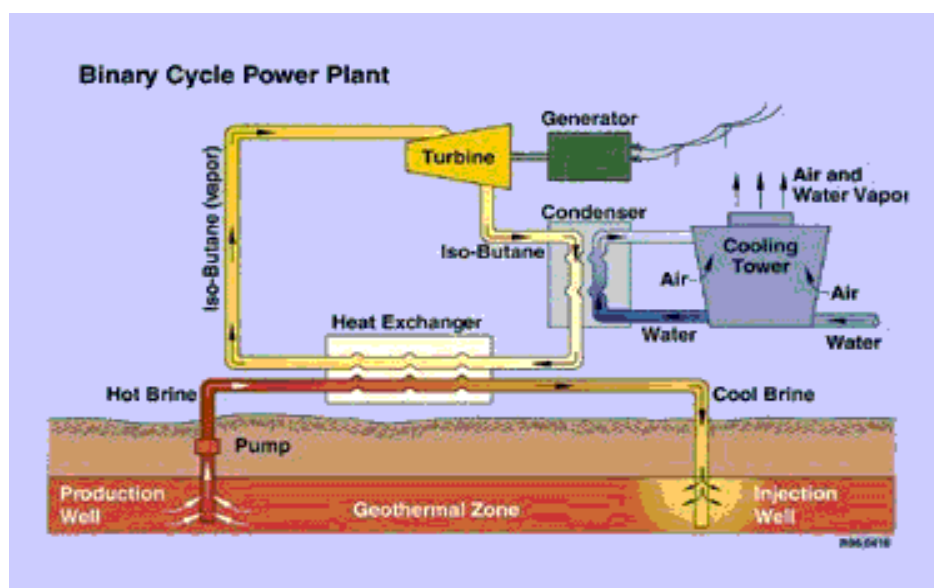
La generación eléctrica con plantas tipo Flash se presenta en el esquema de la siguiente figura:



El diagrama mostrado permite visualizar los mecanismos de control que se implementan en este tipo de plantas, esto es, el control sobre la extracción e inyección de fluidos y el control sobre la cámara de baja presión que permite vaporizar el fluido que se extrae del yacimiento geotérmico. De este modo, se optimiza el intercambio energético con la turbina. Adicionalmente a lo que se muestra la figura, el control sobre la corriente rotórica del generador permite controlar los puntos de operación para inyección de potencia activa hacia la red.

6.3.3 Tecnología de Ciclo Binario

En el caso de las plantas geotérmicas con tecnología de tipo Ciclo Binario la lógica de control se puede representar a partir del esquema de planta mostrado a continuación:



Para tecnologías de Ciclo Binario, al igual que el caso de tecnologías Flash, existe un sistema de control que actúa sobre la extracción y posterior inyección de fluidos del yacimiento geotérmico. La diferencia más marcada tiene relación con el hecho de que el ciclo binario se constituye como un lazo de control independiente. Esto último debido a que el fluido que atraviesa la turbina recorre un circuito completamente separado al recorrido por el fluido original.

De este modo un segundo lazo de control está encargado de la optimización del intercambio energético a través de un fluido con características de vaporización superiores al agua. Adicionalmente son necesarios sistemas de control dedicados al intercambio de calor, tanques de condensación, etc.

Finalmente, es necesario mencionar que un tercer mecanismo de control lo compone el control eléctrico sobre el generador a través de la corriente de excitación del mismo y que es análogo al caso de la planta tipo Flash.

6.4 Situación Internacional

En la siguiente tabla se resumen características de proyectos específicos a nivel mundial y se entrega detalles de las empresas fabricantes.

(<http://www.eren.doe.gov/geothermal/geysers.html>).

Tabla 6.1: Proyectos Geotérmicos Específicos a nivel mundial

Operador	Planta	Plant Tipo	Turbina DEM	Gross MW	Condensador	Off Gas	Primary Abatement	Secondary Abatement	Año Entrada	Año Salida
Calpine	UNIT 1	DRY STEAM	GE	12	BAROMETRIC	2 STG JET	INCIN	FE CHE***	1960	1992
Calpine	UNIT 2	DRY STEAM	ELLIOT	14	BAROMETRIC	2 STG JET	INCIN	FE CHE	1963	1992
Calpine	UNIT 3	DRY STEAM	ELLIOT	28	BAROMETRIC	2 STG JET	ICP**	N/A	1967	1992
Calpine	UNIT 4	DRY STEAM	ELLIOT	28	BAROMETRIC	2 STG JET	ICP	N/A	1968	1992
Calpine	UNIT 5	DRY STEAM	TOSHIBA	55	LLDC*	2 STG JET	INCIN	FE CHE	1971	
Calpine	UNIT 6	DRY STEAM	TOSHIBA	55	LLDC	2 STG JET	INCIN	FE CHE	1971	
Calpine	UNIT 7	DRY STEAM	TOSHIBA	55	LLDC	2 STG JET	INCIN	FE CHE	1972	
Calpine	UNIT 8	DRY STEAM	TOSHIBA	55	LLDC	2 STG JET	INCIN	FE CHE	1972	
Calpine	UNIT 9	DRY STEAM	TOSHIBA	55	LLDC	2 STG JET	ICP	N/A	1973	
Calpine	UNIT 10	DRY STEAM	TOSHIBA	55	LLDC	2 STG JET	ICP	N/A	1973	
Calpine	UNIT 11	DRY STEAM	TOSHIBA	110	LLDC	2 STG JET	INCIN	FE CHE	1975	
Calpine	UNIT 12	DRY STEAM	TOSHIBA	110	LLDC	2 STG JET	INCIN	FE CHE	1979	
Calpine	UNIT 13	DRY STEAM	GE	138	SURFACE	2 STG JET	STRET	FE CHE	1980	
Calpine	UNIT 14	DRY STEAM	TOSHIBA	114	SURFACE	2 STG JET	STRET	FE CHE	1980	
Calpine	UNIT 15	DRY STEAM	GE	62	SURFACE	2 STG JET	LOCAT	FE CHE	1979	1989
Calpine	UNIT 16	DRY STEAM	TOSHIBA	119	SURFACE	2 STG JET	STRETFORD	FE CHE	1985	
Calpine	UNIT 17	DRY STEAM	TOSHIBA	119	SURFACE	2 STG JET	STRETFORD	FE CHE	1982	
Calpine	UNIT 18	DRY STEAM	TOSHIBA	119	SURFACE	2 STG JET	STRETFORD	FE CHE	1983	
Calpine	UNIT 20	DRY STEAM	TOSHIBA	119	SURFACE	2 STG JET	STRETFORD	FE CHE	1985	
NCPA	NCPA 1	DRY STEAM	FUJI	2x55	SURFACE	2 STG JET	STRETFORD	FE CHE	1983	
NCPA	NCPA 2	DRY STEAM	ANSALDO	2x55	SURFACE	2 STG JET	STRETFORD	FE CHE	1985/86	
SMUD	SMUDGE	DRY STEAM	MITSUBISHI	78	SURFACE	COMP/JET HYBRID	STRETFORD	PEROXIDE	1983	
SANTA FE	SANTA FE	DRY STEAM	TOSHIBA	2x48	SURFACE	2 STG JET	STRETFORD	FE CHE/ PEROXIDE	1984	

CALIF/DWR	BOTTLE ROCK	DRY STEAM	FUJI	55	SURFACE	2 STG JET	STRET FORD	PEROXIDE	1985	1990
SMUD	CCPA	DRY STEAM	TOSHIBA	2x66	SURFACE	COMP/JET HYBRID	STRET/INCIN	FE CHE/SUL-FITE	1988	
Calpine	BEAR CANYON	DRY STEAM	MITSUBISHI	2x11	SURFACE	2 STG JET	STRET FORD	PEROXIDE	1988	
Calpine	FORD FLAT	DRY STEAM	MITSUBISHI	2x17	SURFACE	2 STG JET	STRET FORD	PEROXIDE	1988	
Calpine	AIDLIN	DRY STEAM	FUJI	12.5	SURFACE	2 STG JET	INCIN	FE CHE	1989	

La siguiente tabla muestra la evolución a nivel mundial de la capacidad instalada de generación de energía GT y su evolución respecto de USA.

Tabla 6.2: Evolución mundial de capacidad instalada de energía GT

Cumulative Installed Capacity		Source: EIA - AEO 1997-2002, Table A17, Renewable Resources in the U.S. Electric Supply, 1993-Table 4, World Totals from UNDP World Energy Assessment 2000, Tables 7.20 and 7.22 and, Renewable Energy World/July-August 2000.								
		1980	1985	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Electricity (MW _e)										
U.S.				2,575	3,020	3,000	2,870	2,860	2,790	2,850
Rest of World				3,292	3,778		5,130	5,379		
World Total				5,867	6,798		8,000	8,239		
Direct Use- Heat (MW _{th})										
U.S.								1,910		
Rest of World								9,090		
World Total		1,950	7,072	8,064	8,664		10,400	11,000		17,175

Existe consenso en que la producción de electricidad mediante el uso de geotermia no ha experimentado un crecimiento importante en la última década, con un crecimiento anual promedio de cerca del 1%. En lo que se refiere a aplicaciones de GT para la generación de electricidad¹ la situación es la siguiente:

- La geotermia actualmente es la tercera fuente de mayor importancia de energía primaria renovable con un 9.3%, después de las plantas hidráulicas (35.6%) y de la biomasa sólida con un 45.4%.
- En el mundo existen alrededor de 8000 MWe y 4000 MWt de potencia GT instalada. De estas cifras, en 18 puntos de extracción, 2800 MWe y 600 MWt se ubican en Estados Unidos de Norteamérica (USA). USA produce un 44.6% (14678 GWh) de la energía geotérmica eléctrica del mundo en el año 2000, seguido de México (5901 GWh) e Italia (4705 GWh).
- En USA la producción eléctrica mediante geotermia ha disminuido de 16525 GWh en 1990 a 14678 GWh en el año 2000. Sin embargo, países como Islandia han

¹ En la bibliografía se encuentra el nombre del documento o directorio aludido que es parte de la base de datos de este estudio.

presentado tasas de crecimiento de 16.7% pasando de 283 GWh a 1323 GWh en igual periodo.

- La mayor planta de generación geotérmica está ubicada en la parte norte de California, USA. Esta planta alcanzó su máximo de potencia instalada en 1989 con 1967 MWe. Esta capacidad ha declinado a cerca de 1100 MWe en el 2000.
- Se argumenta que el nivel de penetración puede ser mejorado sustancialmente en la medida que exista una cultura en su uso, que permita aprovechar y prolongar al máximo la utilización del recurso.
- Los beneficios de la opción geotérmica son de mediano plazo, por lo que es necesario entregar un marco regulatorio estable y claro para la exploración y explotación de los yacimientos.
- En USA, los estados con mayor cantidad de instalaciones de GT son California (7.3% de la demanda), Nevada y Utah; con gran potencial en los estados de Idaho, New Mexico, Arizona, Oregon y Wyoming. Se espera que en la próxima década se desarrollen proyectos por 15000 MWe en USA. Actualmente, la geotermia corresponde a nivel de USA a un 0.4 % de la energía eléctrica consumida.
- Actualmente, la GT representa alrededor el 0.26% de la capacidad de generación eléctrica instalada a nivel mundial.
- Existe una cantidad importante de grupos económicos asociados a GT. Información detallada se encuentra en: U.S. Department of Energy Renewable Electric Plant Information System (REPiS Database) online y Global Energy Marketplace. Para buscar fabricantes de estas tecnologías se recomienda utilizar el buscador de James & James (Science Publishers), the World Renewable Energy Suppliers and Services. En USA pueden mencionarse las siguientes empresas líderes: Calpine Corporation, Caithness Energy, Cal Energy Company (a subsidiary of Mid American Energy Holding Company), Ormat International, Inc.
- A nivel Latinoamericano, la experiencia de Nicaragua es de interés. Los primeros estudios para aprovechar la energía geotérmica se iniciaron en Nicaragua a finales de los años '60, para tomar un gran impulso a partir del año 1973, cuando la crisis del petróleo impactó negativamente en la balanza comercial del país. La explotación comercial de este recurso comenzó en el año 1983, con la puesta en operación de la planta geotérmica de Momotombo, la cual tiene actualmente una capacidad de 70 MW. Para la integración de este recurso se desarrolló un plan maestro que incluía todos los aspectos regulatorios necesarios. Los recursos geotérmicos en este país se calculan en 3000 MWe. El desarrollo actual de la geotermia en Nicaragua se ve fuertemente comprometido por la falta de inversión en el sector, lo que ha llevado a paralizar y a operar en forma defectuosa instalaciones existentes.
- A nivel sudamericano se dispone de la siguiente información: el desarrollo en Argentina es muy bajo, limitándose a plantas experimentales. En Ecuador, existe 1 proyecto GT de algunos MWe para los próximos 10 años.
- Según estudios de la Universidad de Chile, el potencial GT en Chile es de 16000 MWe. A modo de comparación, el potencial geotérmico en USA está calculado en 40000 MWe.

Cabe señalar que en otros ámbitos, el uso de la GT se ha masificado en algunos países. A modo de ejemplo, el 86% de los hogares en Islandia es calefaccionado a través de 200 redes de distribución de calor de fuentes GT. Este país presenta las mayores tasas de crecimiento en el desarrollo de la GT. La siguiente tabla resume la capacidad instalada de generación de Energía Geotérmica por país expresada en MWe.

Tabla 6.3: Energía Geotérmica en el mundo

Country Year	1990	1995	1998
Argentina	0.67	0.67	0
Australia	0	0.17	0.4
China	19.2	28.78	32
Costa Rica	0	55	120
El Salvador	95	105	105
Francia (Guadalupe)	4.2	4.2	4.2
Grecia	0	0	0
Guatemala	0	0	5
Islandia	44.6	49.4	140
Indonesia	144.75	309.75	589.5
Italia	545	631.7	768.5
Japón	214.6	413.7	530
Kenia	45	45	45
México	700	753	743
Nueva Zelandia [14]	283.2	286	345
Nicaragua	70	70	70
Filipinas	891	1191	1848
Portugal (Azores)	3	5	11
Rusia	11	11	11
Tailandia	0.3	0.3	0.3
Turquía	20.4	20.4	20.4
USA	2774.6	2816.7	2850
Totales	5866.72	6796.98	8240

Capítulo 7 Energía del Mar

7.1 Introducción

La energía es una propiedad de la materia que representa la mayor o menor capacidad de realizar un trabajo o producir transformaciones. Si bien es única, puede presentarse bajo diversas formas, y transformarse de unas a otras.

Fuentes de energía renovables o alternativas se denomina a aquellas que se regeneran naturalmente, y en su concepción traen implícita la idea de ser “no contaminantes”. Estas se pueden volver fuentes no renovables si la velocidad de explotación supera la capacidad de regeneración de las mismas.

Por el contrario, se entiende por fuentes de energía no renovables a aquellas que implican el consumo de recursos agotables y contaminantes. Algunos ejemplos son el petróleo, el carbón y las usinas nucleares.

La fuente primaria de toda la energía está en el sol, según los procesos que nos permiten disponer de ella son sus diferentes manifestaciones.

Algunas fuentes de energía renovable son:

- Bioenergía
- Eólica
- Solar (fotovoltaica, térmica y arquitectura solar)
- Hidroenergía
- Marítima (mareas, olas y gradientes térmicos)
- Geotérmica
- Hidrógeno

Este apunte se centrará en la extracción de energía mediante los océanos.

7.2 Características Físicas del Medio Marino

7.2.1 Temperatura

El calor recibido por el agua del mar procede principalmente de las radiaciones solares (y este detalle relaciona directamente la temperatura del agua con la iluminación), pero hay también otras fuentes importantes como el calor que asciende por convección desde el fondo de los mares y desde el interior de la tierra o desde la propia atmósfera, o el producido por las reacciones químicas que tienen lugar en el seno de los océanos.

Debido al elevado calor específico que presenta el mar, los cambios de temperatura que en él se producen son mucho menores que los terrestres, por ello el mar es un termorregulador que influye en los climas en función de la mayor o menor proximidad de la tierra emergida. Por esto existen también, entre otras causas, variaciones estacionales y diarias de la temperatura.

En general, la temperatura del mar oscila entre 2-30°C, pudiendo alcanzar en algún caso el valor extremo de 0°C. Las máximas oscilaciones térmicas diarias por término medio, son de 1°C y se producen entre las 14 y 15 h y las mínimas, se producen hacia las 5 h. Las oscilaciones de temperatura a nivel estacional van desde 5°C en los trópicos hasta 10°C en las zonas templadas, aunque en la costa y mares cerrados, estas oscilaciones suelen ser mayores (Mediterráneo, por ejemplo, hasta 12°C, Báltico hasta 17°C, Mar Negro hasta 18°C)

Hay otros factores que influyen en las oscilaciones térmicas:

- Latitud: tiempo de insolación e inclinación de los rayos solares.
- Profundidad: al aumentar, se estabiliza la temperatura entre 4 y 1°C. En superficie hay mayores variaciones aunque dependen también de los vientos y las corrientes, que mezclan las capas marinas.
- Corrientes: este factor puede llegar incluso a anular el efecto de la latitud sobre la temperatura.

La temperatura, junto con la salinidad, influye en la densidad y solubilidad de los diferentes gases que aparecen en el medio marino y ambos inciden sobre la distribución de los seres vivos en el mar. Todos estos factores afectan a los procesos bioquímicos o químicos que ocurren en los seres vivos, tanto vegetales como animales poiquilotermos. Según la ley de Van Hoff los procesos biológicos se duplican cada vez que se incrementa la temperatura en 10°C.

7.2.2 Luz

Una parte de la luz que llega al mar es absorbida, otra se dispersa por reflexión y el resto se convierte en calor. De la luz absorbida, una buena cantidad se dispersa a causa de las partículas en suspensión que hay en el agua del mar. Según Birge solo un 18% de las radiaciones solares llegadas a la superficie marina son reflejas a la atmósfera y el 82 %

restante son absorbidas y transformadas en calor. De este alto porcentaje absorbido solo un 2% es aprovechado por los organismos fitoplanctónicos.

La mayor o menor penetración de la luz en el mar depende de varios factores: estación del año, ángulo de incidencia, naturaleza del medio, grado de absorción atmosférica en función del clima. No todas las radiaciones llegan a la misma profundidad ya que la luz está constituida por un espectro de radiaciones de distinta longitud de onda, cada una de ellas con un color de atenuación diferente.

Las radiaciones de color rojo y naranja se absorben más rápidamente cuando el agua es transparente, de modo que a 4 m. la primera disminuye un 99% respecto a su intensidad en superficie. Las radiaciones violeta, verde y azul, e incluso amarillo, alcanzan mayores profundidades, siendo la azul la más penetrante, ya que a los 70 m. aun conserva un 70-80% de su intensidad en superficie. Las radiaciones infrarrojas son prácticamente opacas en el mar y las ultravioletas son aun menos absorbidas que las violetas. En aguas turbias, las que más penetran son las verdes y amarillas y en general, a mayor longitud de onda, mayor es su dispersión y menor, por tanto, su penetración.

Todo esto influye en la distribución escalonada de los vegetales marinos que utilizan distintos tipos de radiaciones para la fotosíntesis; así, algunas algas verdes costeras utilizan prácticamente todo el espectro de luz y se sitúan en las capas superiores. Las algas pardas, usan las radiaciones rojas y se distribuyen en los 5-15 m de profundidad. Otras como las rojas utilizan radiaciones azules, situándose a mayor profundidad según su especie.

A efectos de la penetración lumínica, pueden establecerse dos zonas marinas:

- *Fótica*: que es la zona hasta donde penetra la luz. Dividida a su vez en eufótica-hasta 80 m y disfótica de 80 a 200 m.
- *Afótica*: a partir de 200 m, donde no hay luz.

A nivel práctico la observación de la penetración de la luz en el mar se hace con los llamados discos Sechi.

7.2.3 Densidad

Coincide con el valor del peso específico por lo que al hablar de densidad del agua de mar se considera el valor de su peso específico, el cual es muy parecido o ligeramente inferior al que presentan los seres marinos. Esto es lo que permite a éstos flotar y desplazarse sin dificultad, o facilitar el paso del agua por el interior del cuerpo de los organismos que viven fijos, de forma que puedan aprovechar las partículas en suspensión.

La densidad del mar depende de la temperatura, presión y salinidad y en general aumenta con la profundidad. La densidad del mar depende de las corrientes que pueda haber en una zona, de modo que a igual profundidad puede haber distinta densidad. En este caso las aguas que afloran tenderán a hundirse o a elevarse para ajustar su densidad al nivel de profundidad (corrientes de convección).

En la zona superficial de las aguas, sobre todo en las próximas a la costa, suele decrecer la densidad debido a los aportes del agua de lluvia y ríos. Las aguas de más densidad se encuentran en altas latitudes (polares), por lo que tienden a hundirse y distribuirse por los fondos en zonas cada vez más amplias; esta es una de las causas de la baja temperatura de los fondos. La elevación de estas aguas hacia la superficie provoca en cierta medida los procesos de Up-Welling.

7.2.4 Presión

Todos los seres marinos están sometidos a la presión atmosférica, sumada, en función de la profundidad, a la de la columna de agua que tienen encima. En el medio marino, la presión aumenta 1 atmósfera por cada 10 m de profundidad, con lo que los organismos que se encuentran en las profundidades marinas pueden llegar a soportar presiones de unas 1000 atmósferas.

No se conocen bien los efectos de la presión hidrostática sobre los organismos, pero se supone que modifica la velocidad de los procesos biológicos y que interfiere en los efectos de otros factores como temperatura y salinidad.

7.2.5 El Sustrato

Es el soporte físico al que un ser vivo puede fijarse durante toda su vida o parte de ella. Está constituido por los fondos marinos y distintos materiales costeros (arenas, arcillas, limos, piedras). También pueden constituirse en sustrato cualquier objeto sumergido (botellas, cascos, etc.) e incluso los mismos seres vivos (algas y animales).

En relación con el sustrato, los organismos son selectivos, llegando a establecerse entre ellos relaciones de competencia a la hora de escoger donde se van a colocar ya que está en juego el proceso nutricional.

7.3 Corte de una Cuenca Oceánica

La corteza terrestre está constituida en su exterior por dos capas (Sial, silicatos aluminicos y Sima, silicatos magnésicos). El sial, la capa más externa, es discontinuo, forma los bloques continentales y flota sobre el sima. Esto provoca en el caso de los fondos marinos que, mientras por ejemplo, el del océano Atlántico está formado por el sial que constituye el puente entre los continentes americano y euroasiático, el del Pacífico, está constituido por el sima.

La topografía, distribución y magnitud de las profundidades marinas es muy variada.

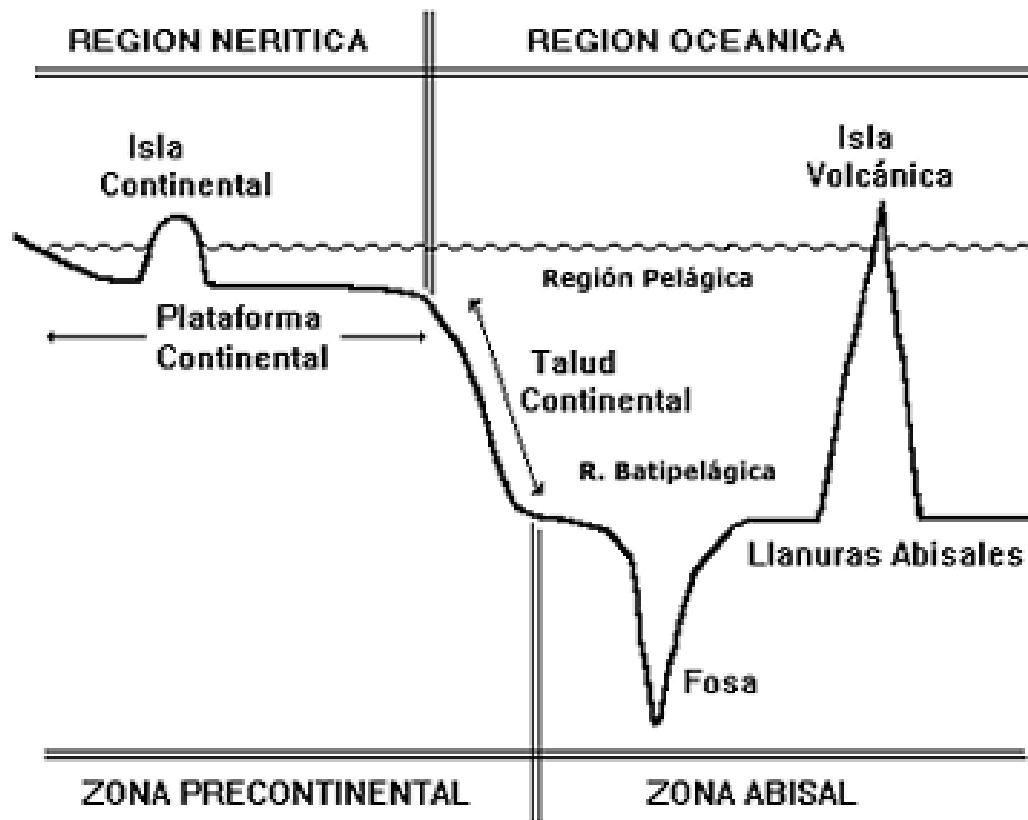


Figura 7.1. Corte de una cuenca Oceánica

La zona de transición entre continentes y océanos, formada básicamente por la plataforma y el talud continental, se denomina generalmente "precontinente" y se considera por ello un dominio fundamentalmente continental. La zona más cercana a la tierra, que soporta los efectos de la erosión marina de forma más intensa, es la llamada "plataforma litoral" o "plataforma costera".

- **Plataforma Continental:** prolongación del Continente pero sumergida, con una profundidad media de 200 m y pendientes generalmente suaves; su anchura es muy variable de una zona a otra (Francia: muy amplia, Cantábrico: muy estrecha). Se acumulan en ella gran cantidad de sedimentos; está recorrida por variados accidentes: Deltas de ríos, cañones submarinos, etc.
- **Talud Continental:** continuación de la Plataforma que se puede considerar ya como verdadera zona Oceánica; presenta pendientes muy acusadas y va desde 200 m hasta 4.000 m. Acumula también sedimentos que a veces descienden hasta las Fosas Abisales. En algunas zonas aparecen cañones submarinos.
- **Borde continental:** es el margen inferior del talud continental y donde comienza realmente el dominio oceánico. Como es fácil suponer, hablamos de una frontera difícilmente delimitable.
- **Arcos Insulares:** alineaciones de Islas volcánicas que aparecen siempre con relativa proximidad a un continente y paralelas a la costa; dibujan formas convexas hacia el

océano. Entre ellas y el continente aparece un mar pequeño que se denomina Cuenca Marginal.

- **Fosas Abisales:** son las zonas marinas de mayor profundidad de toda la cuenca oceánica; normalmente aparecen frente a las costa y paralelas a ella. Aunque no es frecuente, pueden presentar fondos planos. Las costas con Arcos Insulares siempre tienen Fosas Abisales.
- **Llanuras Abisales:** zonas extensas en las que las pendientes son escasas; hay montañas submarinas, zonas de Volcanes, generalmente en actividad, a veces Islas volcánicas y Guyots (montañas con la parte superior plana).
- **Dorsales Oceánicas:** son de gran importancia; zonas muy activas que atraviesan todos los océanos. Extensión aproximada de 60 millones de Km, anchura de 1.000 a 4.000 m y altura de unos 3 m.



Figura 8.2: Fondo marino

7.4 Características químicas del medio marino

El agua de mar lleva en suspensión una gran cantidad de sólidos y gases, pudiendo admitir en general que todos los elementos químicos presentes en la tierra aparecen en el agua de mar. La proporción de cada uno de estos elementos disueltos es diferente, variando también sus porcentajes en función de la zona de mar de que se trate en cada momento. El estudio de estos porcentajes es muy dificultoso, por eso normalmente se dan datos medios.

Algunos elementos son difíciles de cuantificar porque aparecen en porcentajes muy bajos (para obtener 1 gr. de Ra se necesitaría tratar 5 millones de cc de agua), otros porque requieren técnicas analíticas muy finas, etc. Pero su presencia es observable en la composición de los propios animales marinos (el Cu, muy escaso, es fundamental para la formación de Hemocianina en Moluscos y otros Crustáceos).

Las variaciones se ven también influidas por los elementos de mezcla y transporte, sobre todo a nivel superficial, de olas, mareas y corrientes.

A pesar de la gran complejidad observada en la composición química del agua de mar, en lo que se refiere a sus principales componentes, existe siempre, y en todos los mares, una gran constancia en las proporciones relativas de cada uno de ellos.

7.4.1 Salinidad

En base a esta uniforme proporción de los diversos componentes del agua de mar, se acepta que la determinación de cualquiera de ellos, mejor del más abundante, sirve como indicador del total de los elementos disueltos. Conociendo la dependencia que existe entre determinadas propiedades físicas del agua marina y su composición química, la determinación de este componente sirve también para la determinación indirecta de dichas propiedades físicas.

La salinidad es el más interesante de los factores químicos y se define como la concentración de sólidos disueltos por Kgr de agua de mar. Los componentes fundamentales de estos sólidos son los aniones (cloruros, fosfatos, ...) y los cationes (Na, Mg, ...).

La relación entre aniones y cationes va a condicionar el pH del agua del mar, que oscila entre 8 y 8'3 y es por tanto ligeramente alcalino (esto le confiere una gran capacidad amortiguadora que tiene profundo interés biológico ya que muchos animales marinos carecen de estructuras aislantes del medio y por tanto, ligeras variaciones en el pH del medio afectan seriamente a su pH interno, pudiendo incluso causarles la muerte).

La salinidad está muy relacionada con la densidad y ésta es de gran importancia para los seres vivos ya que afecta a dos procesos fundamentales: el movimiento y la alimentación.

La salinidad está también relacionada con la clorinidad, de tal manera que conociendo los tantos por mil existe una relación en la cantidad de las distintas sales.

7.4.2 Distribución de la salinidad en los mares

La salinidad de los distintos mares es diferente y oscila entre 33 y 37%. , incluso hay variaciones en una misma zona debido a factores climáticos, topográficos, aportes fluviales, etc. Por citar algunos ejemplos extremos: la salinidad del Mediterráneo es de un 38%, la del mar Rojo y la del mar Negro es de un 40%. En el Báltico y en las desembocaduras de los grandes ríos, debido al alto aporte de agua dulce, la salinidad es casi nula.

La temperatura está relacionada con la salinidad por los efectos que produce la evaporación. Ambas están relacionadas a su vez con la densidad. Por lo tanto, cambios estacionales en las temperaturas significan cambios en la salinidad; este proceso sucede fundamentalmente en las capas superficiales y las isohalinas pueden experimentar desplazamientos estacionales que en mares abiertos suelen ser de N a S y viceversa; en zonas próximas a la costa estas variaciones pueden producirse en cualquier sentido.

7.4.3 Otras sustancias disueltas

En el medio marino aparecen una serie de sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas que proceden fundamentalmente de la descomposición de los desechos eliminados por los seres vivos marinos y de los restos de los que mueren. Pero de entre todos estos compuestos sólidos disueltos en el agua de mar, hay algunos que son imprescindibles para la síntesis de materia orgánica, y de ellos depende por lo tanto la vida en aguas marinas. Se les conoce con el nombre genérico de **sales nutritivas**.

Estas sales son fundamentales, entre otras razones, porque forman parte de muchas estructuras de los seres vivos y porque son indispensables en la nutrición de muchos de ellos. Las más necesarios son, en primer lugar, los fosfatos y los nitratos de los que depende totalmente el fitoplancton para poder realizar los procesos de fotosíntesis.

Son importantes también los compuestos de carbono (Carbonatos/Bicarbonatos) y los silicatos, ya que muchas de las especies que componen el plancton tienen esqueletos silíceos (diatomeas, flagelados, radiolarios).

Hierro, Cobre y Arsénico, por ejemplo, serían otros elementos, que aunque de menor importancia, son imprescindibles para animales y plantas. Aparecen casi siempre en cantidades muy reducidas y se llaman, por eso mismo, **oligoelementos**.

Así: el **Hierro** (Fe) es indispensable por cuanto una buena parte de la vida vegetal depende de su adecuada concentración en el mar. El término medio es de unos 2 micro-gr/litro. El **Cobre** (Cu) es necesario para la Hemocianina de los moluscos y en ciertas fases de desarrollo larvario. Su concentración varía de 1 a 10 micro-gr/litro. El **Arsenio** (As) es importante para las plantas. Su concentración oscila entre 9 y 22 micro-gr/litro.

La carencia de estas sales puede provocar alteraciones fisiológicas graves e incluso la muerte de animales y vegetales, pero además, pueden darse graves desequilibrios en la productividad de la zona afectada ya que esa carencia puede convertirse en un factor limitante para el desarrollo de ciertas especies. Hay que tener en cuenta que las sales que aparecen en escasa cantidad pero son muy necesarias a los seres vivos marinos, van a consumirse en porcentajes relativamente altos.

Las proporciones de estas sustancias en el mar son variables y dependen entre otros factores de:

1. abundancia de seres vivos en una zona determinada.
2. estabilidad de las propias sustancias.

7.4.4 Gases Disueltos

Su porcentaje es bastante variable pero se puede afirmar que disueltos en el mar aparecen todos los gases que aparecen en la atmósfera. Su proporción depende del intercambio entre el mar y la atmósfera y de la actividad de los distintos seres vivos (respiración y fotosíntesis).

A nivel general se puede afirmar que las variaciones de CO₂ y O₂ son mucho más notables en las zonas superficiales debido a que los vegetales marinos viven en la zona eufótica. Por otra parte, al ser el O₂ más soluble que el CO₂, su distribución es más homogénea en la masa del mar. No se puede olvidar la aparición de CO₂ en forma de otros radicales tales como Carbonatos o Bicarbonatos, constituyentes básicos de las estructuras esqueléticas de los seres vivos marinos.

7.4.5 Valores del pH

Los valores de pH en el mar suelen oscilar entre 7.1 y 8.3 lo que significa que el mar es un medio ligeramente alcalino. De todas formas, los valores más normales para el agua de mar oscilan entre 8.1 y 8.3. Las variaciones del pH se ven influidas por los siguientes factores: Salinidad, Fotosíntesis (favorece la alcalinidad), temperatura, concentración de CO₂.

Las variaciones del pH en relación con la vertical se producen básicamente en la zona eufótica (0-80 m), y más concretamente en los primeros 50 m. A esta profundidad, los valores de pH son mínimos (7.1-7.3) ya que hay bajas concentraciones O₂ y elevadas de CO₂. A partir de aquí, los valores de pH aumentan con la profundidad hasta estabilizarse sobre 8.5

El pH influye en la actividad biológica de las especies y los seres marinos influyen a su vez en el pH por medio de la respiración y de la fotosíntesis. Condiciona también numerosas reacciones químicas marinas que solubilizan o precipitan las sales disueltas que en definitiva son los elementos nutritivos que mantienen los ecosistemas marinos. Influye también en las migraciones de las especies, lo que se explica en el proceso anterior. Esta influencia es uno de los factores determinantes de las características de muchos medios marinos (marismas, estuarios, etc.) lo que condiciona drásticamente la vida en los mismos.

7.5 Movimiento de las Aguas Oceánicas

El agua del mar, por diversas causas, está en constante movimiento, sufre desplazamientos que provocan, entre otras cosas, la formación de Olas, Mareas y Corrientes. Estos movimientos tienen un marcado efecto sobre los seres marinos ya que condicionan la distribución de las especies de vida libre al colaborar, por un lado, en los movimientos migratorios estacionales de muchas especies y, en segundo lugar, al transportar sustancias nutritivas de unos lugares a otros, favoreciendo el desarrollo y distribución de organismos planctónicos.

7.5.1 Mareas

Son movimientos periódicos del mar con desplazamiento vertical, de ascenso y descenso, de la masa de agua. La influencia gravitacional de la Luna, y en menor medida la del Sol, sobre las aguas de los océanos es la causa principal de las mareas.

Otros factores que influyen en la evolución de las mareas son la latitud, la profundidad del mar, la forma y el tipo de costa, etc.

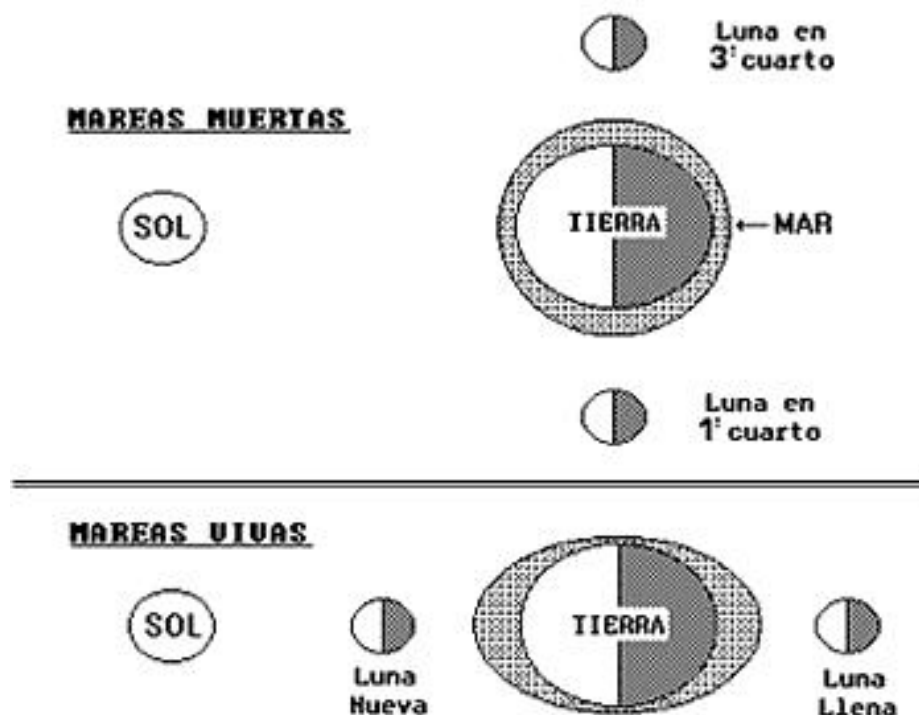


Figura 7.3 Factores que influyen en las mareas

Cuando la Luna gira alrededor de la Tierra, el punto de la superficie del mar que esté más próximo a la Luna, experimenta a la vez el empuje provocado por la fuerza centrífuga de la Tierra, y la máxima atracción por parte de la Luna. La suma de ambas fuerzas empuja al agua a separarse de la Tierra, desplazándose hacia la Luna y formando una protuberancia.

En el punto opuesto de la Tierra, el efecto de la atracción de la Luna sobre el mar es mínimo y, además, la fuerza centrífuga se opondrá a ella, lo que supone una menor atracción sobre la masa de agua en dicho punto, o lo que es lo mismo, se produce una tendencia del agua a separarse de la tierra y a formar una protuberancia similar, aunque un poco menor, a la que se forma en el punto antípoda.

Se habrá producido así, en los dos puntos opuestos del planeta alineados con la Luna, una elevación del nivel del mar, o sea, una 'PLEAMAR' o marea alta.

Pero la masa de agua que se desplaza hacia arriba en dichos puntos, es restada del total de la masa de agua del planeta, de tal forma que se produce un descenso del nivel

del mar en los demás puntos, o sea, una 'BAJAMAR' o marea baja. Este movimiento complementario de la masa de agua se va transmitiendo alrededor de la superficie de la Tierra a medida que la Luna gira a su alrededor, por eso en el transcurso de cada giro, y aunque la Luna sólo pase una vez por su meridiano, se producen en un punto dado del mar, una pleamar cada 12 horas y 25 minutos.

Dado que el día lunar tiene 24 horas y 50 minutos, el ciclo de subida y bajada del agua avanza aproximadamente una hora cada día (unos 50 minutos). No todas las mareas se dan de igual forma en los mismos sitios ya que influyen variantes como la latitud, profundidad del mar, forma y tipo de costa, etc.

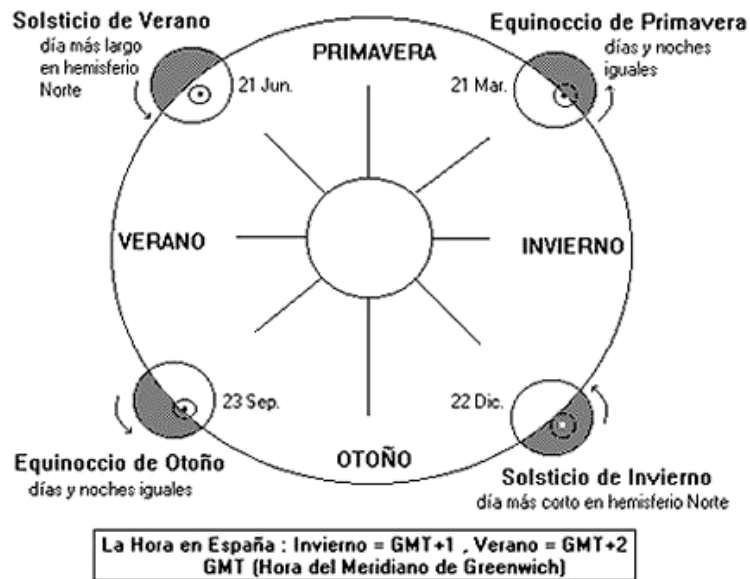


Figura 7.4. Ciclo de mareas anuales

Pero el fenómeno de las mareas es bastante más complicado ya que, según las posiciones relativas del Sol y la Luna con referencia a la Tierra, los efectos de atracción se suman o se restan, lo que hace que las mareas sean más o menos intensas. Mensualmente, con Luna nueva y llena, la influencia del Sol y la Luna se suman casi en línea recta, lo que ocasiona mareas de gran amplitud llamadas 'MAREAS VIVAS'. Por el contrario, cuando la Luna, en primer y tercer cuarto, se coloca en ángulo recto con el Sol y la Tierra, las influencias de Sol y Luna se contrarrestan, y se producen mareas de amplitud mínima: son las 'MAREAS MUERTAS'.

Anualmente, durante los equinoccios, en Marzo y Septiembre, Sol y Luna se hallan alineados y provocan una amplitud extremadamente alta en las mareas vivas. Por el contrario, en Diciembre y Junio, las mareas vivas son de menor amplitud que en cualquier otra época del año.

7.5.2 Corrientes Marinas

Son movimientos del mar con desplazamientos horizontales o verticales de las masas de agua que, aunque a nivel superficial no son tan visibles como las olas y las

mareas, son de mayor amplitud. Las corrientes marinas hoy conocidas discurren por cauces bastante definidos en las diferentes regiones oceánicas.

Básicamente son producidas por:

Calor solar: que calienta la superficie del océano estableciendo diferencias de temperatura; el agua fría pesa más que la caliente de modo que el agua de las zonas polares tiende a hundirse por debajo del flujo de agua caliente procedente del Ecuador

Rotación terrestre: es un giro constante en virtud del cual, tanto vientos como corrientes se desvían hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el sur. Esto se conoce como Efecto Coriolis.

Viento: que modifica la acción de las corrientes y está afectado por el calor solar y la rotación terrestre. En los trópicos, los vientos Alisios llevan las aguas en dirección Oeste hacia el Ecuador y en latitudes superiores, los vientos de poniente las llevan en dirección opuesta originando la circulación oceánica.

Hay dos tipos de corrientes:

- **Superficiales:** conocidas hace tiempo, su circulación se ajusta a la circulación atmosférica, y está condicionada fundamentalmente por los vientos (del Oeste y Alisios) que hacen que estas corrientes circulen básicamente en la dirección de las agujas del reloj en el hemisferio norte y al revés en el sur
- **Profundas:** se mueven fundamentalmente por diferencias de densidad del agua del mar (condicionada por temperatura y salinidad). Se ven también condicionadas por la topografía de los fondos (posición de Dorsales y Taludes)

En las corrientes profundas, el agua fría, más densa, desciende a mayor profundidad desde las latitudes altas dirigiéndose hacia el Ecuador. En el Atlántico, la corriente fría profunda Ártica, una vez pasado el Ecuador, asciende hacia 60 grados de Latitud, introduciéndose debajo de ella la corriente fría Antártica. Las corrientes profundas tienden a seguir los bordes occidentales de los océanos por el efecto de rotación de la Tierra. Su velocidad varía entre 2 y 40 cm/seg siendo el término medio de 10 a 20 cm/seg. Esta velocidad es importante en la medida en que transportar mayor o menor cantidad de sedimentos (generalmente grano fino).

- **Up-Welling = Afloramientos**

En determinadas zonas cercanas a la costa, y debido fundamentalmente a corrientes marinas profundas, cada cierto tiempo, los materiales sedimentados en el fondo (nitratos, nitritos, fosfatos) se ponen en circulación hacia las capas más superficiales de agua con lo cual pueden ser aprovechados por los organismos planctónicos allí

presentes, mejorando en gran medida la cadena alimenticia marina. En Galicia se dan dos afloramientos anuales.

La curiosa conjunción de la circulación estuárica y el afloramiento marino, circunstancia particular de las Rías gallegas, es tema de especial interés que abarca ámbitos muy diversos, desde el estrictamente biológico hasta el económico o social.

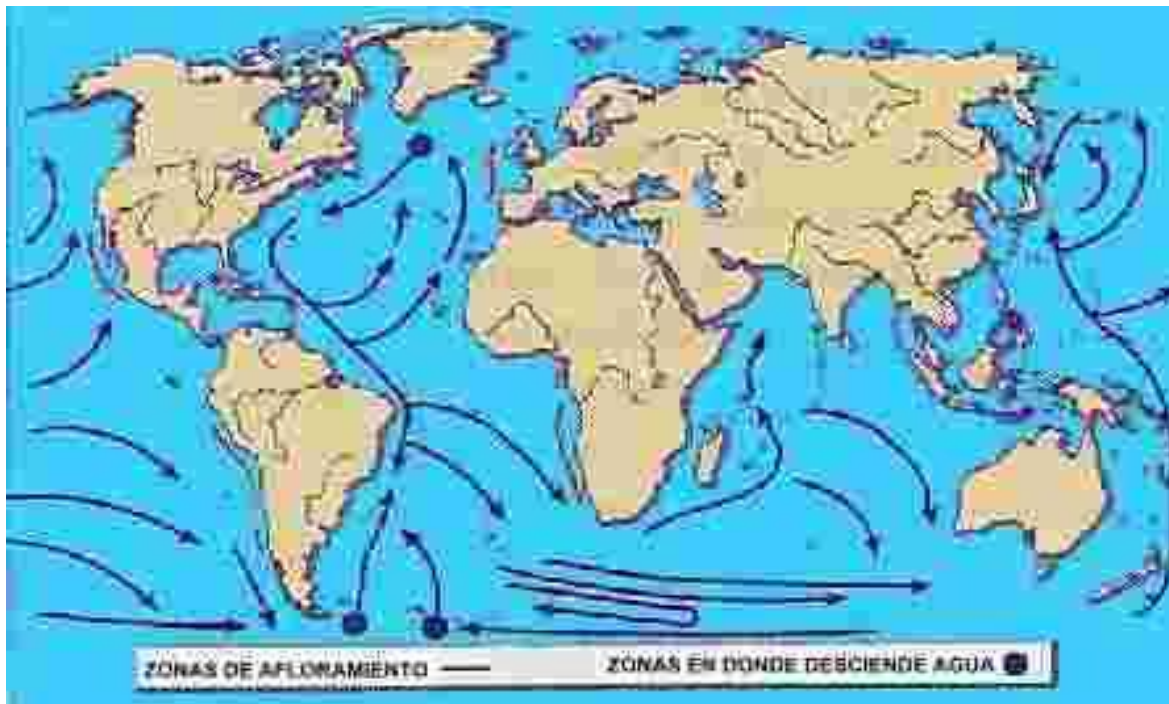


Figura 7.5. Zonas de afloramientos

7.5.3 Ondas y Olas

Es el movimiento de las moléculas de agua, en la zona superficial del mar, provocado por la acción del viento. En este movimiento, que es originariamente circular, no hay desplazamiento horizontal de dichas moléculas ni de la masa de agua por ellas constituida, aunque sí lo hay del movimiento ondulatorio generado por ese movimiento molecular. Este tipo de olas, que se originan en alta mar, se conocen con el nombre de 'olas libres' u 'olas estacionarias'.

Pero la acción de corrientes marinas o atmosféricas sobre estas olas hace que los movimientos de unas moléculas de agua se superpongan con los de las contiguas, añadiendo, a los movimientos circulares, un empuje de traslación en el sentido de la fuerza de empuje dominante. A este nuevo tipo de olas se las denomina generalmente con el nombre de 'olas progresivas' u 'olas forzadas'.

Cuando una ola se aproxima a la costa, el movimiento típico del mar libre, movimiento circular, se transforma, por rozamiento con el fondo, en un movimiento elíptico; la cresta de la ola avanza por este motivo más deprisa que su punto opuesto en la vertical y se produce un desplazamiento horizontal de la masa de agua que provoca la ruptura de la ola al llegar a la costa. Otros mecanismos que las producen pueden ser movimientos sísmicos, derrumbamientos, actividad volcánica submarina, etc.

Geológicamente, las Olas tienen un papel muy importante ya que constituyen un agente geológico de gran magnitud, sobre todo a nivel costero. Tienen también una enorme energía Cinética (unas 30Tm/m^2) debido a la gran masa de agua que se pone en movimiento. Por este motivo se idearon métodos para el aprovechamiento de esta Energía (básicamente para la obtención de energía eléctrica).

Las olas son formadas por los vientos que barren la superficie de las aguas. Mueven al agua en cilindro, sin desplazarla hacia adelante, pero cuando llegan a la costa y el cilindro roza en la parte baja con el fondo inician una rodadura que acaba desequilibrando la masa de agua, produciéndose la rotura de la ola. Los movimientos sísmicos en el fondo marino producen, en ocasiones gigantescas olas llamadas *tsunamis*.



Figura 7.6. Tsunami : "Olas de puerto" en japonés

Elementos que definen una ola:

- **Crestas:** zonas de superficie del mar que alcanzan en un momento dado la mayor altura.
- **Senos:** igual, pero la menor altura.
- **Longitud de onda:** distancia que hay entre dos crestas sucesivas.
- **Frecuencia:** número de ondulaciones por unidad de tiempo.
- **Velocidad:** tiempo entre el paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto.

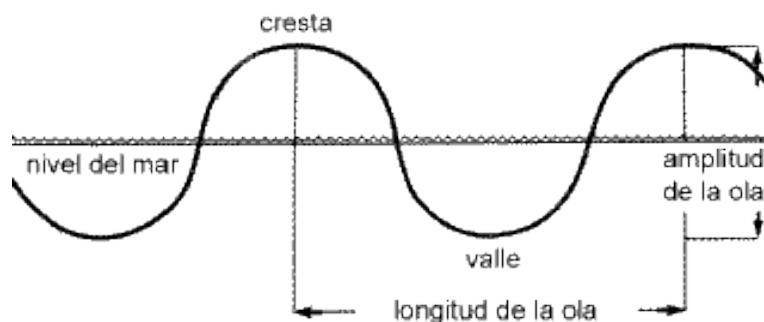


Figura 7.7. Representación sinusoidal de una ola

7.6 Formas de Energía presente en Aguas Marinas

Existen diversas formas de aprovechamiento de la energía del océano. En primer lugar, se producen desplazamientos de grandes masa de agua, de gran energía cinética. Estas corrientes se podrían aprovechar directamente o bien utilizar las mareas, mediante embalses artificiales adecuados. Las olas y ondas también son otra forma de energía que podría aprovecharse.

En segundo lugar, existe energía térmica almacenada en el mar, la cual se manifiesta a través de un gradiente de temperatura entre la superficie y las capas de aguas mas profundas, que se encuentran a temperatura inferior, debido a la gran inercia térmica que posee el mar.

En tercer lugar, en el mar podemos encontrar energía de tipo químico, que se originan a partir de las diferencias de concentración de sal, donde las aguas de baja salinidad fluyen a las aguas salinas de los océanos.

Una alternativa adicional consiste en utilizar la “biomasa”, es decir, las plantas y algas marinas que mediante procesos adecuados permitirían obtener gases o líquidos combustibles.

Según estudios realizados por diversos autores (Wick y Schmitt, 1977), considerando la superficie total que cubren los océanos (3×10^{14} m²), el potencial energético mundial y la densidad de energía de cada una de las cinco fuentes mencionadas anteriormente pueden resumirse como lo señala la tabla 7.1.

Fuente Oceánica	Potencia 10 ¹² Watts	Densidad de energía Watts-hora / m ³
Mareas	0.03	28
Corrientes	0.05	0.14
Gradientes de Temperatura	2.00	580
Gradientes de salinidad	2.60	670
Oleajes	2.70	4.2

Tabla 7.1. Potencia y densidad de energía de fuentes oceánicas.

Se ha calculado que el potencial energético que seria posible extraer es el indicado en la figura 7.8.

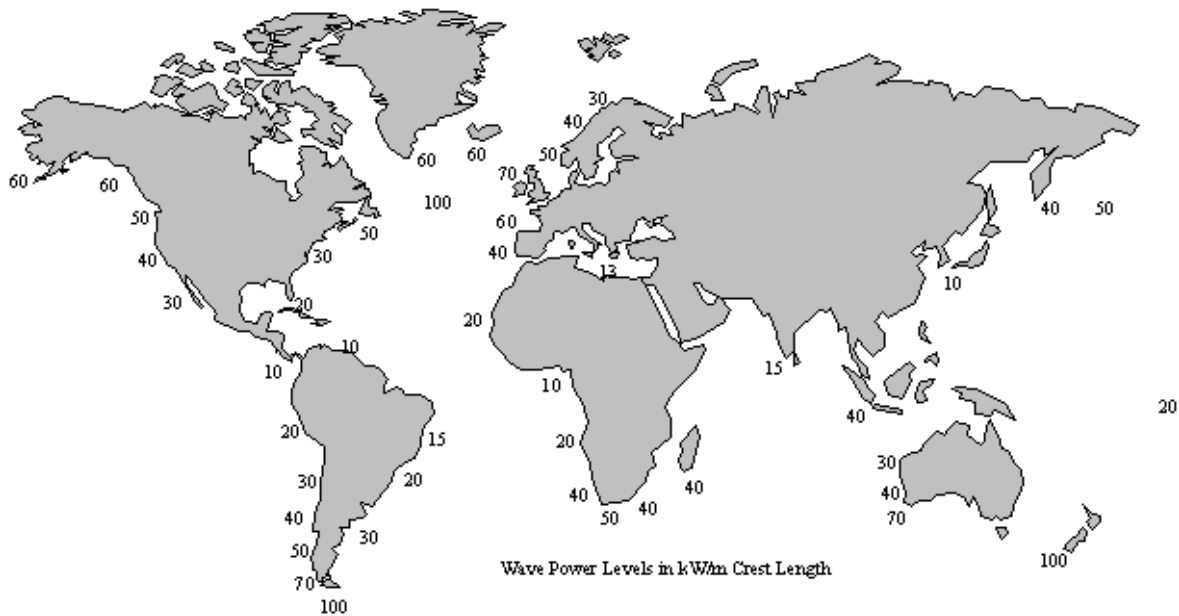


Figura 7.8. Distribución de potencia en los Océanos, en kWm

7.7 Sistemas de Extracción de Energía del Océano

7.7.1 Ondas

La energía que desarrollan es proporcional a las masas de aguas que oscilan y la amplitud de oscilación. La misma se descompone en dos partes aproximadamente iguales: una potencial, deformación de la superficie, y una cinética, desplazamiento de las partículas.

La energía contenida en su movimiento -energía cinética- puede transformarse en energía eléctrica de distintas formas. Por ejemplo, las oscilaciones en la altura del agua pueden hacer subir y bajar un pistón dentro de un cilindro, moviendo con ello un generador de electricidad. Otra posibilidad es que el movimiento de las olas produzca un desplazamiento del aire en el interior de un cilindro. El aire busca la salida y va a dar a una turbina que, girando, activa un generador. Cuando la ola se retira del recinto, el cilindro reabsorbe el aire que había ascendido, y el movimiento del aire hacia abajo vuelve a mover la turbina.

Pese a la aparente sencillez del mecanismo, la irregularidad de las olas constituye un importante inconveniente a la hora de utilizarlas como fuente de energía continua.

Además, los dispositivos deben ser bastante ligeros para aprovechar la energía de las olas pequeñas y, a la vez, suficientemente resistentes para soportar los golpes de las olas cuando hay tempestad. En estas condiciones no es de extrañar que, según las cifras del World Energy Council, existan más de 1000 diseños de convertidores de energía actualmente patentados, la mayoría con importantes dificultades prácticas.

Una forma de extracción son los sistemas de columnas oscilantes, mostrados en la figura 7.9.

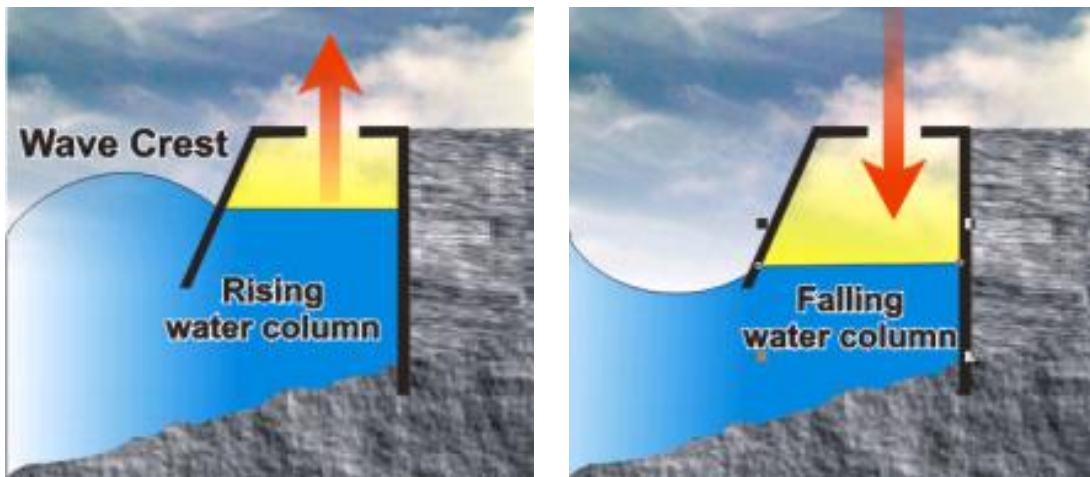


Figura 7.9. Sistemas de columnas oscilantes

7.7.2 Olas

Su energía se concentra en los bordes continentales, los que suman un total de 336000 Km. de longitud.

Uno de los mayores inconvenientes en la utilización de la energía de las olas, es su irregularidad e inconstancia. Los dispositivos deben ser, por un lado, livianos para aprovechar las olas pequeñas, pero resistentes para soportar los choques de las grandes olas. La densidad de energía de las olas es mayor que la solar “pura”.

Las olas suponen un recurso potencial de alrededor de 2 TW de potencia”

Los sistemas utilizados para aprovechar la energía de las olas pueden clasificarse en dos: fijos a la plataforma continental, y flotantes. Básicamente, los mecanismos funcionan haciendo que la variación de altura del agua mueva un pistón que a su vez mueve un generador eléctrico. O bien, que el movimiento de las olas produzca el desplazamiento del aire hacia el interior de un cilindro donde se ubica una turbina. El aire al salir mueve la turbina. Al retirarse la ola se genera un efecto de vacío, el aire ingresa nuevamente al cilindro haciendo girar la turbina.

Las tecnologías perfiladas en 1998 basadas en la Oscilación o Columnas Asistidas de agua (OWC), boyas y pontones (The Hosepump), tapas y canales afilados (The Pendulor y TAPCHAN) todavía existen o siguen siendo desarrolladas.

Figure 15.2 Outline of Main Types of Currently Deployed Wave Energy Devices

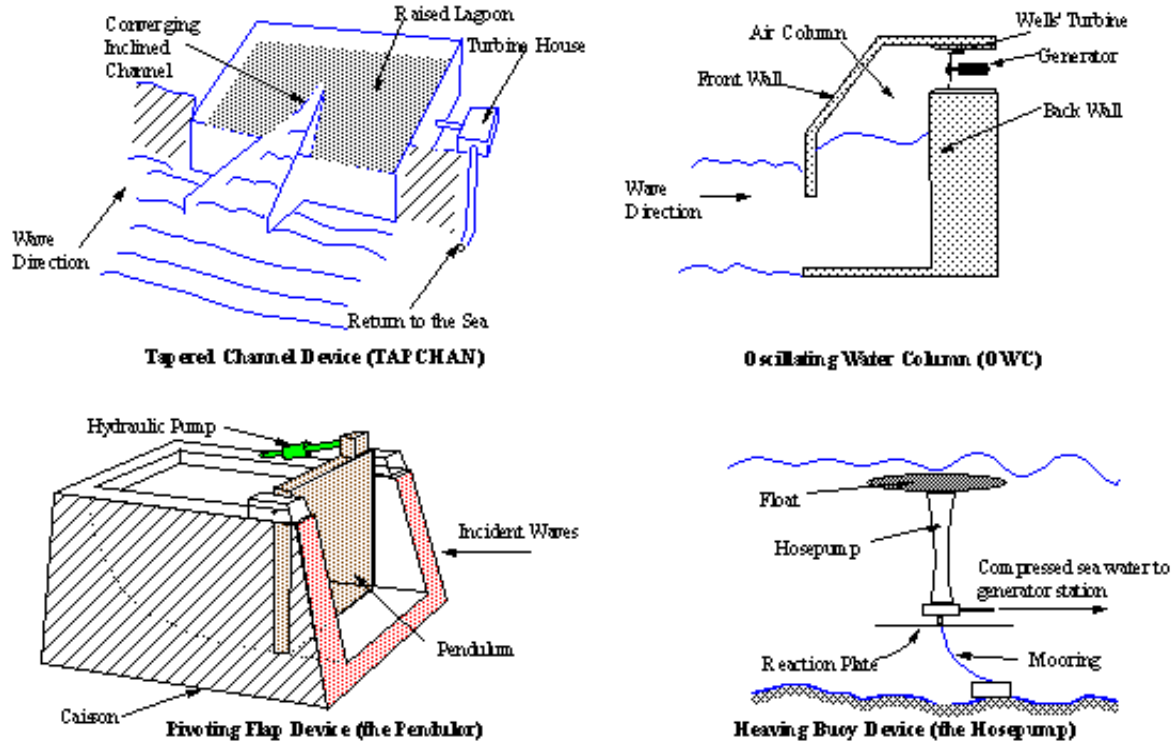


Figura 7.10. Generación a partir de olas

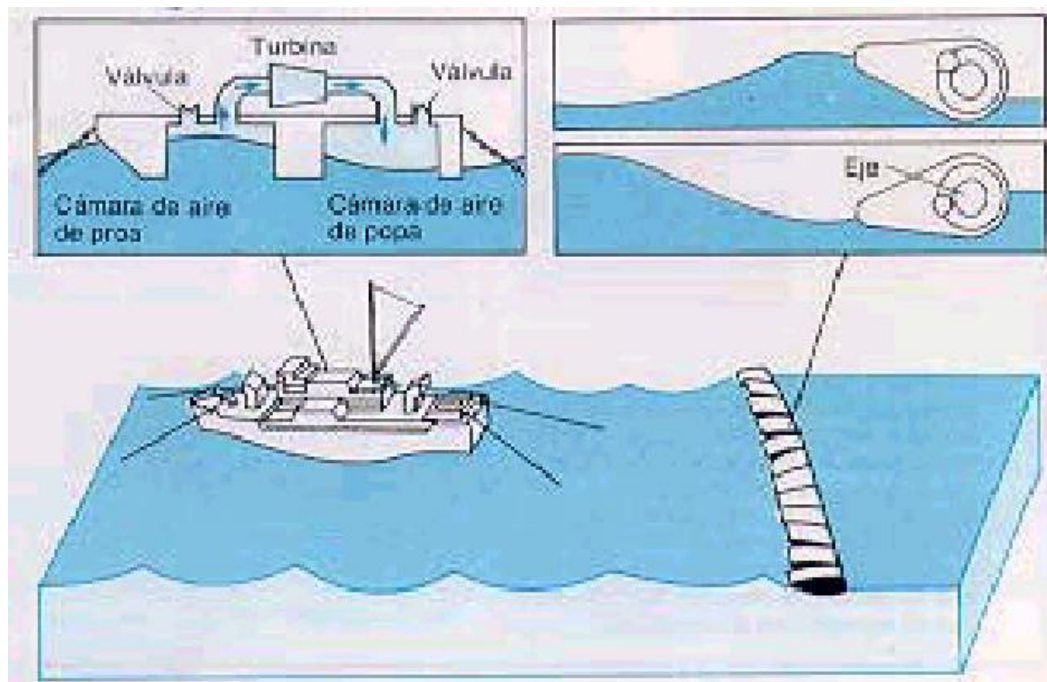


Figura 7.11. Generación a partir de olas

7.7.3 Temperatura

El primero en exponer estas ideas fue D'Arsoval en 1881. Pero fue el científico francés Georgi Claudi quien se dedicó a investigar la implantación de una central de conversión térmica marina.

Esta tecnología consiste en convertir la diferencia de temperatura del agua de la superficie con la del agua de las profundidades (a 100 m) en energía útil. Es suficiente para ello una diferencia de 20°C, en las zonas tropicales esta diferencia es de 20° a 24°C. Las ventajas asociadas son el carácter permanente del salto térmico y que no tiene un impacto negativo sobre el medioambiente. El mayor inconveniente es el aspecto económico de las tecnologías necesarias para llevar adelante este tipo de aprovechamientos.

Entre las ventajas secundarias se puede mencionar el uso de este recurso para abastecer de agua potable, el agua fría de las profundidades es rica en sustancias nutritivas y libres de agentes patógenos.

La diferencia de temperatura oceánica no depende de factores como el clima o el momento del día.

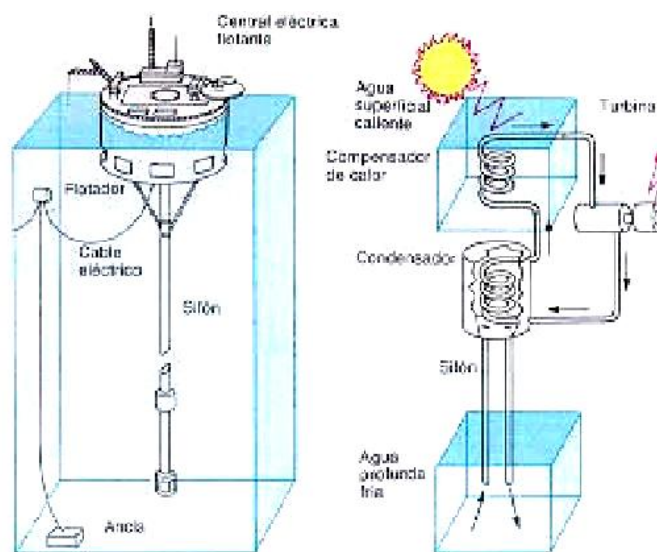


Figura 7.12. Funcionamiento de central mareotérmica

7.7.4 Mareas

La técnica de explotación consiste en cerrar una bahía o un estuario con un dique generando así una diferencia de nivel a ambos lados, energía potencial acumulada. En el dique se instalan turbinas con sus respectivos generadores y demás equipamiento, las cuales son puestas en marcha al pasar el agua hacia el embalse (flujo) y luego de este hacia el mar (reflujo).

Es decir, que funciona como una central hidroeléctrica convencional, solo que su origen tiene relación con la atracción de la luna y el sol, en vez del ciclo hidrológico.

Pero esta técnica no es tan sencilla de llevar a la práctica en un proyecto que resulte eficiente, implicando una inversión acorde al rendimiento que se logra. Los dos grandes aspectos que condicionan el avance de esta tecnología son el económico, se requieren grandes inversiones iniciales en obras, y el impacto que provoca sobre la fauna y flora del lugar de implantación de la central.

El primero en estudiar la posibilidad de aprovechar la energía de las mareas fue Belidor, en 1927, en el Tratado de Arquitectura Hidráulica. Belidor era profesor de la Escuela de Artillería de La Fère en Francia.

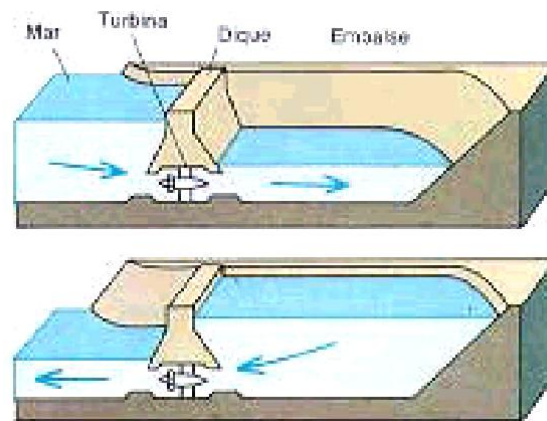


Figura 7.13. Generación mediante las mareas

7.7.5 Corrientes

La energía también puede ser generada a través de corrientes marinas, usando turbinas sumergidas con aspas rotativas y un generador. Las turbinas submarinas trabajan con el mismo principio de funcionamiento que las turbinas eólicas, transformando la energía cinética de los fluidos transfiriéndola a energía rotacional y luego a energía eléctrica. Las velocidades de las corrientes son mas lentas que las del viento, sin embargo debido a la densidad del agua (835 veces la del aire) las turbinas acuáticas son más pequeñas que las eólicas con la misma capacidad instalada.

La potencia que es posible extraer de las corrientes marinas depende de la velocidad del fluido, del área y eficiencia de la turbina acuática, y puede ser calculada como:

$$Power = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

- donde
- ρ es la densidad del mar (1025 kg/m^3)
 - A es el área de las aspas del rotor (m^2)
 - v es la velocidad marina (m/s)
 - C_p es el coeficiente de la turbina, que mide la eficiencia

La energía mediante las corrientes no ha sido aun bien desarrollada, con un número pequeño de prototipos. Hay dos variantes en la investigación de estas turbinas, incluyendo turbinas usando concentración y “convertidor de mareas” (tidal fences).

Turbinas de eje horizontal Similar al concepto de turbinas de eje horizontal de generación eólica.

Turbinas de eje vertical El concepto de instalación es colocar un gran número de turbinas de eje vertical en un “convertidor de marea”.

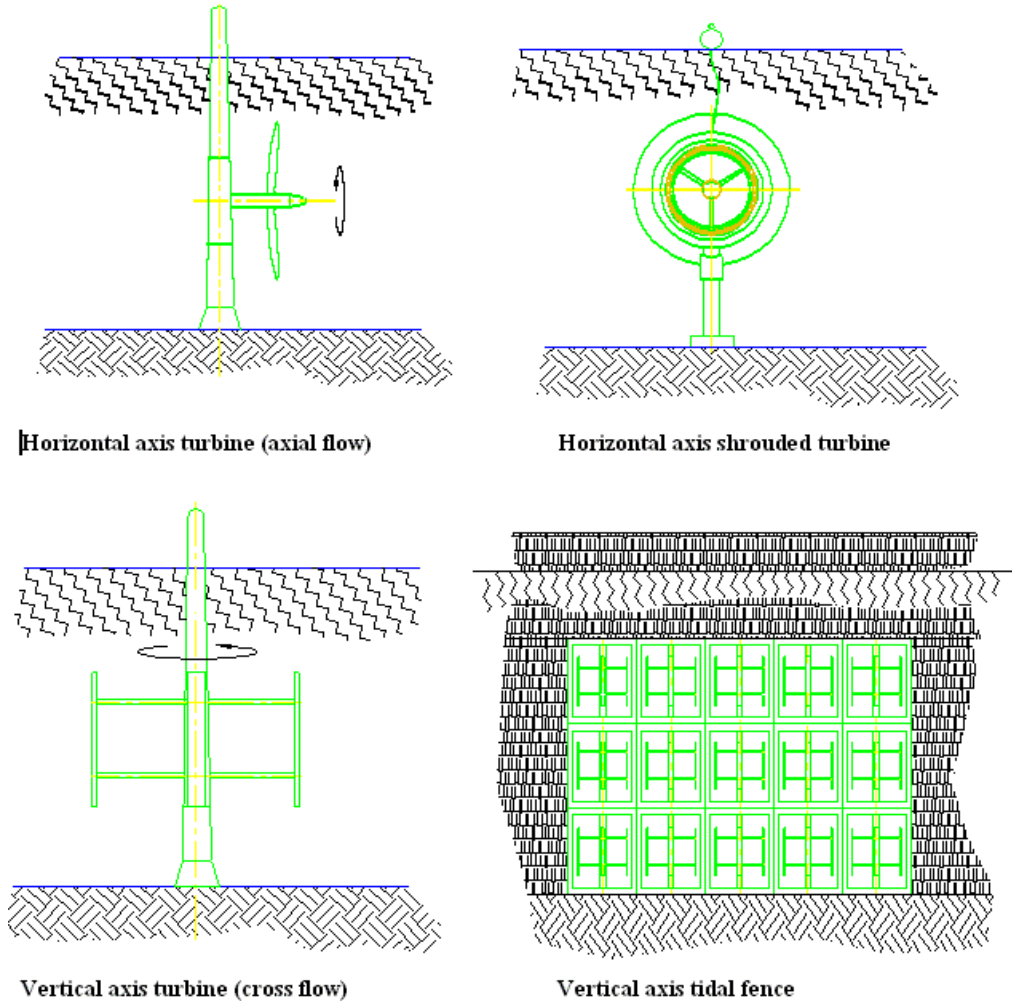


Figura 7.14. Turbinas para aprovechamiento de corrientes marinas

7.7.6 Gradientes de salinidad

➤ Sistema por presión osmótica retardada:

Este sistema utiliza el aumento de presión en el interior de un estanque, por efecto de la diferencia de presión osmótica en la interfase de dos aguas de diferente concentración de sal.

Consiste en un estanque en cuyo interior se bombea agua de mar a una presión inferior a la diferencia de presión osmótica entre las aguas. El agua de río pasará al interior del estanque a través de una membrana semipermeable, aumentando la presión interna. Este aumento de presión se utilizará para obtener energía eléctrica, mediante el accionamiento de una turbina acoplada a un generador. La membrana tiene la característica de ser permeable al agua e impermeable a las moléculas de sal contenidas en el agua; por esta razón, el agua dulce atravesará la membrana hacia el interior del estanque, pero, el agua salina del estanque no podrá salir a través de la membrana.

El sistema podría funcionar sin necesidad de presurizar el estanque mediante un abomba, pero se ha demostrado (Wick, 1978) que el máximo rendimiento del sistema se obtiene cuando el tanque se presuriza a la mitad de la diferencia de presión osmótica correspondiente.

La potencia que es posible extraer por este mecanismo dependerá de la diferencia de presión osmótica entre el agua dulce y el agua salada, así como del caudal de agua que atraviese la membrana.

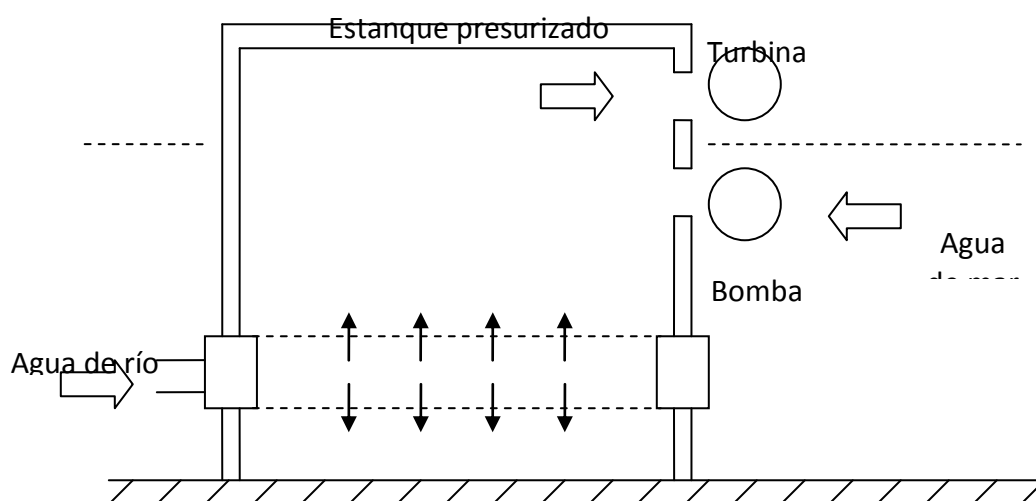


Figura 7.15. Diagrama esquemático de funcionamiento de sistema por presión osmótica retardada

➤ Sistema de electrodiálisis reversa:

Se refiere a conversión electroquímica directa, mediante celdas de electrodiálisis, es decir, se basa en el principio de una pila de concentración. Consiste en dos electrodos en dos recipientes con agua de diferente concentración de sal, separados por una membrana ión-permeable. Se producirá una diferencia de potencial entre los electrodos, correspondiente a la potencia del óxido-reducción de la solución, que dependerá de la diferencia de concentración de las soluciones. Esta diferencia de potencial es bastante pequeña si se utiliza la diferencia de concentración de sal existente en las

desembocaduras de los ríos en el mar. Por esta razón, se propone (Wick, 1978) un sistema de varias celdas en serie, separados por membranas cargadas de manera que sean permeables a los cationes (Na^+) o a los aniones (Cl^-).

Si se colocan en serie membranas anión-permeables alternadas con membranas catión-permeables, y se llenan los intersticios alternados con agua dulce y agua salada, respectivamente, se pueden obtener voltajes en serie bastante considerables. Debido a que las membranas están cargadas positiva y negativamente, con el objeto de permitir el paso selectivo de los iones de una celda a otra, se origina un voltaje entre cada par de membranas consecutivas. De esta forma, el voltaje entre los extremos de la serie corresponderá a la suma de los voltajes de cada celda. Por ejemplo, para una serie de 1000 celdas pueden obtenerse voltajes del orden de los 100 volts.

La ventaja de este sistema es que se disminuyen considerablemente los problemas de electrodos, ya que sólo se requieren en los extremos de la serie.

En cuanto al material de los electrodos, puede utilizarse un ánodo (+) de grafito o carbón y un cátodo (-) de acero. G. L Wick propone utilizar un ánodo de titanio platinado, lo que encarece el sistema pero tiene ventajas desde el punto de vista de la corrosión y de la caída de tensión producida en los electrodos.

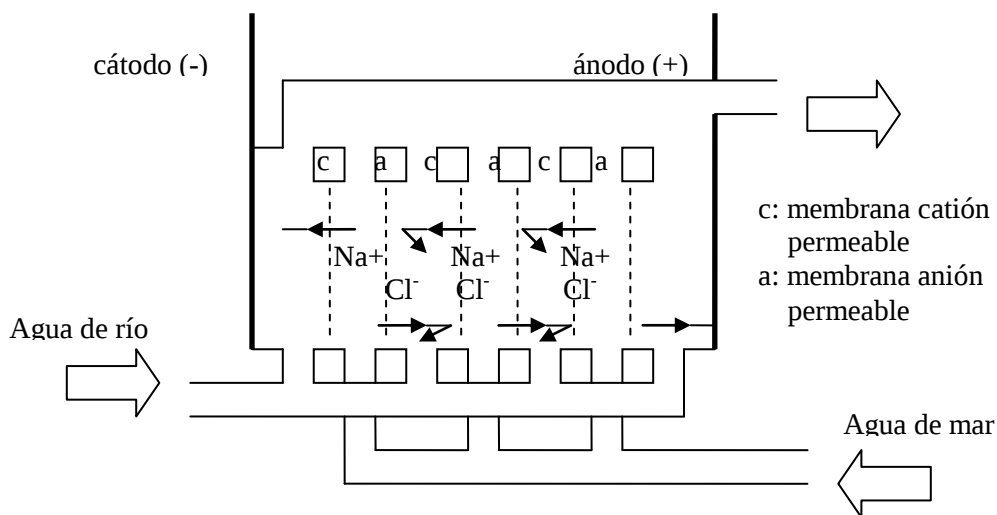


Figura 7.16. Diagrama esquemático de funcionamiento de sistema por electrodiálisis reversa

7.7.7 Efecto osmótico por métodos mecánicos

Se trata de provocar artificialmente una altura H de caída que pueda ser utilizada mediante una turbina hidráulica convencional. La diferencia de altura, entre el nivel del mar y un estanque encerrado entre dos muros comunicado con el océano mediante una membrana semipermeable, es producida por la diferencia de presión osmótica entre las aguas y corresponderá a la altura de caída del río.

La potencia que se puede extraer, al igual que en una planta hidráulica convencional, será proporcional a la altura de caída y al caudal de agua.

En cuanto a las membranas semipermeables que utilizan los sistemas por diferencias de presión osmótica, son similares a las empleadas en desalinización de agua de mar, es decir, membranas de acetato de celulosa de 0.1 a 10 micrones de espesor (Perry, 1973).

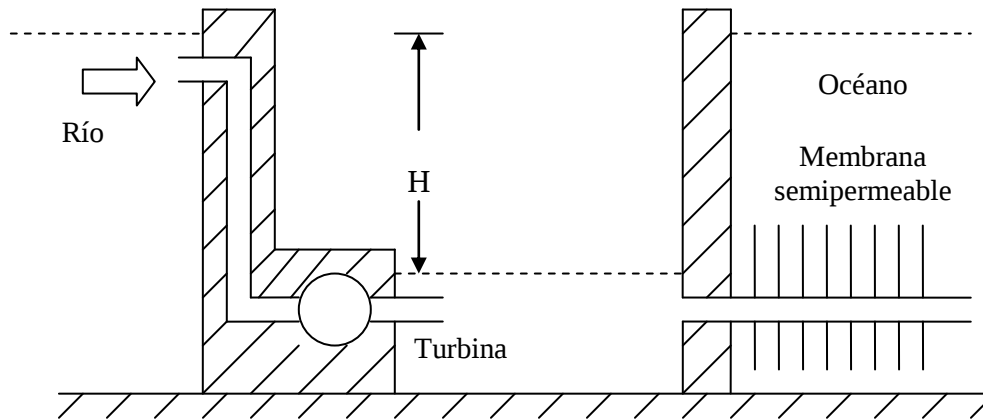


Figura 7.17. Esquema de funcionamiento de sistema por presión osmótica directa

7.8 Sistemas de Generación en Operación Actual

7.8.1 Mareotérmica

Las diferencias de temperaturas de los océanos, a diferencia de lo que ocurre con la energía eólica y la energía solar, no dependen de otros factores como el clima o el momento del día. Es por ello que las centrales de energía maremotérmica podrían producir electricidad durante 24 horas al día y 365 días al año, empleando para ello los llamados Sistemas de Conversión de Energía Térmica Oceánica (CETO). El Laboratorio de Energía Natural de Hawai se ha convertido en el principal centro de investigación de estos conversores al albergar la única planta maremotérmica existente en todo el mundo. A través de sus trabajos han corroborado las ventajas del aprovechamiento de este recurso natural y renovable a través de los sistemas CETO, que de forma simultánea a la obtención de energía permiten usos como la acuicultura, el empleo del agua fría de las profundidades en sistemas de refrigeración, la desalinización del agua del mar, etc.



Figura 7.18. 210kW OC-OTEC Experimental Plant (1993-1998) in Hawaii
(Source: Luis A. Vega, Ph.D. Project Director)

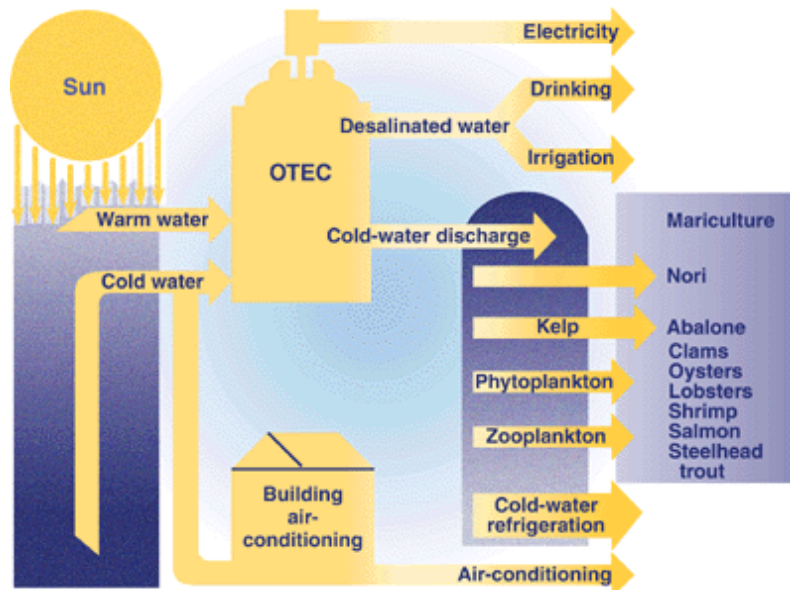


Figura 7.19. Aplicaciones OTEC

7.8.2 Mareomotriz

La primera central mareomotriz se instaló en el Estuario de Rance, Francia, en 1967. Un dique embalsa un área de unos 20 km², el mismo cuenta con esclusa para la navegación, seis aliviaderos y una central con 24 turbinas bulbo capaces de generar 240 MW. La amplitud de mareas máxima es de 13,5m. La central funcionó durante dos décadas. El volumen de agua que ingresa por segundo es de aproximadamente 20000 m³. Se estudia reactivar la central por sus condiciones favorables.



Figura 7.20. Central mareomotriz: estuario de Francia

Luego le siguió la central experimental de Kislogubskaya, ubicada en el mar de Barentz, Rusia. Puesta en marcha en 1968 con una capacidad de 400 KW.

En la bahía de Cobscook, EEUU, se instaló una central de este tipo pero duró poco tiempo debido a su bajo rendimiento en comparación con la alta inversión inicial que demandó.

Por último, en la bahía Fundy, Canadá, donde se dan las mayores mareas del mundo, desde 1984 funcionan en experimentación una central dotadas con turbinas Strafflo y 18 MW de potencia. La gran innovación de este equipamiento radica en la concepción misma de las turbinas, el generador eléctrico está dispuesto circundando los alabes, en vez de instalado a continuación del eje de la turbina, de este modo el generador no se interpone al flujo del agua.

También Gran Bretaña preveía construir una central mareomotriz en el estuario del río Severn. La misma constaría de un dique de 16,3 km donde se instalarían 192 grupos turbina-generador para producir 14,4 TWh/año. Pero la sociedad rechazó el proyecto debido al impacto que podría ocasionar al ecosistema.

7.8.3 Corrientes

Un novedoso diseño es el Stingray, el cual está diseñado para extraer la energía del agua que fluye por efecto de la marea, "la Energía de Corriente De marea". El prototipo ha sido instalado en Yell Sound en Islandia en el verano 2002 con promesa de resultados y EB planea desplegar de nuevo demostrador en el 2003 para las pruebas remotas y de desarrollo.

Stingray consiste en hidropilano que tiene su ángulo de ataque en relación con la corriente que se aproxima de agua, variada por un mecanismo simple. Esto hace que el brazo de apoyo oscile el que a su turno obliga a cilindros hidráulicos a ampliarse y

retraerse. Esto produce grandes presiones de aceite, el cual es usado para conducir un generador. Existe un proyecto para ser instalado en el 2004 de 3MW.



Figura 7.21. Diseño Stingray

7.8.4 Ondas y Olas

El ingeniero Stephen Salter, de la Universidad de Edinburgo, presentó un proyecto conocido como el «pato» de Salter, en 1973. Este es un tipo de estructura cuya sección transversal tiene forma de leva, asemejándose a un pato flotando en el agua. La zona de mayor diámetro permanece dentro del agua, opera como pivote frente al embate del mar y en ella se ubica un grupo de bombas que impulsan el agua a máquinas hidráulicas que están unidas a generadores eléctricos.

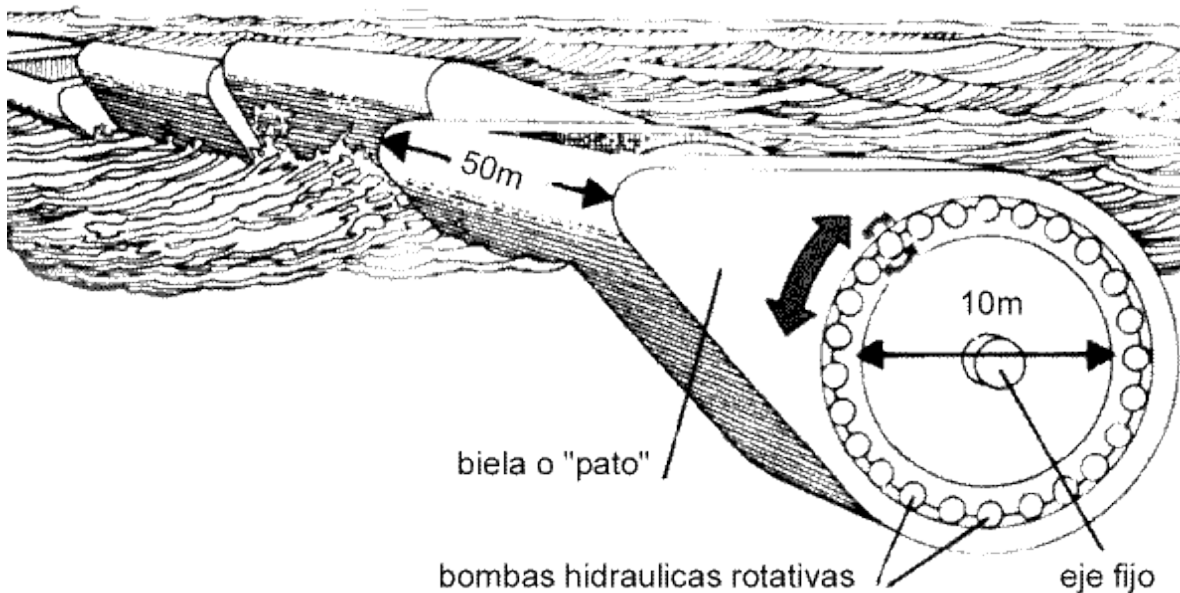


Figura 7.22. El «pato» de Salter constituyó un dispositivo interesante para convertir la energía de las olas en energía eléctrica.

Este diseño implica el uso de un grupo de estos patos, que se articulan por medio de una espina dorsal apoyada en sus extremos en grandes boyas, y se fijan al fondo del mar. Este eje se construyó con 15 m de diámetro para soportar la potencia máxima de las olas, pese a ello su resistencia y estabilidad fueron cuestionadas por ser su principal defecto. En las referencias consultadas no se exponen los materiales empleados en su construcción, pero se plantea que ubicados en posición paralela al oleaje puede aprovechar hasta 90 % de las olas.

En Southampton, a 800 km de Edinburgo, al sur de Inglaterra, un equipo dirigido por Christopher Cockerell trabajó en el diseño de un tipo de "balsa" capaz de aprovechar el movimiento de las olas. La balsa debe adoptar el nivel del mar y a la vez ejecutar sus funciones, por lo que para ello el diseño fue concebido por módulos. Al principio se proyectó formar una balsa con siete partes, pero en la práctica se construyeron de tres y dos partes articuladas, logrando mayor estabilidad. El movimiento de la balsa provoca la acción de émbolos, que posibilitan bombear el líquido a la máquina hidráulica que está acoplada a un generador eléctrico.

En 1974, Cockerell creó la sociedad Wave Power Limited para la comercialización de estos trabajos. Se instalaron prototipos cerca de la isla Wight, al sur de Inglaterra, hasta llegar a instalar una balsa de 50 m de ancho y 100 m de longitud en las costas de Escocia, que entregaba una potencia de 2 MW ocupando un área de 0,005 km² y con un frente de ola de 100 m. De manera que 100 MW de potencia se pueden producir con un frente de ola de 5 km y con un área de equipamiento de 0,25 km².

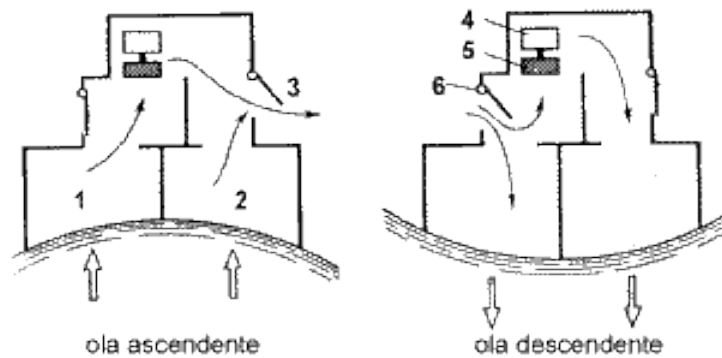


Figura 7.23. Turbina neumática ideada por el japonés Masuda, y utilizada por los ingleses posteriormente. 1- compresión de aire 2- expulsión de aire 3- válvula 4- generador eléctrico 5- turbina 6- admisión de aire

Aproximadamente esta es el área que ocupa una termoeléctrica que consumiendo fuel oil produce la misma potencia. Otro proyecto británico se llevó a cabo en el National Engineering Laboratory, situado en Glasgow. Se basa en el perfeccionamiento de un dispositivo ideado por el ingeniero japonés Ioshio Masuda, denominado por los ingleses "columna de agua oscilante", que consiste en un recipiente que tiene dos compartimentos o vasos que se inundan con el agua de mar. Cuando pasa la ola, el nivel del agua se incrementa comprimiendo el aire de la parte superior del vaso que alcanza una velocidad de hasta 100 m/s , para posteriormente pasar a través de una turbina acoplada a un generador eléctrico, cuando el nivel baja se hace vacío y se aspira aire del exterior que circula a través de dicha turbina realizando el mismo efecto.

Los trabajos de los investigadores ingleses no pasaron de prototipos; sin embargo, el equipo de Masuda puso en práctica en Japón un dispositivo denominado "Kamiei" montado en una barcaza de 80 m de longitud y 12 m de ancho con orificios en su parte inferior, ubicada en las costas del Japón, que producía $1,3 \text{ MW}$. En el año 1977, un primer navío japonés de 400 m de longitud utilizó el sistema para producir electricidad.

En Oxford, un equipo de trabajo dirigido por Robert Russel de un laboratorio de investigaciones hidráulicas creó un sistema de aprovechamiento de la energía de las olas denominado "rectificador". Es una construcción amplia expuesta a la costa e internamente separada en dos partes. Cuando la ola llega al equipo pasa a través de válvulas al reservorio superior, donde permanece hasta que se deja trasegar hacia la parte inferior y en su recorrido acciona una turbina hidráulica que está coaxialmente unida a un generador eléctrico.

En la actualidad han sido más avanzados los proyectos de Salter y Cockerell. Según el propio Salter, 1 kW producido con una instalación marina cuesta diez veces más que si se produce mediante una central térmica de petróleo. Aunque los costos han decrecido, el criterio de los especialistas, en la actualidad, es que una planta que opere con la energía de las olas, de 10 MW de potencia, cuesta diez millones de dólares. En nuestros días, el costo de instalación de una planta termoeléctrica de 30 MW que funciona a partir de fuel oil es de un millón de dólares por megawatt. Entonces el costo de una unidad de 30 MW asciende a treinta millones de dólares, y es el mismo que el de una planta que produce 10

MW a partir de la energía de las olas del mar. Es decir, hoy el costo de una instalación marina de este tipo es tres veces más costosa que por la vía convencional.

El ariete hidráulico, inventado por el francés Montgolfier, también se ha utilizado para transformar la energía de las olas. Una instalación que producía hasta 10 *kW* fue construida antes de 1917 en el Mar Negro, y a causa de la guerra hoy no se cuenta con la instalación ni con sus planos. En la isla Mauricio, en el Océano Índico, se usa el ariete para bombear agua a un tanque elevado y de ahí circula por una turbina hidráulica acoplada a un generador de 18 *MW*. Se reportan otras instalaciones en Noruega y en las costas de California.

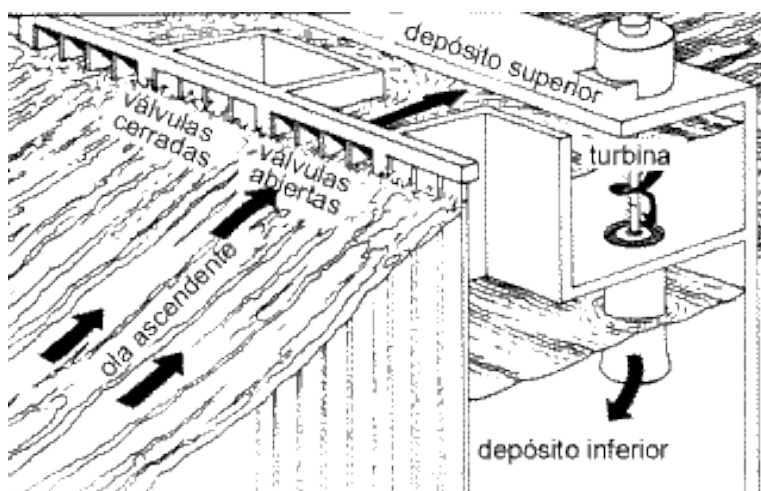


Figura 7.24. Instalación denominada rectificador de Russel, que genera energía eléctrica a partir de un desnivel de la superficie de la ola.

Investigaciones más avanzadas se realizaron durante 20 años, para finalmente presentar el proyecto Limpet, como resultado de la colaboración de las firmas Wavegen y Queen's University Belfast y la Unión Europea, que hizo posible se instalara una estación generadora de electricidad de 500 *kW* de potencia aprovechando las olas en la isla escocesa Islay, para brindar energía a más de 400 hogares y en el año 2000 se unificó al sistema electroenergético del Reino Unido.

En la isla escocesa de Isley esta instalado un generador mareomotriz. El LIMPET (Land Installed Marine Powered Energy Transformer) produce 500 kilovatios de electricidad, lo suficiente para abastecer a 400 casas de la zona, y consiste en una estructura de hormigón abierta al mar por su parte inferior, donde rompen las olas, y una cámara de aire en la superior. Al entrar la marea, comprime el aire, que hace entonces girar las turbinas. La novedad en el LIMPET es que sus turbinas no se paran al retroceder la ola hacia el mar y experimentar el viento una succión inversa a través de ellas, sino que siempre gira en el mismo sentido con independencia del vaivén de la marea. De esta forma, el generador escocés logra producir electricidad sin interrupción.



Figura 7.25. Generador Limpet

El pelamis (llamado serpiente de mar), desarrollado en Ocean Power Delivery Ltd en Escocia, es una serie de segmentos cilíndricos conectados por uniones de bisagra. Las olas descargan en la longitud del dispositivo y actúan en las uniones, cilindros hidráulicos incorporados en las bombas de aceite de las uniones conducen un motor hidráulico vía un sistema alisando energía. La electricidad generada en cada unión es transmitida por un cable común sub-acuático. El dispositivo flojo-amarrado (snack-moored) será alrededor de 130 m de largo y 3.5m de diámetro. El pelamis es querido para el despliegue general a cierta distancia de la costa y es diseñado para usar la tecnología ya disponible en la industria en el exterior. La versión a escala natural tiene una salida de poder continuamente nominal de 0.75MW. Habitualmente un prototipo es una séptima parte del preparado para el despliegue en 2001.

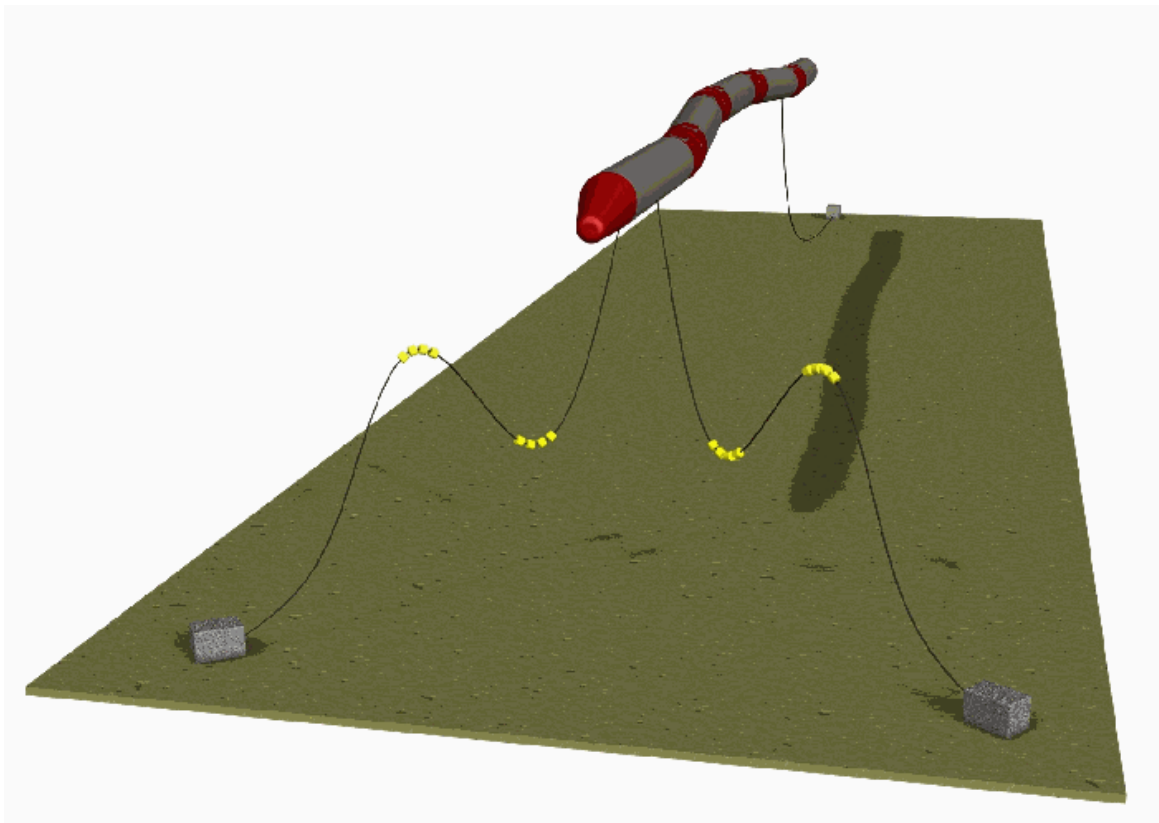


Figura 7.26. The Pelamis Wave Energy Converter (Ocean Power Delivery Ltd.)

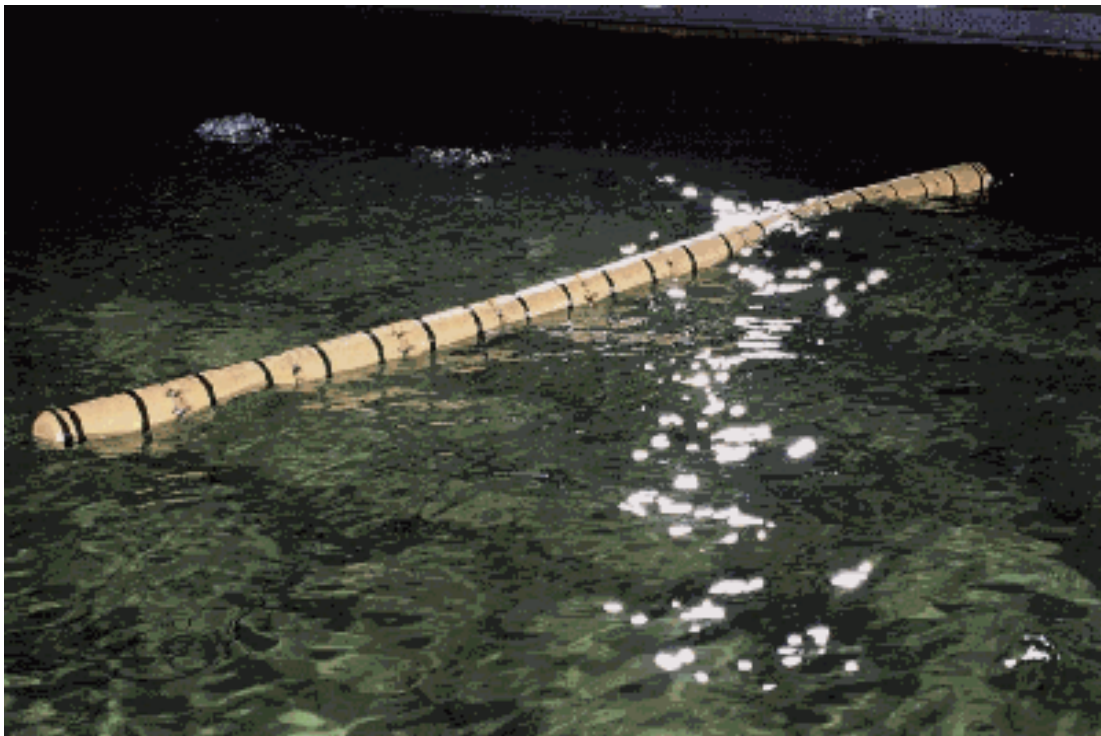


Figura 7.27. Pelamis – prototype (Ocean Power Delivery Ltd.)

7.9 Ventajas y desventajas de la energía a partir del océano

Las ventajas que se pueden mencionar en relación al aprovechamiento de la energía de las mareas son:

- Autorenovable
- No contaminante
- Silenciosa
- Bajo costo de materia prima
- No concentra población
- Disponible en cualquier época del año y clima

En cuanto a las desventajas encontramos:

- Impacto visual sobre el paisaje
- Alto costo del traslado de energía
- Limitada (al ciclo de las mareas)
- Efecto negativo sobre la flora y fauna
- Depende de muchos factores
- Alto costo inicial

Capítulo 8 Biomasa

8.1 Introducción

Biomasa, abreviatura de masa biológica. La biomasa es la energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica; esa energía la podemos recuperar por combustión directa o transformando la materia orgánica en otros combustibles.

8.2 Utilización de la Biomasa

8.2.1 Bosques

La única biomasa realmente explotada en la actualidad. Para fines energéticos es la de los bosques para cubrir parte de la demanda energética sólo puede constituir una opción razonable en países donde la densidad territorial de dicha demanda es muy baja, así como también la de la población (Tercer mundo). En España (por lo demás, país deficitario en madera) sólo es razonable contemplar el aprovechamiento energético de los desechos de la corta y saca y de la limpia de las explotaciones forestales (leña, ramaje, follaje, etc.), así como de los residuos de la madera.



8.2.2 Residuos agrícolas y deyecciones y camas del ganado

Estos constituyen otra fuente importante de bioenergía, aunque no siempre sea razonable darles este tipo de utilidad. En España sólo parece recomendable el uso a tal fin de la paja de los cereales en los casos en que el retirarla del campo no afecte apreciablemente a la fertilidad del suelo, y de las deyecciones y camas del ganado, cuando el no utilizarlas sistemáticamente como estiércol no perjudique las productividades agrícolas.

8.2.3 Cultivos energéticos

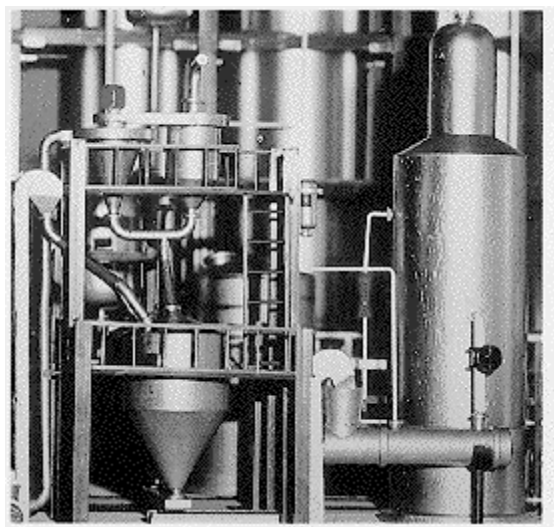
Consiste en cultivar vegetales para la posibilidad del aprovechamiento de cultivos energéticos. Esta opción no es muy rentable. Es muy discutida la conveniencia de los cultivos o plantaciones con fines energéticos, no sólo por su rentabilidad en si mismos, sino también por la competencia que ejercerían con la producción de alimentos y otros productos necesarios, (madera, etc.) Las dudas aumentan en el caso de las regiones templadas, donde la asimilación fotosintética es inferior a la que se produce en zonas tropicales.

No obstante, el problema de la competencia entre los cultivos clásicos y los cultivos energéticos no se plantearía en el caso de otro tipo de cultivo energético: los cultivos acuáticos. Una planta acuática particularmente interesante desde el punto de vista energético sería el jacinto de agua, que posee una de las productividades de biomasa más elevadas del reino vegetal (un centenar de toneladas de materia seca por hectárea y por año) .podría recurrirse también a ciertas algas microscópicas (micrófitos), que tendrían la ventaja de permitir un cultivo continuo. Así, el alga unicelular *Botryococcus braunii*, en relación a su peso produce directamente importantes cantidades de hidrocarburos.

8.3 Conversión de la biomasa en energía

8.3.1 Métodos termoquímicos

Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están bien adaptados al caso de la biomasa seca, y, en particular, a los de la paja y de la madera.



La combustión, oxidación de la biomasa por el oxígeno del aire, libera simplemente agua y gas carbónico, y puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial.

La pirólisis, combustión incompleta de la biomasa en ausencia de oxígeno, a unos 500 grados centígrados, se utiliza desde hace mucho tiempo para producir carbón vegetal. Aparte de este, la pirólisis lleva a la liberación de un gas pobre, mezcla de monóxido y dióxido de carbono, de hidrógeno y de hidrocarburos ligeros. Este gas, de débil poder calórico, puede servir para accionar motores diesel, o para producir electricidad, o para mover vehículos. Una variante de la pirólisis, llamada pirólisis flash, llevada a 1000 grados centígrados en menos de un segundo, tiene la ventaja de asegurar una gasificación casi total de la biomasa. De todas formas, la gasificación total puede obtenerse mediante una oxidación parcial de los productos no gaseosos de la pirólisis. Las instalaciones en la que se realizan la pirólisis y la gasificación de la biomasa reciben el nombre de gasógenos. El gas pobre producido puede utilizarse directamente como se indica antes, o bien servir la base para la síntesis de un alcohol muy importante, el metanol, que podría sustituir las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol).

8.3.2 Métodos biológicos

La fermentación alcohólica es una técnica empleada desde muy antiguo con los azúcares, que puede utilizarse también con la celulosa y el almidón, a condición de realizar una hidrólisis previa (en medio ácido) de estas dos sustancias. Pero la destilación, que permite obtener alcohol etílico prácticamente anhidro, es una operación muy costosa en energía. En estas condiciones la transformación de la biomasa en etanol y después la

utilización de este alcohol en motores de explosión, tienen un balance energético global dudoso. A pesar de esta reserva, ciertos países (Brasil, E.U.A.) tienen importantes proyectos de producción de etanol a partir de biomasa con un objetivo energético (propulsión de vehículos; cuando el alcohol es puro o mezclado con gasolina, el carburante recibe el nombre de gasohol).

La fermentación metánica es la digestión anaerobia de la biomasa por bacteria. Es idónea para la transformación de la biomasa húmeda (mas del 75% de humedad relativa). En los fermentadores, o digestiones, la celulosa es esencialmente la sustancia que se degrada en un gas, que contiene alrededor de 60% de metano y 40% de gas carbónico. El problema principal consiste en la necesidad de calentar el equipo, para mantenerlo en la temperatura óptima de 30-35 grados centígrados. No obstante, el empleo de digestores es un camino prometedor hacia la autonomía energética de las explotaciones agrícolas, por recuperación de las deyecciones y camas del ganado. Además, es una técnica de gran interés para los países en vías de desarrollo. Así, millones de digestores ya son utilizados por familias campesinas chinas.

8.3.3 La biomasa en las fuentes de energía



Al contrario de las energías extraídas de la tanatomasa (carbón; petróleo), la energía derivada de la biomasa es renovable indefinidamente. Al contrario de las energías eólica y solar, la de la biomasa es fácil de almacenar. En cambio, opera con enormes volúmenes combustibles que hacen su transporte oneroso y constituyen un argumento a favor de una utilización local y sobre todo rural. Su rendimiento, expresado en relación a la energía solar incidente sobre las mismas superficies, es muy débil (0.5 % a 4% contra 10% a 30% para las pilas solares fotovoltaicas), pero las superficies, terrestres y acuáticas, de que puede disponer no tienen comparación con las que pueden cubrir, por ejemplo, los captadores solares.

8.4 Conceptos sobre la Biomasa

8.4.1 Biogás

Mezcla de metano y otros gases que se desprende durante la degradación anaerobia de la materia orgánica por la acción de microorganismos. El biogás se obtiene mediante un digestor o bien canalizándolo directamente en un vertedero controlado. En el primer caso, la temperatura del digestor se mantiene a unos 50 grados centígrados; de este modo se logra que el pH este comprendido entre 6.2 y 8, lo que favorece la actividad de los microorganismos. La degradación bioquímica, de gran complejidad y que dura entre 10 y 25 días, se desarrolla en tres fases principales: la hidrólisis y acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis.

Tanto el tipo de sustrato orgánico como las condiciones del proceso y el grado que este alcanza hacen que las proporciones de los componentes del biogas (54%-70% para el metano, 27%-45% para el CO₂, etc.) varíen mucho. El biogás se emplea tanto para la generación de calor mediante combustión como para la generación de energía mecánica o eléctrica, principalmente en las mismas plantas donde se obtiene.

8.4.2 Digestor

Dispositivo que permite llevar a cabo la degradación anaerobia controlada de residuos orgánicos para obtener biogás y otros productos útiles. El dispositivo mas simple de este tipo esta formado por un recipiente cerrado, de base cónica saliente, dotado con un conducto lateral para la entrada de los residuos, otro superior de escape del gas y un tercero inferior para evacuar los demás productos de la digestión (digestor discontinuo). Los digestores mas perfeccionados disponen de un agitador y de un calefactor que regulan la homogeneidad y la temperatura del proceso (digestor de mezcla completa), y de otros sistemas para enriquecer la flora bacteriana (digestores de contacto y de filtro anaerobio).Una instalación básica comprende el sistema de almacenamiento y alimentación, el digestor y los depósitos de gas y de los demás productos resultantes de la digestión. El digestor se alimenta con residuos orgánicos en las plantas de compostaje, con lodos de decantación en las depuradoras de aguas y con las deposiciones de los animales en las explotaciones ganaderas; además del biogás, los productos de la digestión son el compost, los lodos útiles para obtener más compost y los fertilizantes.

8.4.3 Combustibles Alcohólicos

Los alcoholes son los biocombustibles más utilizados actualmente en algunos países, tanto por dar una salida a excedentes agrícolas convertibles en alcohol como por dificultades financieras en la importación de combustibles fósiles.

En principio, es posible obtener alcoholes a partir de cualquier producto que contenga glúcidos fermentables; en particular, el proceso de fermentación alcohólica se puede dar con sustancias azucaradas (caña de azúcar, mostos, remolacha, jugos de frutas, etc.), amiláceas (cereales y tubérculos) y celulósicas (madera, paja de cereal, etc.), pero los rendimientos son muy desiguales. Algunos estudios señalan el metanol como el alcohol

con más condiciones para la combustión en motores: sirve tanto para motores Otto como Diesel.

Su densidad de energía es menor que la de la gasolina, pero su combustión, en cambio, es mejor, se le debe añadir un 10% de hidrocarburos ligeros para facilitar el encendido en frío en los motores de explosión; presenta también dificultades de arranque en los Diesel; y causa problemas de corrosión.

8.4.4 Compostaje

El compostaje, es decir, la fermentación controlada de residuos orgánicos para obtener compost, es un proceso de transformación de residuos poco costosos y de gran utilidad en extensas regiones del mundo con suelos agrícolas pobres.

La materia prima del proceso proviene de residuos sólidos urbanos (RSU), estiércol y lodos de depuradora. Para los RSU, hay que prever un tratamiento de separación de la fracción orgánica, así como la eliminación del rechazo final del compostaje en un vertedero o incineradora.

8.4.5 La Biomasa y la Economía

La biomasa agrícola y forestal supone un potencial económico importante especialmente en las zonas tropicales y subtropicales, dado que en ellas se dan las condiciones más idóneas para el desarrollo de los vegetales. Los organismos fotosintéticos, tanto terrestres como marinos, pueden ser considerados como convertidores continuos de la energía solar, y por consiguiente renovables, en materia orgánica. Las plantas fijan anualmente mediante la fotosíntesis una cantidad de carbono equivalente en energía a $2 \cdot 10^{21}$ julios, que equivalen aproximadamente a 10 veces el consumo mundial de energía y aproximadamente a 200 veces la energía consumida en forma de alimentos.

8.4.6 La Biomasa y el Medio Ambiente

El interés medioambiental de la biomasa reside en que, siempre que se obtenga de una forma renovable y sostenible, es decir que el consumo no vaya a más velocidad que la capacidad del bosque, la tierra, etc. para regenerarse, es la única fuente de energía que aporta un balance de CO₂ favorable, de manera que la materia orgánica es capaz de retener durante su crecimiento más CO.

8.5 Ventajas y Desventajas

La utilización de la biomasa con fines energéticos tiene las siguientes ventajas medioambientales:

- Disminución de las emisiones de CO₂: Aunque para el aprovechamiento energético de esta fuente renovable tengamos que proceder a una combustión, y el resultado

de la misma sea agua y CO₂, la cantidad de este gas causante del efecto invernadero, se puede considerar que es la misma cantidad que fue captada por las plantas durante su crecimiento. Es decir, que no supone un incremento de este gas a la atmósfera.

- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas.
- Si se utilizan residuos de otras actividades como biomasa, esto se traduce en un reciclaje y disminución de residuos. Canaliza, por tanto, los excedentes agrícolas alimentarios, permitiendo el aprovechamiento de las tierras de retirada.
- Los cultivos energéticos sustituirán a cultivos excedentarios en el mercado de alimentos. Eso puede ofrecer una nueva oportunidad al sector agrícola.
- Permite la introducción de cultivos de gran valor rotacional frente a monocultivos cerealistas.
- Puede provocar un aumento económico en el medio rural.
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles.
- En la actualidad la tecnología aplicada a la biomasa está sufriendo un gran desarrollo. La investigación se está centrando en los siguientes puntos:
 - En el aumento del rendimiento energético de este recurso
 - En minimizar los efectos negativos ambientales de los residuos aprovechados y de las propias aplicaciones
 - En aumentar la competitividad en el mercado de los productos
 - En posibilitar nuevas aplicaciones de gran interés como los biocombustibles

Entre las desventajas se encuentran:

- Tiene un **mayor coste de producción** frente a la energía que proviene de los combustibles fósiles.
- **Menor rendimiento energético** de los combustibles derivados de la biomasa en comparación con los combustibles fósiles.
- **Producción estacional.**
- La materia prima es de **baja densidad energética** lo que quiere decir que ocupa mucho volumen y por lo tanto puede tener problemas de transporte y almacenamiento.
- Necesidad de acondicionamiento o transformación para su utilización.

Referencias y Bibliografía

Bibliografía Principal

- [1] REPP-CREST, Geothermal Power: FAQs, 1612 K Street, NW, Suite 202, Washington, DC 20006, 2002 (REPP-CREST.doc).
- [2] Regulatory Information Idaho, 2002 (Idaho.doc).
- [3] DOE and EPRI joint project, Presentation, 2002 (Intro.pdf).
- [4] Energía Geotérmica, (<http://www.renovables.com/tablas/geotermica1.htm>, http://ecoweb.terrashare.com/energ_alternat_geotermica.htm), 2002, (Energía geotérmica.htm).
- [5] DOE and EPRI joint project, Overview Of Geothermal Technologies, 2002 (geo_overview.pdf).
- [6] Ejemplo Nicaragua, cipres.cec.uchile.cl/~fmorales, 2002, (Geotermia a nivel mundial.htm).
- [7] Confidencial, Semanario de Información y Análisis, 1999, (Tema Central.htm).
- [8] The Americas; Nicaragua, Latest developments in Nicaragua, Ariel Zúñiga, Instituto Nicaragüense de Energía 2002, (THE AMERICAS.htm).
- [9] GT en Argentina, <http://www.segemar.gov.ar/geotermia/pagina/estado.htm> (Argentina.htm).
- [10] DOE and EPRI joint project, Geothermal Hot Dry Rock, 2002 (geo_hotdry_rock.pdf).
- [11] U. de Chile, Proyecto de energía geotérmica, 2002, (U-noticias.htm).
- [12] Informe resumen sobre tecnologías renovables, 2002 (tp.pdf).
- [13] Geothermal Networks, <http://www.geothermie.de/>, información sobre los últimos Concilios sobre Geotermia en el mundo.
- [14] New Zealand Geothermal Association, energía geotérmica en Nueva Zelandia.
- [15] La Geotermia: Tetera Natural, 2002, http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/119/htm/sec_13.htm

- [16] Instituto Nicaraguense de Energía <http://www.ine.gob.ni/>
- [17] http://nti.educa.rcanaria.es/blas_cabrera/TER/GEOTE/GEOTE04.htm
- [18] Asociación Geotérmica Internacional (IGA), <http://iga.igg.cnr.it/index.php>.
- [19] Instituto Geográfico y Minero de Portugal, <http://www.igm.pt/estatisticas/aguas/geotermia.htm>.
- [20] Departamento de GCorfo, 1993 [26]gía, Universidad de Chile, Presentación, material bibliográfico y reunión de trabajo con los Srs. Carlos Rojas y Alfredo Lahsen, diciembre, 2002.
- [21] International Energy Agency, Priddle, R., Renewables Information 2002, lawrence.metzroth@iea.org (Ren2002.pdf).
- [22] Hiriart, G., “Análisis Económico de un Proyecto Geotérmico Nuevo”, Curso sobre desarrollo de proyectos geotérmicos, Centro Geotérmico de Entrenamiento Los Azufres, Méjico, Agosto, 2001.
- [23] Kazmerski, L., “Renewable & Sustainable Energy Reviews”, Pergamon, Vol. 1, Nr.1-2, ISSN 1364-0321, March/June, 1997.
- [24] Advanced Horizontal Axis Wind Turbines in Windfarms.
- [25] F.García: Simulación de Turbina Eólica. memoria Ingeniero Civil Electricista. U. de Chile, 1984.
- [26] CORFO, 1993: Evaluación del Potencial de Energía Eólica en Chile, desarrollado por el Dpto. Geofísica de la Universidad de Chile, 1993.
- [27] A.Feijóo and J.Cidrás: Modeling Wind Farms in the Load Flow Analysis, Trans. on Power Systems,IEEE, vol.15, N°1, February 2000.
- [28] Gallegos-Ortega, R., Quintero-Núñez, M., García-Cueto, O. Rafael: “H2S Dispersion Model at Cerro Prieto Geothermoelectric Power Plant”, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, Mayo 28 – Junio 10, 2000.
- [29] Hutter, G.: “The Status of World Geothermal Power Generation 1995-2000”, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japón, 2000 (Hutter.pdf).
- [30] Informes de Precios de Nudo, CDEC-SIC, CDEC-SING, Octubre, 2002 (inf_SIC_o02d.pdf, inf_SING_o02d.pdf,).
- [31] CNE: Proyección de Costos Marginales calculada por la CNE, enero 2003 (Proyeccion Marginales.xls).
- [32] European Wind Energy Association , Greenpeace: “Wind Force 12: A BLUE PRINT TO ACHIEVE 12% OF THE WORLD’S ELECTRICITY FROM WINDPOWER BY 2020”, 2001-2002.
- [33] Economic Indicator: ” Wind Energy Generating Capacity for the World and Selected Countries, 1980-2001”, Earth Policy Institute, Washington.
- [34] Lester R. Brown: “World Wind Generating Capacity Jumps 31 Percent in 2001”, 2002, Earth Policy Institute, Washington.
- [35] José Luis Martinez, “Generación eólica de gran potencia, prospección para su uso en Chile”, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencia Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 2000.
- [36] Simposio Tecnológico Chileno-Alemán de Energías Renovables y uso eficiente de la Energías”, Septiembre 2001.

- [37] Transelec, Valor Nuevo de Reemplazo y Costos de Operación y Mantenimiento, Junio 2002.
- [38] Comisión Nacional de Energía, R.M. Exenta Nº236, Aprobación Reglamento Interno del Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado del Norte Grande, CDE-SING, 2001.
- [39] Comisión Nacional de Energía, R.M. Exenta Nº448, Aprobación Reglamento Interno del Centro de Despacho Económico de Carga del Sistema Interconectado Central, CDEC-SIC, 2001.
- [40] Apunte Máquinas Eléctricas, Universidad de La frontera, 2005

Otros Sitios WWW de Interés

- [41] <http://www.windpower.org/>
- [42] <http://www.renovart.com/>
- [43] <http://www.nrel.gov/wind/index.html>
- [44] <http://www.iter.es/>
- [45] <http://power.inescn.pt/>
- [46] <http://www.energias-renovables.com/i>
- [47] <http://www.risoe.dk/>
- [48] <http://www.windenergy.com/>
- [49] <http://www.wpm.co.nz/>
- [50] <http://www.eren.doe.gov/>
- [51] <http://www.repp.org/>
- [52] <http://www.igm.pt/estatisticas/aguas/geotermia.htm> (Instituto Geográfico y Minero de Portugal)

ReferenciasPV

- [1] Rafael Faradje, Energía Solar, <http://www.cai.org.ar/revista/sol1064.html>
- [2] A Consumer's Guide to Buying a Solar Electric System
<http://www.nrel.gov/ncpv/pdfs/26591.pdf>.
- [3] US Department of Energy, <http://www.eere.energy.gov/pv>
- [4] A guide to photovoltaic (PV) system design and installation, California Energy commission,
http://www.energy.ca.gov/reports/2001-09-04_500-01-020.PDF.

Bibliografía Adicional

Esta bibliografía no ha sido analizada en detalle, pero es citada en varios trabajos.

1. U.S. DOE. Overview of Geothermal Technologies. Renewable Energy Technology Characterizations. Accessible online at http://www.eren.doe.gov/power/pdfs/geo_overview.pdf
2. U.S. DOE. Geothermal Today. 1999 Geothermal Energy Program Highlights. DOE/GO-102000-1066. May 2000. Accessible online at <http://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27820.pdf>
3. NREL. The Status and Future of Geothermal Electric Power. Charles F. Kutscher. National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-550-28204. August 2000. Accessible online at <http://www.ecotopia.com/apollo2/geothermalstatus.pdf>
4. Unocal. The Geysers: A Continuing Evolution. Dr. Paul G. Atkinson. Accessible online at <http://www.unocal.com/geopower/evolution/>. This paper originally appeared in the Geothermal Resources Council Bulletin (August/September 1998), published by the Geothermal Resources Council.
5. U.S. DOE. Geothermal Today. 1999 Geothermal Energy Program Highlights. DOE/GO-102000-1066. May 2000. Accessible online at <http://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27820.pdf>
6. U.S. DOE. Geothermal Today. 1999 Geothermal Energy Program Highlights. DOE/GO-102000-1066. May 2000. Accessible online at <http://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27820.pdf>
7. International Ground Source Heat Pump Association. Financing Your Geothermal Heat Pump. Accessed June 22, 2001 at <http://www.igshpa.okstate.edu/Technology/MoreInfo/FactSheet/FinanceFactSheet.htm>
8. University of Utah. Energy & Geoscience Institute. Geothermal Energy Brochure. Accessed June 1, 2001 at <http://www.egi.utah.edu/geothermal/brochure/brochure.htm> and U.S. DOE. Geothermal Heat Pumps. DOE/GO-10098-652. September 1998. Accessible online at http://www.eren.doe.gov/erec/factsheets/geo_heatpumps.html
9. U.S. DOE. Geothermal Heat Pumps. DOE/GO-10098-652. September 1998. Accessible online at http://www.eren.doe.gov/erec/factsheets/geo_heatpumps.html
10. U.S. DOE Geothermal Energy Program. Geothermal Power Plants and Electricity Production. Accessed June 2, 2001 at <http://www.eren.doe.gov/geothermal/geopowerplants.html>
11. The cost of generating power from geothermal resources has dropped by about 25% over the past two decades. (Source: Geothermal Energy Association. Geothermal Facts and Figures. Accessed May 31, 2001 at <http://www.geo-energy.org/Facts&Figures.htm>)

12. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. INEEL Geothermal Energy Web Site. Accessed online June 1, 2001 at <http://geothermal.id.doe.gov>
13. U.S. DOE. Geothermal Today. 1999 Geothermal Energy Program Highlights. DOE/GO-102000-1066. May 2000. Accessible online at <http://www.nrel.gov/docs/fy00osti/27820.pdf>
14. U.S. DOE. Overview of Geothermal Technologies. Renewable Energy Technology Characterizations. Accessible online at http://www.eren.doe.gov/power/pdfs/geo_overview.pdf : and University of Utah. Energy & Geoscience Institute. Geothermal Energy Brochure. Accessed June 1, 2001 at <http://www.egi.utah.edu/geothermal/brochure/brochure.htm>
15. California Energy Commission. Electricity in California: 1983-1999 California Electricity Generation. Accessible online at <http://energy.ca.gov/electricity/index.html>
16. U.S. DOE. GeoPowering the West. Accessed June 1, 2001 at <http://www.eren.doe.gov/geopoweringthewest/geomap.html>
17. U.S. DOE. The U.S. Geothermal Industry: Three Decades of Growth. Lynn McLarty, Meridian Corporation, VA and Marshall J. Reed. Accessible online at <http://www.eren.doe.gov/geothermal/usgeoindustry.html>
18. U.S. DOE Geothermal Energy Program: Geothermal Electricity Production. Accessed June 2, 2001 at <http://www.eren.doe.gov/geothermal/geoelectprod.html>
19. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. INEEL Geothermal Energy Web Site. Accessed June 1, 2001 at <http://geothermal.id.doe.gov>
20. Vulcan Power. Geothermal Gas Price Hedge Power Policy Analysis: New Power Supply At Stable Low Price Without Air Pollution. Accessed June 1, 2001 at http://www.vulcanpower.com/policy_analysis.htm
21. NREL. The Status and Future of Geothermal Electric Power. Charles F. Kutscher. National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-550-28204. August 2000. Accessible via the internet at <http://www.ecotopia.com/apollo2/geothermalstatus.pdf>
22. International Geothermal Association. Installed Geothermal Electricity Generation Capacity by Country and Year. Accessed June 25, 2001 at www.demon.co.uk/geosci/igahome.html U.S. DOE. International Energy Annual 1999 and Energy Annual 1999. Energy Information Administration. Accessed June 25, 2001 at <http://www.eia.doe.gov>
23. Oregon Institute of Technology Geo-Heat Center. Services Offered: Brief Description of the Oregon Institute of Technology System. Accessed June 22, 2001 at <http://geoheat.oit.edu/service.htm>
24. Iceland Energy. Cascaded Use of Geothermal Resources in Iceland. Accessed June 22, 2001 at <http://www.icelandenergy.is/casehis05.html>
25. California Energy Commission. A.F. Jenkins, R.A. Chapman, and H.E. Reilly. Tax Barriers to Four Renewable Electric Generation Technologies. 1998. http://www.energy.ca.gov/development/tax_neutrality_study/index.html
26. President's Committee of Advisors on Science and Technology. Panel on Energy Research and Development. Report to the President on Federal Energy Research and Development for the Challenges of the Twenty-First Century. November 1997. <http://www.ostp.gov/Energy>

27. Vulcan Power. New Renewable Power Policy Suggestions. Accessed June 27, 2001 at http://www.vulcanpower.com/policy_recomm.htm . For further information contact Fred VanNatta at (503) 910-9664.
28. The World Bank Group. Rural and Renewable Energy: Geothermal Energy. Accessed June 27, 2001 at <http://www.worldbank.org/html/fpd/energy/geothermal>
29. Vulcan Power. New Renewable Power Policy Suggestions. Accessed June 27, 2001 at http://www.vulcanpower.com/policy_recomm.htm. For further information contact Fred VanNatta at (503) 910-9664.
30. Vulcan Power. New Renewable Power Policy Suggestions. Accessed June 27, 2001 at http://www.vulcanpower.com/policy_recomm.htm. For further information contact Fred VanNatta at (503) 910-9664.
31. Geothermal Heat Pump Consortium. National Earth Comfort Program. 1997. <http://wastenot.inel.gov/geothermal/fy95/environ/env03.htm>

Anexo: Celdas de Combustible

8.6 Introducción

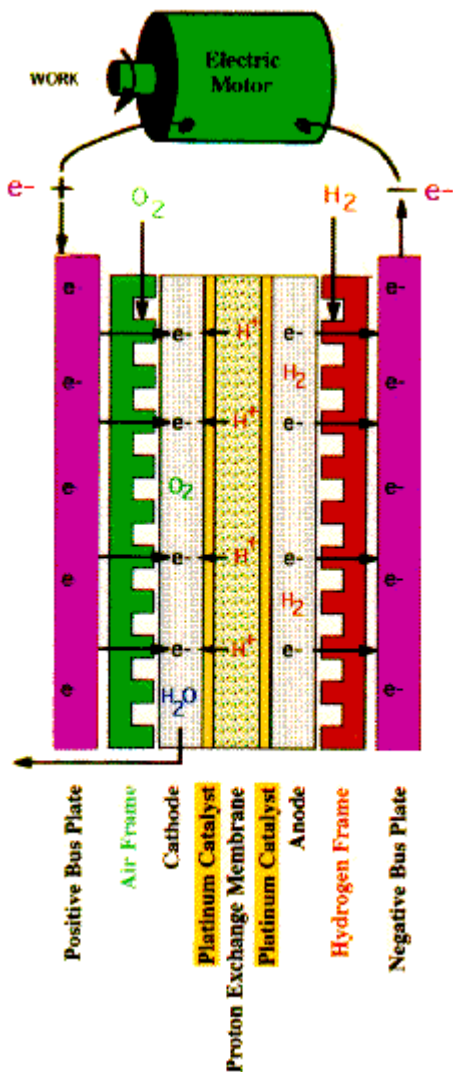
La primera celda de combustible fue desarrollada en 1839 por Sir William Grove (Francia), un juez y científico que demostró que la combinación de hidrógeno y oxígeno generaba electricidad además de agua y calor. Una de las primeras aplicaciones de las celdas de combustible, como un generador práctico, vino hacia comienzos de los años sesenta del siglo pasado, cuando el programa espacial de los Estados Unidos (NASA) seleccionó las celdas de combustible para proporcionar electricidad, agua y calor a las naves espaciales Gemini y Apollo. Hoy en día, la aplicación espacial ya no es la única de tipo práctico, puesto que las celdas de combustible están atravesando por un gran momento, al haber alcanzado una etapa tecnológica que les permite estar en posición de competir cada día más con las tecnologías convencionales de generación eléctrica, ofreciendo enormes ventajas sobre ellas.

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de una reacción directamente en energía eléctrica. Por ejemplo, puede generar electricidad combinando hidrógeno y oxígeno electroquímicamente sin ninguna combustión. La producción de energía de estas celdas no se agota como lo haría una batería, ni precisan recarga, ya que producirán energía en forma de electricidad y calor en tanto se les provea de combustible. Sin embargo, la corrosión y la degradación de materiales y componentes de la celda pueden limitar su vida útil. La manera en que operan es mediante una celda electroquímica consistente en dos electrodos, un ánodo y un cátodo, separados por un electrólito. El oxígeno proveniente del aire pasa sobre un electrodo y el hidrógeno gas pasa sobre el otro. Cuando el hidrógeno es ionizado en el ánodo se oxida y pierde un electrón; al ocurrir esto, el hidrógeno oxidado (ahora en forma de protón) y el electrón toman diferentes caminos migrando hacia el segundo electrodo

llamado cátodo. El hidrógeno lo hará a través del electrólito mientras que el electrón lo hace a través de un material conductor externo (carga). Al final de su camino ambos se vuelven a reunir en el cátodo donde ocurre la reacción de reducción o ganancia de electrones del oxígeno gas para formar agua junto con el hidrógeno oxidado. Así, este proceso produce agua 100% pura, corriente eléctrica y calor útil (energía térmica).

8.7 Principio de Funcionamiento de las Celdas de Combustible Tipo “PEM”

Estas Celdas de Combustible (Fuel Cells) utilizan como electrolito una membrana polimérica conductora de protones. Dicha membrana se encuentra entre dos electrodos porosos impregnados en el lado de la membrana con un electrocatalizador (usualmente Platino) y un material hidrofóbico del otro lado. Operan a temperaturas relativamente bajas (unos 80° C), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial alta. El único líquido que maneja la celda PEM es agua, por lo que los efectos por corrosión son mínimos. Un diagrama del esquema de funcionamiento se muestra en la Figura 5.1.



1. Al ánodo las moléculas de hidrógeno pierden sus electrones y forman iones de hidrógeno, un proceso que se hace posible por medio de catalizadores de platino.
2. Los electrones se traspan al cátodo a través de un circuito externo que produce electricidad al pasar por un motor (u otro mecanismo eléctrico).
3. Los iones de hidrógeno pasan al cátodo por la membrana de intercambio protónico, donde se unen con las moléculas de oxígeno y electrones para producir agua.

De esta manera, se utiliza el proceso natural de producción de agua por medio de la oxigenación de hidrógeno, para producir electricidad y trabajo útil.

4. No se produce ninguna contaminación y los únicos desechos son agua y calor.
5. El proceso químico es:

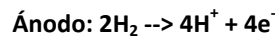


Figura 5.1: Cuadro que describe el funcionamiento de la celda PEM

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

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

presión, temperatura y calidad de los gases, entre otros parámetros. El desempeño actual de las celdas PEM está representado por resultados del laboratorio nacional de Los Álamos, Estados Unidos, en donde se han mostrado valores de 0.78 V por celda a corrientes de 200mA/cm² a presiones de 3atm de H₂ y 5atm de aire, usando cargas de Pt de 0.4mg/cm². Este tipo de celda produce calor útil que no puede ser utilizado en cogeneración, pero que puede aprovecharse en sistemas de calefacción y agua caliente, por ejemplo para aplicaciones residenciales y de oficina. Gran parte del éxito mostrado por esta celda se debe a los avances en materiales con propiedades fisicoquímicas más favorables para este sistema. También es en el área de materiales en donde se esperan mejoras adicionales, las cuales están concentradas principalmente en los electrocatalizadores tanto en su sustitución por otros menos costosos como en el mejor diseño de electrodos porosos para así bajar la carga del electrocatalizador.

Otros componentes como los colectores de corriente, los cuales también juegan el papel de distribuidores de gases y las placas finales de la celda, son objeto de investigación en universidades e instituciones académicas, en donde se han convertido en principales contribuyentes y proveedores de los desarrollos tecnológicos clave para fabricantes de celdas. El IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas, México) se encuentra trabajando junto con otras instituciones en esta dirección [Malo, T.J. *et al.*, 1999] para mejorar componentes de este tipo de celdas de combustible tanto en el área de colectores de corriente como electrodos porosos. Las celdas PEM son los principales candidatos para vehículos ligeros y prácticamente todos los gigantes de la industria automotriz han prometido llevar sus autos, ya en demostración, en etapa comercial, en los primeros cinco años del 2000. Otra aplicación importante es en la generación distribuida y muestra de ello es que Ballard (Empresa Canadiense) ha lanzado el plan de comercialización de su celda PEM de 250 kW, la cual consume gas natural y cuya primera unidad debe ser comisionada este mismo año a un centro naval en Indiana, Estados Unidos. Otras aplicaciones mucho menores como la sustitución de baterías recargables en videocámaras, telefonía inalámbrica, además de aplicaciones residenciales, se encuentran entre los mercados potenciales de las celdas PEM. Sin duda un tipo de celda que a corto plazo verá apertura de varios mercados que faciliten su comercialización y, por lo tanto, aumento en sus volúmenes de producción, con la consecuente disminución en sus costos iniciales.

8.8 Tipos de Celdas de Combustible

A pesar que las FC sean una tecnología nueva para la comunidad, estas aparecieron hace mucho tiempo, y además, existen diferentes tipos de celdas que se diferencian tanto por su funcionamiento al que están destinadas, tipo de combustible que utilizan, potencia generadora, etc.

Los diferentes tipos de FC que existen son las siguientes:

8.8.1 Celda de Ácido Fosfórico (PAFC)

Las FC de ácido fosfórico utilizan gas natural, por lo que utilizan un electrolito de ácido fosfórico, el cual es muy corrosivo para uso menor (hogar, oficina, artículos pequeños), pero es rentable a nivel industrial, donde pueden generar electricidad del orden del 40 % de eficiencia, sin embargo, pueden llegar a producir cerca del 85 % si el vapor que se expelle de esta, es vuelto a reutilizar en un ciclo de cogeneración. Comparándola con la mejor máquina de combustión interna que existe, que puede generar del orden del 30 % de eficiencia, la celda es mucho más eficiente. Las temperaturas en las que operan estas celdas son del orden de los 220° Celsius (400 Kelvin). Estas celdas pueden ser utilizadas en vehículos grandes como autobuses y locomotoras, pero ya se están utilizando a nivel comercial como en hospitales, clínicas, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas y aeropuertos.



Figura 5.2: Cuadro resumen de la celda PAFC.

8.8.2 Celda de Carbonatos Fundidos (MCFC)

Este tipo de celdas utilizan sales fundidas como electrolito, debiendo reponerse en forma frecuente CO_2 en el cátodo para que se pueda formar y recuperar iones carbonato, por lo que es una de las más eficientes desde el punto de vista combustible-electricidad y además poseen la capacidad de consumir combustibles a base de carbón, incluyendo el CO y los biocombustibles. Esta celda opera a temperaturas del orden de los 650 ° Celsius (1200 Kelvin) y permite la reformación del combustible (extracción del hidrógeno contenido en hidrocarburos) dentro de la propia celda, además de que no necesita

electro-catalizadores de metales nobles. En este tipo de celdas es aprovechada la electricidad y el calor generado.

MCFC Carbonato Fundido (Molten Carbonate Fuel Cells)	
• Electrolito	Mezcla Carbonatos litio y sodio
• Temperatura operación	650° - 700° C
• Eficiencia	50% - 60%
• Fabricante	Energy Research Corporation
• Comercialización	ND
• Aplicaciones	Plantas de cogeneración, plantas de generación transporte, 280 kW - 2MW



Tanque de almacenamiento de Hidrogeno

Figura 5.3: Cuadro resumen de la celda MCFC.

8.8.3 Celdas de Oxido Sólido

Este tipo de calda no utiliza electrolitos corrosivos, sino electrolitos en estado sólido y presenta diversas ventajas técnicas, ya que un sistema de oxido sólido normalmente usa un material cerámico (zirconio estabilizada de Ytrio), en lugar de un electrolito líquido, permitiendo que la temperatura de operación alcance los 1000° Celsius, logrando una eficiencia de generación del orden del 60 %, alcanzando un máximo del 80 % usando cogeneración. Por lo que este tipo de celdas son muy auspiciosas, no sólo por su eficiencia, sino que además por su bajo costo de fabricación. Su aplicación más directa son las generadoras de electricidad a gran escala e industrial.



Figura 5.4: Cuadro resumen de la celda SOFC.

8.8.4 Celda de Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

Este tipo de celdas tienen una densidad de potencia alta, por lo que pueden variar su salida para satisfacer cambios en la demanda de potencia y son adecuadas para aplicaciones donde se requiere una demanda inicial de energía bastante importante, tal como en el caso de automóviles. Las celdas "PEM" operan a temperaturas del orden de los 80 ° Celsius, por lo que no pueden utilizarse en cogeneración, pero si en sistemas de calefacción y agua caliente de hogares y oficinas. De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos, "son los principales candidatos para vehículos ligeros, edificios y potencialmente otras aplicaciones mucho más pequeñas tales como baterías recargables para videocámaras".

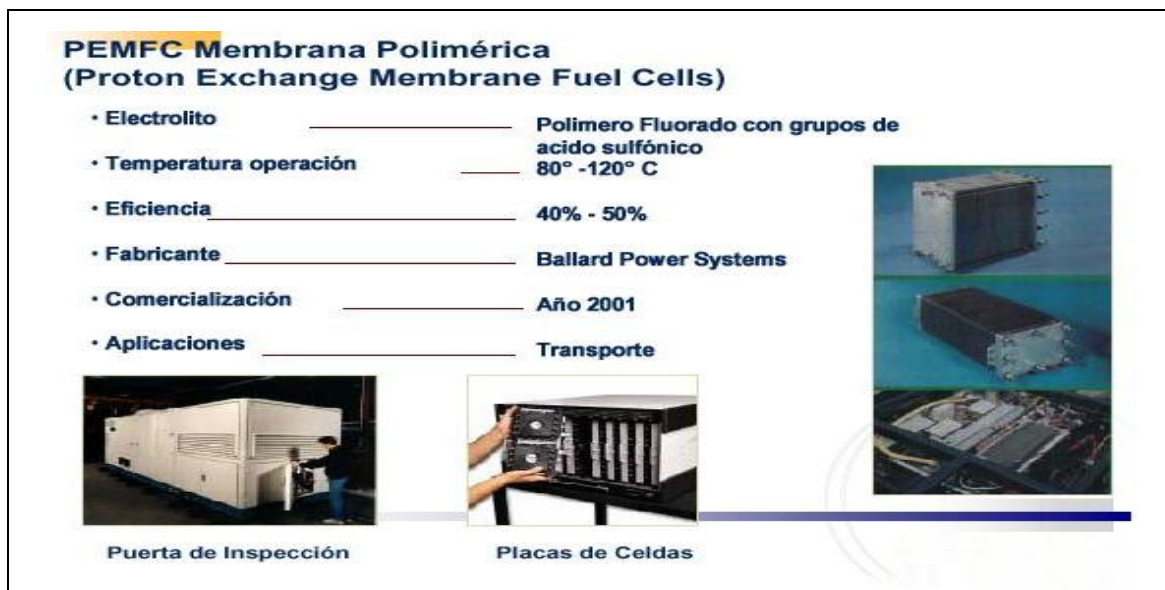


Figura 5.5: Cuadro resumen de la celda PEM.

8.8.5 Celdas Alcalinas

Este tipo de celdas utilizan hidróxido de potasio como electrolito, no requieren de materiales como catalizadores, ya que la dificultad de reducción de oxígeno es mínima, sin embargo, un factor adverso en este tipo de celdas es el efecto nocivo que el CO₂ produce al reaccionar con el hidróxido presente, lo que genera la necesidad de utilizar un combustible altamente puro, como el hidrógeno puro. Estas celdas pueden alcanzar temperaturas de entre 50° a 250° Celsius y una eficiencia de generación eléctrica de cerca del 70 %. Las celdas alcalinas han sido utilizadas hace mucho tiempo por la NASA, pero debido a su gran costo de fabricación no se han masificado, sin embargo, varias empresas están examinando la forma de reducir costos y mejorar su flexibilidad en su operación.



AFC Alcalinas (Alkaline Fuel Cells)	
Electrolito	KOH, concentración 85%
Temperatura operación	ND
Eficiencia	60% - 90%
Fabricante	Ze Tek Power
Comercialización	Año 2002 (500 U\$/kW)
Aplicaciones	Aplicaciones Espaciales transporte

Figura 5.6: Cuadro resumen de la celda ALCALINA.

8.8.6 Otras Celdas de Combustible

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

8.8.7 Clasificación de las Celdas de Combustible

A continuación, en la figura 5.7 es posible observar un resumen de las celdas de combustible basado en su historial, materiales de fabricación, eficiencia, producción, temperatura de operación y aplicaciones:

CUADRO 1

Tipos de celdas de combustible y características principales.

<i>Tipo de celda</i>	<i>Electrólito</i>	<i>Aplicación inmediata</i>	<i>(MW)</i>	<i>Disponible comercialmente</i>	<i>Eficiencia conv. eléctrico (cogeneración)</i>	<i>Temp. de operación/ electrocatalizador</i>
PEM	Membrana de intercambio protónico	Generación distribuida, transporte y aplic. móviles	Hasta 0.25	1997 (-1 kW) 2002 (transp.) 2001 (250 kW)	>40% (>70%)	80C/Pt
PAFC	Ácido fosfórico	Generación distribuida, cogeneración y transporte	0.2 - 10	1996 (200 kW) 1992 (transp.)	40% (80%)	200 C/Pt
MCFC	Carbonato fundido (sal fundida "inmóvil")	Generación distribuida, cogeneración, poten. central	0.25 - 100 (y mayor)	1997 2000	45% (70%)	650C/Ni
SOFC	Óxido sólido (cerámico)	G. distrib. poten. central	1 - 10 50 (y mayor)	2000	> 50% (> 80%)	1000C/ perovskitas

Figura 5.7: Clasificación de las celdas de Combustible

Este cuadro resumen de las FC, no señala la presencia de las celdas del tipo DMFC, ya se que encuentran en etapas de pruebas y no se conoce mucho de sus características, por lo que es conveniente esperar antes de colocar características erróneas de esta celda.

8.9 Aplicaciones

Desde la aparición de la primera FC en 1839, se tuvo que esperar cerca de 120 años para que se aplicara por primera vez una celda con fines prácticos, siendo la NASA la primera en utilizarlas (Proyecto Apollo 13, 1970). En la actualidad, las FC se están aplicando en variados campos, como la generación de electricidad masiva (Central Eléctrica) que se esta desarrollando en Estados Unidos y otros países; en la industria automotriz, donde empresas como General Motors, Toyota, Daimler-Benz ya poseen sus primeros prototipos de vehículos que utilizan celdas de combustible en base a hidrógeno; y en muchos otros usos menores como la celda portátil para ser utilizada a nivel de hogar y/o oficinas, en el campo de las telecomunicaciones, como la aplicación en telefonía portátil, y en muchos otros ámbitos que aun no se a investigado.

8.9.1 Generación de Electricidad Masiva

Dado el funcionamiento de la FC, una de las primeras visiones para las aplicaciones de las FC fue la producción de electricidad, y en particular la generación masiva mediante

centrales eléctricas. En la actualidad, la generación de electricidad esta dado por centrales hidroeléctricas, termoeléctricas y nucleares. Sin embargo, países como Estados Unidos, Italia y Japón ya están poniendo a prueba las primeras Centrales Eléctricas de FC.

La producción de electricidad por medio de las FC se ve muy prometedor desde el punto de vista económico (Costos), ecológico (Emisión de gases contaminantes) y Eficiencia. Haciendo una comparación de las diversas formas de producción de electricidad, las Centrales Termoeléctricas, dado los últimos avances del programa ATS (Advanced Turbine Systems) del Departamento de Energía de EEUU. Prometen un aumento de su eficiencia de un 15 % para las turbinas a gas y de un 55 % para las centrales que poseen un ciclo combinado. Estos sistemas modernos basados en el uso de FC operarán a costos 10% menores que los actuales sistemas y reducirán los niveles de NO_x, CO₂, CO, e hidrocarburos no quemados según proyecciones del mismo ATS. A pesar de esto, dichos avances están alcanzando los límites de temperatura de operación de los materiales actuales debido a que la eficiencia del sistema a turbina depende de la temperatura de entrada de los gases, limitada por el daño potencial de las hojas de la turbina misma. A diferencia de estos sistemas avanzados, la eficiencia en las FC no está limitada por la temperatura.

Desde el aspecto ecológico, los gases que producen el efecto invernadero, las FC representan un desarrollo potencialmente revolucionario, ya que en lugar de utilizar combustión para generar electricidad, utilizan la reacción electroquímica entre el hidrógeno del combustible y el oxígeno del aire para producir electricidad, agua y calor. Es también cierto que cuando una celda de combustible utiliza hidrocarburos como fuente de hidrógeno (gas natural, metanol, etc.) generalmente requerirá una etapa de reformación para extraer el hidrógeno, lapso durante el cual producirá CO₂. No obstante, gracias a su capacidad de obtener altas eficiencias de conversión combustible/ electricidad, las celdas de combustible producen la menor cantidad de CO₂ de cualquier tecnología actual que utilice combustibles fósiles para generar electricidad, por lo que las emisiones de este gas por Kwh. producido son mucho menores en las celdas de combustible, que los valores prometidos, por ejemplo, por los sistemas avanzados de turbina tanto en los sistemas actuales como en los sistemas proyectados en los próximos años de ambas tecnologías. Otra diferencia fundamental es la alta flexibilidad que tienen las celdas para aceptar una gran diversidad de combustibles, lo cual las ubica como una tecnología que permite una transición hacia tecnologías limpias y el uso de fuentes de energía renovables.

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

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

A continuación, los siguientes diagramas representan los distintos aspectos técnicos que comparan la aplicación de FC a las centrales eléctricas con los sistemas actuales de producción de electricidad:

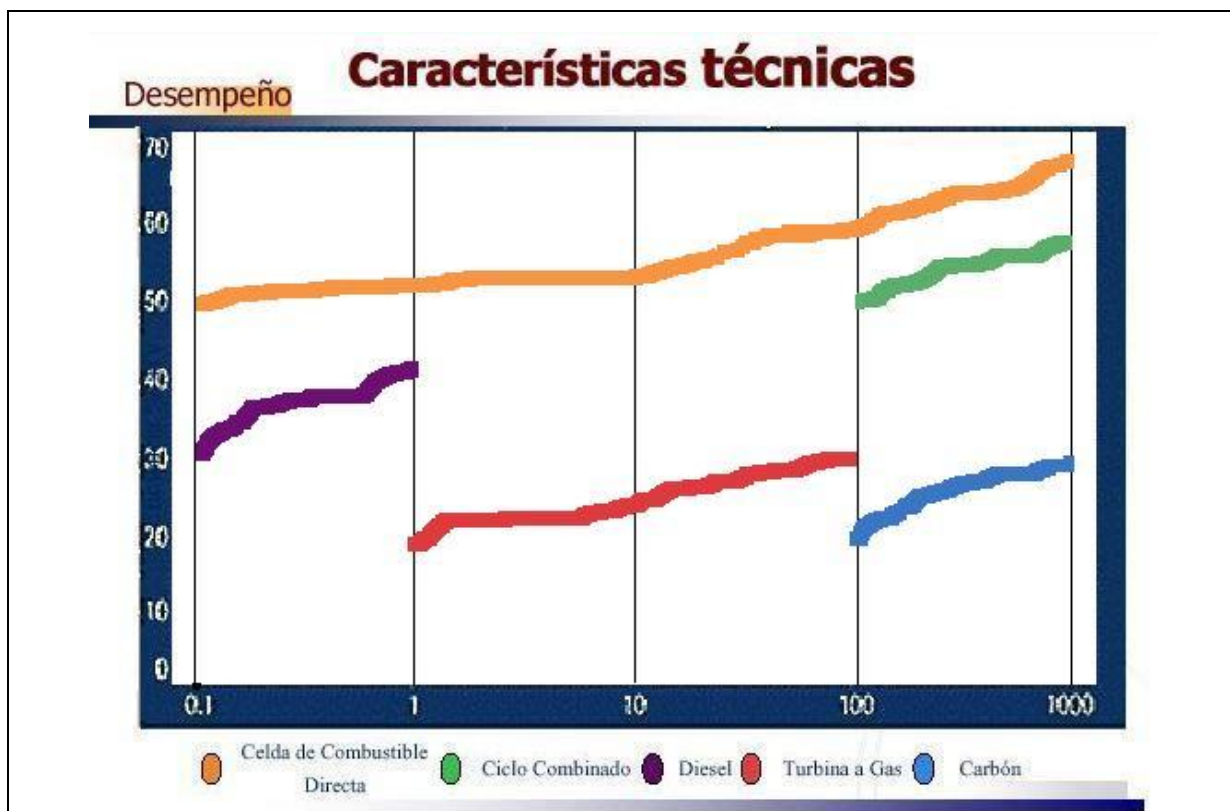


Figura 5.8: Diagrama de comparación del Desempeño (%), en función de la Generación (MW).

COSTOS POR TAMAÑO DE PLANTA Y TECNOLOGÍA

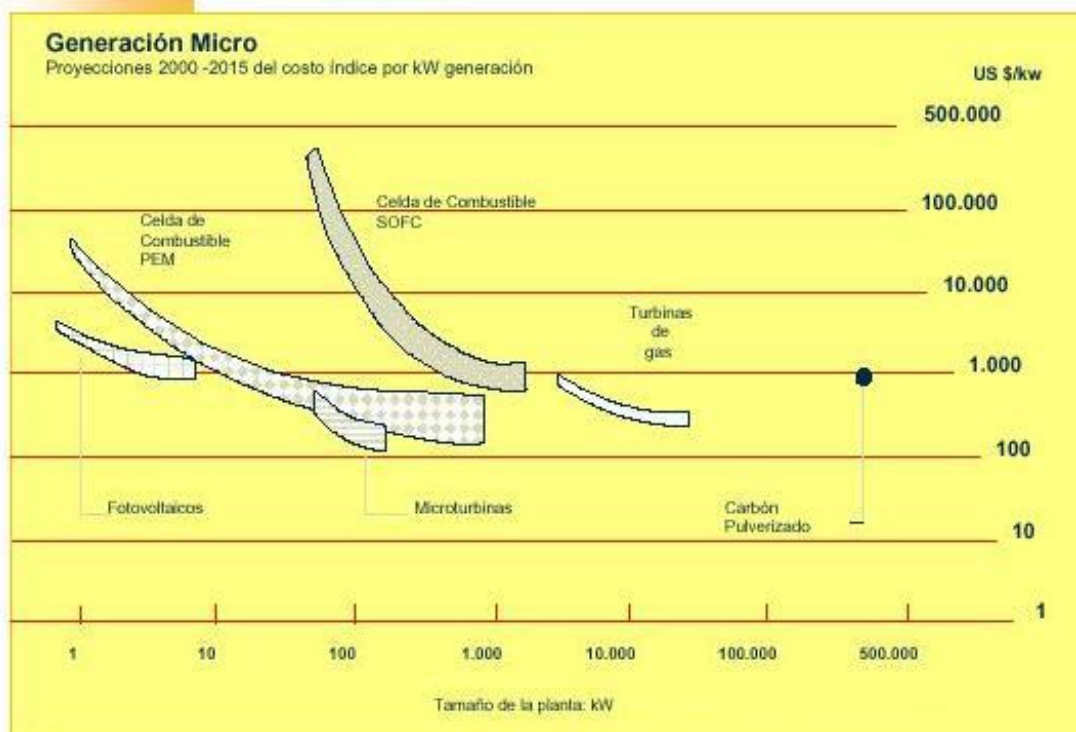


Figura 5.9: Diagrama de comparación del Costo (US\$) en función de la Generación (MW).

EMISIONES

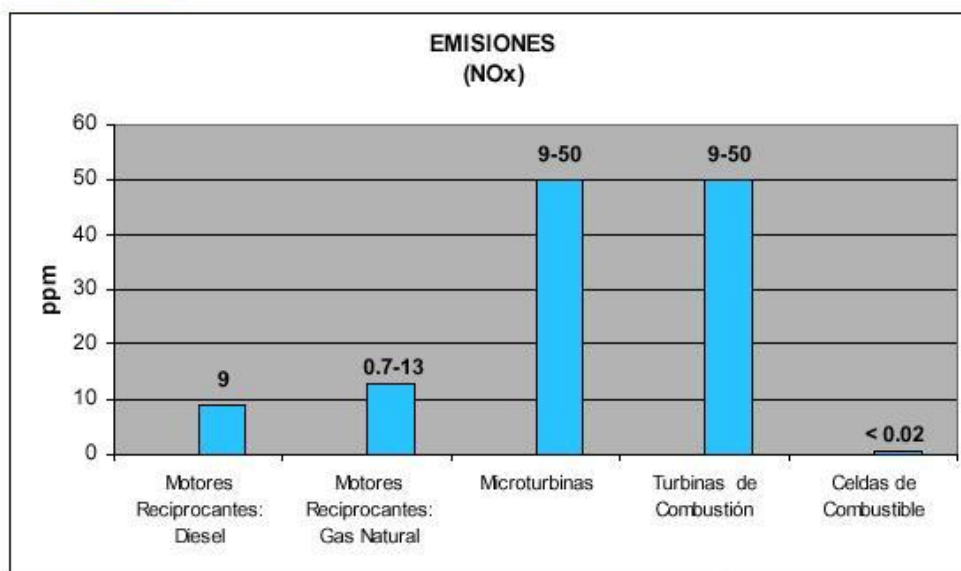


Figura 5.10: Diagrama de comparación de Emisión de Nox (ppm) de las distintas Centrales Eléctricas

EMISIONES

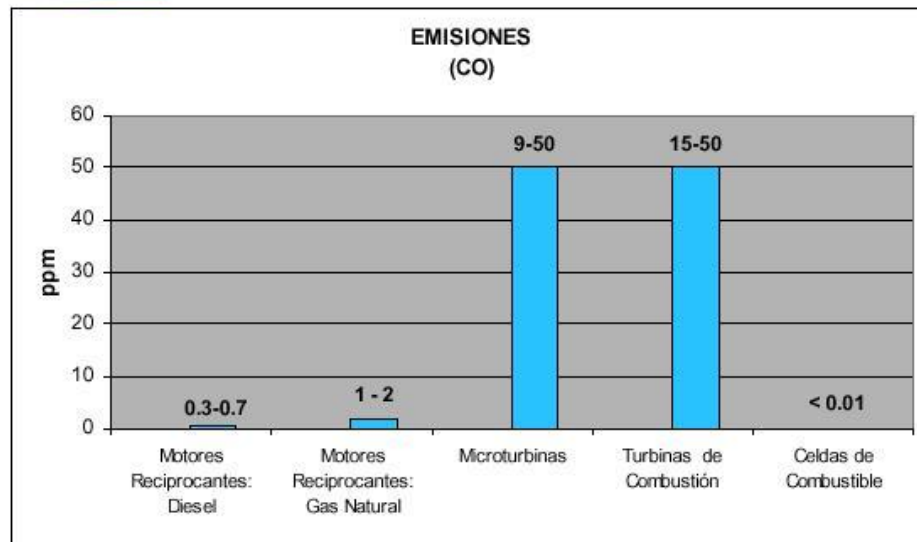


Figura 5.11: Diagrama de comparación de la Emisión de CO (ppm) de las distintas Centrales Eléctricas

EMISIONES

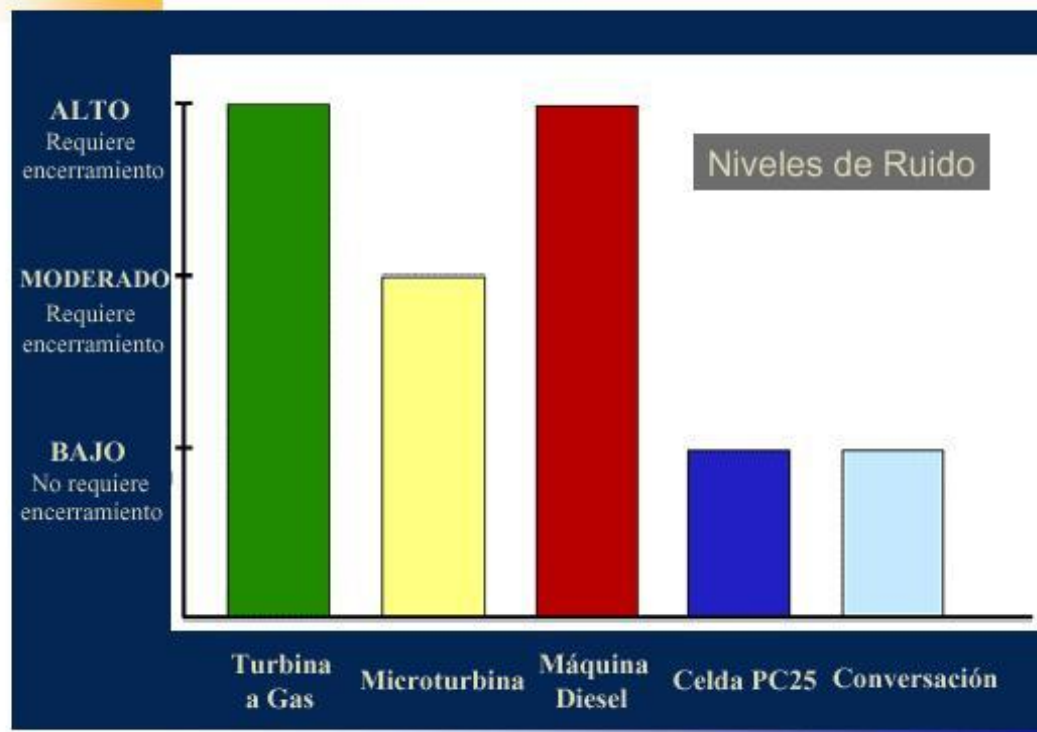


Figura 5.12: Diagrama que representa los niveles de ruido de la Centrales Eléctricas

En forma más concreta, entre los proyectos que llevan a cabo ciertas empresas de diversos países podemos mencionar los siguientes

- Una generadora de potencia experimental es planeada por Mitsubishi. Una planta generadora de 200kW de celda de combustible tipo MCFC será construida por Mitsubishi para demostración y prueba por parte de Kansai Electric Power Company, la cual es parte de un consorcio japonés encargado de desarrollar sistemas de potencia con celdas MCFC. Mitsubishi espera desarrollar eventualmente un sistema MCFC a gran escala. El proyecto está siendo apoyado por la organización NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization).
- La reestructuración de la industria eléctrica de Connecticut podría impulsar la generación a base de FC. La legislatura de Connecticut aprobó un plan de reestructuración de la industria eléctrica que establece que el 5.5% de la energía del estado provenga de fuentes solares, eólicas, biomasas sostenibles, gas de rellenos sanitarios, de celdas de combustible y que un 7% adicional de fuentes hidráulicas, otras biomasas y basura-a-energía para el año 2009. El programa tendrá efecto si es también adoptada por otros dos grandes estados del noreste.
- Italia genera poco más de un cuarto de la energía que consume, basándose principalmente en combustibles fósiles importados. El programa de energía nuclear fue abandonado por la oposición pública tras el accidente de 1986 en Chernobil, Ucrania. Ahora se utilizan diferentes alternativas de energía, incluido el metano para quemar en plantas térmicas, la cogeneración y las celdas de combustible

8.9.2 Generación de Electricidad de Pequeña Escala

Dentro de la generación menor de electricidad, podemos mencionar una serie de aplicaciones de las FC, que van desde la producción de electricidad para un hogar, generación de electricidad para diversos artefactos mayores (Telecomunicaciones) y menores (Computadores, Heladeras, etc.) e incluso aplicaciones de FC para un teléfono portátil (celular).

Celda de Combustible en el Hogar

Un proyecto desarrollado en Alemania por la empresa Vaillant, esta investigando la aplicación de las **FC** del tipo SOFC para la generación de electricidad para un hogar, donde se tendrían mini-centrales del tamaño de las antiguas calderas hogareñas. Cuantitativamente, se puede generar una cantidad de 4.5 kW. de energía eléctrica. Y no sólo electricidad, ya que se trata de una **FC**, se puede obtener el calor que genera la celda para regular la temperatura en el interior de la casa (Calefacción), generando una cantidad de 35 kW de calor. En la figura 5.13, se ilustra muy superficialmente como se aplicaría la celda de combustible para la generación eléctrica hogareña.

Aplicación residencial



Figura 5.13: Aplicación de las CC para generación eléctrica hogareña.

La empresa Sanyo (Japón) probó desarrollar el uso de FC para uso residencial con la comercialización de estas en sistemas de cogeneración en hogares y tiendas. Estas FC son del tipo PEFCs (electrólito de polímero), cada unidad genera 1 kW de electricidad. Estas unidades utilizan gas natural para extraer el hidrógeno.

Celda de Combustible en las Transmisiones

Otro proyecto es el de proveer energía confiable para operaciones delicadas. El SERC (Schatz Energy Research Center) ha construido un sistema de FC que provee energía confiable durante todo el año para una estación de telecomunicaciones en un sitio aislado. Esta estación provee servicio telefónico para la tribu Yurok en el norte del Estado de California, EEUU. Como casi todo el mundo, a los miembros de la tribu Yurok del noroeste de California, EEUU, les gusta tener el servicio telefónico. Pero en su remota aldea en el corazón del valle del río Klamath, obtener ese servicio no ha sido muy fácil. Alejados de las líneas telefónicas y las estaciones emisoras de telefonía celular, la opción más confiable para establecer el servicio telefónico es la instalación de una serie de transmisores de microondas, que puedan llevar las señales telefónicas. Sin embargo, fue necesario ubicar la emisora más importante de la cadena en la cima de la montaña llamada Schoolhouse Peak, dentro de los límites del Parque Nacional Redwood (conocido por sus bosques de secuoyas, los árboles más altos del mundo), a varios kilómetros de las líneas eléctricas. Dado que la administración del parque prohíbe el uso de generadores que usan combustibles de petróleo dentro del parque, y que la energía solar no sería suficiente durante los largos períodos oscuros y lluviosos del invierno, fue necesario escoger una fuente alternativa de energía: una celda de combustible. La emisora

microonda está ubicada en una torre usada por la detección de incendios forestales (vea la foto a la derecha figura 5.14: la antena parabólica se usa para transmitir las señales de microondas). Esta emisora usa 100 vatios, igual que una bombilla eléctrica. Durante el día, los módulos solares (en la foto, visibles en la pared de la torre) proveen la energía, almacenando el exceso en baterías. Durante los largos períodos nublados, cuando no hace suficiente sol y las baterías se descargan, se enciende la celda de combustible. El sistema de la celda de combustible (vea la foto a la derecha) está ubicado dentro de la torre. Cuando la celda de combustible está funcionando, produce suficiente energía para apoyar la emisora microonda y recargar las baterías. El hidrógeno se almacena en 12 tanques industriales conectados con un colector de escape.



Figura 5.14: Izquierda, dispositivo de control de la CC. Derecha, torre de transmisión de señales.

La misma FC (a la izquierda de la figura 5.14), es un dispositivo relativamente pequeño de 32 celdas. Los tanques que almacenan el hidrógeno se rellenan desde un camión después de cada 1000 horas de operación, o sea, aproximadamente cada dos meses en el invierno. En el verano, se espera que los módulos solares obtengan la mayoría de la carga requerida. El sistema fue encendido por primera vez en octubre 1999. En sus primeros cinco meses el sistema funcionó sin fallas, acumulando más de 2000 horas en operación, con una eficiencia neta de 49%. Además, la celda de combustible mantiene las baterías a un nivel de carga de por lo menos 50%, extendiendo así la vida útil de las baterías. Las ventajas que posee la celda, en comparación con un generador de combustible de petróleo normalmente usado en esta aplicación, la celda de combustible es un avance tecnológico importante. El generador consume petróleo y produce contaminación. Si se produjera una fuga de la gasolina, contaminaría el suelo y el agua. En cambio, la celda de combustible consume hidrógeno y produce agua y electricidad solamente. Si fugara el hidrógeno, éste ascendería sin peligro hasta la capa atmosférica superior sin contaminar el agua ni el suelo, porque el hidrógeno es más liviano que el aire.

La CC tiene una eficiencia de 50% en la conversión de energía de combustible a electricidad, en comparación con 15% eficiencia en el generador. En contraste con el ruido que produce el generador (como cualquier motor de gasolina), la celda de combustible

funciona silenciosa y limpiamente, sin emitir ninguna contaminación en el ambiente puro del Parque Nacional.

Celda de Combustible Portátil

Llamada "Stack-In-A-Box™" es una celda de combustible portátil, que en un principio fue diseñada para darle energía eléctrica a una maquina de helados, sin embargo, las posibilidades de aplicaciones de esta celda de combustible son muy variadas, ya que podrían utilizarse en todos los artefactos del hogar (refrigeradores, televisores, computadoras, etc.), en los artículos de la oficina, la industria, etc.



Figura 5.15: Fotografía de la Celda de Combustible portátil.

Técnicamente el sistema "Stack-In-A-Box™" es un generador de energía completamente portátil, diseñado y hecho a la medida por el laboratorio SERC. Fue diseñado para su uso por un grupo de estudiantes de la academia Merit en Santa Cruz, California, EEUU. Los estudiantes han utilizado este sistema de FC portátil para impulsar una máquina para hacer helados, demostrando así las posibilidades que presentan las FC y la energía renovable.

En este sistema, el hidrógeno almacenado en un pequeño cilindro se provee a una membrana de intercambio protónico para producir electricidad CC (corriente continua). Este diseño de baja presión de aire asegura una alta eficiencia del sistema de celda de combustible. Un pequeño invertidor de voltaje convierte la electricidad del sistema de 12 voltios CC a 110 voltios corriente alterna (CA) para utilizarla con cualquier electrodoméstico. Nuestro electrodoméstico preferido para las demostraciones es la máquina para hacer helados. Un pequeño cilindro de hidrógeno (56 litros estándares/0,5 litros comprimidos) dura aproximadamente una hora y media, suficiente para elaborar tres porciones (cantidades) de helados. El "Stack-in-a-Box™" se ha hecho para que sea fácil

de usar y muchos estudiantes lo han usado numerosas veces con un record perfecto en seguridad y funcionamiento.

El sistema de 15 celdas PEM tiene una capacidad máxima de 250 vatios, suficiente para impulsar una variedad de electrodomésticos. El sistema se ha probado para hacer licuados en una licuadora, mirar videos en un televisor, y usar una computadora. El sistema es portátil e independiente. No es necesario estar en el laboratorio para utilizarlo. El sistema puede proveer electricidad donde sea y en cualquier momento, en la playa, en las montañas, en una excursión, de día o de noche.

Sin embargo, uno de los mayores inconvenientes es el costo. Los materiales para elaborar el "Stack-in-a-Box™" costaron 10.000 dólares. Pero todos los prototipos hechos en laboratorio son caros. El mejoramiento en las técnicas de fabricación y automatización, el mejoramiento en los diseños, las ventajas económicas de comprar los componentes en gran escala y la producción masiva.

8.9.3 Celda de Combustible en la Telefonía Móvil

Una de las últimas novedades de las aplicaciones de las celdas de Combustible, es la que se utilizará en los teléfonos celulares. Los motivos, la FC es más pequeña, más liviana, más simple, más limpia, y más barata que las baterías actuales de los celulares; en efecto, una FC tiene de 3 a 5 veces la energía específica de las baterías de litio (Li-Ion) que alimentan a todos los celulares actuales, por lo que a igualdad de tamaño, con una carga de metano se puede hablar entre 18 y 27 horas, en vez de las 5 horas de tiempo de conversación que puede proporcionar una batería Li-Ion. El tiempo de standby también aumenta al tener las FC, con una densidad de energía entre 6 a 7 veces la de una batería de litio, con un límite teórico de 33 veces, por lo tanto, si con las mejores baterías Li-Ion el tiempo de standby es de 11 días, con una carga de metanol se obtienen en la actualidad 41 días, con un límite teórico de ¡6 meses a un año!

Para la fabricación de las FC de estas características, existe una empresa pionera en este campo, que es la Energy Related Devices Inc., una empresa contratista de Manhattan Scientifics Inc. que además registró aplicaciones como el Power Holster, un porta celular que actúa como cargador, basado en una FC alimentada por la ya mencionada mezcla de metanol y agua. Otra institución, el Ernest B. Yeager Center for Electrochemical Science dependiente de la Case Western Reserve University, desarrolló una celda miniatura de sólo 5 mm³, algo así como el tamaño de la goma de un lápiz, y que pronto podrá estar en producción. La producción masiva de baterías de estas dimensiones se prevé para fines de este año (2003), con una completa conversión para el año 2010 aproximadamente.

8.9.4 Industria Automotriz

La adopción del hidrógeno como combustible de automóviles podría iniciar la transición de la dependencia total del petróleo hacia la utilización combinada de diversos tipos de combustible, ya que el 98 % de la energía motriz de los automóviles proviene del petróleo. La búsqueda de fuentes de energía que reemplacen a los combustibles fósiles podrá reducir el impacto que recibe ha recibido el medio ambiente y utilizar energía renovables y limpias. Una de las claves para el diseño de un automóvil que funcione con

FC es el rediseño de los sistemas de dirección, frenado, aceleración y el motor, ya que al utilizar FC permite un chasis más plano. Dado que en el mundo existen muchas industrias que están investigando esta posibilidad, se mencionara un listado con los diversos trabajos que están realizando las empresas e instituciones en este ámbito:

Chrysler. Chrysler ha contratado a Delphi Automotive Systems para desarrollar un sistema para automóviles a base de celda de combustible. Delphi ha puesto una orden de compra por \$4 millones de USA dólares con Ballard Power Systems para las FC que se usarán en el sistema. A principios de 1997, Chrysler reveló un modelo a escala real de un vehículo movido a base de un sistema de celdas de combustible que podría emplear gasolina. El sistema de las FC emplea un reformador del combustible, desarrollado por Arthur D. Little Inc., el cual convierte gasolina y otros combustibles líquidos en hidrógeno "a bordo". Chrysler está también trabajando con la industria del petróleo. Chrysler expresó la intención de tener un auto trabajando para 1999 y realizar su comercialización en autos medianos para 2015.

Ford Motor Corporation. Ford ha establecido su programa P2000 para producir un sedán familiar ligero altamente avanzado. El concepto del automóvil P2000 actuará como plataforma para varios sistemas motores avanzados incluyendo FC. Ford ha trabajado con Ballard, International Cells y con Mechanical Technology Incorporated en este proyecto. Este fabricante de autos está tratando de llegar a un auto completamente integrado para investigación el cual podría estar listo para su evaluación para el año 2000.

En diciembre de 1997, Ford trajo su tecnología de autos eléctricos junto con \$420 millones de USA dólares, a una nueva alianza internacional de vehículos provistos con celdas de combustible junto con Ballard y Daimler-Benz. Cuando todos los arreglos de efectivo y valores hayan sido completados, tres compañías habrán de surgir. Ballard será el propietario mayoritario de la compañía que suministre las FC. Daimler-Benz será dueño mayoritario de la compañía que desarrolle los sistemas de motores empleando celdas de combustible y Ford será el principal propietario de una compañía que desarrolle los sistemas de transporte eléctrico.

General Motors. GM está trabajando con Delphi y Ballard para desarrollar motores a celdas de combustible. En enero de 1998, GM reveló un modelo avanzado de un sistema de tren de avance a celda de combustible y oficiales de la compañía mencionaron la intención de ésta de tener un vehículo a celda de combustible "listo para producción" para el año 2004.

Actualmente GM se encuentra probando la posibilidad de integrar un procesador de combustible (el cual extraería hidrógeno de metanol) con un motor a **FC** y espera terminar las pruebas de un vehículo que pruebe el concepto para 1999 y comercializarlo antes del 2006.

Ballard Power Systems. Ballard es un proveedor importante de celdas de combustible de membrana intercambio protónico (PEM) para aplicaciones de transporte. Esta compañía ha recibido pedidos de fabricantes de autos de todo el mundo y se encuentra

desarrollando motores a celdas de combustible comerciales junto con Ford y Daimler-Benz.

El primer vehículo de demostración "real" que empleó tecnología moderna de FC fue un autobús de 32 pies lanzado en 1933 por Ballard. Un autobús de segunda generación Ballard se encuentra bajo pruebas ya en las calles en Canadá y los Estados Unidos. La ciudad de Chicago en Illinois se encuentra operando 3 de estos vehículos en campo.

Energy Partners. Energy Partners ha anunciado el primer auto para pasajeros movido por celdas de combustible, un auto deportivo llamado "el auto verde". Energy Partners se ha unido a John Deere Corporation en un proyecto para desarrollar vehículos a celda de combustible de usos múltiples basado en el vehículo de Deere llamado "Gator". En octubre de 1997 los vehículos comenzaron a hacer demostraciones en el aeropuerto Regional de Palm Springs transportando primordialmente personal, equipo de mantenimiento y cargas pequeñas dentro de las instalaciones del aeropuerto.

Universidad de Georgetown. La Universidad de Georgetown está trabajando con Ballard, International Fuel Cells, con los fabricantes de autobuses NOVABUS y otros bajo contrato con el Departamento de Transporte de USA para desarrollar autobuses tamaño "natural" energizados con celdas de combustible tipo PEM y PAFCs. Georgetown ha conseguido realizar la primera demostración en USA. Entregó 3 autobuses al comienzo de 1991 impulsados por FC de ácido fosfórico bajo contrato con el Departamento de Energía de los USA.

H-Power. H-Power fue el integrador del sistema usado en el programa original de Georgetown y el Departamento de Energía y ahora hace celdas de combustible tipo PEM para una variedad de aplicaciones en automóviles especiales.

International Fuel Cells. International Fuel Cells (IFC) ha hecho demostraciones de manera muy exitosa con un sistema a base de celdas de combustible tipo PEM de 50kW usando hidrógeno más aire del ambiente. El sistema es altamente compacto, unos 9 pies cúbicos de espacio, y será muy apropiado para automóviles. IFC está también trabajando para desarrollar una celda de combustible PAFC de 100kW para un autobús.

Plug Power, L.L.C. Plug Power, L.L.C. es una inversión conjunta entre un subsidiario de DTE Energy Co., y el Mechanical Technology Inc. de Latham, Nueva York. Junto con Arthur D. Little Inc., y Los Alamos National Laboratory, Plug Power ha demostrado exitosamente una celda de combustible en operación empleando un producto reformado de gasolina. Este grupo se encuentra ahora concentrado en integrar este sistema a un vehículo. Dicho sistema se espera sea el doble de eficiente que un motor a gasolina de combustión interna.

Daimler-Benz Daimler-Benz ha estado probando en campo una FC desde 1993 declarando que las barreras fundamentales para su comercialización han sido superadas. Daimler dio a conocer, en mayo de 1996, su vehículo a base de FC de segunda-generación, un vehículo tipo van llamado NECAR II.

En octubre de 1997, Daimler dio a conocer NECAR III, un vehículo alimentado con metanol para su FC. Daimler-Benz y Ballard anunciaron su asociación en abril 1997. Las dos compañías han comprometido más de \$450 millones de dólares canadienses en el trato. Una nueva compañía de motores, financiada por este acuerdo, pondrá al mercado FC y motores a FC. En mayo de 1997, movido por FC, que opera con hidrógeno almacenado y tiene un rango de 250 Km (unas 155 mi). Este autobús se encuentra probándose en campo en Stuttgart, Alemania. Daimler ha comprometido \$725 millones de USA dólares en su participación junto con Ballard para investigación en FC que usan metanol como combustible. Estas compañías esperan tener un vehículo a base de celdas de combustible comercialmente viable hacia finales de 1999 y planean producir unos 100,000 motores al año para el 2003-2004.

De Nora S.p.A. El grupo italiano de investigación De Nora S.p.A. se encuentra trabajando con FC PEM para autobuses y aplicaciones marinas. Esta compañía se encuentra en la etapa de completar un diseño avanzado de celda de combustible PEM para el programa de autobuses de la Comunidad Europea y está cooperando con Renault en un proyecto de un automóvil a FC (ver más abajo).

Peugeot/Citroen Peugeot/Citroen está involucrado en un programa de investigación conjunto europeo de FC tipo PEM para reducir tanto el peso de este sistema como sus costos.

Renault. Una coinversión franco-sueco-italiana ha dado como resultado un concepto de vehículo a FC basado en un vagón tipo Renault. El vehículo FEVER (llamado así por sus siglas en inglés "Fuel Cell Electric Vehicle for Efficiency and Range") es alimentado por un sistema de FC tipo PEM que utiliza hidrógeno líquido almacenado, y una batería níquel-hidruro metálico como almacén de energía de respaldo. Su rango será de 500 Km. (310 mi).

Volkswagen/Volvo. En un proyecto conjunto, Volkswagen y Volvo han anunciado sus planes para tener en funcionamiento en 1999 un auto tipo "Golf" híbrido a base de una FC PEM alimentada con metanol.

Honda. En febrero de 1997, el subsidiario de Honda para investigación y desarrollo firmó un contrato por \$2 millones de dólares canadienses con Ballard para que éste le provea FC y equipo de medición relacionado con éstas.

Mazda. En diciembre de 1997, Mazda anunció que había desarrollado un auto a base de celdas de combustible basado en su auto compacto Demio. El auto desarrollado estará diseñado para alcanzar una velocidad máxima de 90 km/h y un rango de 170 Km. con un tanque de hidrógeno lleno.

Nissan. Nissan comenzó a probar autos con FC a principio de los noventas. En 1991 la compañía compró a Ballard una celda de combustible para pruebas. En marzo del mismo

año Nissan arregló un contrato por \$2.2 millones de dólares canadienses con Ballard para que lo abasteciera de celdas de combustible para investigación y prueba en automóviles.

Toyota. En octubre de 1996, Toyota reveló la conclusión de un vehículo a FC de pre-producción basado en su vehículo deportivo RAV4L. El auto corrió abastecido de hidrógeno almacenado a bordo en forma de hidrógeno sólido, en un "tanque" de una aleación capaz de absorber hidrógeno desarrollada por Toyota. Para la aceleración Toyota usa un sistema híbrido basado en baterías.

Un año más tarde, Toyota reveló una nueva versión de su FCEV alimentado con metanol. Este auto es operado con una FC tipo PEM empleando un reformador de combustible y tiene un rango con tanque lleno de 500 Km.

Un ejecutivo de Toyota dijo que el enfoque de la compañía sería sobre hidrógeno ó metanol como combustibles para sus vehículos, siendo metanol la opción preferida ya que la infraestructura existente para gasolina podría ser fácilmente modificada para la distribución de metanol.



Figura 5.16: Ejemplos de vehículos no contaminantes, provistos de Celdas de Combustibles

8.9.5 Industria Aeroespacial

Una de las primeras aplicaciones de las celdas de combustible fue precisamente en las misiones espaciales Apollo que desarrollo la NASA a partir del año 1970. Las aplicaciones en que estaban destinadas las FC eran en las naves espaciales, con el fin de entregar calor a la tripulación, debido a las extremas temperaturas que se exponen en el espacio (cerca de 3 grados Kelvin), suministrarle electricidad a los equipos electrónicos y finalmente aportar el agua necesaria a los astronautas.

Sin embargo, en una de estas misiones, la misión Apollo 13, una de estas FC tuvo una falla, explotando y colocando en riesgo la vida de los astronautas de la nave. Fue precisamente con este hecho que las FC se tornaron más populares, pero en el mundo científico ya eran muy conocidas.

Actualmente, las FC siguen siendo utilizadas en los transbordadores espaciales, dado el avance tecnológico, hoy en día son más seguras y el riesgo de tener un accidente similar es muy bajo.

8.9.6 Aplicaciones Varias

Dado las características de las celdas, estas poseen un variado campo de aplicaciones que aun no han sido probadas. Aquí hay una lista de algunas de estas aplicaciones:

- Existen alternativas para producir energía y una de las más prometedoras son las FC. Esta tecnología de FC se aplica en una planta de tratamiento para aguas servidas, entre otros lugares, en el Estado de Portland Oregon USA, se genera electricidad de llamado "Biogas" produciendo energía a 8 centavos por kilovatio.
- El metano colectado resultante de la descomposición biológica expide hidrogeno para unas FC que transforman este gas volátil en electricidad para proveer energía a más de 100 hogares por un periodo de 1 año.
- En Alaska, debido a las condiciones climáticas, se ha puesto en marcha una planta de calentamiento, la que genera 250 kW de energía. (Figura 5.17).
- Un proyecto en Palm Desert busca desarrollar un sistema de transporte sano y sustentable para la comunidad. El proyecto demuestra la utilidad práctica del hidrógeno como combustible para el transporte, y el valor de la FC de membrana de intercambio protónico como sistema de energía vehicular. El proyecto en Palm Desert abarca el ciclo entero de la energía, desde la producción hasta su uso último (transporte). (Figura 5.18).

Las aplicaciones que existen en la navegación también son muy prometedoras, ya que van desde la aplicación en pequeñas embarcaciones como en submarinos militares. (Figura 5.19).



Calentamiento en Alaska

Figura 5.17: Planta de Calentamiento en Alaska, EEUU.



Figura 5.18: Fotografía del vehículo del proyecto de Palm Desert



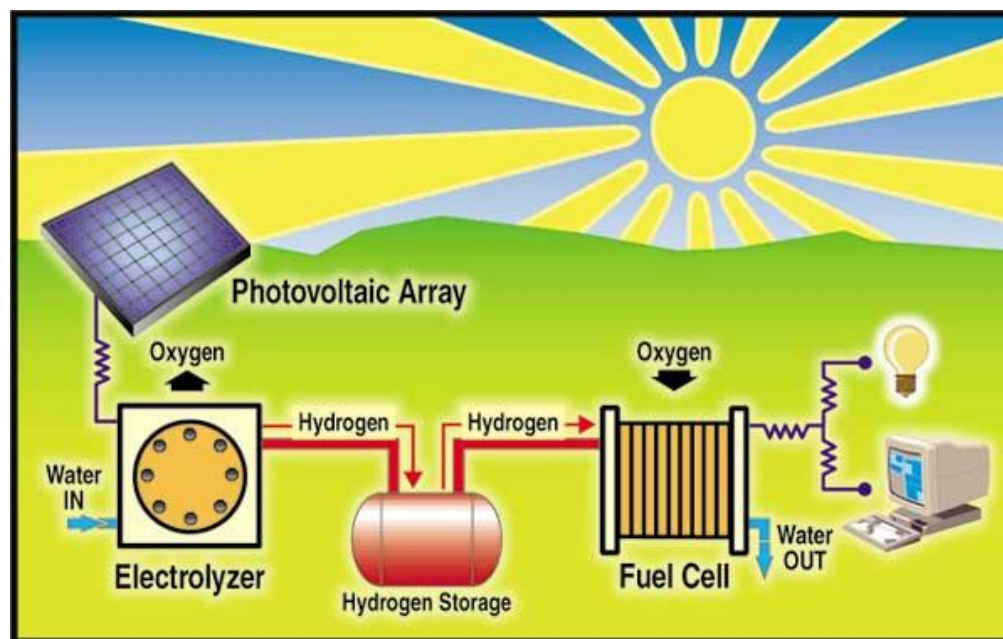
Figura 5.19: Aplicaciones de las CC en una pequeña embarcación

8.10 Ciclo del Hidrogeno

Se conoce con este nombre al proceso mediante el cual el hidrogeno cumple un ciclo completo- agua -gas-agua, y en cuyas partes intermedias ha sido utilizado para generar energía eléctrica. Es un proceso no tan reciente y que ya es utilizado en comunidades agrícolas independientes (alemanes en el norte de Chile), en instalaciones del SERC (Shatz Energy Research Center), y sin duda en otros lugares en los cuales se disponga de abundante, o al menos aceptable, radiación solar.

El proceso es el siguiente: la luz solar impacta sobre paneles fotovoltaicos, los cuales utilizan la electricidad generada para operar un equipo de electrolisis, el cual separa el agua en hidrogeno y oxigeno. El oxigeno es liberado al ambiente, mientras que el hidrogeno es almacenado en tanques o es utilizado inmediatamente. ¿De que manera? A través de una celda de combustible, la cual recibe como combustible hidrogeno para generar electricidad, agua y calor(a veces este ultimo no aprovechable). El hidrogeno no utilizado puede seguir almacenado en los tanques para ser utilizado en la noche o en días en que la radiación solar sea baja, y el agua formada por la celda de combustible puede ser reutilizada para el procesos de electrolisis. De este modo, se crea una estación generadora que necesita solo la radiación solar como combustible, y que según sus

requerimientos, puede operar como generadora a nivel propio (hogar personal o pequeñas comunidades), o mayores escalas.



8.11 Almacenamiento del Hidrógeno

El hidrógeno es el principal combustible utilizado para las celdas de combustible y sus aplicaciones. Pero existe un problema aun no resuelto en forma exitosa, el cual es el almacenamiento de este. Un gramo de hidrógeno a presión atmosférica ocupa un volumen de 11 litros; ambas cantidades, masa y volumen, son impensables para los requerimientos de la industria, ya que se exige combustible almacenado en contenedores lo menos espacioso posible, y obviamente se requiere una cierta densidad energética para que las celdas puedan producir suficiente electricidad.

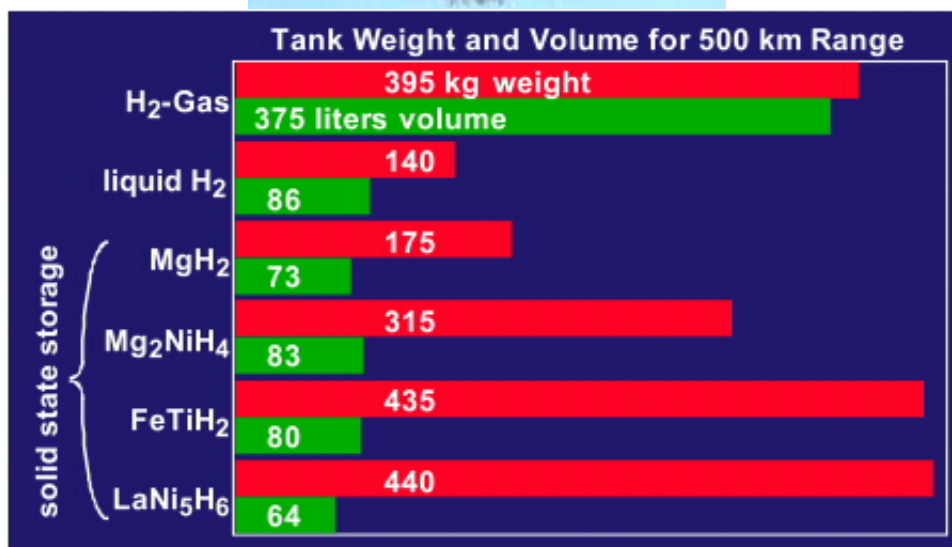
A continuación se mostraran algunos de los posibles métodos de almacenamiento del hidrógeno, los cuales varían tanto en materiales como en los principios utilizados.

8.11.1 Hidruros de metal

Esta es una de las alternativas que ha sido utilizada en algunas aplicaciones y es una opción importante para muchas compañías. Su principio de funcionamiento es sencillo, y se basa en la reacción del hidrógeno con ciertos metales para formar hidruros.

Esta reacción es reversible con facilidad, y el factor que desencadena la inversión es la presión. En otras palabras, y explicitando el proceso utilizado, sobre cierta presión, el hidrógeno reacciona con el metal respectivo para formar el hidruro, y bajo cierta presión, este se descompone nuevamente en hidrógeno y metal. En algunos casos (como los dispositivos de la empresa Ergenics), el metal o la aleación correspondiente es tratado de modo de optimizar las condiciones de absorción, eliminando imperfecciones en el metal

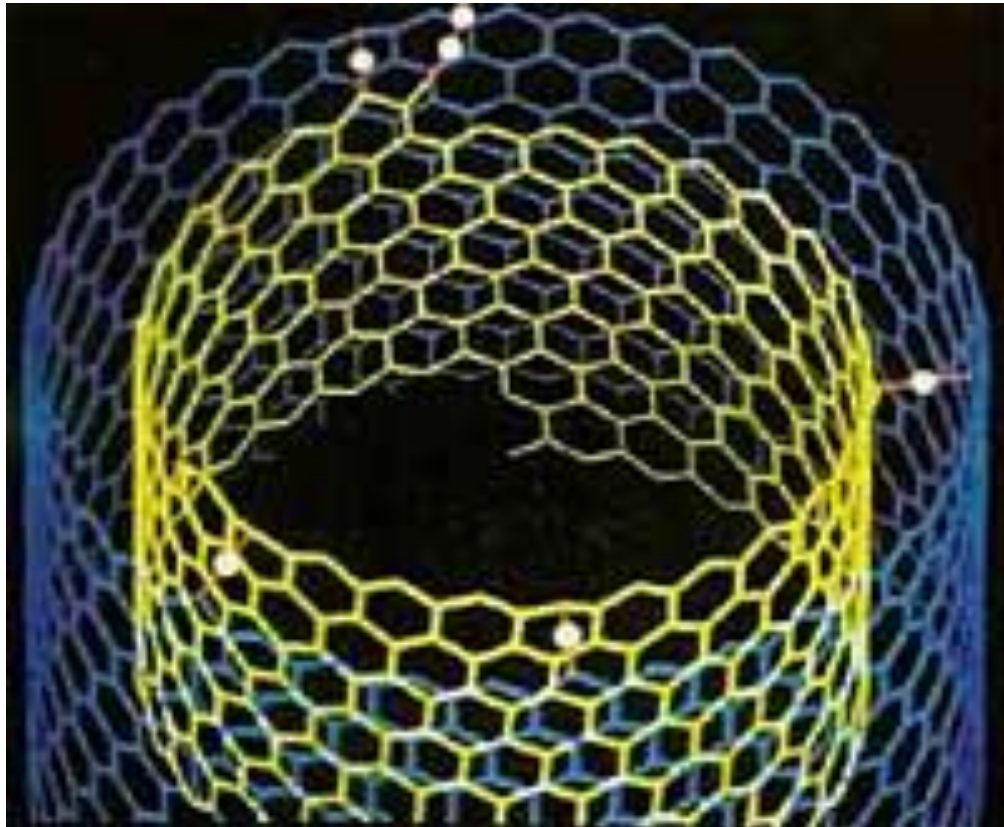
que actúan como barreras para la absorción. De este modo, el hidrogeno puede almacenarse en volúmenes superiores, y lo que no sea capaz de reaccionar por saturación, permanecerá dentro del contenedor como hidrogeno libre. Algunos hidruros son capaces de almacenar el doble de hidrogeno en comparación al hidrogeno liquido, para un mismo volumen., aunque habitualmente el porcentaje es cercano al 60% superior. La reacción de absorción es exotérmica, y la de liberación requiere calor, aprox. 250 C. Por tanto, se requiere una fuente de calor para que el hidrogeno se libere fluidamente, y cierto almacenador o difusor de calor para que este no sea excesivo en el proceso de llenado de hidrogeno. Además, con respecto a la vida útil del contenedor, es dependiente de la pureza del hidrogeno que al macena, ya que cualquier tipo de impurezas forman otro tipo de compuestos con el metal, donde ya no se podrá absorber hidrogeno.

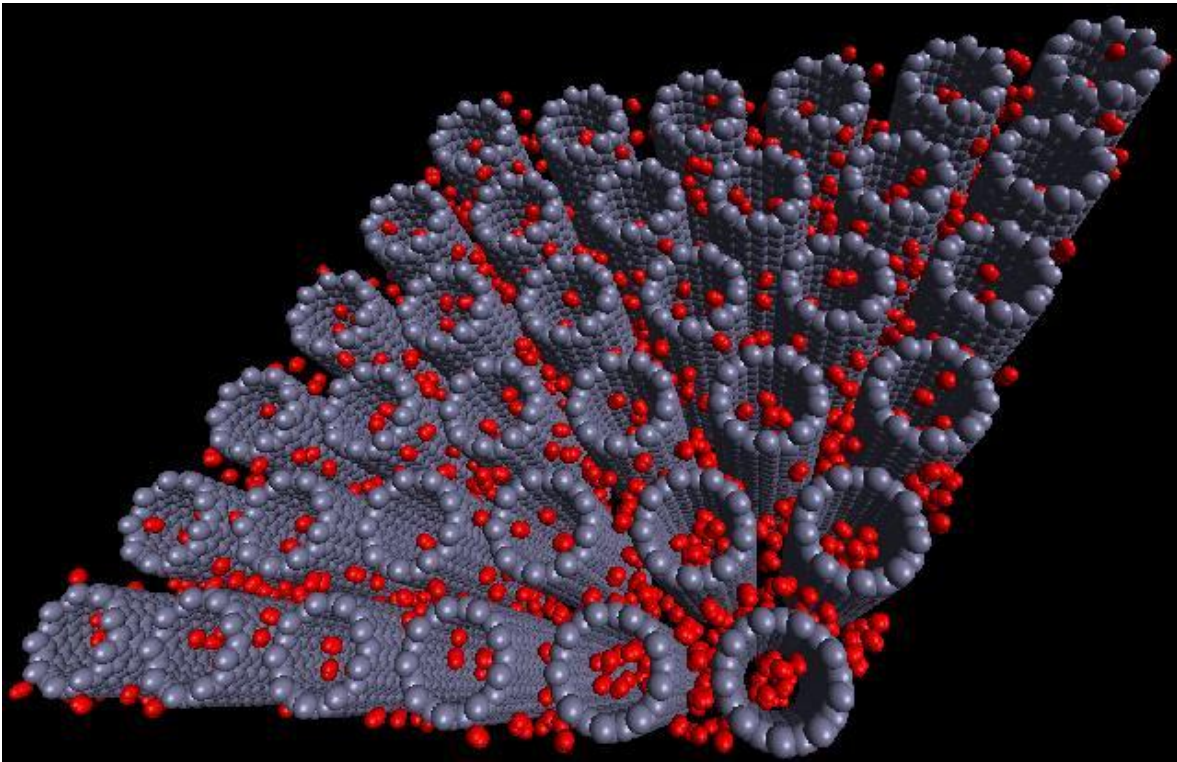


8.11.2 Nanotubos de carbón

Esta alternativa es también muy apoyada por algunos sectores. Como su nombre lo indica, los almacenadores del hidrogeno son los nanotubos de carbón, tubos de aproximadamente 2 nanómetros de diámetro (2 millonésimas de metro), y cuyo principio de funcionamiento es predecible: las moléculas de hidrogeno son guardadas “ordenadamente” en los nanotubos, una detrás de otra, aprovechando el espacio al

máximo. En un principio se habló de capacidades teóricas de 300% en peso de hidrógeno respecto al contenedor, pero ahora se considera imposible alcanzar tales capacidades, y ya se ha observado una capacidad de entre 4%-65%. El principio de funcionamiento es el de una simple reacción química, con la diferencia de que las moléculas de hidrógeno quedan distribuidas ordenadamente dentro de los nanotubos como pelotas en un envase. El carbono es un elemento fácilmente moldeable y en este caso, se utiliza una configuración "buckyball", como es posible ver.





8.11.3 Hidrogeno comprimido

Teóricamente, esta es la manera mas sencilla de almacenar hidrogeno. La temperatura de evaporación del elemento es alrededor de unos 20K, por lo que existe como gas a temperatura ambiente, y a temperaturas mucho mayores y menores que esta. Sin embargo, su baja densidad (0.0834401 Kg/m³ a temperatura ambiente, 1 ATM. de presión) requiere contenedores muy grandes, los cuales son impensables en aplicaciones medianas y pequeñas como el transporte y/o las telecomunicaciones. Tal problema podría solucionarse comprimiendo el hidrogeno lo necesario para que los contenedores tengan tamaños aceptables, pero las presiones necesarias para densidades energéticas aceptables serian no menores a 300 Atm. y en algunos casos a 400 Atm., lo que los hace inviables por seguridad y dificultad de implementación, a pesar de que algunas compañías han fabricado contenedores para aplicaciones, como el siguiente contenedor de Dinetek (245 atm.) para vehículos de Ford.





8.11.4 Almacenamiento químico

Esta técnica no es exactamente un método de almacenamiento, sino de producción. El mecanismo es el siguiente: como el hidrogeno es un elemento muy común en muchos compuestos, se hacen reaccionar compuestos ricos en hidrogeno, con el objeto de liberar este. El hidrogeno recién formado se traslada a un contenedor, el cual puede almacenarlo u ocuparlo inmediatamente. Como se ve, aquí la idea es aprovechar la producción de hidrogeno en grandes cantidades para llenar el contenedor “hasta reventar” (introducir hidrogeno sin parar). De este modo, se obtiene cantidades aceptables de hidrogeno. Se ha propuesto como mecanismo productor craqueo de amoniaco, de metanol y oxidación parcial. Sin embargo, por ahora no parece ser un método muy confiable ni eficiente, por lo que en un futuro cercano se utilizaran algunas de las alternativas anteriores.

8.11.5 Almacenamiento liquido

Es una de las más antiguas técnicas de almacenamiento (utilizada en las naves espaciales), pero a nivel mediano y pequeño no es adecuado por muchos factores. En primer lugar, el hidrogeno es líquido a 20 K: esto implica llevarlo a esta temperatura, lo cual es costoso e implica pérdidas en el 30% de la energía que se almacena. Además, mantenerlo a tan bajas temperaturas es también complicado, más aun para medios de transporte o artículos personales. En segundo lugar, a pesar de su eficiencia (100 veces mayor densidad que como gas), una pequeña cantidad (aprox. 3%) se evapora cada día; además se debe considerar que es menos eficiente que otras alternativas como los nanotubos de carbón o los hidruros metálicos. Aunque algunos prototipos de automóviles utilizan hidrogeno líquido (BMW), no es probable que se llegue a masificar su uso por todos lo dicho anteriormente.



8.11.6 Esferas de vidrio

Una técnica mas o menos nueva, pero de poco potencial a nivel mediano. Su principio de funcionamiento es el siguiente: a altas temperaturas, el hidrogeno puede atravesar las paredes de las esferas, las cuales mantienen el gas adentro a temperaturas y presiones menores. Luego, entregándole calor, el hidrogeno puede liberarse. La cantidad que puede almacenarse no es demasiada, aunque es segura y mantiene el hidrogeno a baja presión. Aun no están muy desarrolladas.

8.11.7 Transporte liquido

Esta alternativa, aunque ha sido utilizado en prototipos de General Motors, es probablemente la menos popular, ya que consiste en utilizar combustibles fósiles para obtener el hidrogeno, reformando petróleo u otros. Ya que gran parte de la búsqueda de mejoras en las celdas de combustible esta dada por los problemas ambientales, es poco probable que esta alternativa sea tomada mas en serio que algunas de las nombradas anteriormente, ya que se pretende acabar tanto con el uso como con la explotación de este tipo de combustibles (fósiles).

8.11.8 Poros atractores de hidrogeno

Esta idea es muy reciente y no forma parte de los métodos habitualmente esperados. Es una idea que corresponde al profesor Omar Yaghi, de la Universidad de California. Plantea el uso de un tipo de materiales conocidos como MOFs (Metal Organic Frameworks), que pueden ser fabricados a partir de otros materiales de bajo costo como el oxido de zinc (componente común de los bloqueadores solares). Su estructura es capaz de abarcar grandes superficies, y son llamados también cristales-esponja porque son capaces de atraer otros elementos, en este caso el hidrogeno. La ventaja de estos materiales, según Omar Yaghi, es que la absorción es física y no química, por lo que no hay deterioro del material. Actualmente se han llegado a eficiencias del 2% en peso de hidrogeno, pero espera llegarse al 6%.

8.12 Formas de Generación Hidrogeno

Al ser el hidrogeno un elemento tan abundante, existen diferentes formas de poder obtenerlo. Algunas de ellas son antiguas, mientras que otras son muy recientes. Pese a la infinidad de procesos posibles, solo algunos son los más utilizados, por eficiencia, por facilidad, por beneficios anexos, etc. Los mecanismos principales pueden agruparse en generación típica, biotecnológica y fotoprocetos. Se detallan a continuación.

8.12.1 Generación Típica

➤ *Reformacion con vapor:*

Esta técnica comprende dos fases. En la primera, una mezcla de hidrocarburos (generalmente metano) y agua se introducen dentro de un reactor multitubular, el cual esta a una temperatura de 790 °C y a 13 Atm. de presión. Los productos de la reacción, mediante un catalizador de níquel, son hidrogeno gaseoso (H_2) y CO. En una segunda etapa, el CO producido en la etapa anterior, junto con agua, se introduce en un reactor tubular (shift reactor) a menores temperaturas (220 °C-320 °C) y a mayor presión (26 Atm.) para obtener CO_2 y H_2 (hidrogeno gaseoso). En esta etapa el catalizador utilizado es CuZn o Fe_2O_3 , los cuales son muy activos a bajas temperaturas. Cabe decir que la primera reacción es endotérmica y la segunda exotérmica, siendo la reacción neta muy endotérmica.

➤ *Electrolisis:*

Este proceso es uno de los mas antiguos que permite obtener hidrogeno. Su funcionamiento es el siguiente: se le entrega corriente eléctrica a una celda electrolítica, la cual utiliza como materia prima agua. El agua es descompuesta en hidrogeno y oxigeno, obteniéndose el hidrogeno con una pureza de 99.7%. Este pasa luego a un intercambiador de calor, un horno y finalmente a un lecho catalítico, después del cual se obtiene hidrogeno puro.

Sin embargo, existen problemas asociados en relación a la eficiencia económica del proceso. Para producir la electrolisis a 25 °C y 1 Atm. de presión se requieren 1.24 Volt, y para producir 1m³ de hidrogeno un gasto energético de 4.8 kWh, por lo que esta técnica esta dada solamente para pequeña escala o lugares donde el costo de la energía eléctrica sea bajo.



8.12.2 Generación Biotecnológica

➤ *Gasificación de biomasa*

El proceso de gasificación solo se da si la humedad de la biomasa es inferior al 20%; si no es así, se utiliza para fermentación. La técnica en si consiste en producir la llamada oxidación parcial, que consiste en hacer reaccionar hidrocarburos, oxígeno y vapor de agua (de la biomasa) en un horno de oxidación, con temperaturas de 1300 °C-1500 °C.

El hidrocarburo mas utilizado es el metano, y la reacción neta produce CO y H₂ (hidrogeno gaseoso) .La composición de este hidrogeno es dependiente de la proporción hidrogeno-carbono del hidrocarburo como de la relación hidrocarburo-agua. El CO producido es sometido después a un proceso de shift reactor como el mencionado anteriormente.

➤ *Fermentación anaeróbica de masa:*

Esta técnica utiliza una reacción metabólica de ciertos organismos, específicamente bacterias. Las bacterias anaeróbicas (que no consumen oxígeno) al alimentarse de biomasa libera como producto de desecho un gas compuesto principalmente de metano (CH₄), que anteriormente fue rico en H₂. Por tanto, el hidrogeno puede ser obtenido reformando el metano con alguno de los métodos anteriores o interrumpiendo alguna vía metabólica de las bacterias de modo de liberar hidrogeno mas o menos puro.

8.12.3 Fotoproduccion de hidrogeno

➤ *Procesos fotoquímicos:*

Cualquier tipo de proceso fotoquímico para producir H₂ esta basado en la conocida reacción de hidrólisis, la cual separa el agua en sus componentes, hidrogeno y oxígeno. Sin embargo, el agua absorbe radiación en el rango infrarrojo, donde la energía de los fotones no es suficiente para producir la hidrólisis, por lo que se debe agregar otra molécula o un semiconductor que absorban en otra región para producir la reacción. Además de esto, se debe incluir un catalizador que almacene los electrones liberados en la absorción. El proceso no es especialmente sencillo y las eficiencias de almacenamiento son cercanas al 7%, por lo que por ahora no es una alternativa viable.

➤ *Procesos fotoelectroquímicos:*

Este proceso no es nada particular en si mismo, sino que consiste en generar energía eléctrica por medio de paneles solares, la cual se utilizara para producir la reacción de electrolisis nombrada anteriormente.

➤ *Procesos Fotobiológicos:*

Este uno de los métodos mas innovadores en la generación de hidrogeno, ya que utiliza microorganismos intervenidos de tal modo que liberen como producto de desecho hidrogeno. En condiciones normales, los microorganismos liberan oxigeno como principal producto. Sin embargo, si se modifican ciertas condiciones de crecimiento, es posible lograr que el reductor final en el proceso fotosintético sea una enzima catalizadora de la creación de hidrogeno, como la nitrogenasa o la hidrogenasa. Los microorganismos más eficientes en esta transformación energética han resultado ser las cianobacterias y las algas verde-azules.

Las algas verde-azules producen hidrogeno luego de ser sometidas a anaerobiosis (ausencia de oxigeno) y oscuridad. La eficiencia inicial es de un 12%, para luego decaer a medida que se reestablece la fotosíntesis. En condiciones ideales, se dan eficiencias promedio de hasta un 10%, pero uno de los principales problemas que aun permanecen es la rápida saturación del aparato fotosintético de estas algas, lo que hace que la producción de hidrogeno pueda terminar abruptamente si recibe radiación suficiente.

Con respecto a las cianobacterias, cuando son sometidas aun medio de cultivo carente de N_2 , producen hidrogeno, actuando la nitrogenasa como catalizador. Sin embargo, la nitrogenasa requiere gran cantidad de energía metabólica, de modo que la eficiencia se reduce a la mitad, siendo la generación mediante algas verde-azules la que tiene mayores posibilidades de desarrollo. En la imagen, algas verde-azules.



8.13 Comentarios

Varias son las características que hacen que las celdas de combustible se consideren una de las formas alternativas más ventajosas para la obtención de energía. Sus altas eficiencias rozan el 80% cuando además de electricidad se recupera calor. Este valor supera ampliamente las eficiencias de otros sistemas convencionales.

Además, la energía producida es 100% limpia, ya que el único producto que se obtiene es agua o vapor de agua dependiendo de la temperatura de operación del dispositivo. Otra de sus ventajas es que pueden conectarse en paralelo para suplir cualquier requerimiento energético. Las celdas de combustible adosadas a un procesador permiten obtener energía a partir de combustibles corrientes como alcoholes, gas natural y combustibles de origen fósil, así como también a partir de biomasa o de la fracción orgánica recuperada de residuos sólidos domiciliarios. De todas formas, el combustible más conveniente termina siendo el hidrógeno, ya que es el que más energía entrega por unidad de masa (141 mJ/Kg). Además, el hidrógeno puede obtenerse fácilmente por electrólisis del agua. Estos equipos de electrólisis se pueden alimentar de energía eléctrica obtenida por paneles fotovoltaicos o aerogeneradores. El aspecto económico también es de gran relevancia, los precios de las celdas de combustible no son altos cuando se los compara con los gastos anuales de electricidad y gas natural, con lo que su compra se amortiza en pocos meses. Con respecto a los costos de mantenimiento, éstos se consideran mínimos o casi nulos. Además de todo esto, no debe dejarse de lado la importancia de la independencia energética que brinda la instalación y uso de celdas de combustible. Por último, cabe aclarar que las celdas de combustible prometen seguir mejorando en todos sus aspectos y ampliar cada vez más el mercado, así lo demuestran las estadísticas.