



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EMPLEANDO  
*GEOBACTER SULFURREDUCTENS***

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO**

P R E S E N T A

**TALÍA ELENA HUITZIL HINOJOSA**

DIRECTORA DE TESIS  
M.I. TANYA MORENO CORONADO

MÉXICO D.F.

NOVIEMBRE 2010





## **Frases**

“Ingeniería es una gran profesión. Fascina ver como un fragmento de la imaginación emerge con ayuda de la ciencia, en un dibujo, en un papel y luego se transforma en una realización en piedra o metal o energía y trae trabajo y hogares a hombres y mujeres y eleva los niveles de vida y agrega el confort humano. Y ese es el gran privilegio de los ingenieros.”

Herbert Hoover.

“En este lugar perdemos demasiado tiempo mirando hacia atrás. Camina hacia el futuro, abriendo nuevas puertas y probando cosas nuevas. Sé curioso... porque nuestra curiosidad siempre nos conduce por nuevos caminos”.

Walt Disney

...Si el progreso es nuestro oficio... Que no ves que eres un puente entre el salvajismo y el modernismo, Salvador el ingeniero, salvador de la humanidad... Yo pienso que ha llegado el tiempo de darle lugar a los espacios sin cemento... que nosotros los humanos no necesitamos más hidrocarburos.

Rubén Albarrán. Trópico de Cáncer

## **Agradecimientos**

A la UNAM por haberme brindado la formación académica, forjar en mí el espíritu de pertenencia a esta gran institución y los momentos vividos en sus aulas que siempre se recordaran con una sonrisa.

A la Facultad de Ingeniería por plantear los retos y desafíos necesarios para el crecimiento profesional.

A mi asesora Tanya Moreno por su tiempo y sus conocimientos, por todo su apoyo en la elaboración de este trabajo y por la amistad brindada.

A mi profesor Rafael Garduño Delgado (qepd) el mejor maestro que tuve en la universidad, por sus enseñanzas y sus consejos que tanto me han servido en mi quehacer profesional.

A Techint, especialmente a los Ingenieros Georgina Palacios y Jorge Aguilar por todas las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo y el alentarme a concluirlo.

## **Dedicatorias**

Este trabajo quiero dedicarlo a todas las personas que me han apoyado en todo momento y de quienes he aprendido a ser la persona que soy ahora.

Leticia Hinojosa, mi madre.

Quien siempre ha sido una mujer inteligente y trabajadora, que ha educado una familia, y quien siempre me alentó a hacer lo correcto y hacerlo bien. No me queda más que decir ¡Gracias por todo!

Arturo Huitzil, mi padre.

De quien aprendí que la mejor manera de hacer las cosas, es amando lo que se hace, y hoy puedo decir que ha sido una gran lección, quien siempre me ha apoyado y me ha demostrado que lo único importante es ser bueno en lo que se hace.

A mis abuelos, Cristina, Inés, Ernesto y Ausencio. A los que afortunadamente la vida me ha permitido conservarlos, y de quienes aprendí que todo se logra a base de trabajo y esfuerzo. Gracias por su ejemplo.

A mis hermanos Arturo y Laura

Por los buenos momentos que hemos compartido y que aún nos faltan por vivir, por las risas compartidas y las tristezas que nos han ayudado a unirnos, por los momentos de reflexión y por las peleas en las que aún así comprendo que es imposible dejarlos de querer.

A los amigos que han sido siempre una fuente de admiración y que han estado cuando los problemas se veían más grandes que nosotros, pero siempre tuvieron las palabras correctas para devolvernos la fe, y por todos los momentos que pasamos riendo.

A mis tíos y primos que siempre me han dado su cariño y apoyo, sus historias y su tiempo también ha sido valioso para mí.

## Índice

	Pág.
Índice de Tablas y Gráficas.....	3
Resumen.....	5
Introducción .....	6
Objetivo.....	7
1. Combustibles fósiles como fuente principal de generación de energía eléctrica.	
1.1 Conceptos básicos.....	8
1.2 Electricidad.....	9
1.3 La ruta de la energía eléctrica.....	10
1.4 Consumo de fuentes primarias para la generación de electricidad.....	11
1.5 Generación de energía eléctrica en México por tipo de central.....	13
1.6 Tendencias a nivel mundial en la generación de electricidad.....	14
2. Centrales de generación de energía eléctrica actualmente en México que emplean fuentes renovables.	
2.1 Antecedentes históricos.....	18
2.2 Panorama actual.....	19
2.3 Energía hidráulica.....	20
2.3.1 Funcionamiento.....	21
2.3.2 Ventajas de la energía hidráulica.....	22
2.3.3 Inconvenientes ambientales.....	22
2.3.4 Centrales hidroeléctricas.....	23
2.4 Energía geotérmica.....	24
2.4.1 Definición de geotermia.....	24
2.4.2 Tipos de sistemas geotérmicos.....	25
2.4.3 Generación de electricidad.....	26
2.4.4 Impacto ambiental.....	27
2.4.5 La geotermia en México.....	27
2.4.6 Capacidad instalada y generación.....	28
2.5 Energía Eólica.....	29
2.5.1 Generación de electricidad.....	29
2.5.2 Parques eólicos.....	30
2.5.3 Ventajas e inconvenientes.....	31
2.5.4 Centrales Eólicas en México.....	32
2.6 Energía Solar.....	32
2.6.1 Antecedentes.....	33

2.6.2	Funcionamiento de las centrales termosolares.....	33
2.6.3	Tipos de centrales termosolares.....	34
2.6.4	Empleo de energía solar.....	36
2.6.5	Ventajas e inconvenientes de la energía solar térmica.....	38
3.	Nuevos combustibles	
	Introducción.....	40
3.1	¿Qué son los biocombustibles?.....	40
3.2	Ventajas e inconvenientes en el empleo de biocombustibles en comparación con el empleo de combustibles fósiles.....	42
3.3	Biocombustibles de segunda generación.....	44
3.4	Uso de los biocombustibles actualmente.....	50
4.	<i>Geobacter Sulfurreducens</i>	
	Introducción.....	54
4.1	Características fisiológicas.....	56
4.2	Generación de electricidad.....	60
4.3	Celdas de combustible.....	62
4.4	Resultados experimentales de Celdas de Combustible Microbiano en diversos estudios.....	65
5.	Aplicaciones y usos actuales	
5.1	Celdas de Combustible Microbiano.....	75
5.2	Tratamiento de aguas residuales.....	80
5.3	Biorremediación.....	81
5.4	Biosensores.....	81
5.5	Producción de hidrógeno.....	83
	Conclusiones.....	86
	Bibliografía y Mesografía.....	88

## Índice de Tablas y Gráficas

Página

Gráficas

1.1 Combustibles empleados para la generación de electricidad en el año 2006.....	12
1.2 Generación de electricidad en México por tipo de fuente 1997-2007.....	14
1.3 Proyección del consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica 2007-2017 en México.....	17
2.1 Capacidad efectiva de generación en MW.....	19
4.1 Corriente obtenida empleando <i>Geobacter Sulfurreducens</i> .....	67
4.2 Resultados obtenidos empleando <i>Geobacter Sulfurreducens</i> .....	68
4.3 Voltaje obtenido en función de los valores de resistencia.....	71
4.4 Voltaje obtenido en etapa de medición continua.....	72
4.5 Generación de electricidad en etapa de medición continua.....	73

Tablas

2.1 Centrales hidroeléctricas en México.....	23
2.2 Centrales geotermoeléctricas en México.....	28
2.3 Centrales eólicas en México.....	32
3.1 Biocombustibles.....	42
4.1 <i>Geobacter Sulfurreducens</i> .....	58
4.2 Celdas de combustible.....	64
4.3 Resumen de empleo de <i>Geobacter Sulfurreducens</i> .....	74

Figuras

1.1 Modelo atómico.....	9
1.2 Flujo de electrones.....	10
2.1 Norias.....	20
2.2 Central hidráulica.....	21
2.3 Capas de la Tierra.....	24
2.4 Yacimientos Geotérmicos en México.....	28
2.5 Partes de un aerogenerador.....	30
2.6 Tipos de centrales termosolares.....	34
2.7 Capacidad instalada de energía solar en la Unión Europea.....	37
3.1 Biodigestor.....	41
3.2 Lupino.....	45
3.3 Pasto indio.....	46
3.4 Pasto varilla.....	46
3.5 Algas.....	47
3.6 Viruta.....	47
3.7 <i>Jatropha</i> .....	48



4.1 Shewanella Oneidensis.....	55
4.2 Geobacter Sulfurreducens.....	56
4.3 Pili.....	60
4.4 Celdas de Combustible Microbiana.....	63
4.5 Diseño de una CCM.....	69
4.6 Construcción de electrodos.....	69
5.1 Celdas de Combustible Microbiana.....	76
5.2 Celdas de Combustible Microbiana.....	77
5.3 Configuración de una CCM.....	78
5.4 Lámpara de CCM.....	79
5.5 Ecobot II.....	79
5.6 Biosensor.....	83
5.7 Electrolisis microbiana.....	85

## Resumen

Se encontraron 5 estudios del empleo de *Geobacter Sulfurreducens* en diferentes países (México, EUA, Argentina y Corea del Sur), de manera general los parámetros a comparar son:

- \* Medio de Crecimiento
- \* Temperatura
- \* Electrodos y Cámara de electrodos
- \* pH
- \* Valores eléctricos obtenidos

En el medio de crecimiento siempre estuvieron presente el cloruro de amonio ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) y el fosfato diácido de sodio ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ), encontrándose variaciones en el empleo de cloruro de potasio (KCl) y bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ).

Los electrodos en todos los casos fueron de carbón con tamaños desde 1.7 hasta 15.8 cm de largo, y 1.6 a 3.8 cm de ancho.

La temperatura promedio de estos estudios fue de 34 °C, y el pH promedio fue de 6.1.

Las resistencias empleadas tenían valores entre 100 y 4000 Ohms.

Los valores de Corriente encontrados oscilaron entre 0.02 mA y 0.45 mA.

Los valores de Voltaje oscilaron entre 0.35mV y 0.24 V.

Los valores de Potencia se encontraron entre 335 y 880 mW/m<sup>2</sup>.

Los detalles de cada experimento se detallan en el Capítulo 4. "*Geobacter Sulfurreducens*".

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha presentado una crisis energética a nivel mundial debida al alto consumo de combustibles fósiles como principal fuente de generación de electricidad, lo que provoca una sobre explotación de estos recursos, aunado a una mala distribución mundial de estos.

Como resultado de ésta crisis se tiene la necesidad de buscar nuevos combustibles para generar electricidad y alertar a la población acerca de un consumo más inteligente y responsable.

En la búsqueda de nuevos recursos se desarrolló el empleo de biocombustibles, siendo la biomasa el más popular de estos, sin embargo, investigaciones recientes han mostrado que es posible emplear no solo recursos alimentarios como se acostumbraba antes, entre estos nuevos recursos encontramos algas, pastos, e incluso animales como bacterias y termitas.

El objetivo principal de esta investigación es dar a conocer una alternativa para generar electricidad: las bacterias.

El empleo de bacterias no es un tema nuevo, las primeras investigaciones se llevaron a cabo en Inglaterra en 1930, sin embargo el estudio de la actividad eléctrica en seres vivos se remonta a fines de la década de 1780 con los experimentos de Luigi Galvani al observar que una pata de rana diseccionada se contraía cuando se le colocaba cerca de un generador electrostático.

En este trabajo nos enfocaremos al estudio de las bacterias *Geobacter Sulfurreducens*, una familia de bacterias capaces de generar electricidad mediante un proceso metabólico.

El presente trabajo se divide en 5 capítulos, a través de los cuales se muestra un panorama energético respecto al uso de combustibles, las características de las bacterias capaces de generar electricidad y sus aplicaciones.

En el primer capítulo se definen los conceptos de básicos de energía y electricidad, así como el concepto de Sistema Eléctrico de Potencia y las partes que lo conforman. Con esto nos adentramos en el consumo de las fuentes para generar electricidad, y mostrar un panorama mundial de los antecedentes y el futuro empleo de los combustibles fósiles.

En el segundo capítulo se da una reseña histórica de la generación de energía en México, se detalla también las fuentes de energía renovables que se emplean en México (hidráulica, geotérmica, eólica y solar). En este capítulo se muestran las definiciones, funcionamiento, ventajas e inconvenientes ambientales de cada fuente; así como su capacidad instalada.

El capítulo tres se refiere a nuevas fuentes de generación de energía, los llamados biocombustibles, aquí se detallan los conceptos básicos de éstos, se muestra un panorama de los biocombustibles empleados actualmente y sus ventajas e inconvenientes frente a los combustibles de origen fósil.

El capítulo cuatro explica lo referente a la bacteria *Geobacter Sulfurreducens*, la cual es capaz de liberar electrones mediante reacciones metabólicas, aquí se detallan sus características fisiológicas y los medios para aprovechar los electrones, es decir, las celdas de combustible microbiano y se mencionan algunos resultados del empleo de este tipo de celdas.

Finalmente se mencionan los diversos usos que actualmente se le están dando a esta tecnología y los posibles usos, entre los que se encuentra el tratamiento de aguas residuales, la descontaminación de suelos (biorremediación) y la producción de hidrógeno.

### **Objetivo**

Dar a conocer el uso de nuevos combustibles como fuente de generación de electricidad, en éste caso particular, la bacteria *Geobacter Sulfurreducens*.

Así mismo explicar el funcionamiento de las Celdas de Combustible Microbianas, a través de las cuales es posible el aprovechamiento de la electricidad generada por este tipo de bacterias.

## **1. Combustibles fósiles como fuente principal de generación de energía eléctrica.**

### **1.1 Conceptos básicos**

La energía es la capacidad de realizar trabajos, movimientos, fuerzas y cambios.

La historia del hombre va muy ligada con la historia de la energía, ya que la humanidad se ha beneficiado con su uso y por ello se ha dedicado incasablemente a la búsqueda de fuentes de energía, explotando las energías que brinda el ambiente y con el tiempo se ha observado que en cada etapa de evolución se muestra un crecimiento en el consumo de energía.

Las energías que el hombre obtiene de la naturaleza se pueden dividir en dos fuentes: renovables y no renovables.

Las fuentes de energía renovables son aquellas energías cuyos recursos son considerados como inagotables, ya que son capaces de regenerarse por medios naturales.

Las fuentes de energía renovables son las provenientes del Sol (energía solar), del viento (energía eólica), del agua (energía hidráulica), de los mares y los océanos (energía maremotriz y undimotriz), el calor de la Tierra (energía geotérmica) y los residuos de la materia orgánica (biomasa).

Las fuentes de energía no renovables son aquellas que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas y se van agotando conforme las vamos consumiendo.

Dentro de las fuentes de energía no renovables se encuentran los combustibles fósiles y los combustibles nucleares.

Los combustibles fósiles son mezclas de compuestos orgánicos que se extraen del subsuelo provienen de seres vivos enterrados hace millones de años, y son: el carbón, el petróleo y el gas natural.

El uso de la energía nuclear tiene varias aplicaciones, una de las principales aplicaciones es la generación de electricidad, y emplea uranio, plutonio y torio.

Las fuentes de energía son aquellas que producen energía útil directamente o por medio de una transformación, éstas se clasifican en dos tipos: primarias y secundarias.

La energía primaria corresponde a las distintas fuentes de energía tal y como se obtienen de la naturaleza como lo son: la energía solar, la energía hidráulica, eólica, leña, productos de caña y otros combustibles de origen vegetal, el carbón mineral, la energía geotérmica, nuclear, petróleo, etc.

El ser humano transforma las energías primarias en energías secundarias para que pueda usarlas con facilidad, como es el caso de la energía eléctrica, la cual se obtiene de procesar energías primarias en una central eléctrica.

La energía eléctrica es el energético secundario por excelencia.

## 1.2 Electricidad

La electricidad es un fenómeno físico- químico natural, relacionado con la estructura molecular de un cuerpo, y se manifiesta a través de un flujo de electrones. Cuando una carga se encuentra en reposo produce fuerzas sobre otras situadas en su entorno. Si la carga se desplaza produce también fuerzas magnéticas.

La electricidad está presente en algunas partículas subatómicas. La partícula fundamental más ligera que lleva carga eléctrica es el electrón, que transporta una unidad de carga.

Los átomos, en circunstancias normales, contienen electrones y a menudo los que están más alejados del núcleo se desprenden con gran facilidad. En algunas sustancias, como los metales, proliferan los electrones libres. De esta manera, un cuerpo queda cargado eléctricamente gracias a la reordenación de los electrones.

La Figura 1.1 nos muestra el modelo atómico de Bohr, el más empleado para ejemplificar la configuración de los átomos.

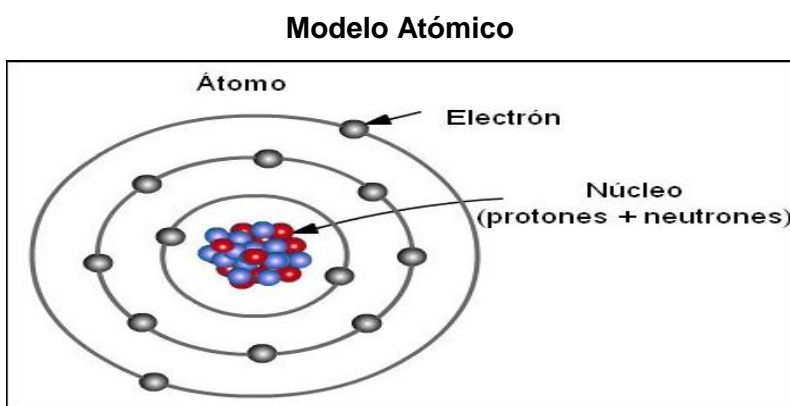


Fig. 1.1 Modelo atómico  
Fuente: Electricasas

Para entender este concepto imagínese un pedazo de alambre, éste alambre está formado por millones de átomos, cada átomo tiene sus propios protones, neutrones y electrones. Los protones y neutrones están muy unidos a sus átomos pero los electrones se mueven muy fácilmente de un átomo a otro.

Ahora supongamos que en un extremo del alambre se añade un electrón al primer átomo, éste electrón adicional tiene que encontrar un lugar para acomodarse y desaloja a otro electrón del primer átomo. El electrón desalojado empuja a su vez al electrón del segundo átomo y así sucesivamente hasta llegar al otro extremo del alambre. El salto de electrones de un átomo al siguiente es lo que llamamos electricidad. Por lo tanto la electricidad es una corriente de electrones que van en una sola dirección, desde un átomo hasta el siguiente.

La Figura 1.2 nos sirve para ejemplificar el flujo de electrones.

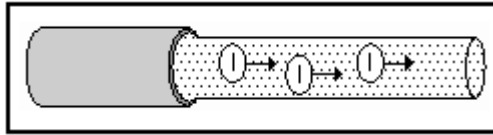


Fig. 1.2 Representación gráfica del flujo de electrones  
Fuente: Manual Energía M.I Tanya M.

Pero antes de lograr que los electrones se precipiten en corriente, se necesita tener alguna forma de añadir electrones que se requieren para empezar el movimiento, también necesitamos lograr que continúen moviéndose y necesitamos proporcionar un buen camino por el que puedan moverse, ya que si no se mueven no hay electricidad.

Por lo tanto la energía eléctrica tiene su origen en la presencia de cargas eléctricas (electrones) que se desplazan de un sitio a otro, éste desplazamiento se debe a que en un sitio existe una mayor cantidad de ellas respecto al otro punto de referencia, cuando estos dos actores están presentes (acumulación de cargas eléctricas y flujo o movimiento de ellas) se origina la energía eléctrica.

Se conoce como energía eléctrica a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, esta diferencia comúnmente se conoce como voltaje o tensión eléctrica, la cual permite establecer una corriente eléctrica entre ambos puntos, para realizar un trabajo.

### 1.3 La ruta de la energía eléctrica

Se debe saber que la electricidad que se emplea en las casas o centros de trabajo no se trata solo del enchufe donde se conectan equipos, sino al contrario es el final de una cadena que se origina en las centrales de generación de electricidad; esta electricidad es transportada por miles de kilómetros y; distribuida en menores bloques de energía, hasta nuestros hogares, utilizando cientos de transformadores, postes y kilómetros de cable.

Este proceso es conocido como un Sistema Eléctrico de Potencia, y se compone de las siguientes etapas.

#### Generación

Aquí inicia el recorrido de la electricidad, se lleva a cabo en Centrales generadoras, las cuales emplean energía primaria (mecánica, calorífica, química, etc.) para convertirla en energía eléctrica.

En México se emplean las siguientes fuentes para la generación de electricidad:

- Hidráulica
- Termoeléctrica (Vapor, ciclo combinado, dual, carbón, turbogas y combustión interna), como casos particulares también se pueden considerar termoeléctricas a las centrales Geotermoeléctricas y nucleoeeléctricas.
- Eoloeléctricas

En el siguiente capítulo se detalla el funcionamiento de estas centrales.

### Transmisión

La transmisión consiste en llevar hasta los puntos de consumo la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas.

Para ello, los niveles de energía eléctrica producidos deben elevar su nivel de tensión. Con este fin se emplazan subestaciones elevadoras en las cuales dicha transformación se efectúa empleando transformadores, o bien auto transformadores. De esta manera, una red de transmisión emplea usualmente voltajes del orden de 220 kV y superiores, denominados alta tensión, de 400 kV.

Una línea de transporte de energía eléctrica o línea de alta tensión es el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias.

Está constituida tanto por el elemento conductor, usualmente cables de cobre o aluminio, como por sus elementos de soporte, las torres de alta tensión.

En México la red de transmisión considera los niveles de tensión de 400, 230 y 161 kV.

### Distribución

La distribución de la energía eléctrica consiste en hacerla llegar hasta sus usuarios finales. La red de distribución está integrada por las líneas con niveles de tensión de 138, 115, 85 y 69 kV; así como, las de niveles más pequeños como los de de 34.5, 23, 13.8 kV y baja tensión.

## **1.4 Consumo de fuentes primarias para la generación de electricidad**

En el periodo 1996-2006 el consumo mundial de energía eléctrica fue de 16 252 TWh<sup>1</sup>.

El combustible con mayor empleo para la generación de electricidad es el carbón, por ejemplo en el año 2006, produjo el 54.3% de la electricidad utilizada.

---

<sup>1</sup> Prospectiva del sector eléctrico 2008-2017. Secretaria de Energía.



En Sudáfrica, casi la totalidad de la energía eléctrica se genera a partir del carbón (94%).

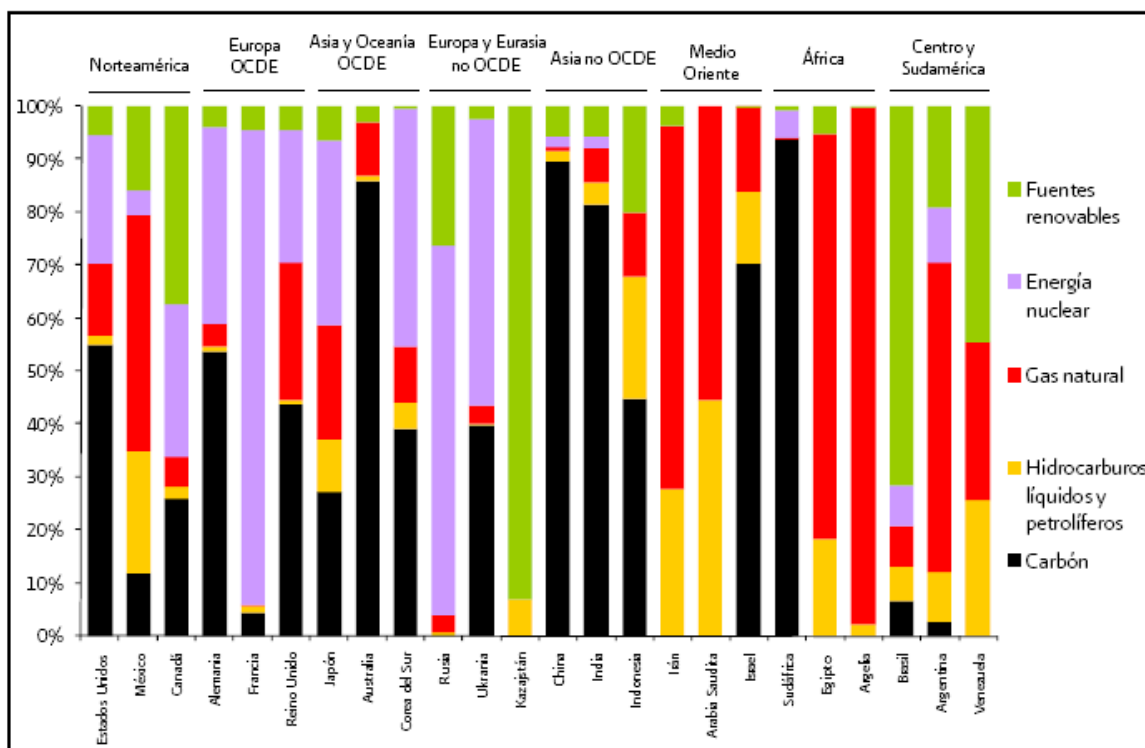
En China, el carbón aporta el 89.6%, la hidroeléctrica el 5.7%. La energía nuclear se incrementó en forma acelerada hasta finales de la década de 1980, estabilizándose principios de la década de 1990.

La generación eléctrica a partir de gas natural creció rápidamente durante las últimas dos décadas. Principalmente en Argelia, Argentina e Irán.

En contraste, la utilización de petrolíferos ha disminuido desde mediados de la década de los setentas. Se espera que en países miembros de la OCDE, la generación de electricidad a partir de derivados del petróleo siga declinando, a diferencia de los países de Medio Oriente donde debido a la existencia de grandes reservas de petróleo, continuarán dependiendo de sus derivados para satisfacer la demanda de energía eléctrica.

En la Gráfica 1.1 se observan las diferentes fuentes de generación empleadas en algunos países en el año 2006

### Combustibles empleados para la generación de electricidad en el año 2006.



Gráfica 1.1 Participación porcentual de fuentes primarias para la generación de energía, las fuentes renovables se componen por hidráulica, eólica, geotermia y biomasa.

Fuente: Prospectiva del sector eléctrico 2008-2017

## 1.5 Generación de energía eléctrica en México por tipo de central

En el año 2007, la generación total de energía eléctrica para el servicio público ascendió a 232,552 GWh.

La generación de electricidad basada en tecnología de ciclo combinado fue la que presentó el mayor dinamismo en términos absolutos, al incrementar su generación en 11,610 GWh, como resultado del inicio de operaciones de la central Tamazunchale (PIE), principalmente.

La generación eoloeléctrica registró el mayor crecimiento al pasar de 45 GWh en 2006 a 248 GWh en 2007, con la entrada en operación de La Venta II, mientras que en lo que corresponde a la generación termoeléctrica basada en combustóleo, ésta se redujo en 4.7%, debido a los retiros de algunas unidades generadoras, (unidades de vapor 1 y 2 de la central Río Bravo, Emilio Portes Gil) con 37.5 MW cada una, para ser integradas con un ciclo de gas y formar un ciclo combinado.

La generación eléctrica con base en hidrocarburos (gas natural, petróleo y diésel) representa el 67.1% de la generación eléctrica total.

La participación de combustión interna ha disminuido, como resultado de un mayor despacho de centrales de ciclo combinado y el continuo retiro de unidades generadoras que utilizan combustóleo.

En el caso de las centrales carboeléctricas y la central dual, su participación en la generación total se ubica en 13.5%.

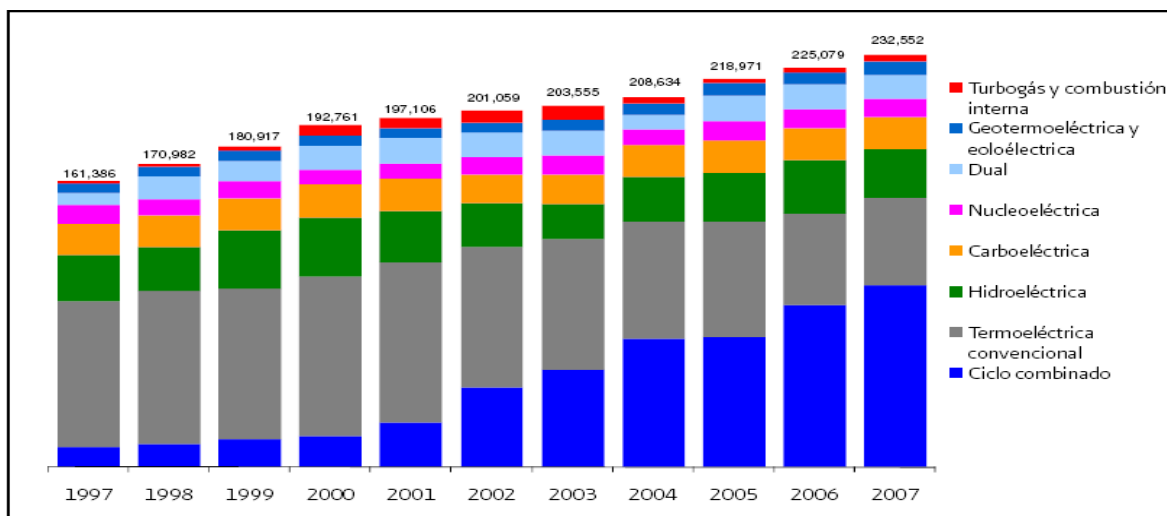
Finalmente en lo que se refiere a las centrales basadas en fuentes alternas se mostró un incremento geotermia y la eólica, mientras que hubo una disminución en la energía generada por las centrales hidroeléctricas y la nucleoeleétrica.

En total, la electricidad proveniente de fuentes alternas se ubicó en 45,115 GWh, lo que representa el 19.4% del total generado para servicio público en el país.

La participación porcentual de cada fuente respecto al total es la siguiente: centrales hidroeléctricas 11.6%, centrales geotérmicas y eólicas 3.3% y la central nucleoeleétrica 4.5%.

En la Gráfica 1.2 se muestra el empleo de los diferentes tipos de centrales de generación de energía en México.

## Generación de electricidad en México por tipo de fuente 1997-2007.



Gráfica 1.2 Generación bruta en el servicio público por tipo de central en GWh.

Fuente: Prospectivas del sector eléctrico 2008-2017. SENER

### 1.6 Tendencias a nivel mundial en la generación de electricidad.

Finalmente se muestra un pronóstico para la generación de electricidad, estos datos fueron obtenidos de la publicación de la Secretaría de Energía "Prospectiva del sector eléctrico 2008-2017".

#### Norteamérica OCDE

En el caso de EUA, se espera un incremento en la generación basada en gas natural, carbón y energía nuclear.

En Canadá la capacidad y la generación de energía eléctrica estarán basadas en el uso de gas natural, energía nuclear, y otras fuentes renovables.

En el caso de México, el combustible de mayor crecimiento en su utilización será el gas natural, con un promedio anual del 5%, mientras que el combustóleo mostrará la mayor disminución anual con  $-7.6\%$ , seguido por el diésel con  $-6.3\%$ . Se prevé que el carbón aumente con un ritmo de  $2.5\%$  anual.

Como una estrategia para contribuir a la diversificación del parque de generación, en el actual programa de requerimientos de combustibles se consideran dos cambios de tecnología en las centrales: Río Bravo, unidad 3 de 300 MW (de combustóleo a carbón, incremento de capacidad a 330 MW) y Altamira, unidad 1 y 2 de 150 MW (de combustóleo a coque), a efectuarse a partir de 2012 en ambos casos.

### Europa OCDE

Se espera que en Europa, el consumo de gas natural aumente con más rapidez que el resto de las fuentes de energía. En cuanto a la energía nuclear, se estima que la región experimente una disminución en la capacidad instalada. Finalmente acerca de las energías renovables, la que ha mostrado mayor crecimiento es la energía eólica.

### Asia y Oceanía OCDE

En Japón el gas natural y la energía nuclear aportan el 53% de la generación total, mientras que el carbón representa el 30%.

Australia y Nueva Zelanda, en conjunto utilizan carbón para generar aproximadamente el 75% de su energía eléctrica. El resto es principalmente producido a partir de hidroeléctricas y derivados del petróleo.

Finalmente en Corea del Sur el carbón y la energía nuclear aportan el 41% y 38% de la generación total, respectivamente.

### Europa y Eurasia No OCDE

Rusia planea incrementar su capacidad nucleoelectrica para reducir la dependencia al gas natural y conservar lo que se ha convertido en uno de sus principales productos de exportación, con la intención de construir 26 nuevas instalaciones nucleares. Se estima que hacia 2015 se instalarán 4 GW de nueva capacidad nuclear para generación de electricidad.

### Asia No OCDE

China e India seguirán impulsando el crecimiento económico y de la demanda de energía eléctrica. La generación total de energía eléctrica en dicha región pasará de  $3.9 \times 10^6$  GWh en 2005 a  $7.8 \times 10^6$  GWh en 2015, con un crecimiento promedio anual en el ingreso de 7.2%.

El uso de carbón para generación eléctrica aporta dos terceras partes de la energía eléctrica producida en la región, y no se espera crecimiento de la energía nuclear.

En lo que se refiere a energías renovables, China tiene varios proyectos hidroeléctricos en construcción, entre ellos el proyecto de la Presa de las Tres Gargantas de 18 200 MW planeado para concluirse a finales de 2008. Incluso, se han anunciado planes para ampliar la capacidad de este proyecto hasta 22 400 MW.

Por otra parte, hacia finales de 2007 se registraron más de 6 000 MW de capacidad en instalaciones eólicas en China, de las cuales durante ese año se instalaron 3 400 MW.

En India al cierre de 2007 se registraron cerca de 8 000 MW instalados.

### Medio Oriente

En los países de Medio Oriente se espera un incremento en la demanda de electricidad. En Irán la demanda de energía eléctrica ha crecido en promedio 7% anual durante los años recientes.

En lo que a energías renovables se refiere, no se tienen identificados los incentivos que brinden un impulso a los países de Medio Oriente para incrementar su generación de electricidad basada en fuentes renovables.

### África

Sudáfrica genera la mayor parte de la electricidad en el continente africano, aportando en 2005 el 43% del total.

Se espera que la generación de electricidad a partir de recursos hidroeléctricos y otras fuentes renovables crezca, en Tanzania se tiene planeada la construcción de una instalación hidroeléctrica de 60 MW sobre el Río Kagera, la cual deberá iniciar a principios de 2009.

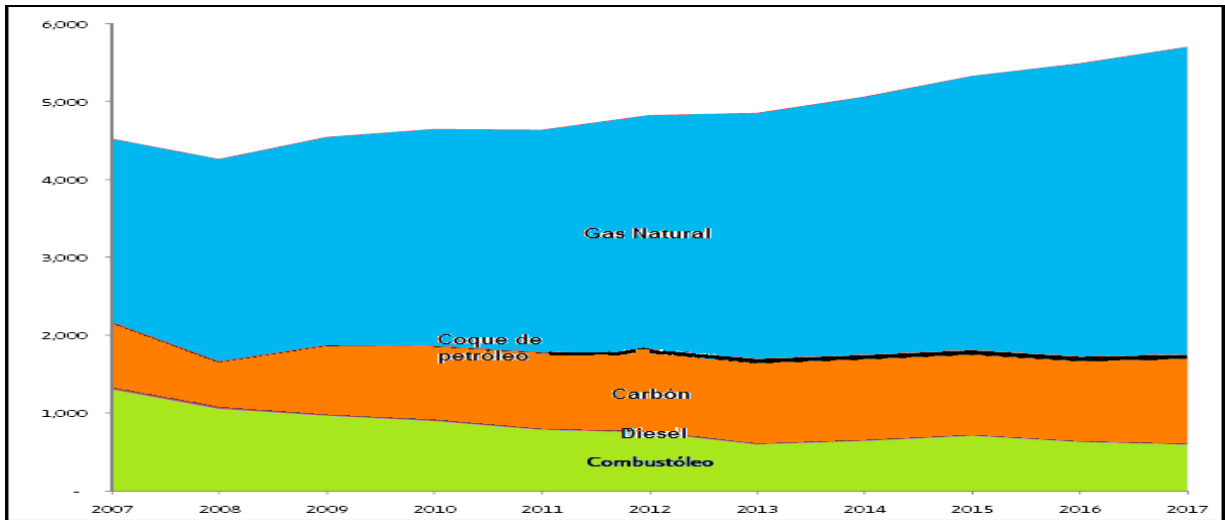
### Centro y Sudamérica

En la región Centro y Sudamérica, Brasil es la mayor economía con un crecimiento anual en la demanda de energía eléctrica del 5.0%. Y está enfrentando tiempos difíciles para garantizar el suministro de gas natural proveniente de países vecinos, así como incrementando la capacidad de generación hidroeléctrica con proyectos del Río Madeira en Rondonia: San Antonio de 3,150 MW y Jirau de 3,326 MW.

Bolivia ha suspendido el suministro a la planta termoeléctrica Cuiaba, de 400 MW, y a su vez el suministro desde Argentina se ha suspendido debido a los problemas de producción de gas natural doméstico.

La Gráfica 1.3 muestra la proyección en el consumo de los combustibles fósiles para generar electricidad en México durante los próximos 7 años.

**Proyección del consumo de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica 2007-2017 en México.**



Gráfica 1.3 Proyección de consumo en TJ/día  
Fuente: Prospectivas del sector eléctrico 2008-2017. SENER

## **2. Centrales de generación de energía eléctrica actualmente en México que emplean fuentes renovables**

### **2.1 Antecedentes Históricos**

Para adentrarnos un poco en los antecedentes históricos de la generación de energía en México se empleó el libro de divulgación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) llamado "Las fuentes de energía en México" ahí encontramos los datos que se detallan a continuación.

En el año de 1889 se construye en México la primera planta Hidroeléctrica en Batopilas, Chihuahua, aprovechando los saltos y caídas de agua como fuente primaria para la generación eléctrica.

Mediante una concesión gubernamental Arnold Vaquié promovió el primer proyecto importante para generar electricidad por medio de caídas de agua del río Necaxa en Puebla, este hecho dio origen a la empresa canadiense Mexican Light & Power Company Limited, la cual posteriormente cambiaría a Compañía Mexicana de Luz y Fuerza Motriz.

Fue tal el auge de la electricidad, que en el año de 1920, mediante la inversión de empresarios extranjeros, funcionaban en nuestro país 199 compañías. En diciembre de 1933 se decretó que la generación y distribución de electricidad son actividades de utilidad pública.

En el año de 1937 el presidente Lázaro Cárdenas decretó la creación de la Comisión Federal de Electricidad, con la encomienda de organizar un sistema de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica para el beneficio del país.

En 1959 la CFE vendía el 70% de la energía a las dos empresas extranjeras que comercializaban la electricidad: American Foreign Power Company y la compañía Mexican Light & Power Company Limited.

Es hasta el 27 de septiembre de 1960, cuando el presidente Adolfo López Mateos nacionaliza la industria eléctrica.

A partir de entonces se comenzó a integrar el Sistema Eléctrico Nacional, extendiendo la cobertura del suministro y acelerando la industrialización. El Estado mexicano adquirió los bienes e instalaciones de las compañías privadas.

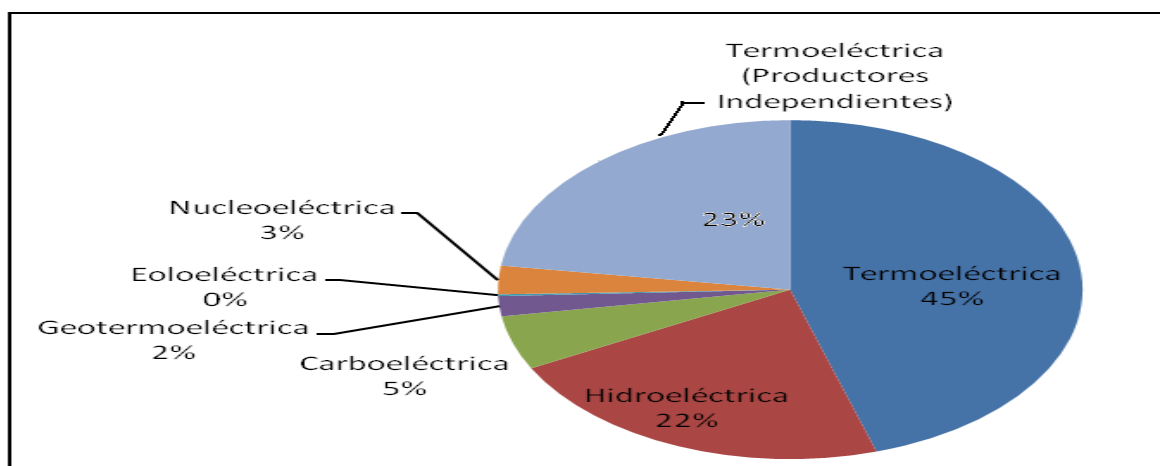
En los inicios de la industria eléctrica mexicana operaban varios sistemas aislados, con características técnicas diferentes, llegando a coexistir casi 30 voltajes de distribución, siete de alta tensión para líneas de transmisión y dos frecuencias eléctricas de 50 y 60 Hz, por lo que CFE definió y unificó los criterios técnicos y económicos del Sistema Eléctrico Nacional, normalizando los voltajes de operación, con la finalidad de estandarizar los equipos, reducir sus costos y los tiempos de fabricación, almacenaje e inventariado. Posteriormente se unificaron las frecuencias a 60 Hz y CFE integró los sistemas de transmisión en el Sistema Interconectado Nacional.

## 2.2 Panorama actual.

Actualmente la CFE se encarga de la producción de electricidad en todo el país, y cuenta con centrales hidroeléctricas, eoloeléctricas y termoeléctricas; éstas últimas comprenden las centrales de vapor convencional, dual, carbón, ciclo combinado, turbo gas y combustión interna; geotermoeléctricas y nucleoeeléctricas.

En la Gráfica 2.1 se observa la capacidad efectiva de generación de electricidad.

### Capacidad efectiva de generación en MW.



Gráfica 2.1 Capacidad efectiva por tipo de generación.

Fuente: Estadísticas de CFE. Marzo 2010.

Hasta el mes de febrero del año 2010, la capacidad instalada de la CFE era de 50 403 MW, correspondiendo el 45% a las centrales Termoeléctricas y 23% Termoeléctrica (Productores Independientes), el 22% a las Hidroeléctricas, mientras que las Carboeléctricas aportan el 5%, el 3% corresponde a Nucleoeeléctricas y finalmente el 2% a las Geotermoeléctricas.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Estadísticas de CFE obtenidas a través de su página de Internet.



En este capítulo nos enfocaremos únicamente en aquellas cuyas fuentes sean renovables, es decir: hidráulicas, eólicas, geotermoeléctricas y solares.

### 2.3 Energía Hidráulica

A través de sus informes de divulgación titulados “Cuaderno de Energías Renovables para todos” en este caso el volumen Hidráulica, la página de Internet “Energías Renovables” proporciona toda la información que se encuentra a continuación sobre este tema.

El agua es un elemento básico para la vida, es necesaria para beber, para la agricultura, y para la práctica totalidad de los procesos productivos y un recurso que a lo largo de la historia, ha determinado el desarrollo humano.

Ha sido utilizada desde la antigüedad para la obtención de energía siendo aprovechada para sustituir el trabajo humano o animal. Como en los molinos de agua romanos, o las norias<sup>3</sup> de la cultura musulmana (Fig. 2.1).

#### Norias



Figura 2.1 Norias musulmanas

Fuente: Páginas de Internet sobre Destinos turísticos hacia Arabia.

Es hasta la aplicación de la electricidad, a finales del siglo XIX, cuando el agua se contempla como una fuente básica para la producción de energía eléctrica por lo que adquiere un mayor valor en el ámbito energético. Las centrales hidráulicas son el origen de la industria eléctrica mundial, que comenzó a producir Watts gracias a la fuerza del agua.

---

<sup>3</sup> Noria: Máquina compuesta de dos grandes ruedas engranadas que, mediante cangilones, sube el agua de los pozos, acequias, etc. Diccionario de la Real Academia Española.

### 2.3.1 Funcionamiento

Una central hidráulica aprovecha la energía potencial de una cantidad de agua situada en el cauce de algún río para convertirla en energía mecánica y posteriormente en electricidad.

El agua de una corriente natural o artificial cae con fuerza (por efecto de un desnivel) sobre el grupo turbina-generador de la central, dando lugar a la producción de energía eléctrica. El objetivo de emplear un desnivel es aprovechar la energía potencial contenida en la masa de agua que transportan los ríos para convertirla en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a generadores.

En algunos casos el caudal del río asegura una aportación regular de agua, la energía potencial de ésta puede ser aprovechada directamente sin necesidad de embalsar previamente el agua o bien utilizando un embalse muy reducido. Este tipo de centrales recibe el nombre de centrales fluyentes. En los casos más habituales, por el contrario, una cantidad apreciable de agua es retenida mediante una presa, formando así un embalse o lago artificial del que se puede generar un salto de agua, para liberar eficazmente la energía eléctrica. Son las centrales con regulación.

En la Figura 2.2 podemos observar los elementos típicos de una central hidráulica, como son: presa, toma de agua, conducción, cámara de carga, tubería forzada, central, equipos electromecánicos, descarga, subestación y línea eléctrica.

#### Central hidráulica.

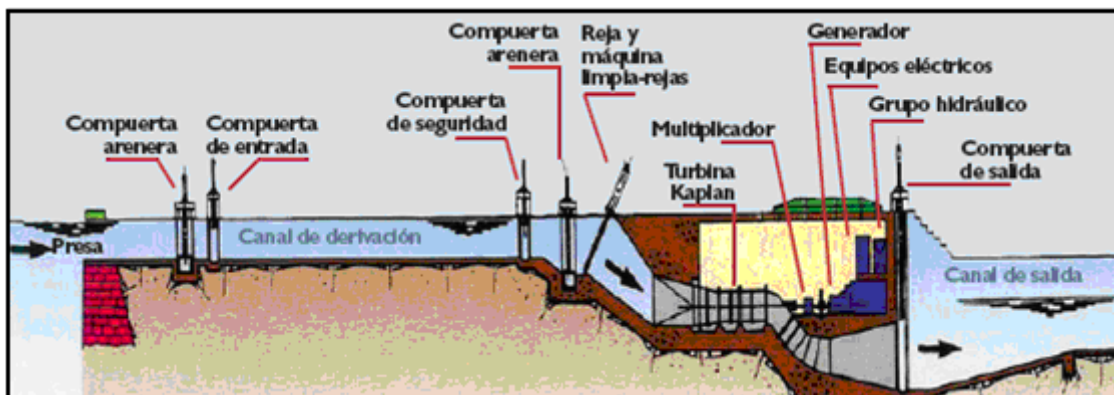


Fig. 2.2 Diagrama de una central mini hidráulica  
Fuente: Energías renovables para todos. Tomo Hidráulica

### 2.3.2 Ventajas de la energía hidráulica

- ✓ Es renovable.
- ✓ No se consume. Se toma el agua en un punto y se devuelve a otro a una cota inferior.
- ✓ Es exclusiva de cada país, por lo que evita importaciones.
- ✓ Es completamente segura para personas, animales o bienes.
- ✓ No genera calor ni emisiones contaminantes (lluvia ácida, efecto invernadero, etc.)
- ✓ Genera puestos de trabajo en su construcción, mantenimiento y explotación.
- ✓ Requiere inversiones muy cuantiosas que se realizan normalmente en comarcas de montaña muy deprimidas económicamente.
- ✓ Genera experiencia y tecnología fácilmente exportables a países en vías de desarrollo.
- ✓ La energía hidroeléctrica emite, en su ciclo de vida, entre un 1% y un 500% menos de gases de efecto invernadero que la energía producida por centrales térmicas convencionales.<sup>4</sup>

### 2.3.3 Inconvenientes ambientales

La Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui (Venezuela) a través de su blog explica los efectos en el medio ambiente causados por este tipo de plantas.

La energía hidráulica siempre se ha considerado como un energético no contaminante. Sin embargo, la construcción de una central hidroeléctrica aporta cierto impacto en el medio ambiente.

- × En su construcción y proceso de establecimiento, se comienza a intervenir los bosques y los causes haciendo vías de acceso más apropiadas para el traslado de materiales, lo que significa habitualmente un número significativo de tala arbórea, desvíos y modificaciones del curso del río.
- × Cambios constantes en los niveles de las aguas, que en ocasiones termina manifestándose como un pequeño hilo de agua que intenta sobrevivir a los pequeños obstáculos naturales con el fin de llegar a su destino.

Siempre que estos impactos se tengan en cuenta desde la concepción del proyecto, pueden disminuirse o evitarse en gran medida con un estudio apropiado de alternativas y de medidas correctoras. Cuestiones que han de abordarse necesariamente en los estudios de impacto ambiental.

---

<sup>4</sup> “Cuaderno de Energías Renovables para todos” volumen Hidráulica

### 2.3.4 Centrales Hidroeléctricas en México

La Tabla 2.1, que se muestra a continuación, se generó con los datos mostrados en la página de la CFE y resume las centrales hidroeléctricas en México, así como su capacidad instalada.

<b>Ubicación Geográfica</b>	<b>Número de centrales</b>	<b>Número de unidades</b>	<b>Capacidad efectiva instalada (MW)</b>
Chiapas	7	33	4 828
Chihuahua	2	5	28
Coahuila	1	2	66
Guerrero	4	18	688
Hidalgo	1	2	212
Jalisco	5	11	369
Michoacán	10	25	458
Nayarit	3	9	1 712
Oaxaca	2	8	356
Puebla	3	10	223
San Luis Potosí	3	5	20
Sinaloa	6	13	787
Sonora	3	6	164
Tamaulipas	1	3	32
Veracruz	6	8	91
<b>Total</b>	<b>57</b>	<b>158</b>	<b>3494</b>

Tabla 2.1 Centrales hidroeléctricas en México.

Fuente: Listado de Centrales Generadoras. Hidroeléctricas. CFE, Marzo, 2010.9

## 2.4 Energía Geotérmica

### 2.4.1 Definición de Geotermia

A través de su "Informe de Geotermia" el Instituto de Investigaciones Eléctricas proporciona toda la información que se encuentra a continuación sobre este tema.

La geotermia es el estudio y la utilización de la energía térmica que se encuentra en el interior de la Tierra, la cual es transportada a través de la roca y/o fluidos, se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales de la misma, dando origen a los sistemas geotérmicos.

Aún cuando la geotermia ha existido siempre, no fue sino hasta principios del siglo pasado que empezó a dársele uso en forma comercial, haciéndose notoria su existencia hace apenas cuatro décadas. En los años 70's con el incremento en el costo de los combustibles fósiles se le dio una importancia relevante, ayudando a suministrar parte de los requerimientos de energía de muchos países.

Estudios sismológicos han establecido que la Tierra se encuentra constituida por cinco capas esféricas concéntricas que son la *atmósfera* (con sus respectivas subcapas), la *corteza* (que incluye las masas de tierra, los mares y los conos polares), el manto, el núcleo líquido y el núcleo interno.

En la Figura 2.3 se muestran las capas de la Tierra así como sus longitudes.

**Capas de la Tierra.**

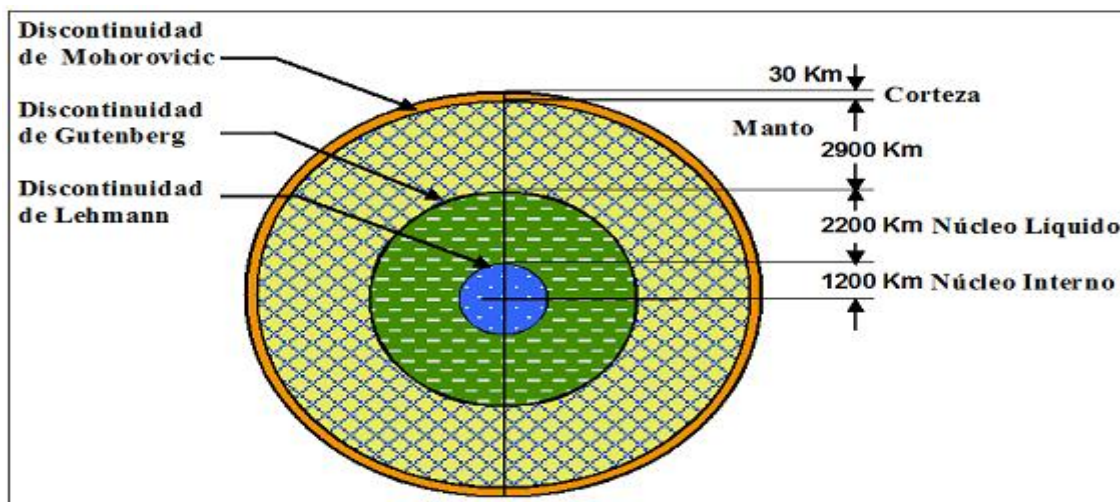


Fig. 2.3 Esquema de las capas de la Tierra

Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas. Gerencia de Geotermia

## 2.4.2 Tipos de Sistemas Geotérmicos

Actualmente se han identificado cinco tipos de sistemas geotérmicos: hidrotermales, roca seca caliente, geopresurizados, marinos y magmáticos.

### 1. Sistemas Hidrotermales

Estos sistemas están constituidos por: una fuente de calor, agua (líquido y/o vapor) y la roca en donde se almacena el fluido. El agua de los sistemas hidrotermales se origina en la superficie de la tierra en forma de lluvia, hielo o de nieve.

Se filtra en la corteza terrestre, a través de poros y fracturas, penetrando a varios kilómetros de profundidad en donde es calentada por la roca alcanzando en ocasiones temperaturas de hasta 400°C.

Estos sistemas pueden clasificarse en tres tipos principales: vapor dominante, líquido dominante alta entalpía y líquido dominante baja entalpía. En la actualidad estos sistemas son los únicos que se explotan comercialmente para la generación eléctrica.

- (i) *Vapor Dominante*. Son sistemas de alta entalpía, generalmente de vapor seco. Existen unos cuantos en el mundo. Los más conocidos son The Geysers (Estados Unidos) y Lardarello (Italia).
- (ii) *Líquido dominante (alta entalpía)*. Sistemas de salmuera caliente, con temperaturas entre 200°C y más de 300°C. Como ejemplos de este tipo de sistemas encontramos Cerro Prieto en México, Wairakei en Nueva Zelanda y Tiwi Filipinas, entre otros.
- (iii) *Líquido Dominante (baja entalpía)*. Sistemas con salmueras calientes, con temperaturas entre de 100°C y 200°C aproximadamente. Son más abundantes que los dos anteriores. Se encuentran en casi todos los países del mundo. Los más destacables son Heber ubicado en Estados Unidos y Yangbajin en China.

### 2. Sistemas de Roca Seca Caliente

Son sistemas rocosos con alto contenido energético pero con poca o ninguna agua, conocidos como HDR por sus siglas en inglés (Hot Dry Rock). No se explotan comercialmente en la actualidad.

### 3. Sistemas Geopresurizados

Son sistemas que contienen agua y metano disuelto a alta presión (700 Bar) y mediana temperatura (150°C). No se explotan comercialmente en la actualidad. Estos recursos ofrecen tres tipos de energía: térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluidos a muy alta presión).

#### 4. Sistemas Marinos

Son sistemas de alta entalpía existentes en el fondo del mar. No se explotan comercialmente en la actualidad.

#### 5. Sistemas Magmáticos

Son sistemas de roca fundida existentes en volcanes activos o a gran profundidad en zonas de debilidad cortical. No se explotan comercialmente en la actualidad.

### **2.4.3 Generación de Electricidad**

La generación de electricidad por medio de la energía geotérmica está ligada con las condiciones naturales del yacimiento geotérmico utilizado para ese fin. La presión de entrada a las turbinas de vapor está determinada por la presión y la temperatura del yacimiento.

Las plantas geotermoeléctricas requieren de pequeñas cantidades de agua de enfriamiento y no compiten por este recurso con otras aplicaciones como, por ejemplo, la agricultura.

La unidad geotermoeléctrica más grande del mundo es de 135 MW (instalada en el campo de los Geysers en Estados Unidos), pero es muy común encontrar unidades de 55 MW, 30 MW, 15 MW, 5 MW y aún más pequeñas. La confiabilidad de las plantas geotermoeléctricas es muy buena y cuentan con factores de planta entre el 80 y 90 %.

Existen varios tipos de procesos de conversión de energía para generar electricidad por medio de recursos hidrotermales. Actualmente, tres de estos procesos se encuentran en operación comercial: vapor seco, sistemas de separación de vapor y ciclo binario.

#### Plantas de vapor seco

Las plantas de vapor seco utilizan el vapor saturado o ligeramente sobrecalentado que se obtiene en la superficie y es enviado directamente a las turbinas. El vapor húmedo a la salida se condensa para regresarse al yacimiento a través de pozos de inyección.

Los sistemas de vapor dominante han sido explotados únicamente en Indonesia, Italia, Japón y Estados Unidos. La mitad de la capacidad de generación instalada se encuentra en estos campos.

### Plantas de separación de vapor

En yacimientos geotérmicos dominados por líquido, los pozos generalmente producen una mezcla de agua y vapor en la superficie.

Esto se debe a que el fluido del yacimiento sufre un proceso de ebullición en el interior del pozo, causado por la caída de presión a lo largo de la tubería. Cuando la mezcla llega a la superficie, el vapor y el líquido se separan por medio de instalaciones adecuadas.

El vapor es utilizado para alimentar la turbina, mientras que el líquido se inyecta nuevamente al yacimiento.

### Plantas de ciclo binario

Las plantas de ciclo binario son apropiadas para la explotación de los sistemas geotérmicos de líquido dominante que no están lo suficientemente calientes como para producir una importante ebullición del fluido geotérmico, y para utilizar el calor contenido en los fluidos de desecho de las plantas de separación de vapor.

#### **2.4.4 Impacto Ambiental**

En ese mismo documento de la IIE nos explica el impacto en el medio ambiente del empleo de este tipo de energía.

“La energía geotérmica se considera una fuente de energía limpia. Si se toman las medidas apropiadas para su explotación, el impacto ambiental de los desarrollos geotérmicos se puede eliminar casi completamente.

Las plantas geotermoeléctricas generan aproximadamente un sexto del CO<sub>2</sub> que producen las plantas que queman gas natural y prácticamente no producen óxidos de nitrógeno o de azufre.

Cada 1,000 MW generados con geotermia evitan la emisión anual a la atmósfera de aproximadamente 860 toneladas de diversas partículas contaminantes y de 3.5 millones de toneladas de dióxido de carbono de las plantas que queman gas”.

#### **2.4.5 La Geotermia en México**

A finales de la década de los 40's el ingeniero Luis de Anda, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se enteró de los logros obtenidos en el campo geotérmico de Larderello (Italia). Esto lo motivó para efectuar estudios en ese lugar, en donde se familiarizó con las técnicas de exploración y explotación que allí se utilizaban

Los principales yacimientos geotérmicos con los que se cuenta en el país son Pathé, Cerro Prieto, Los Azufres y Los Humeros; su ubicación se muestra en la Fig. 2.4:



### Yacimientos Geotérmicos en México.

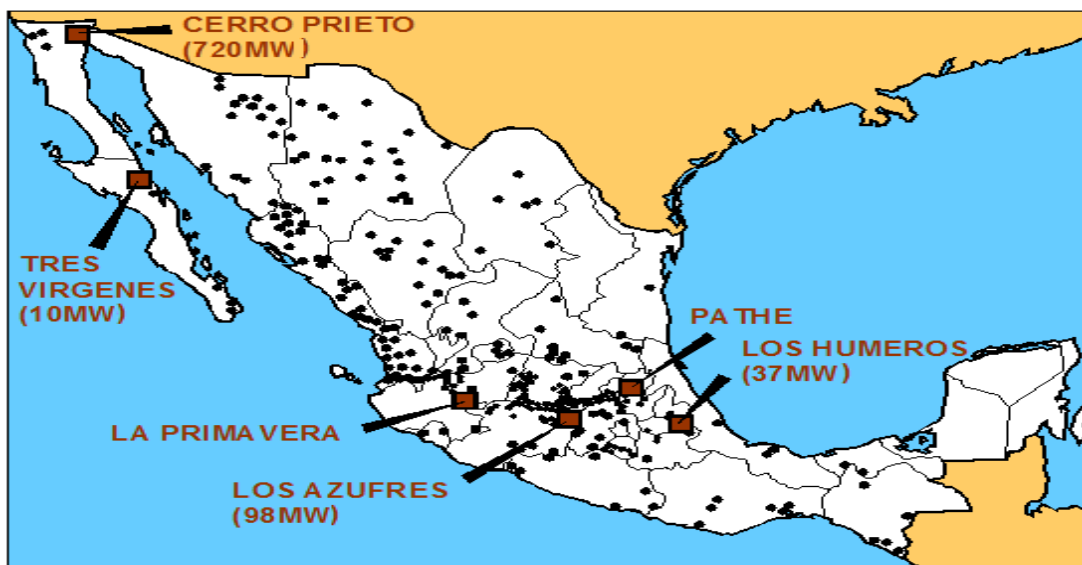


Fig. 2.4 Localización de los yacimientos geotérmicos en México  
Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas

#### 2.4.6 Capacidad instalada y generación

La capacidad geotérmica instalada en México es de 965 MW, que representa aproximadamente el 2.58 % de la capacidad instalada en el país.

La Tabla 2.2 muestra la ubicación y capacidad de las centrales geotermoeléctricas instaladas en México.

#### Centrales Geotermoeléctricas en México.

Ubicación Geográfica	Número de centrales	Número de unidades	Capacidad efectiva instalada (MW)
Baja California	4	13	720
Baja California Sur	1	2	10
Michoacán	1	15	195
Puebla	1	8	40
Total	7	38	965

Tabla 2.2 Centrales Geotermoeléctricas en México  
Fuente: Listado de Centrales Generadoras. Geotermoeléctricas. CFE, Marzo 2010.

## 2.5 Energía Eólica

A través de sus informes de divulgación titulados “Cuaderno de Energías Renovables para todos” en este caso el volumen Eólica, la página de Internet “Energías Renovables” proporciona toda la información que se encuentra a continuación sobre este tema.

Esta energía proviene del viento; el cual se origina porque la atmósfera de la Tierra absorbe la radiación solar de forma irregular debido a diversos factores y esa irregularidad hace que haya masas de aire con diferentes temperaturas y presiones.

Ésta diferencia de presiones provocan que el aire tienda a desplazarse desde las zonas de alta presión hacia las de baja presión, generando el movimiento del aire, es decir, el viento.

“Se calcula que entre el 1 y el 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento. Si se excluyen las áreas de gran valor ambiental, esto supone un potencial de energía eólica de 53 TWh/año en el mundo, cinco veces más que el actual consumo eléctrico en todo el planeta”<sup>5</sup>.

La tecnología actual permite aprovechar, casi exclusivamente, los vientos horizontales. Esto es, los que soplan paralelos y próximos al suelo y siempre que su velocidad esté comprendida entre determinados límites (a partir de unos 3 m/s y por debajo de los 25 m/s).

### 2.5.1 Generación de electricidad

Las máquinas empleadas para transformar la fuerza cinética del viento en electricidad reciben el nombre de turbinas eólicas o aerogeneradores.

Se colocan sobre una columna o torre debido a que la velocidad del viento aumenta con la altura respecto al suelo.

La mayoría de los aerogeneradores modernos son tripalas y de eje horizontal. Se ha demostrado científicamente que este número de palas es el idóneo ya que cuanto mayor es el número de palas, el rendimiento es menor porque cada pala “choca” con las turbulencias dejadas por la pala anterior, lo que frena su movimiento.

Los aerogeneradores se componen de: torre, rotor, palas y góndola.

- Torre: Soporta la góndola y el rotor. El grosor y la altura de la torre varían en función de las características de la turbina.
- Rotor. Es el conjunto formado por las palas y el eje al que van unidas, a través de una pieza llamada buje. Las palas capturan el viento de manera perpendicular a su dirección, gracias a un sistema que coloca automáticamente el rotor en esa posición, y transmiten su potencia hacia el buje.

---

<sup>5</sup> Cuaderno de Energías Renovables para todos. Eólica

El buje está conectado, a su vez, mediante otro eje al multiplicador, incluido dentro de la góndola.

- Las palas: Se parecen a las alas de un avión.
- Góndola: Contiene, al generador eléctrico, el multiplicador y los sistemas hidráulicos de control, orientación y freno.
- La veleta y el anemómetro, situados en la parte posterior de la góndola, miden la dirección y la velocidad del viento en cada instante y mandan ordenes a los sistemas de control que accionan el aparato para que el rotor y las aspas se sitúen en la posición óptima contra el viento.

La góndola incluye, además, un sistema de “cambio de paso”, que hace girar la posición de las palas de manera que recojan el viento de la forma óptima en cada momento. Este sistema también se utiliza para frenar el rotor cuando es necesario.

En la Figura 2.5 se pueden apreciar las partes que componen un aerogenerador.

#### Partes de un aerogenerador.

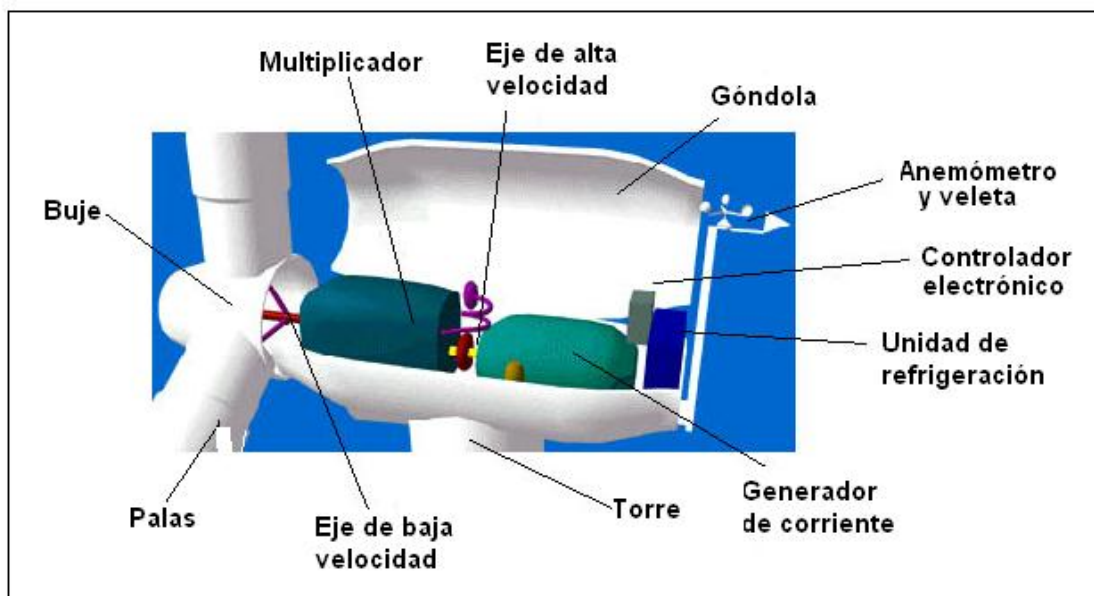


Fig. 2.5 Partes de un aerogenerador  
Fuente: Energía eólica. Solarpedia

#### 2.5.2 Parques Eólicos

La explotación de la energía eólica se lleva a cabo en un conjunto de molinos aerogeneradores que forman un parque eólico.

Cada parque cuenta con una central de control de funcionamiento que regula la puesta en marcha de los aerogeneradores, controla la energía generada en cada momento, etc.

Las principales razones por las que se instalan parques eólicos son que el agrupamiento de las turbinas permite aprovechar mejor las posibilidades energéticas del emplazamiento, reducir costes y evacuar la energía desde un solo punto, con lo que se reduce el número de líneas de transporte y se minimizan impactos ambientales.

Los parques eólicos deben pasar, además, un examen previo de carácter medioambiental, en el que se analizan multitud de factores como son: estudios geohidrológicos de la zona, impacto de las obras y de los tendidos eléctricos, afectaciones a la fauna y flora y a los valores culturales e históricos del enclave, impacto visual.

En base a esto se determina si el lugar elegido para situarlo es adecuado y las medidas correctoras que se deben realizar (restauración de la cubierta vegetal, utilización de materiales autóctonos en la construcción de edificaciones, enterramiento de tendidos, etc.).

### **2.5.3 Ventajas e Inconvenientes**

#### *Ventajas*

- ✓ La energía eólica no deja ningún tipo de residuos ni de emisiones dañinas para el medio ambiente.
- ✓ Cada kWh producido con energía eólica tiene 26 veces menos impactos que el producido con carbón fósil, 21 veces menos que el producido con petróleo, 10 veces menos que el producido con energía nuclear y 5 veces menos que el producido por gas.
- ✓ Los aerogeneradores actuales recuperan rápidamente toda la energía gastada en su fabricación, instalación, mantenimiento y desmantelamiento. Bajo condiciones de viento normales, a una turbina le cuesta entre dos y tres meses recuperar esa energía.
- ✓ Los parques eólicos son compatibles con otros usos y son instalaciones que, tras su clausura y desmantelamiento, no dejan huella y el suelo recupera su apariencia original.
- ✓ Los aerogeneradores no requieren un suministro de combustible posterior. Por lo tanto, son idóneos para los países en vías de desarrollo, contribuyendo a su crecimiento y a luchar contra la pobreza.

### *Inconvenientes*

- × Los aerogeneradores son siempre elementos visibles en el paisaje; provocan un impacto visual, aunque mientras para unos ese impacto es positivo, otros lo consideran inasumible (percepciones individuales).
- × La creación de los parques eólicos está sujeta a las pertinentes actuaciones para evitar daños en la vegetación y restaurarla, cerrar los caminos al paso de vehículos, etc.
- × Otros aspectos criticados son las supuestas afecciones que causan a la flora y fauna, en especial a las aves.
- × Los aerogeneradores y los caminos de acceso ocupan menos del 1% del área de un parque eólico típico. El 99% restante puede ser utilizado para agricultura y pasto.

### **2.5.4 Centrales Eólicas en México**

Finalmente la Tabla 2.3 muestra la capacidad eoloeléctrica instalada en México.

<b>Ubicación Geográfica</b>	<b>Número de centrales</b>	<b>Número de unidades</b>	<b>Capacidad efectiva instalada (MW)</b>
Baja California Sur	1	1	1
Oaxaca	1	104	85
Total	2	105	86

Tabla 2.3 Centrales eólicas en México

Fuente: Listado de Centrales Generadoras. Eoloeléctricas. CFE. Marzo 2010.

### **2.6 Energía Solar**

A través de sus informes de divulgación titulados “Cuaderno de Energías Renovables para todos” en este caso el volumen solar Fotovoltaica, la página de Internet “Energías Renovables” proporciona toda la información que se encuentra a continuación sobre este tema.

La obtención directa de electricidad a partir de la luz se conoce con el nombre de efecto fotovoltaico.

La existencia de este fenómeno fue puesta de manifiesto por el físico Antoine Becquerel, en el año 1839. Para lo cual, se requiere un material que absorba la luz del Sol y transforme la energía radiante absorbida en energía eléctrica.

### 2.6.1 Antecedentes

Hacia 1870 el profesor W. Grylls Adams y su estudiante, R. Evans Day, experimentaron sobre el efecto de la luz sobre el selenio, comprobando que se creaba un flujo de electricidad, que denominaron “fotoeléctrica”.

En 1885 se construyó el primer módulo fotoeléctrico, empleando una capa de selenio extendida sobre un soporte metálico y cubierta por una fina película transparente de oro, este modulo fue elaborado por Charles Fritts.

Fritts envió sus paneles solares a Werner Von Siemens, que ante la Real Academia de Prusia, presentó los módulos americanos declarando “por primera vez tenemos la evidencia de la conversión directa de la energía de la luz en energía eléctrica”.

La primera célula fotovoltaica de silicio fue descrita por R. S. Ohl en el año 1941. Pero los primeros dispositivos fotovoltaicos no se empezaron a fabricar hasta la década posterior.

En los Bell Laboratories, a comienzos de la década de 1950, Calvin Fuller y Gerald Pearson trabajaban en la materialización de la teoría del transistor construido a base de silicio, tiempo después presentaron la denominada Batería Solar Bell, mostrando un panel de células fotovoltaicas que alimentaban una noria en miniatura.

Los científicos de Bell Laboratories hicieron funcionar un radio transmisor alimentado por energía solar, dentro de la reunión de la Academia Nacional de Ciencias Americana. La prensa recogió la noticia manifestando: “las células solares de Bell suministran energía a partir del sol en una cantidad de  $60 \text{ W/m}^2$ , mientras que la célula atómica, recientemente anunciada por RCA, suministra una millonésima de vatio. Por tanto, la célula solar proporciona 50 millones de veces mas energía que el artefacto de RCA”. (se referían a la denominada pila atómica, que consistía en una célula de silicio alimentada por energía nuclear, que utilizaba los fotones emitidos por un muy nocivo residuo radiactivo, el Estroncio- 90, en vez de los fotones solares.

A partir de este momento, las células solares fotovoltaicas entraban de lleno en el campo de acción de la industria. Primero fue Western Electric, que las utilizó para alimentar líneas telefónicas en las zonas rurales de Georgia.

En 1955, National Fabricated Products compró la licencia para la fabricación de células solares a Western Electric, para intentar el mejoramiento de su eficiencia.

La primera empresa que intentó su comercialización fue la californiana Hoffman Electronics, en 1956, para introducirlas en campos de aplicación específicos (alimentación de lugares remotos alejados de la red eléctrica).

### 2.6.2 Funcionamiento de las Centrales Termosolares

El principio básico de todos los sistemas solares térmicos es simple: la radiación solar es captada y el calor se transfiere a un medio portador de calor, generalmente un fluido (agua o aire). El medio calentado se puede usar directamente (albercas), o indirectamente, mediante un intercambiador de calor que transfiere el calor a su destino final como puede ser la calefacción de un ambiente.

### 2.6.3 Tipos de Centrales Termosolares

Las centrales térmicas solares se basan en espejos que concentran los rayos solares con la finalidad de calentamiento de un fluido (agua, aire, metal líquido o sal fundida), que convertido en vapor accionará una turbina, que a su vez impulsará un generador eléctrico.

En la Figura 2.6 se muestran los diferentes tipos de centrales termosolares.

#### Tipos de Centrales Termosolares.

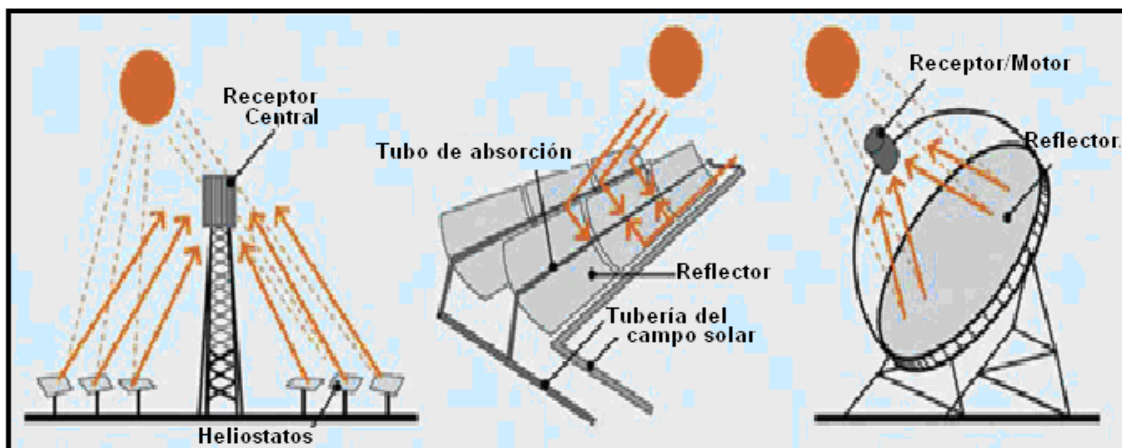


Fig. 2.6 Esquemas de los tipos de centrales empleadas actualmente  
Fuente: Energías renovables para todos. Tomo Solar Térmica

Se han desarrollado tres variantes de este principio:

- \* Las centrales de torre
- \* Los discos parabólicos
- \* Los cilindros parabólicos.

Las dos primeras son sistemas concentradores de foco puntual y la tercera es un sistema concentrador de foco lineal.

#### Centrales solares de torre

Las centrales solares de torre constan de centenares o miles de espejos planos (helióstatos) que concentran la luz solar en un punto de la torre, donde se sitúa una caldera para calentar el fluido (agua, aire, metal líquido o sal fundida) que acciona la turbina mediante un ciclo de vapor.

En la actualidad se están investigando sistemas avanzados que calientan aire a presión para inyectarlo en una turbina de gas de ciclo combinado.

### Los discos parabólicos

Los discos parabólicos pueden ser usados de forma individual para el accionamiento de un motor térmico situado en su foco o bien pueden ser utilizados colectivamente, formando agrupaciones, para el accionamiento de un motor térmico o turbina central.

Fue A. Mouchot quien en el año 1860 inició en Tours sus investigaciones para aprovechar la energía solar para accionar una máquina de vapor.

En la Plataforma Solar de Almería se han desarrollado diversos prototipos de concentradores disco-parabólicos y se han instalado varios prototipos del denominado SunDish en Estados Unidos.

Se basa en un dispositivo de concentración consistente en una estructura en forma de disco que soporta 16 discos que concentran los rayos del Sol en un foco donde está dispuesto un motor Stirling (55 kWe) que puede funcionar concentrando los rayos del Sol o en combinación con cualquier tipo de combustible.

La realización más importante hasta el momento con esta tecnología son las famosas cocinas solares que la Asociación Brahma Kumaris tiene en funcionamiento en sus centros de formación en Mont Abu (Rajasthan, India). La primera de ellas se instaló en Gyan Sarovar (Academy for a Better World), en el año 1996 y tiene capacidad para cocinar 1.000 comidas/día (24 discos parabólicos, con una superficie de captación de 190 m<sup>2</sup>).

### Los cilindros parabólicos

Concentran la luz solar sobre un eje por donde circula un fluido (generalmente aceite) que se dirige hacia la zona de generación, donde se calienta agua hasta producir vapor para el accionamiento de una turbina.

El desarrollo de los sistemas de captación solar a base de espejos en forma cilindro-parabólica se remonta a los años 1880, cuando John Ericsson construyó un sistema de espejos cilindro-parabólicos para alimentar un motor de aire caliente.

En 1981 la Agencia Internacional de la Energía construyó y probó un sistema para la producción de electricidad a base de captación solar mediante espejos cilindro-parabólicos de 500 kW de potencia en la Plataforma Solar de Almería (Tabernas).



Basándose en la tecnología de espejos cilindros- parabólicos, una pequeña empresa, Luz International Ltd., consiguió producir electricidad solar para cubrir las necesidades de miles de habitantes de California (900 GWh/año) y a un coste del kWh producido inferior al generado por las centrales nucleares en funcionamiento entonces en California.

Así, Luz consiguió que una de las grandes empresas eléctricas de California (South California Edison) negociara un contrato para la compra de electricidad de origen solar, durante 30 años.

Todas estas centrales descritas anteriormente, tienen en común el elemento generador, constituido por un alternador, movido mediante una turbina que será distinta dependiendo del tipo de energía primaria utilizada.

Existen también centrales solares fotovoltaicas, en las cuales se convierte la energía del Sol directamente en electricidad reemplazando electrones directamente la energía luminosa del sol en energía eléctrica, gracias a la propiedad que tienen ciertos materiales de generar una corriente de electrones cuando incide sobre ellos una corriente de fotones.

La energía que portan los fotones de la luz solar arranca los electrones sobrantes de una capa y los hace moverse en dirección a los "huecos" de la otra capa. Como resultado, se crea un flujo de electrones excitados, es decir, una corriente eléctrica.

#### **2.6.4 Empleo de energía solar.**

Se calcula que en la Unión Europea había instalados 20 millones de m<sup>2</sup> de captadores solares (14.280 MWt) a finales de 2006, algo que no habría sido posible sin el empuje solar de países como Alemania, Grecia y Austria.

De los 3 millones de m<sup>2</sup> nuevos que se instalaron en 2006 en Europa, la mitad se hizo en Alemania.

Chipre es el país que más cantidad de energía solar térmica aporta por habitante en el mundo, con 350 kWt por cada 1.000 habitantes. Más del 90% de los edificios construidos en este país están equipados con captadores solares térmicos.

En cuanto a Grecia, en los últimos años se instalan más de 200.000 m<sup>2</sup> anuales. Hoy totalizan unos 3,5 millones. Con un 17% de la superficie instalada en la UE, dispone de un tejido solar que abastece de agua caliente a uno de cada cuatro habitantes.

En Israel, alrededor del 85% de las viviendas están equipadas con colectores solares térmicos, como resultado de una ley de hace 25 años.

En Turquía hay unos 10 millones de metros cuadrados, y en China, el país con más superficie de captadores solares instalados, 78 millones, lo que supone aproximadamente

el 40% de todos los instalados en el mundo. Hoy, más de 10 millones de familias chinas disponen de agua caliente gracias al sol.

En la figura 2.7 se observa la capacidad instalada acumulada en los países pertenecientes a la Unión Europea hasta el año 2006 (rojo), así como la capacidad compartida (amarillo).

La superficie europea ocupada por instalaciones solares superó los 20 millones de m<sup>2</sup>.

### Capacidad Instalada de energía solar en la Unión Europea.

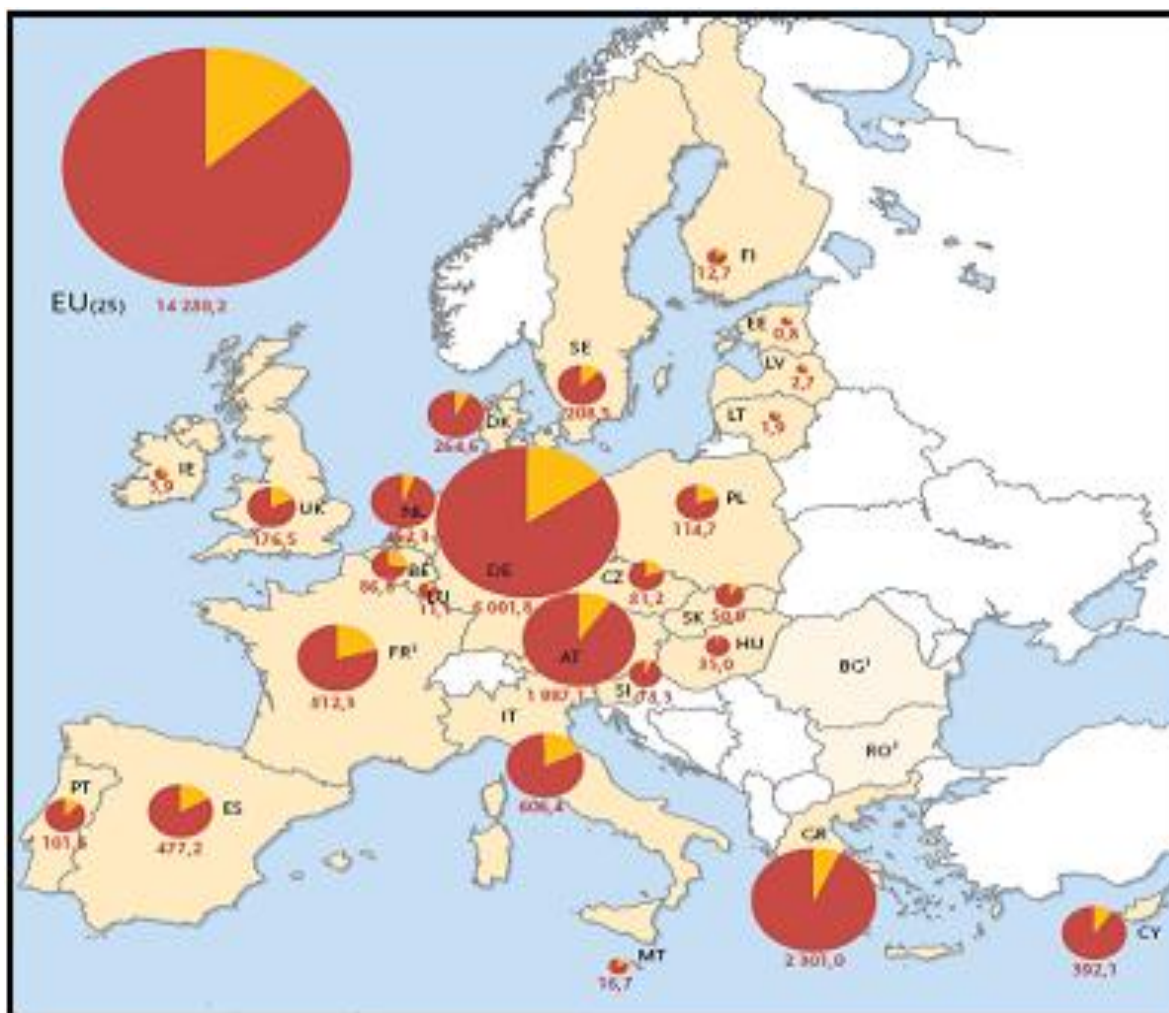


Figura 2.7 Capacidad instalada en la Unión Europea.

Fuente: EurObserv'ER 2007.

En el caso de México actualmente la CFE se encuentra apoyando la instalación de un campo solar acoplado a una planta de ciclo combinado en Sonora.

Así como la utilización de paneles fotovoltaicos en el Fraccionamiento Valle de las Misiones, en la ciudad de Mexicali, donde se impulsaron la instalación de 220 paneles con fotoceldas en casas del Fraccionamiento para contar con un kW de capacidad de generación, durante la noche, la energía eléctrica es abastecida por Comisión Federal de Electricidad, bonificando los excedentes entregados durante el día que no se consumieron.

### **2.6.5 Ventajas e Inconvenientes de la energía solar térmica**

A continuación se mencionan las principales ventajas e inconvenientes de este tipo de energía en cada uno de los sistemas mencionados.

#### Cilindros Parabólicos

##### *Ventajas*

- ✓ Temperatura operativa potencial de hasta 500° C.
- ✓ Eficiencia neta anual de rendimiento de la planta del 14%.
- ✓ Inversión y coste operativos probados comercialmente.
- ✓ Buen uso del terreno.
- ✓ Presenta la menor demanda de materiales.

##### *Inconvenientes*

- × Se obtienen cantidades moderadas de vapor.

#### Torre solar

##### *Ventajas*

- ✓ Temperatura operativa potencial de más de 1000° C.
- ✓ Almacenamiento a altas temperaturas.
- ✓ Posible operación híbrida

##### *Inconvenientes*

- × Los valores anuales de rendimiento previstos, los costes de inversión y su operación necesitan pruebas a mayor escala en operaciones comerciales.

#### Discos Parabólicos

##### *Ventajas*

- ✓ Eficiencias de conversión muy altas.
- ✓ Integra de la forma más efectiva el almacenamiento térmico en una central grande.
- ✓ Experiencia operativa de primeros proyectos de demostración.
- ✓ Inversión y coste operativos probados comercialmente.

- ✓ Fácil fabricación y producción en serie de piezas disponibles.
- ✓ No requiere agua para refrigerar el ciclo.

*Inconvenientes*

- × No hay ejemplos de uso comercial a gran escala
- × Objetivos de costes previstos de producción en serie aún por probar.
- × Menor potencial de disponibilidad para integración a la red.

### 3. Nuevos combustibles

#### Introducción.

Actualmente la preocupación ante la escasez de combustibles fósiles ha ocasionado una búsqueda de combustibles renovables, que permitan aprovechar los desechos orgánicos, y a su vez sean amigables con el medio ambiente,

En respuesta a esta búsqueda la opción más viable se encuentra en los llamados “biocombustibles”.

El interés en estos combustibles radica en que no aumentan en los niveles atmosféricos de dióxido de carbono, y evitan la producción de gases de efecto invernadero, esto se debe a que en el caso de los combustibles derivados del petróleo el contenido de carbono fue retirado de la atmósfera hace millones de años, sin embargo, en los biocombustibles, el contenido de carbono permitió a los vegetales llevar a cabo el proceso de fotosíntesis (conversión de dióxido de carbono a oxígeno y azúcares).

#### 3.1 ¿Qué son los biocombustibles?

El portal de Internet Biodisol define como biocombustibles “a todos aquellos restos orgánicos que son procesados para obtener combustibles; generalmente se emplea: azúcar, trigo, maíz, semillas oleaginosas, madera e incluso excrementos secos”.

El interés en estos insumos radica en que su empleo como combustible ayuda a la reducción del volumen total de dióxido de carbono que se emite a la atmósfera.

Entre los biocombustibles más empleados se encuentran:

##### Biomasa

Fue la primera fuente de energía proveniente de desechos orgánicos que se empleó.

La biomasa es materia orgánica de origen animal o vegetal (madera, residuos de productos agrícolas y forestales, basura industrial, excrementos secos, humanos o animales) que se procesa en un dispositivo especial, comúnmente llamado “biodigestor”.

El biodigestor es un contenedor cerrado e impermeable dentro del cual se deposita la biomasa en disolución para descomponerse y producir metano y fertilizantes orgánicos, este proceso de descomposición se lleva a cabo por bacterias anaeróbicas.

En la Figura 3.1 se muestra el modelo de un Biodigestor.

## Biodigestor

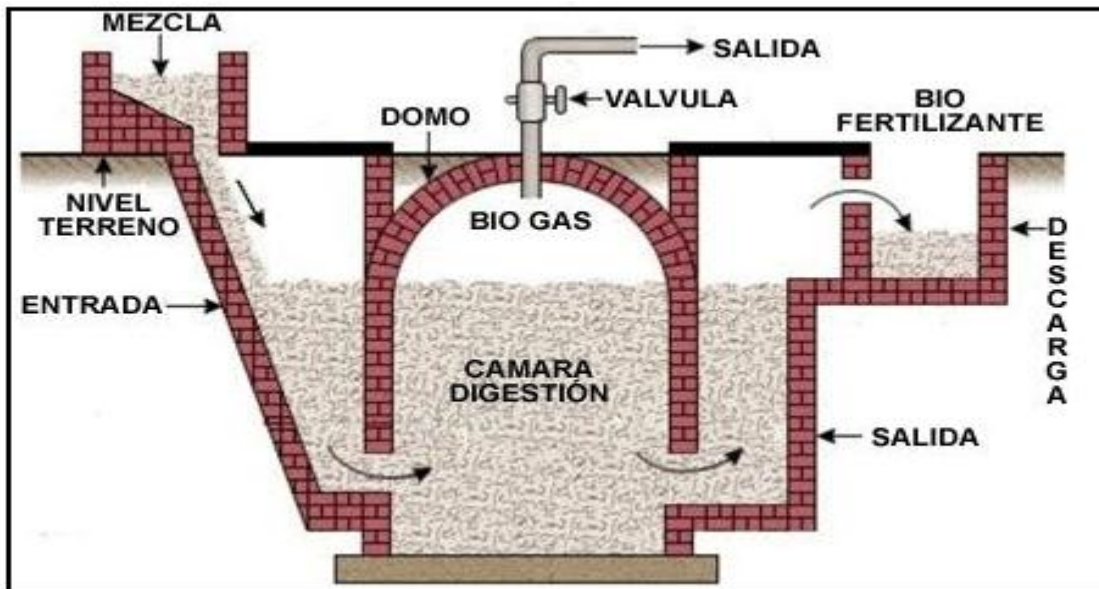


Fig. 3.1 Diagrama de funcionamiento de un biodigestor

Fuente: Agencia de Informaciones Mercosur.

### Biodiésel

El biodiésel se fabrica a partir de cualquier grasa animal o aceites vegetales, generalmente se emplea girasol, mostaza o soya. En algunos casos el cultivo de estos es exclusivo para generar biodiésel.

La obtención de biodiésel se lleva a cabo a través de un proceso llamado transesterificación, el cual consiste en sustituir la glicerina contenida en los insumos por un alcohol por medio de un catalizador, entre los catalizadores más empleados se encuentran el metanol, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio.

### Bioetanol

Es un alcohol que se obtiene a partir de maíz, sorgo, caña de azúcar, betabel o celulosa, casi todos los residuos vegetales son susceptibles de ser transformado en azúcar, con lo cual, es posible destilar el alcohol por medio de levaduras.

Se emplea como sustituto de gasolina o nafta y actualmente es el biocombustible más empleado, es por ello que se han llevado a cabo estudios relacionados con las emisiones contaminantes que se originan al mezclar bioetanol con gasolina.

### Biogás

Este biocombustible se obtiene a través de dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano.

Se genera en dispositivos específicos o medios naturales a partir de la degradación de materia orgánica y es llevado a cabo por microorganismos en ausencia de aire, lo que lo convierte en un biocombustible muy útil al tratar residuos orgánicos.

En la Tabla 3.1 se resumen los conceptos de biocombustibles mencionados.

### Biocombustibles

<b>Biocombustible</b>	<b>Origen</b>	<b>Conversión</b>	<b>Países Productores</b>
<b>Biomasa</b>	Materia orgánica	Biodigestor	Francia Suecia Finlandia
<b>Biodiésel</b>	Grasas y aceites vegetales	Transesterificación	Alemania Francia EUA
<b>Bioetanol</b>	Maíz, sorgo, caña de azúcar, celulosa	Destilación	Brasil EUA China
<b>Biogás</b>	Monóxido de carbono Dióxido de carbono Metano	Microorganismos anaerobios	Alemania Inglaterra Italia

Tabla 3.1 Resumen Biocombustibles

### 3.2 Ventajas e inconvenientes en el empleo de biocombustibles en comparación con el empleo de combustibles fósiles.

#### Biomasa

##### *Ventajas*

- ✓ Emplea desechos.
- ✓ No compite con la producción de alimentos.
- ✓ Reduce los gases de efecto invernadero.
- ✓ El agua empleada en el tanque digestor permite su reuso como agua de riego
- ✓ Promueve la estabulación del ganado; es decir, su concentración en establos, facilitando la higiene (agrupación de estiércol) y evitando el pisoteo de árboles y renuevos de reforestación.
- ✓ Los residuos del biodigestor se pueden emplear como fertilizante.

*Inconvenientes*

- × Baja densidad energética.
- × Requiere sistemas de almacenamiento y transporte muy grandes.
- × Deficiente desarrollo en los sistemas de distribución.
- × Los sistemas de alimentación de combustible y eliminación de cenizas son más complejos y requieren unos mayores costos de operación y mantenimiento.

*Biodiésel**Ventajas*

- ✓ Es un combustible totalmente ecológico al estar compuesto por productos vegetales.
- ✓ No posee azufre.
- ✓ Es un comburente biodegradable.
- ✓ Podría crear un reciclaje de aceite (cocina o automotriz) y empleo de plantas consideradas como plagas.

*Inconvenientes*

- × Los gases empleados para su producción presentan altos costos.
- × Requiere insumos que podrían destinarse al consumo alimenticio.
- × Su uso está destinado al transporte automotriz.
- × Sus costos de producción son mayores.
- × Su proceso de producción produce más gases de efecto invernadero.

*Bioetanol**Ventajas*

- ✓ Es un combustible renovable y doméstico.
- ✓ Su emisión de gases de efecto invernadero es menor, reduce la lluvia ácida, mejora la calidad del aire en zonas urbanas, no contamina el agua y reduce los residuos
- ✓ Virtualmente utilizable en todos los vehículos.
- ✓ Su producción y almacenamiento son fáciles de implementar.

*Inconvenientes*

- × Requiere insumos que podrían destinarse al consumo alimenticio.



El bioetanol se emplea como sustituto de la gasolina y para poder obtener significativamente el consumo se deben implementar algunas modificaciones en los automóviles, estas son:

- × Aumentar la relación de compresión.
- × Variar la mezcla de Combustible / aire.
- × Bujías resistentes a mayores temperaturas y presiones.
- × Conductos resistentes al ataque de alcoholes.
- × Agregar un mecanismo que facilite el arranque en frío.

### Biogás

#### *Ventajas*

- ✓ Es un combustible renovable.
- ✓ No contiene azufre, por lo que reduce la lluvia ácida.
- ✓ Disminuye la tala de bosques al ser utilizado en lugar de leña.
- ✓ Presenta una amplia gama de aplicaciones (cocción de alimentos, alumbrado, producción de energía, fertilizante, transporte, entre otros).

#### *Inconvenientes*

- × Los desechos se deben almacenar cerca del biodigestor.
- × Presenta riesgo de explosión, si no se cumplen las normas de seguridad para gases combustibles.

### **3.3 Biocombustibles de Segunda Generación**

El empleo de insumos agrícolas para obtener biodiésel y bioetanol, ha generado polémica al destinar materias primas agrícolas al sector automotriz evitando que estos lleguen a emplearse para consumo alimentario.

Es por eso que se han buscado nuevas materias primas agrícolas que no formen parte de los productos de consumo humano y se ha acelerado la investigación y desarrollo tecnológico hacia una segunda generación de biocombustibles, con la ventaja de aprovechar la infraestructura y conocimientos adquiridos en la primera. Es decir, sin alterar las condiciones naturales del ambiente y con procesos más eficientes.

Una opción muy interesante es el empleo de celulosa, que se puede obtener de gran variedad de residuos de cultivos, además de que es la forma más común de carbono en la naturaleza y no tiene un fin alimenticio.

Pero dicha celulosa requiere descomponerse en azúcares para poder fermentarse y destilarse para obtener etanol, pero la obtención de cadenas de azúcares es un proceso complejo debido a la estructura de la celulosa.

Aunque las opciones son variadas y aún se requiere de investigación para su utilización comercial, a continuación se muestran las más prometedoras:

### Pastos Silvestres

Los pastos silvestres son una buena opción para la producción de biodiésel, pues se busca emplear especies ornamentales, como son el lupino (Figura 3.2), pasto indio (Figura 3.3), tallo azul gigante y el pasto varilla (Figura 3.4).

Presentan ventajas respecto a los aceites vegetales, como son:

- ✓ Menores costos de producción: El costo de las semillas de pasto es más barato que las semillas de aceites vegetales.
- ✓ No requieren grandes cuidados para su cultivo: No se requieren fertilizantes.
- ✓ Proporcionan más energía: Emplean toda la planta y no solo los granos.
- ✓ No emplea insumos alimenticios.

El investigador de la Universidad de Minnesota, en EUA, David Timan estima que si se produjeran biocombustibles en las tierras degradadas de todo el planeta empleando estos tipos de pastos, se podría cubrir el 13% de la demanda de combustibles necesarios, así como el 19% de las necesidades de electricidad mundial.<sup>6</sup>

### Lupino



Fig. 3.2 Especies de lupino

Fuente: Infojardin

---

<sup>6</sup> Rocio Sarmiento Torres: Biocombustibles de segunda generación. Energía a debate. Año 5. Noviembre-Diciembre 2009.

### Pasto Indio



Figura 3.3 Pasto indio  
Fuente: Plant Inventory

### Pasto Varilla



Figura 3.4 Pasto varilla  
Fuente: Ornamental Grasses & Bamboo

### Algas

Las algas son organismos vegetales marinos fotosintéticos, la mayoría son unicelulares y microscópicas, las especies más conocidas son las visibles, como las algas marinas, la marea roja, las manchas verde azuladas de las paredes de los acuarios, etc.

Se presentan como una fuente potencial para obtener biodiesel ya que no requieren suelos agrícolas para su cultivo.

Empleando el mismo proceso que se utiliza con los aceites vegetales (transesterificación), las algas se introducen en estanques de poca profundidad para permitir el paso de la luz solar, con la ventaja de que pueden situarse en cualquier región sin importar la temperatura o la humedad.

Actualmente existe una planta piloto en Portugal, en la que emplean algas para generar biodiesel. En México se pretende construir una planta en el desierto de Sonora utilizando los restos de dióxido de carbono generados por la central termoeléctrica Puerto Libertad.<sup>1</sup>

En la figura 3.5 se muestran algas en su hábitat natural y un complejo donde se tratan las algas para obtener biodiesel.

### Algas



Figura 3.5 algas

Fuente: Ecología verde y ecologicossi

### Viruta de madera

Empleando virutas de madera de aproximadamente 6 x 15 mm (Figura 3.6) es posible obtener biodiesel. Se recurre a un proceso llamado “pirólisis”, el cual consiste en calentar las virutas de madera en una cámara sin oxígeno a altas temperaturas, obteniendo carbón y gas. Este gas se condensa para ser tratado químicamente y posteriormente ser utilizado en automóviles.

El empleo de este biocombustible requiere más investigación en cuanto a sus emisiones de dióxido de carbono, transporte y almacenamiento; así como su impacto en el medio ambiente y en los motores.

### Viruta



Figura 3.6 Viruta



### Jatropha

La jatropha es una planta tóxica (Figura 3.7) resistente altas temperaturas, sequías y puede vivir en suelos de baja fertilidad o degradados, posee un veneno que la mantiene a salvo de los depredadores. Es originaria de México y América Central.

El 60% de su contenido es aceite, el cual se transesterifica para obtener biodiesel, con la ventaja de que el aceite obtenido está listo para emplearse en los motores, sin necesidad de modificación.

Cabe mencionar que no solo es posible obtener biocombustibles a partir de las plantas y vegetales. Los microorganismos también son capaces de generar biocombustibles.

### **Jatropha**



Figura 3.7 Planta de Jatropha  
Fuente: R-Squared Energy Blog y Next fuel

No solo las plantas y vegetales son alternativas para obtener biocombustibles, los organismos animales también poseen características útiles que podrían emplearse para esta labor, aunque también estos procesos requieren estudios e investigación antes de contemplarse como implementación comercial.

### Termitas

En conjunto el Departamento de Energía de Estados Unidos, el Instituto de Tecnología en California y la empresa de Biotecnología Verenium están investigando el uso de termitas del género *Nasutitermes* para obtener bioetanol.

Esto se debe a que las termitas tienen la fuerza para masticar la madera, y las bacterias que se encuentran en su estómago, las enzimas necesarias para descomponerla en celulosa.

La celulosa al ser descompuesta en azúcares se fermenta por microbios convirtiendo los azúcares en etanol.

### Bacterias

Las bacterias son una fuente de energía muy interesante, ya que a diferencia de los insumos anteriores; en los que en gran parte se obtenía etanol y diésel, las bacterias además pueden producir electricidad.

Las ventajas del empleo de las bacterias es que existen grandes cantidades de ellas, en las condiciones (temperatura, presión, oxígeno, etc.) más adversas, por lo que es un recurso que podría resultar muy aprovechable.

Un ejemplo son las bacterias *Escherichia coli* y *Bacillus subtilis*, las cuales producen etanol de manera natural en pocas cantidades, es por eso que el equipo del Dr. Alfredo Martínez del Instituto de Biotecnología de la UNAM, trabajan en su modificación genética para aumentar la producción de etanol y emplearse como combustible en automóviles.

Aunque las bacterias que están generando más expectativas son aquellas que producen electricidad, el caso más conocido es el de la bacteria *Geobacter Sulfurreducens*, la cual se encuentra en hábitats húmedos.

En términos generales esta bacteria respira metales y produce electrones que regresa de manera natural al suelo.

Es por esto que su estudio se ha incrementado en los últimos años, buscando la forma de trasladar esos electrones a electrodos para ser utilizados por el ser humano, esto es mediante el empleo de dispositivos llamados Celdas de Combustible, Microbianas en este caso.

En el siguiente capítulo se detalla la bacteria *Geobacter Sulfurreducens* y el funcionamiento de Celdas de Combustible Microbianas.

### **3.4 Usos de los Biocombustibles actualmente**

#### *Biodiésel*

El uso por primera vez de aceites vegetales como combustibles, se remonta al año de 1900, siendo Rudolph Diesel, quien lo utilizara por primera vez en su motor de ignición – compresión.

Durante la segunda guerra mundial, se destacó la investigación realizada por Otto y Vivacqua en Brasil, sobre diesel de origen vegetal, pero fue hasta el año de 1970, que el biodiésel se desarrolló de forma significativa a raíz de la crisis energética que se sucedía en el momento, y al elevado costo del petróleo.

En el año de 1985 en Silberberg (Austria), se construyó la primera planta piloto productora de RME (Rapeseed Methyl Ester - metil éster de aceite de semilla de canola).

Hoy en día países como Alemania, Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiésel en automóviles.

Entre los usos que se le dan actualmente a los biocombustibles encontramos:

- Alquiler de autos mediante biodiésel. Comenzó la oferta en Maui y Los Ángeles en EUA.
- Calefacción para el hogar en base a biodiésel. Mucha gente está apuntando sus ojos hacia el biodiésel como una alternativa para la calefacción de la casa. Las calderas a petróleo pueden funcionar bien con Biodiesel (B20), combustible fabricado con 80% de aceite de petróleo y 20% de Biodiesel.

Hay quienes han reformado sus calderas para Biodiesel (B100), un combustible realizado enteramente con aceites vegetales, el cual quema más limpio que el petróleo convencional.

- Generadores de electricidad en base a combustible biodiésel, estos son una alternativa superior al tradicional quemado de carbón de piedra.

#### *Bioetanol*

El etanol puede utilizarse como combustible para automóviles, solo o también puede mezclarse con gasolina en cantidades variables para reducir el consumo de derivados del petróleo.

También puede utilizarse como combustible en las celdas de combustible.

Brasil es el mayor productor y consumidor mundial de bioetanol como combustible. Desde los años 80, ha desarrollado una extensa industria doméstica, produciendo anualmente unos 15 millones de m<sup>3</sup>. Por su parte, Estados Unidos también es otro gran consumidor. El bioetanol de EEUU se fabrica principalmente con maíz, mientras que el de Brasil se hace con caña de azúcar.

Por otra parte, Japón quiere que el 40% de sus vehículos funcionen con bioetanol en 2010, hasta conseguir que en 2030 todos los nuevos vehículos puedan utilizarlo. China ha anunciado la construcción de fábricas de bioetanol a base de mandioca (yuca). En Suecia circulan 30 000 coches llamados flexibles, que mezclan un 85% de bioetanol y un 15% de gasolina.

El bioetanol también puede convertirse en una nueva fuente de ingresos para los agricultores, como sustituto de cultivos improductivos.

### Algas

A inicios del año 2009, un avión Boeing 737 de Continental Airlines utilizó en uno de sus motores una mezcla de biocombustibles con base en algas, en una demostración de la viabilidad en la industria aeronáutica y que, según sus organizadores, fue todo un éxito.

La empresa Solazyme (South San Francisco, California,) ha desarrollado un nuevo proceso con el que es posible convertir biomásas en combustibles utilizando diversas variedades de algas. Este nuevo método, que permite fabricar un combustible tan barato como el petróleo a partir de algas, podría dar lugar a biocombustibles más asequibles.

En lugar de cultivar las algas en estanques o encerradas en tubos de plástico expuestos al sol (como intentan hacer otras compañías), Solazyme cultiva los organismos a oscuras, en el interior de enormes contenedores de acero inoxidable. Los investigadores de la compañía alimentan a las algas con azúcar, que los organismos convierten en distintos tipos de petróleo. El petróleo se puede extraer y, una vez procesado, puede dar lugar a toda una serie de combustibles, incluido gasóleo y carburante, así como otros productos.

La compañía utiliza distintas variedades de algas para producir diferentes tipos de aceites. Algunas algas dan lugar a triglicéridos, como los producidos por la soya y otros cultivos ricos en aceite; otras producen una mezcla de hidrocarburos similar al petróleo crudo ligero.

El método de Solazyme tiene una serie de ventajas frente a otros enfoques que utilizan microorganismos para convertir azúcares en combustible. La mayoría de estos enfoques utilizan microorganismos como la levadura para fermentar los azúcares, formando etanol. Los aceites obtenidos a partir de algas por Solazyme se pueden utilizar, por tanto, para una gama más amplia de productos, señaló Harrison Dillon, presidente y director de tecnología de la compañía.



### Viruta de madera

Tom Adams y otros investigadores de la Universidad de Georgia han desarrollado un nuevo proceso químico, que esperan patentar en un futuro próximo, que con un bajo coste procesa el gasoil para poder ser usado en motores diésel convencionales o mezclado con gasoil o biodiesel, empleando virutas de madera.

Las virutas de madera, de unos 6 milímetros de diámetro y unos 15 mm de largo, se calientan en una cámara sin oxígeno y a altas temperaturas, en un proceso denominado pirólisis.

Más de un tercio de la madera se vuelve carbón, mientras que el resto se convierte en gas. La mayor parte de este gas, se condensa formando un bio-aceite que puede ser tratado químicamente. Cuando se completa el proceso, un 34 por ciento de dicho bioaceite puede ser usado en motores como biocombustible.

Aunque el nuevo biocombustible ha dado resultados positivos, deberán llevarse a cabo más pruebas para estudiar su impacto en los motores a largo plazo, sus emisiones y la mejor manera de transportarlo y almacenarlo, añadió Adams.

"Pasará todavía algún tiempo antes de que este biodiésel esté al alcance de todos", agregó.

### Jatropha

En México, en el estado de Chiapas se produce bioturbodiésel a partir de la jatropha, también conocido como piñón.

El director general de Aeropuertos y Servicios Auxiliares (ASA), Gilberto López Meyer, reconoció el potencial de la entidad en la producción de biodiesel y elogió que además se obtenga a partir de productos no comestibles, lo que sin duda eleva sus cualidades y abarata su costo.

Reiteró que Chiapas es el estado con mayores avances para la producción de bioturbodiésel y tiene ya el potencial para convertirse en la plataforma de suministro que necesita la aeronáutica.

El trabajo que se realiza con la palma de aceite y piñón, para la obtención de biocombustible, empieza desde la extracción, la refinación y el consumo ya que por el momento el extraído de la palma se utiliza en el transporte urbano de Tuxtla Gutiérrez y pronto se hará en Tapachula.

Es importante destacar que en los próximos años toda la aviación mundial estará obligada a utilizar por lo menos el 1% de biocombustibles del total del consumo que realicen.

El mercado de biocombustibles está creciendo de una manera acelerada en todo el mundo y la aviación no es la excepción, por lo que se pretende garantizar que México tenga el suficiente suministro de aceites y biocombustibles que permitan contar con lo necesario cuando se requiera.

La materia prima para la fabricación del biodiésel es el aceite vegetal; en Chiapas ya se cuenta con plantaciones de dos fuentes para generarlo: la palma de aceite, cultivo tradicional en el estado que gracias al apoyo del Gobierno Estatal ha ido en incremento y de la *jatropha curcas*, mejor conocida como piñón, que ha sido considerada como una promesa chiapaneca para los suelos de menor calidad, dada su alta adaptabilidad.

En el tema de biocombustibles, el Gobierno de Chiapas es puntero en este tipo de fuentes de energía alternativas y es que es un gran productor de palma de aceite y piñón. En abril de 2010, Chiapas inició con una producción de 30 mil litros diarios de biodiésel de palma de aceite a través de las plantas de alta tecnología ubicadas en Tuxtla y Tapachula.

## 4. *Geobacter Sulfurreducens*

### Introducción

En la búsqueda de nuevos combustibles nos encontramos con la opción de los microorganismos, ya que poseen la capacidad de producir energía renovable sin dañar el medio ambiente y sin interferir con el suministro de alimentos.

Las bacterias son microorganismos ubicuos, es decir, que se encuentran en todos los lugares del planeta y en cualquier tipo de condiciones de presión y temperatura; en el caso especial de *Geobacter Sulfurreducens* se encuentran en hábitats acuáticos anaerobios, sedimentos de agua fresca, ambientes marinos, incluso, en el tracto gastrointestinal de animales.

Actualmente la comunidad científica se está interesando por las bacterias para obtener combustibles y electricidad, las bacterias estudiadas abarcan una amplia gama de especies y sus aplicaciones que pueden ser tan simples y benéficas como la biorremediación de suelos contaminados o tan futuristas como para emplearse como en el espacio y producir electricidad.

La actividad eléctrica en microorganismos no es un tema nuevo, los primeros estudios los realizó Michael Potter en 1910 en Durham, Inglaterra, empleando la bacteria *Escherichia Coli* y electrodos de platino.

En 1931 Barnet Cohen, interesado por los estudios de Potter, construyó una celda de combustible microbiana, obteniendo una corriente de 0.35 mA y 0.35 V. Estos resultados no causaron impacto en la comunidad científica de ese tiempo, y el empleo de este tipo energía no prospero.

Es hasta la década de 1980 cuando se despierta el interés en los microorganismos capaces de producir electricidad: *Shewanella Oneidensis* y *Geobacter Metallireducens*, descubiertas en los sedimentos del río Potomac (EUA), y en 1987 la especie *Geobacter Sulfurreducens* fue aislada en una muestra del suelo de Oklahoma contaminado por hidrocarburos. En la figura 4.1 se aprecia la bacteria *Shewanella Oneidensis*.

La mayoría de los microorganismos capaces de generar electricidad pertenecen a la familia Geobacteraceae, como son las especies *Rhodoferrax ferrireducens*, *Aeromonas hydrophilia*, *Clostridium butyricum* y *Enterococcus gallinarum*.

Actualmente se tiene conocimiento de otras especies que generan electricidad (las mencionadas anteriormente) aunque sus mecanismos aún no son estudiados.

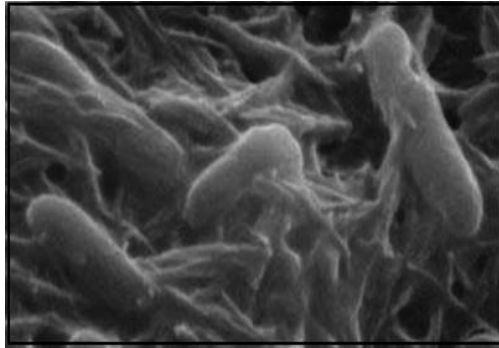


Fig. 4.1 *Shewanella Oneidensis*  
Fuente: Wikipedia

*Geobacter Sulfurreducens* (Fig. 4.2) es capaz de precipitar (cambiar de estado líquido a sólido) una gran variedad de metales, inclusive radiactivos, por lo que facilita la descontaminación.

Entre las ventajas que presenta *Geobacter Sulfurreducens* sobre otro tipo de microorganismos encontramos:

- Transfiere directamente electrones a electrodos
- Es un microorganismo que puede ser cultivado
- En condiciones de laboratorio, con un adecuado sustrato y aceptor de electrones, el tiempo de duplicación es de 45 minutos.

Esta bacteria puede generar electricidad de los desechos orgánicos y materia renovable, mediante el empleo de celdas de combustible microbiano, en adelante CCM.

El interés por estas CCM radica en su potencial empleo como fuentes de energía en lugares remotos sin acceso a la red eléctrica, zonas afectadas por desastres naturales, o incluso en el fondo del mar o en el espacio exterior.

Las primeras investigaciones del Dr. Lovely demostraron que es posible obtener voltaje colocando un ánodo de grafito en el sedimento anaeróbico y conectándolo a través de a un cátodo en una superficie aerobia; la respiración bacteriana del carbón dona electrones al ánodo, finalmente la energía eléctrica es obtenida por medio de un circuito que conecta al ánodo con el cátodo. Obteniéndose como resultado una producción de 10 mW/m<sup>2</sup>, durante un periodo experimental de semanas a meses.

En el laboratorio, esta pila biológica puede abastecer de electricidad por unos meses, y cada tanto se debe renovar el lodo para que las bacterias tengan nueva materia orgánica para degradar. Esto no es necesario si el sistema se usa directamente en la naturaleza.

### ***Geobacter Sulfurreducens***



Fig. 4.2 Diferentes imágenes de *Geobacter Sulfurreducens*  
Fuente: Geobacter Project, Afinidad Eléctrica Art. 172 y Microbiología Word prez.

#### **4.1 Características Fisiológicas**

La bacteria *Geobacter Sulfurreducens* es una proteobacteria; las proteo bacterias se dividen en 5 tipos (Alfa, Beta, Gama, Delta y Epsilon).

Las proteobacterias delta abarcan un grupo de géneros predominante aerobios, como son las mixobacterias, las cuales forman cuerpos fructíferos. Y un grupo de géneros estrictamente anaerobios que contienen la mayor parte de las bacterias reductoras de sulfato (*Desulfovibrio*, *Desulfobacter*, *Desulfococcus*, *Desulfonema*, etc.) y de las bacterias reductoras de azufre (por ejemplo, *Desulfuromonas*) junto con otras bacterias anaerobias con diferente fisiología (por ejemplo, reductas del hierro férrico *Geobacter* y los géneros sintróficos *Pelobacter* y *Syntrophus*).

La bacteria *Geobacter Sulfurreducens* pertenece a la familia de las Geobacteraceae, la cual se compone por microorganismos capaces de reducir el sulfato y sulfito, así como oxidar componentes de azufre y de este modo generar electricidad.

Los organismos de la familia Geobacteraceae, son capaces de acoplar la respiración anaerobia a la reducción de metales en el ambiente.

Esta clasificación de Bacterias Sulfato reductoras contiene a los organismos de los géneros:

- Desulfuromonas
- Desulfomonas
- Desulfococcus
- Desulfobulbus
- Desulfosarcina y Desulfonema
- Desulfovibrio
- Desulfobacter
- Desulfobacter
- Desulfotomaculum

Para comprender un poco más ésta bacteria, es necesario saber que el metabolismo se refiere a las reacciones químicas que tienen lugar en las células vivas: la formación de moléculas (anabolismo), su ruptura (catabolismo) o el cambio entre uno y otro, así como la oxidación y reducción de diversos átomos.

Las bacterias exhiben una gran variedad de tipos metabólicos.

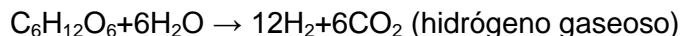
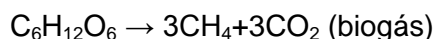
El metabolismo bacteriano se clasifica en base a tres criterios importantes: el origen del carbono, la fuente de energía y los donadores de electrones.

*Geobacter Sulfurreducens* tiene un metabolismo heterótrofo, es decir viven de los alimentos que roban a anfitriones vivos (parásitos) o de la materia orgánica muerta de todo tipo (saprófagos).

En los organismos aerobios, el oxígeno se utiliza como receptor de electrones. En los organismos anaerobios se utilizan como receptores de electrones otros compuestos inorgánicos tales como nitratos, sulfatos o dióxido de carbono. Esto conduce a que se lleven a cabo los importantes procesos biogeoquímicos de la desnitrificación<sup>7</sup>, la reducción del sulfato<sup>8</sup> y la acetogénesis,<sup>9</sup> respectivamente.

Debido a este metabolismo pueden reducir la toxicidad de varios metales pesados, incluyendo Uranio VI, Vanadio VI y Cromo VI.

Entre las reacciones estequiométricas principales del metabolismo microbiológico están:



Las bacterias fueron los primeros organismos que se encontraron con la capacidad de oxidar compuestos orgánicos y metales, (incluyendo hierro, metales radioactivos y compuestos derivados del petróleo) en compuestos benignos para el medio ambiente.

Las bacterias reductoras de azufre obtienen su energía reduciendo azufre a sulfuro de hidrógeno. Acoplan esta reacción a la oxidación de acetato, succinato o de otros compuestos orgánicos.

La reducción del sulfato es un proceso energético relativamente pobre usado por muchas bacterias Gram negativa y por organismos Gram positivos relacionados con *Desulfotomaculum* o con la archaea *Archaeoglobus*.

<sup>7</sup> La desnitrificación es la utilización del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) como receptor terminal de electrones. Es un proceso extensamente distribuido y utilizado por muchos miembros de Proteobacteria.

<sup>8</sup> La reducción del sulfuro es un proceso energético en el cual se obtiene como producto final metabólico sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

<sup>9</sup> La acetogénesis es un tipo de metabolismo microbiano que utiliza hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) como donador de electrones y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como receptor de electrones para producir acetato

Como producto final metabólico se obtiene sulfuro del hidrógeno ( $H_2S$ ). Algunas bacterias reductoras del sulfato autótrofas inusuales pueden utilizar el fosfito ( $HPO_3^-$ ) como donador de electrones o son capaces de generar dos compuestos a partir del azufre, en este caso un donador de electrones y un receptor de electrón) usando el tiosulfato ( $S_2O_3^{2-}$ ).

Su clasificación científica se resume en la Tabla 4.1:

***Geobacter Sulfurreducens***

Reino	Bacteria
División	Proteobacteria
Clase	Delta
Familia	Geobacteraceae
Género	Desulfuromonas
Especie	Geobacter Sulfurreducens
Dimensiones	Longitud: 0.1 a 0.9 $\mu m$ - Diámetro: 1 a 4 $\mu m$
Temperatura óptima de crecimiento	30° C
pH óptimo de crecimiento	7.2 a 7.5, aunque puede vivir en un pH entre 6.5 a 8.5
Nutrición	Heterótrofa

Tabla 4.1 Características Fisiológicas de la bacteria *Geobacter Sulfurreducens*.

Fuente: Bergey's Manual of systematic bacteriology.

Estas bacterias se agrupan formando una película muy delgada, también llamada biofilm.

Los biofilms se definen como comunidades de microorganismos que crecen embebidos en una matriz de exopolisacáridos (carbohidratos complejos producidos por las bacterias) y adheridos a una superficie inerte o un tejido vivo, el crecimiento en biofilms representa la forma habitual de crecimiento de las bacterias en la naturaleza.

La característica que más llama la atención de esta bacteria es la existencia de unos filamentos delgados llamados "Pili", los cuales funcionan como cables conductores de electrones, lo que evita el empleo de "transportadores" de electrones entre la bacteria y su medio. Estos "biocables" tienen una longitud de 10 a 20  $\mu\text{m}$  y un diámetro aproximado de 3 a 5 nm, es decir, 20 mil veces más delgados que un cabello, están formados de una proteína llamada pilina.

Se sabe que el Pili contiene citocromos del tipo C, las *Geobacter* tienen alrededor de 100 distintos citocromos de estas moléculas, cuando por lo general otros grupos poseen sólo cinco o seis.

Los citocromos son proteínas de color oscuro que desempeñan una función vital en el transporte de energía química en todas las células vivas. Las células animales obtienen la energía de los alimentos mediante un proceso llamado respiración aerobia; las plantas capturan la energía de la luz solar por medio de la fotosíntesis. Los citocromos intervienen en los dos procesos.

Los citocromos están incorporados en la membrana celular de las bacterias y en las membranas internas de las mitocondrias (orgánulos presentes en las células animales y vegetales) y de los cloroplastos (que sólo se encuentran en las células vegetales). Durante la respiración y la fotosíntesis, las moléculas de citocromo aceptan y liberan alternativamente electrones, que pasan a otro citocromo en una cadena de reacciones químicas llamada transferencia de electrones, que funciona con liberación de energía. Esta energía se almacena en forma de adenosín trifosfato (ATP). Cuando la célula necesita energía, la toma de sus reservas de ATP.

En la Figura 4.3 se puede apreciar el Pili de la bacteria



### Pili de *Geobacter Sulfurreducens*

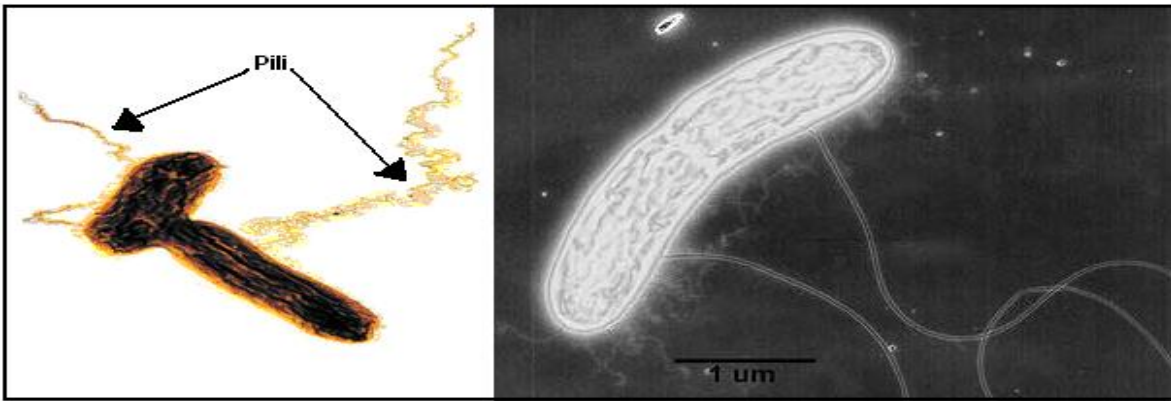


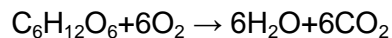
Fig. 4.3 La bacteria *Geobacter Sulfurreducens* donde se puede apreciar el Pili, o cables conductores.

Fuente: Geobacter Project

## 4.2 Generación de electricidad

La vida consiste en multitud de transformaciones metabólicas reguladas y el metabolismo energético en los seres vivos se basa en procesos de oxidación-reducción. Por ejemplo, en los seres humanos la energía química que necesitamos para vivir y movernos la obtenemos de la oxidación de los alimentos con el oxígeno, un proceso en el que participan cadenas transportadoras de electrones, es decir flujos de electrones que llegan hasta el oxígeno y los aniones de oxígeno resultantes se combinan con protones formando agua.

En la siguiente relación estequiométrica se observa como la glucosa se divide en moléculas de agua y dióxido de carbono.



En los organismos que son anaerobios y viven en ausencia de oxígeno el aceptor final del flujo electrónico es otra sustancia en lugar del oxígeno, la pregunta inmediata que surge es la utilización de esos flujos electrónicos para obtener de forma práctica alguna energía eléctrica.

Los organismos anaerobios obtienen la glucosa de los compuestos orgánicos que encuentran en su hábitat, la metabolizan y liberan electrones que finalmente trasladan a los metales en el suelo.

La transferencia extracelular de electrones es el proceso por el cual los electrones derivados de la oxidación de compuestos orgánicos son transferidos a la superficie externa de la célula para reducir un aceptor terminal de electrones.

Existen varios mecanismos para la transferencia de electrones:

- Transferencia con ayuda de mediadores externos
- Transferencia directa a un electrodo
- Transferencia por medio de cables bacterianos

#### Transferencia con ayuda de mediadores externos.

Un mediador es un compuesto que entra a la célula, acepta los electrones que se encuentran dentro y sale de la célula para donar los electrones al ánodo.

Una especie representativa de esta transferencia es la bacteria *Shewanella Oneidensis* (Fig.4.1).

Puede producir sus propios mediadores y así transferir electrones a metales localizados a más de 50µm de la superficie de la célula.

Estas bacterias pueden respirar empleando aceptadores de electrones, lo cual la convierte en una especie adaptable a ambientes variados y extremos.

Las *Shewanella* presentan ventajas para su empleo en CCM, pues son microorganismos de fácil crecimiento y manejo en un laboratorio.

Existen especies que también necesitan un mediador externo, pero este no es producido por el mismo microorganismo y son incapaces de transferir los electrones fuera de la célula y requieren mediadores que transporten los electrones al ánodo.

La desventaja de esos mediadores es que generalmente son tóxicos para los seres humanos, y por esta razón se debe evitar su uso para obtener electricidad en lugares expuestos al medio ambiente; así mismo, estos compuestos mediadores pueden producir ácidos, lo que disminuye la eficiencia y la potencia de la electricidad producida.

#### Transferencia directa de electrones al electrodo

Los electrógenos son microorganismos que conservan la energía permitiendo el crecimiento por la oxidación de compuestos orgánicos a dióxido de carbono y con la transferencia directa de electrones al ánodo de una CCM.

Entre los organismos más estudiados de esta clase encontramos a *Geobacter Sulfurreducens* y *Rhodofex*; las cuales poseen mecanismos de transporte de electrones internos y no requieren la ayuda de mediadores para liberar los electrones.

El empleo de estos microorganismos presenta varias ventajas, una de ellas es la oxidación completa de la materia orgánica, lo que garantiza una alta eficiencia.

Así como también sustentabilidad a largo plazo, existen reportes de CCM que han sido operadas por más de dos años sin disminuir su producción de electricidad.

Los microorganismos más estudiados son los de la familia *Geobacteraceae*, ya que su genoma se conoce completamente.

Otra bacteria de gran importancia es *Rhodoferax ferrireducens*, la cual es capaz de oxidar azúcares como glucosa, sacarosa (azúcar de mesa), fructosa, lactosa y xilosa (azúcar de la madera), todas ellas a dióxido de carbono.

#### Transferencia por medio de cables bacterianos o Pili

Los últimos estudios en microorganismos han descubierto la presencia de nanocables en algunos microorganismos electrógenos. Encontrándose en bacterias como *Geobacter Sulfurreducens*, *Synechocystis* y *Pelotomaculum thermopropionicum*.

El crecimiento en Fe (III) requiere de Pili (Fig. 4.3), los cuales son conductores de electrones y se encuentran localizados a un costado de la célula.

Estos Pili son los encargados de realizar la conexión eléctrica entre la célula y los óxidos de Fe (III) y deben estar en contacto directo con el ánodo de la CCM o formando una red entre las células para facilitar la transferencia de electrones a través de la biopelícula.

La conversión de energía química en eléctrica es posible en las llamadas celdas o pilas de combustible, una variante de éstas es la celda de combustible microbiana o CCM.

### **4.3 Celdas de combustible**

Una CCM, opera como una batería, genera electricidad combinando hidrógeno y oxígeno, sin combustión, por lo que se evita la generación de emisiones nocivas como sólidos en suspensión (generalmente carbón y plomo), óxidos de nitrógeno y azufre.

Convierten sustratos biodegradables directamente a electricidad, no se agotan, ni necesitan recargarse siempre que se les provea de combustible.

La pieza clave en la generación de una corriente eléctrica es el microorganismo empleado; así como también el tipo de inóculo, es decir el medio de comunicación. El inóculo puede provenir de lodos activados o anaerobios, aguas residuales (domésticas o industriales), sedimentos marinos o sedimentos acuáticos.

Como cualquier tipo de pila, consiste de un ánodo, un cátodo y una membrana o electrolito.

El ánodo alberga a las bacterias, es el borde negativo y se debe mantener libre de oxígeno.

El cátodo recibe los electrones y los transfiere al exterior de la celda, es el borde positivo, puede estar expuesto al aire. Esto se debe a que el oxígeno es el aceptor más adecuado para su empleo en una CCM, ya que posee un alto potencial de oxidación, disponibilidad, bajo costo y carece de residuos químicos.

El electrolito es una membrana semipermeable que separa al ánodo del cátodo y bloquea el paso de los electrones, limitando así la distribución de oxígeno del cátodo al ánodo.

El carbón es el material idóneo para emplearse como electrodo, pues es barato, fácil de manejar y posee un área de contacto definida.

### Funcionamiento de una Celda de Combustible Microbiana

Los microorganismos en la cámara ánodica oxidan los compuestos orgánicos como parte de su metabolismo, durante este proceso generan electrones y protones. Los electrones son transferidos al ánodo y transportados al cátodo a través de un circuito externo.

Este proceso genera protones, los cuales atraviesan la membrana o electrolito, llegando al cátodo y de este modo formar agua.

La Figura 4.4 nos muestra los componentes de una Celda de Combustible.

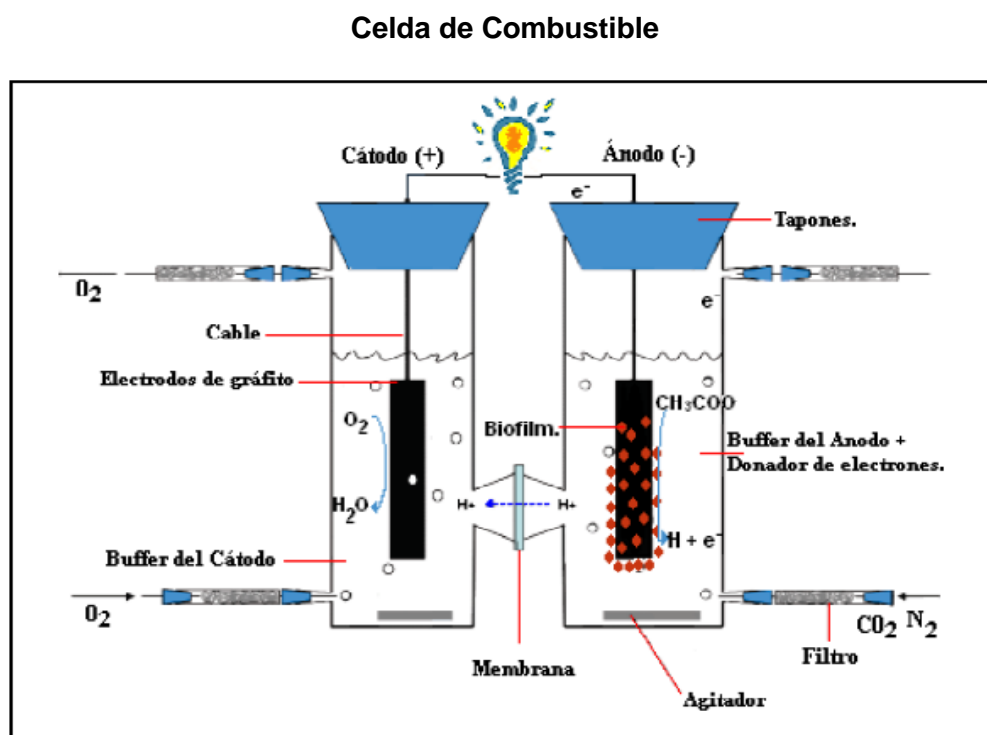


Fig. 4.4 Diagrama de una CCM

Fuente: Bioelectricidad. Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería.

Actualmente existen diversos tipos de celdas de combustible comerciales, en la Tabla 4.2 se resumen sus características.

La celda tipo PEM (Proton Exchange membrane) es la que presenta mejores condiciones para el desarrollo de una CCM.

### Celdas de Combustible

Tipo	Ácido Fosfórico (PAFC)	Carbonato Fundido (MCFC)	Óxido sólido (SOFC)	Membrana de intercambio de protones (PEM)
Eficiencia (Celda-Sistema) (%)	40- 85	60-85	60-85	60-40
Temperatura de operación (°C)	150-200	650	1000	80
Electrolito	Ácido fosfórico líquido	Solución líquida de litio o sodio	Circonio sólido	Ácido de polímero orgánico
Rendimiento [kW]	200	100	100	50-250
Ventajas	* Alta eficacia * Hidrogeno como combustible	*No requiere catalizadores *Variedad de combustibles a emplear	*Empleo en donde se requiera gran potencia (centrales generadoras e industriales)	*Poca corrosión * Silenciosos * Rapidez de arranque
Desventajas	*Alto costo del catalizador (platino) *Grandes dimensiones *Corrientes de baja magnitud	* Las altas temperaturas refuerzan la corrosión y la avería de componentes celulares	* Las altas temperaturas refuerzan la corrosión y la avería de componentes celulares	* Extremadamente sensible a la contaminación por CO <sub>2</sub> .

Tabla 4.2 Tipos de Celdas de combustible y sus características  
Fuente: Tipos de celdas de combustible

#### **4. 4 Resultados experimentales del empleo de *Geobacter Sulfurreducens* mediante CCM.**

El interés por estas bacterias, ha generado diversos estudios en diferentes partes del mundo, Argentina, Corea del Sur, México y obviamente EUA, son los que han mostrado los resultados obtenidos de un modo accesible, es por eso que las investigaciones que se muestran a continuación pertenecen a esos países.

##### **Estados Unidos**

Ésta implementación fue desarrollada por los investigadores: Magdalena Coppi, Stacy Ciuffo, Pablo Pomposiello, Steve Sandler, Cinthia Nunez, Daniel Bond, Susan Childers de la Universidad de Massachussets; Barbara Methe del Instituto de Investigaciones Genómicas, Carol Giometti del Laboratorio Nacional de Argonne y Julia Krushkal de la Universidad de Tennessee.

##### **Medio y condiciones de crecimiento**

El medio de crecimiento estaba compuesto de la siguiente manera (por litro):

0.1 g de KCl, (cloruro de potasio)

0.2 g de NH<sub>4</sub>Cl (cloruro de amonio)

0.6 g de NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, (fósforo diácido de sodio)

Todas las incubaciones se realizaron a 30° C.

El medio fue ajustado a un pH 6.8, y se añadieron 2 gramos de NaHCO<sub>3</sub> (bicarbonato de sodio), también se inyectó N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> (80:20) para remover oxígeno antes de colocarlo en botellas cerradas en el autoclave. El acetato sirve como el donador de electrones.

Para obtener células bien adaptadas para la utilización de electrones insolubles aceptantes, las células se mantuvieron en este medio modificado, con 100 a 120 mm de óxido de Hierro cristalino (III) como aceptor de electrones.

Las células entonces fueron transferidas (10% inóculo) tres veces en un medio con 40 mM fumarato como aceptor de electrones antes de la inoculación en los electrodos contenidos en las cámaras.

El medio de crecimiento en los electrodos fue modificado con 2.9 g de NaCl para reducir al mínimo las diferencias en la osmolaridad entre el fumarato de medio y el medio de crecimiento de electrodo, que carecía de fumarato.

El medio de crecimiento de reemplazo estaba compuesto (por litro):

0.1 g de KCl

0.6 g de NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>,

2.9 g de NaCl, (cloruro de sodio) y

2 g de NaHCO<sub>3</sub>. (bicarbonato de sodio)

### Electrodos y la cámara de electrodos

Se construyó una celda de cámara doble, la capa exterior fue de un diámetro exterior de 54 mm. y el conducto de vidrio fue de 22 mm de diámetro exterior ensambladas por una abrazadera de sujeción.

La parte superior de cada cámara fue sellada con una cúpula de vidrio esmerilado, sellado con silicón y cinta adhesiva gruesa.

Los puertos de muestreo fueron sellados con tapones de butilo, y se añadieron cierres de aluminio a los lados y la parte superior de cada cámara, mientras que los electrodos fueron introducidos desde la parte superior por un cable de alimentación a través de un tapón de butilo en el puerto de muestreo

El volumen de cada cámara, con el electrodo, fue de aproximadamente 225 ml de medio con un espacio libre de 150 ml.

Las cámaras fueron separadas con una membrana. Los electrodos para la CCM eran barras de grafito sin pulir, con las siguientes dimensiones: 2.5 x7.6x1.2 cm, empapados en 1 N HCl que se cambió todos los días hasta que el Fe (II) extraíble estaba por debajo de la detección. Después de cada uso, los electrodos se lavaron en 1 N HCl y NaOH 1 N para eliminar la contaminación de metal posible y de la biomasa.

Las conexiones se hicieron empleando conectores de rosca estancos No. 20 grado marino AWG grado atornillados en los agujeros perforados directamente en los electrodos de grafito. Los agujeros estaban llenos de epoxi de plata y sellado con el tipo epoxi 730.

Un electrodo de referencia se introdujo en el ánodo de trabajo de la cámara mediante un tapón de caucho butilo y fue esterilizado por inmersión del electrodo y el tapón de 5 NHCl durante 5 minutos, lavado en etanol, y permitiendo el secado del electrodo antes de ponerlo en un puerto de muestreo.

Cuando los electrodos estaban listos con un potencióstato<sup>10</sup>, ambas cámaras se llenaron idénticamente con los medios de crecimiento y la muestra del electrodo se lavó con una cámara de vapor de N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> (80:20). Como la cámara de electrodo auxiliar fue anaeróbica, se produjeron pequeñas cantidades de hidrógeno en el electrodo de muestreo, donados al electrodo de trabajo por los microorganismos. El lavado de esta cámara previene el paso de hidrógeno a partir de la difusión en la cámara de electrodo de trabajo y actúa como un donante de electrones para las bacterias.

Las mediciones de corriente y tensión para los estudios a largo plazo fueron recabados directamente de los resultados potencióstato cada 10 segundos con una unidad de energía "4SP Lab" conectada a una computadora Macintosh, y los datos se registran con el software Chart 4.0 (ADInstruments, Mountain View, California). La producción de energía de la célula de combustible fue medido por la tensión a través de una resistencia (500 Ω) en la CCM.

---

<sup>10</sup> Potencióstato: Es un instrumento que permite medir la corrosión de metales a través de probetas que se introducen en celdas electrolíticas.

Para el análisis corriente-tensión, se estabilizaron las celdas de combustible para equilibrar el circuito abierto por un periodo de 2 a 3 horas. La resistencia entre los electrodos se redujo por etapas, deteniéndose en periodos para cada resistencia de 5 minutos.

La corriente (mA) se integró en el tiempo y se convierte en electrones recuperado utilizando las siguientes conversiones:

$$C = A \times s$$

$$C = 6.24 \times 10^{18} \text{ electrones}$$

$$1 \text{ mol} = 6.02 \times 10^{23} \text{ electrones} = (96.500 \text{ C / mol}).$$

La corriente (en vigor con el electrodo de trabajo en ausencia de células, normalmente 0.03 a 0.04 mA) se determinó para cada experimento y se restará de todos los valores antes de calcular la recuperación total de electrones.

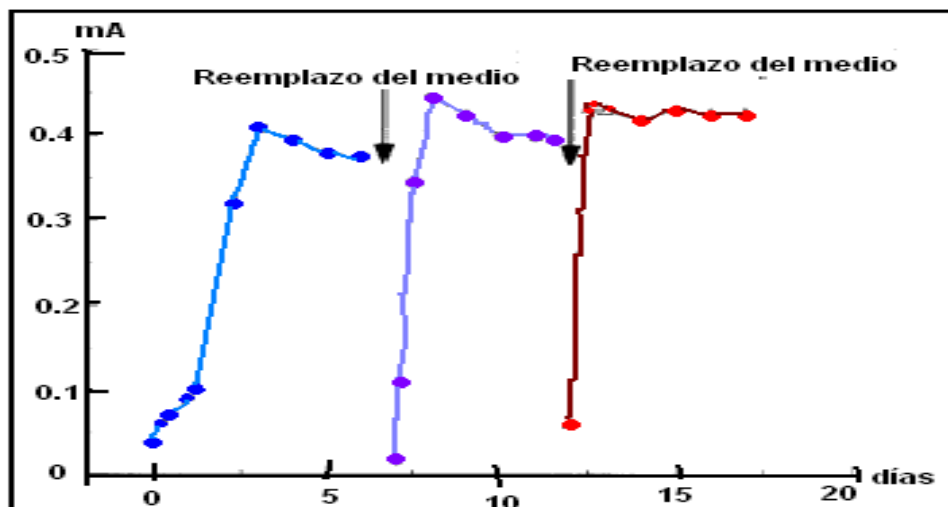
### Resultados

Los electrodos estaban conectados a través de un resistor fijo de 500  $[\Omega]$  a un electrodo similar en una segunda cámara estéril en la que se burbujea continuamente con el aire, y las cámaras estaban separadas por una membrana selectiva catódica.

Este aparato fue diseñado de celdas de combustible para ser similares a las condiciones utilizadas para cosechar electricidad a partir de sedimentos. Se proveyó de acetato de (5 mM) como el donante de electrones.

Los resultados obtenidos se muestran en la Gráfica 4.1

### Corriente obtenida empleando *Geobacter Sulfurreducens*



Gráfica 4.1 Corriente obtenida empleando *Geobacter Sulfurreducens*. La imagen corresponde a la investigación de la UMASS

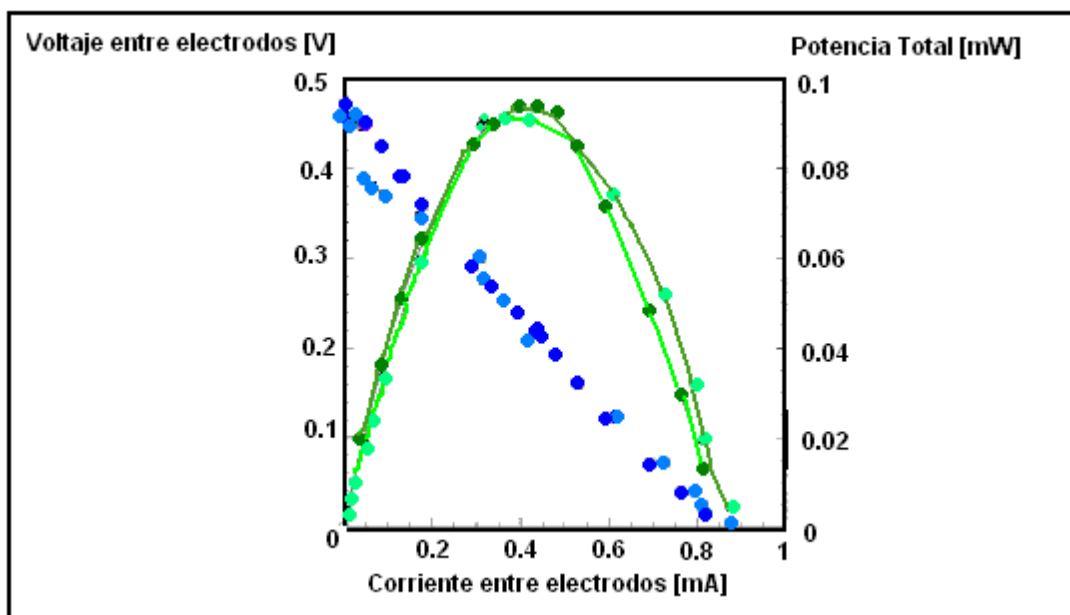
Fuente: Electricity production by *Geobacter Sulfurreducens* attached to electrodes



En la gráfica 4.2 se muestra el análisis de la tensión y la producción de energía (en un rango de densidades de corriente), después se realizó un cambio de medio, lo que da lugar a un perfil de corriente- potencia que era casi idéntico al que inicialmente se observó por primera vez.

En la Gráfica 4.2 podemos observar las magnitudes de la corriente (verde), voltaje (azul), los colores más oscuros representan el inicio del estudio, los colores claros indican el cambio de medio de crecimiento.

#### Resultados obtenidos empleando *Geobacter Sulfurreducens*



Gráfica 4.2 Valores eléctricos obtenidos con *Geobacter Sulfurreducens*  
Fuente: Electricity production by *Geobacter Sulfurreducens* attached to electrodes.

#### Corea del Sur

Este desarrollo fue en el Departamento de Ingeniería Química de Sungkyunkwan, realizada por Ngoc Trung Trinh, Jong Hyeok Park, and Byung-Woo Kim.

Las condiciones de cultivo fueron a 30° C, la corriente obtenida oscilo entre los 0.20 y 0.24 mA, y la densidad de energía máxima fue entre 418-470 mW/m<sup>2</sup>.

#### Argentina

Estos datos corresponden a los estudios realizados por los alumnos Alan Moran, Mathías Efron y Nicolás Azrak; así como los profesores Alejandro Rodríguez Miguel y Matías Gamba, de la E.T. N° 3 María Sánchez de Thompson, en Buenos Aires.

### Electrodos y cámara de electrodos

Se realizaron diseños de prototipo de celda combustible microbiana en 2D y 3D, los cuales constan de dos electrodos (Ánodo y cátodo) ambos de grafito, los cuales están separados por medio de una membrana, separando de esta forma los dos compartimientos, los diseños realizados se aprecian en la Figura 4.5.

#### Diseño de una CCM



Figura 4.5 Modelos tridimensionales de una CCM  
Fuente: Cosechando electricidad de las bacterias

Para la construcción de los electrodos, se utilizó en este primer prototipo, las pilas viejas comunes en desuso o pilas tipo Eveready a las que se le extrajo los núcleos. Se les lavó con ácido clorhídrico diluido en agua destilada en una proporción de 40% y 60% durante unas horas, luego se repitió el procedimiento pero en menor concentración de ácido clorhídrico por un tiempo similar al anterior, se les lavó y se les dejó secar. El proceso de construcción de electrodos se muestra en la Figura 4.6

#### Construcción de los electrodos

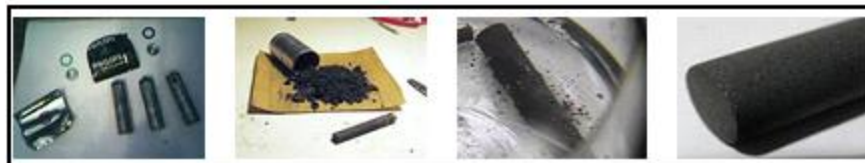


Figura 4.6 Electrodo a emplear en una CCM  
Fuente: Cosechando electricidad de las bacterias

Luego se armaron los electrodos utilizando los núcleos de pilas a los cuales se unió por medio de una soldadura de estaño a un cable de cobre, al que se revistió con Poxipol para protegerlo y darle forma al electrodo.

Luego se ensamblaron los tubos de PVC que darían forma a la celda de combustible según los diseños 3D anteriormente realizados, a éstos se les acopló acrílico en dos secciones: la primera entre los tubos de PVC, la segunda en donde se colocó la membrana separadora y se realizaron las perforaciones respectivas para introducir los electrodos y las mangueras, quedando de la siguiente forma.

El mediador difunde libremente a y desde el compartimiento anódico, transportando electrones liberados por el metabolismo microbiano hacia el ánodo. Debido al poco rendimiento obtenido con los primeros electrodos se decidió realizar una nueva

conformación de electrodos (ánodo y cátodo) y el cable que los unía. Se utilizaron barras de grafito (15.8 cm de alto, 3.8 cm de ancho y 1.2 cm de espesor) con un área superficial de 60 cm<sup>2</sup>.

La conexión de los electrodos se realizó como en los anteriores. En la primera fase de operación se realizaron las muestras de forma manual con un tester DT 9205 A y se midió la celda a voltaje directo obteniéndose como valor máximo de 0.35mV, luego se colocó una resistencia y se midió su corriente y su caída de voltaje. Los valores de corriente se calcularon con la ley de Ohm

Donde I = corriente (mA); V = voltaje (mV); R = resistencia (Ω). La potencia fue calculada con la ecuación:

$$P = \frac{I^2 \times R}{A} \quad I = V/R$$

Donde P = Potencia (mW/m<sup>2</sup>); I = corriente (mA); R= resistencia (Ω); A = área electrodos (m).

La carga generada (expresada en Coulomb) se calculó:

$$1 \text{ Coulomb} = 1 \text{ Ampere} \times 1 \text{ segundo}$$

Se debe tener en cuenta que las unidades de tiempo fueron convertidas a segundos y las de corriente a amperes. Durante los primeros 10 días el sistema no generó una corriente superior a 0.0100 mA.

En los últimos 15 días se generaron corrientes entre 0.0170 y 0.02 mA. Este comportamiento se debió a que durante los primeros 10 días (fase de crecimiento exponencial) los microorganismos requieren gran parte de la energía disponible, y que obtienen del sustrato, para alcanzar su desarrollo, representado por sus procesos de reproducción, crecimiento y movimiento.

A medida que el tiempo pasa se nota que el agua de la celda se va evaporando lentamente pero sucede para eso hay que colocar agua destilada y para ello se empleó primero un método lento y después directamente armamos un destilador.

Se realizó un segundo diseño totalmente de acrílico el cual tiene dos compartimientos de un litro, separados por 4 cm<sup>2</sup> de membrana Nafión 117 según el diseño 3D previo realizado.

El cátodo y el ánodo de la celda de combustible fueron hechos de papel de carbón TGP-H-030 (Toray), con una densidad de 0.40 g/cm<sup>3</sup> y una porosidad del 80%. Los electrodos (50 cm<sup>2</sup> por cada uno) fueron conectados con un alambre de cobre utilizando pegamento Epoxy conductor (plata).

Después de esto, el Epoxy conductor fue cubierto con Epoxy no conductor, para evitar la corrosión de cobre o de plata y la consecuente aparición de potenciales no relacionados

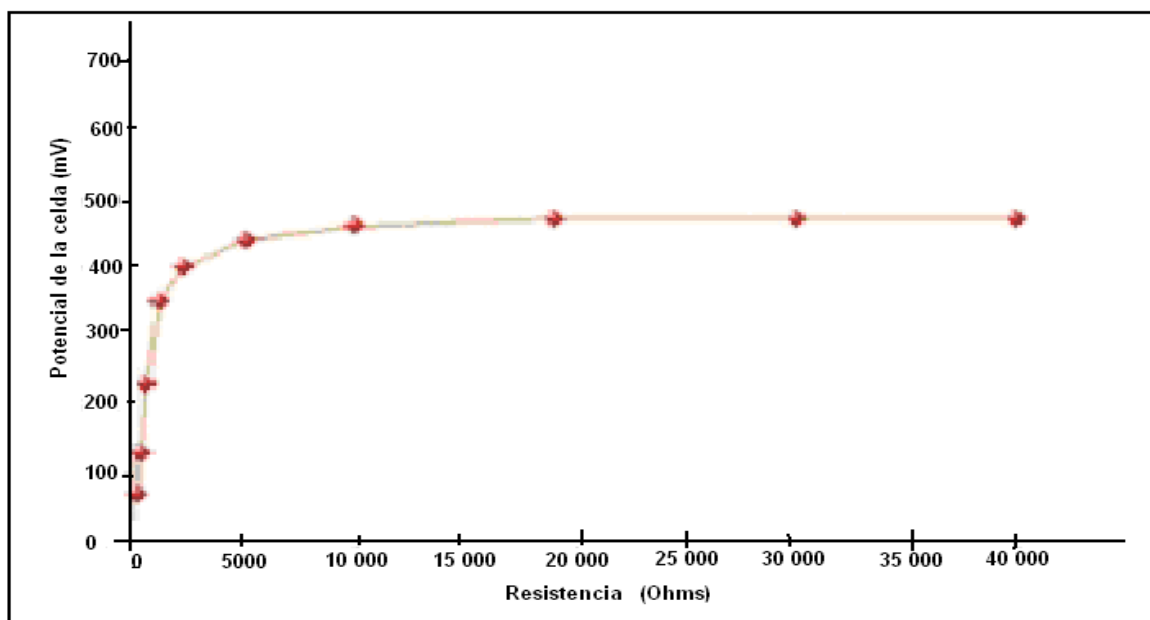
con el fenómeno biológico. Esta celda fue realizada en acrílico transparente de 6 mm de espesor, y tiene una tapa con tres agujeros de 0.6 cm de diámetro, permitiendo las conexiones para los electrodos, burbujeo de gas y la adición de reactivos y la toma de muestras.

Fue diseñado originalmente para funcionar con 100 cm<sup>2</sup> de membrana de Nafion, pero después fue modificado para utilizar una membrana de solamente 4 x 4 cm de Nafion, para reducir al mínimo los costos debido al alto precio del Nafion, quedando de la siguiente forma:

El volumen de cada compartimiento de la celda es de 1 L. Una película gruesa de acetato de 1 mm (amarilla) separa ambos compartimientos, para reducir al mínimo la membrana de Nafion necesitada para cada experimento. En este caso ambos electrodos están conectados a través de una resistencia para posibilitar la circulación de corriente por un circuito externo. El compartimiento catódico está aireado en tanto que el anódico está cerrado y anaeróbico. El compartimiento anódico se rellena con una solución rica en sustratos orgánicos y se inocula con bacterias capaces de utilizarlos. Como consecuencia de la acumulación de compuestos reducidos producto del metabolismo bacteriano se establece una diferencia de potencial a ambos lados de la membrana que es posible utilizar para la producción de energía eléctrica.

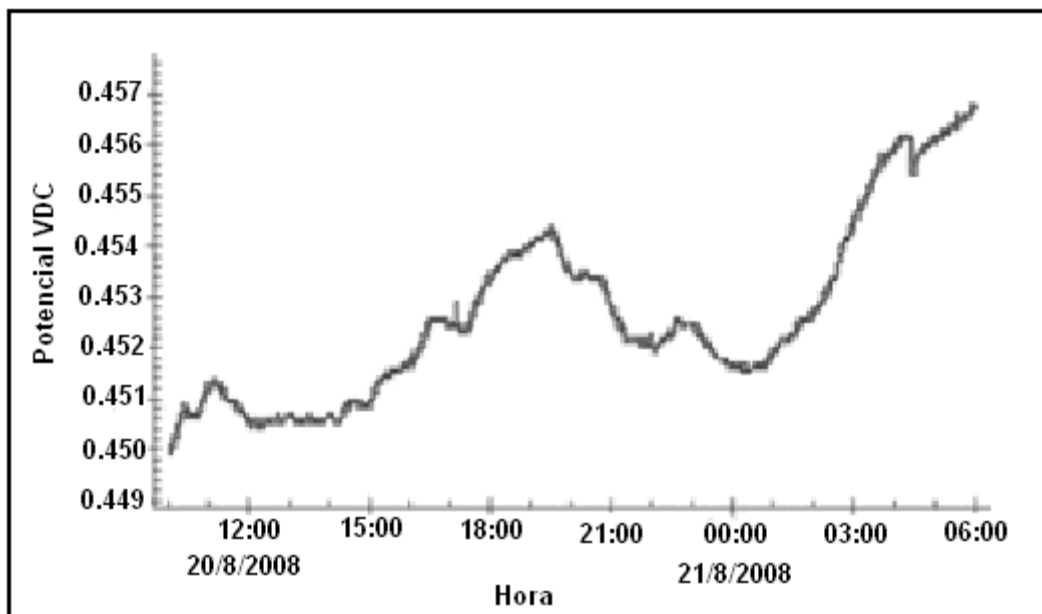
Las Gráficas 4.3 y 4.4 muestran los resultados de estas investigaciones.

### Voltaje obtenido variando las resistencias



Gráfica 4.3 Voltaje obtenido variando las resistencias  
Fuente: Cosechando electricidad de las bacterias.

### Voltaje obtenido en etapa de medición continúa



Gráfica 4.4 Voltaje obtenido en 16 horas  
Fuente: Cosechando electricidad de las bacterias

### México

En México se encontraron 2 diferentes estudios.

El primero correspondiente al equipo interdisciplinario de la Universidad del Mar en Oaxaca, la UAM Iztapalapa y el INPT de Toulouse, Francia<sup>11</sup>.

Se empleó una celda de PVC, con *Geobacter Sulfurreducens* provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales.

El tiempo de estudio fue de 31.5 días presentando un valor máximo de 0.741 V a los 25 días.

El segundo caso corresponde al Centro de Investigación Científica de Yucatan (CICY<sup>12</sup>), con las siguientes características:

Las bacterias fueron obtenidas de un cultivo proveniente del Centro de Investigación en Energía de la UNAM, el sustrato fue agua residual sintética, con un pH entre 5 y 6.

<sup>11</sup> Ana Villareal Rojas, Miguel Velázquez Manzanares, Carlos Estrada Vázquez, Bibiana Cercado Quezada. Universidad del Mar, San Pedro Pochutla, Puerto Ángel, Oaxaca; Sergio Revah, UAM Iztapalapa y Alain Bergel INPT Toulouse.

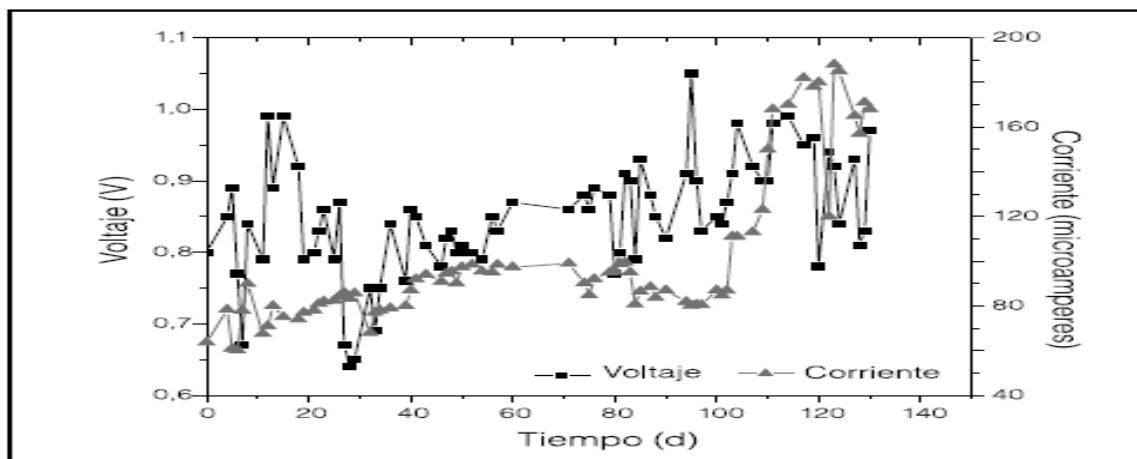
<sup>12</sup> Liliana Alzate Gaviria, Centro de Investigación Científica de Yucatan; Carmen Fuentes Albarrán, Alberto Álvarez Gallegos, Universidad Autónoma del Estado de México; P.J Sebastian, UNAM.

La CCM tenía un volumen de 350 ml, con electrodos de papel carbón, el tiempo de experimentación fue de 140 días.

El voltaje máximo fue de 1.05 V y una corriente de 0.170 mA.

Los resultados obtenidos por el CICY se muestran en la Gráfica 4.5

#### Generación de electricidad en etapa de medición continúa



Gráfica 4.5 Esta gráfica nos muestra los valores obtenidos de voltaje y corriente obtenidos empleando *Geobacter Sulfurreducens*.

Fuente: Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM

Como podemos observar los valores obtenidos de los parámetros eléctricos (voltaje, corriente y potencia) son similares.

En la Tabla 4.3 se muestran los valores obtenidos en los diferentes estudios mencionados.

**Resumen de empleo de *Geobacter Sulfurreducens***

	<b>MÉXICO</b>	<b>EUA</b>	<b>COREA</b>	<b>ARGENTINA</b>
Composición (por litro)	4g C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> 310 mg NH <sub>4</sub> Cl 130 mg KCl 4.97 g NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 2.75 g Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.1 g de KCl, 0.2 g de NH <sub>4</sub> Cl 0.6 g de NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> , 2 g NaHCO <sub>3</sub>	5 g NH <sub>4</sub> Cl 0.6 g NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 0.1 g NaHCO <sub>3</sub> 0.82 g acetato de sodio	-----
Temperatura [° C]	40	30	30	-----
Ph	Entre 5 y 6	6.8	-----	-----
Electrodos [cm]	Papel carbón (1.7 x 1.6)	Barras de grafito sin pulir(2.5 x7.6x1.2)	-----	15.8 x 3.8 x 1.2 Pilas lavadas previamente
Resistencia [Ω]	1000 y 600	500	1000	100 a 4000
Corriente máxima [mA]	0.08 y 0.17	0.45	0.24	0.02
Voltaje máximo [V]	0.08 y 0.102	0.225	0.24	0.35mV
Potencia máxima [mW/m <sup>2</sup> ]	335	880	470	701

Tabla 4.3 Resultados experimentales en diversas partes del mundo empleando *Geobacter Sulfurreducens*.

A pesar de estos resultados, actualmente ya se cuenta con el empleo de este tipo de celdas para diversos usos en la vida cotidiana. Estos usos se comentan en el siguiente Capítulo “5. Aplicaciones y usos actuales”.

## 5. Aplicaciones y usos actuales

Las CCM actualmente están bajo un proceso de constante investigación y desarrollo a nivel mundial, encontrando usos alternativos y diversas aplicaciones.

Las más importantes son:

- ✓ Celdas de Combustible
- ✓ Tratamiento de aguas residuales
- ✓ Biorremediación
- ✓ Biosensores
- ✓ Producción de hidrógeno

### 5.1 Celdas de Combustible Microbianas

La utilización de este tipo de celdas es un tema muy estudiado actualmente, existen varios casos para su aplicación, la mayoría tiene lugar en Estados Unidos, donde diversas universidades han realizado investigaciones.

Una de las aplicaciones más idealistas es su uso en el espacio, esto es porque los desperdicios generados por viajes espaciales son devueltos al planeta, sin embargo el ingeniero Matthew Silver director de los laboratorios IntAct en Cambridge, Massachusetts, propone el empleo de estas celdas para los viajes espaciales. Silver plantea que se utilicen los desechos humanos y otro tipo de basura orgánica durante un viaje a Marte.

El taller de procesamiento de residuos y recuperación de recursos (Waste Processing and Resource Recovery Workshop) estimó que una tripulación de seis astronautas produciría, siguiendo una dieta baja en hidratos de carbono, 10,55 kilogramos de residuos orgánicos al día durante un viaje a Marte, ante esta cantidad Silver calcula que se podría producir cerca de 1 kW de potencia constante en una CCM. La NASA ha estimado que los sistemas de soporte vital en una nave de este tipo precisarían aproximadamente 1 kW por persona durante un viaje a Marte.

El dióxido de carbono producido por la oxidación bacteriana de los residuos orgánicos podría utilizarse para cultivar algas en cámaras aisladas, obteniendo oxígeno molecular como subproducto. Las algas podrían usarse también para alimentar la célula de combustible, produciendo más electricidad.

Se pueden crear una especie de “cascada” basándonos en la utilización de diversos organismos y de este modo, incrementar la potencia de salida.



Silver comenta que las bacterias del género *Clostridium* metabolizan el azúcar, sin embargo no utilizan toda la energía disponible, y empleando *Geobacter* se pueden metabolizar algunos de los productos de desecho de algunos *Clostridium*.

Por otra parte, investigadores de la Universidad Estatal de Pennsylvania dirigidos por el ingeniero Bruce Logan (Figura 5.1) diseñaron un prototipo de CCM, la cual mide aproximadamente 15 cm de longitud, con un diámetro de 6 cm. Contiene 8 ánodos, y el electrodo es de grafito, con una superficie de 90 cm<sup>2</sup>, el cátodo es de carbón.

### Celda de Combustible Microbiana



Fig. 5.1 Dr. Bruce Logan (derecha), y el Dr. Hong Liu.

Fuente: Astroseti. Científicos superan la barrera de la fermentación.

Otro prototipo de celda es el que fabricó Peter Girguis (Fig. 5.2), profesor de Biología Organísmica y Evolutiva de la Universidad de Harvard, tiene el tamaño de una baraja de cartas.

La electricidad fluye desde el electrodo a la placa, y de ahí hacia el exterior por una de las dos tomas de corriente existentes en el lado opuesto. Una toma proporciona la energía para dispositivos eléctricos como las bombillas del tipo LED, mientras el otro tiene un cargador para un teléfono móvil.

Así mismo el también profesor de la Universidad de Harvard y fundador de la empresa Grameen Phone Ltd, Iqbal Z. Qadir, planea emplear las CCM de Girguis, esto, como parte de las actividades de generación de energía que está impulsando.

Aunque Girguis ha desarrollado varias celdas de combustible diferentes, todavía no ha empezado a producirlas.

### Celda de Combustible Microbiana



Fig. 5.2 Peter Girguis

Fuente. Generador eléctrico microbiano para cubrir necesidades básicas de electricidad.

La Universidad de Boston también ha desarrollado celdas de combustible, estas consisten en un balde con un ánodo de grafito, un cable como cátodo, fango con estiércol, una capa de arena la cual funciona como barrera de iones y agua salada, a la vez que actúa como electrolito.

Esta celda es capaz de generar energía suficiente para cargar dispositivos electrónicos y algunos LEDs.

Este prototipo, al ser de fabricación barata se planea aplicar en la zona sub-sahariana de África.

Investigadores de la Universidad Estatal de Ohio, en EUA han empleado microorganismos encontrados en el primer estómago de las vacas y de esta manera generar a través de una CCM aproximadamente 600 mV con tan solo medio litro de jugos estomacales de estos rumiantes.

En México investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM desarrollan celdas de combustible microbianas, el grupo académico del Laboratorio de Investigación en Procesos Avanzados de Tratamiento de Aguas, Unidad Juriquilla, encabezado por el doctor en ingeniería Germán Buitrón Méndez, tiene el objetivo de construir este tipo de instrumentos a nivel piloto a fin de degradar aguas residuales tóxicas, y en el mismo proceso obtener electricidad de manera limpia y renovable.

Entre las ventajas que ofrecen las CCM son:

- ✓ Operan de manera silenciosa
- ✓ El calor o subproducto obtenido puede utilizarse para proveer agua caliente.

- ✓ El mercado de aplicación es muy amplio, desde telecomunicaciones y dispositivos de baja potencia, como aparatos para sordera, detectores de humo, hasta su empleo en lugares sin acceso a la red eléctrica, o incluso en sitios afectados por desastres naturales.
- ✓ No requiere un catalizador
- ✓ Emplea productos de desecho como combustible
- ✓ No genera gases de efecto invernadero

Los inconvenientes que presentan son:

- Baja potencia
- Poca difusión entre la población
- Requiere de mayor investigación para su posible aplicación.

En la Figura 5.3 podemos observar cuatro celdas de combustible microbiana

### **Configuración de Celdas de Combustible Microbiana**



Fig. 5.3 Cuatro pilas de combustible microbianas a base de estiércol recargando una pila tamaño AA. Fuente: Diario NeoFronteras. Sección Ciencia y Tecnología. Septiembre 13,2005.

Entre otros desarrollos que emplean este tipo de celdas se encuentran dos aplicaciones de utilidad.

La primera es una lámpara creada por el diseñador holandés Marieke Correa (Figura 5.4).

El diseño consiste de emplea CCM y placas conductoras, las cuales toman el cobre, hierro y zinc presente en el suelo para proporcionar energía a un LED. Su mantenimiento requiere solo regarla con agua ocasionalmente.

### Lámpara de CCM

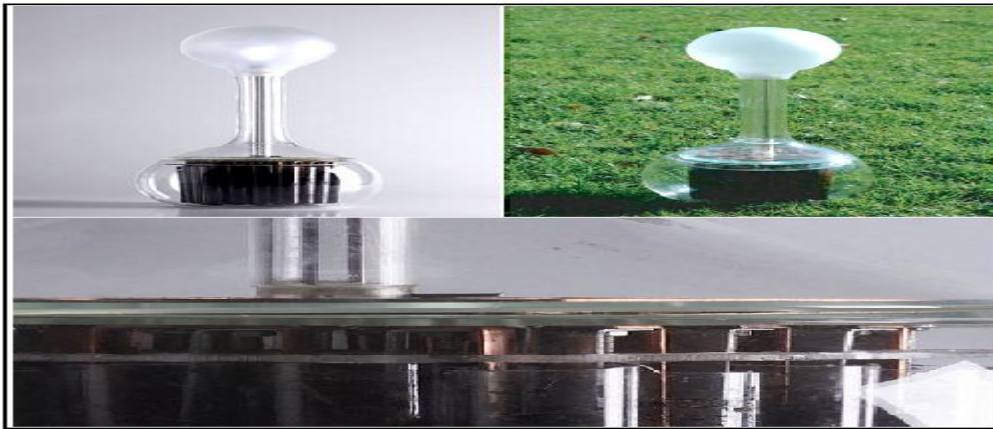


Figura 5.4 Una lámpara que emplea CCM para producir luz.  
Fuente: Sustentator. Lámpara potenciada por la tierra del suelo. Marzo 13,2009.

Otro invento que pareciera provenir de alguna película de ciencia ficción, es un robot que emplea moscas como fuente de energía.

El llamado EcoBot II (Figura 5.5), se alimenta de moscas, que una vez cazadas, son colocadas en CCM, donde las bacterias se encargan de descomponer los azúcares de los que está formada la quitina<sup>13</sup> de sus exoesqueletos (esqueleto externo), liberando así electrones que son aprovechados por el robot para su alimentación.

### EcoBot II

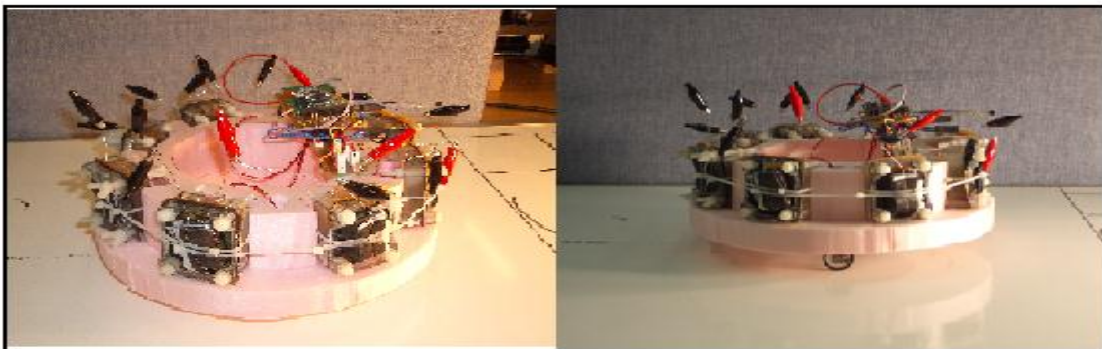


Fig. 5.5 Robot alimentado por CCM  
Fuente: Ecobot Project

<sup>13</sup> Quitina: Compuesto natural que forma parte del caparazón de insectos, crustáceos, moluscos y otros seres vivos que sirve como escudo entre el organismo y el exterior.

## 5.2 Tratamiento de aguas residuales

Hasta ahora es la aplicación más prometedora y que se ha investigado en diferentes instituciones.

Las aguas residuales están repletas de azúcares ricos en energía.

En EUA los investigadores de la Universidad Estatal de Pennsylvania, han experimentado con bacterias.

Según Bruce Logan, uno de los investigadores, han experimentado con muchas variedades de bacterias, pero se han centrado en las *Geobacter*, que se encuentran en muchos suelos y sedimentos.

“Las *Geobacter* pueden atacar casi cualquier contaminante de las aguas residuales y descomponerlo al 90 por ciento, y a la vez recuperar casi todos los electrones.”

Pero no solo EUA está trabajando en emplear *Geobacter* para depurar las aguas residuales, existe un proyecto multidisciplinario en Europa, llamado Interconexión Bacteriológica para la Conversión de Energía y Biorremediación (BacWire, por sus siglas en inglés) cuyo objetivo es descontaminar las aguas residuales y generar energía eléctrica limpia.

En este proyecto multidisciplinario participan, el grupo de Bioelectrogénesis de la Universidad de Alcalá, así como las Universidades de Alicante, Liverpool, Berna, el Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales (INTEMA) de Mar del Plata, así como la empresa danesa de celdas de combustible Electro-Cell.

"El sistema consta de unos electrodos, que introducimos en el agua residual con la bacteria *Geobacter*, que transforma los contaminantes y, a la vez que "respira" el electrodo en la misma forma en la que nosotros utilizamos el oxígeno, genera un flujo de electrones; es decir, electricidad. Estamos tratando de elucidar cuáles son los mecanismos por los que las bacterias transfieren los electrones a los electrodos, y así conectar *Geobacter* a ellos mediante nano-cables moleculares con el objetivo de diseñar pilas de combustible microbianas más eficientes que permitan aplicar esta nueva tecnología", comenta Abraham Esteve Núñez, bioquímico responsable de este grupo de investigación.

Por otra parte, el Laboratorio Nacional de Ingeniería Ambiental de Idaho, EUA, propone el empleo de la bacteria *Thermys brockuabys* descubierta en el Parque Nacional de Yellowstone, la cual genera una proteína que destruye el peróxido de hidrógeno y es 80 mil veces más efectiva que los procesos actuales para la descontaminación de las aguas residuales.

### 5.3 Biorremediación

La página de Internet All natural, en su sección de Biotecnología nos ofrece la definición más completa respecto a la biorremediación; y la define como "El uso de diversos organismos (principalmente bacterias, hongos y diversos vegetales) para la reducción de la contaminación del aire o de los sistemas acuáticos o terrestres."

Se utiliza la biorremediación para el tratamiento de aguas residuales, para descontaminar el aire o el agua, también para limpieza de suelos que hayan recibido contaminantes como hidrocarburos, procedentes sobre todo del petróleo. Asimismo se trata de eliminar o neutralizar los metales pesados e incluso residuos nucleares.

El Departamento de Energía de los Estados Unidos financió un proyecto para emplear *Geobacter Sulfurreducens* para reducir en un 70% el uranio disuelto en el agua de una mina llamada Rifle Mill, en Western Colorado, donde se extraía este mineral para las armas nucleares. El uranio disuelto en ese lugar contaminaba el agua subterránea, que luego fluía hacia el río Colorado. Este proceso duró 5 años, logrando una reducción de uranio VI a uranio IV.

Pero no solo *Geobacter* sirve como "limpiador", el gobierno norteamericano emplea también a la bacteria *Dehalococcoides ethenogenes*, con la cual limpian suelos contaminados con solventes industriales convirtiéndolos en compuestos inofensivos.

Esta bacteria es producida por Dupont y GE, las cuales son inyectadas directamente al suelo por medio de contenedores de acero.

En México se planea hacer una biorremediación similar con la Ex Hacienda El Hospital en Cuautla, Morelos.

El Hospital es una comunidad del municipio de Cuautla, donde en la década de los 60 se instaló una fábrica de pinturas la cual utilizaba plomo y cromo como materias primas para su producción de pinturas.

La especialista del Instituto de Biotecnología (IBt) de la UNAM, Katy Juárez López, usará la bioestimulación de ese microorganismo, se buscará financiamiento para construir pozos donde se inyectará acetato para incrementar la población de microorganismos, reducir el cromo y evitar la contaminación de los mantos freáticos.

### 5.4 Biosensores

Eduardo Corton, doctor de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (UBA), explica que "Los biosensores son instrumentos analíticos que combinan un detector o transductor para algún parámetro físico o químico (detectores de luz, temperatura, gases, etc.) con algún material biológico, generalmente células o enzimas".

Los primeros biosensores fueron empleados por los mineros del carbón; ellos llevaban a un canario u otra pequeña ave, y dado que su metabolismo es más elevado que el del hombre, le permitía detectar antes gases tóxicos o asfixiantes. Y se convertían en un sistema de alerta natural para el trabajador.

Actualmente se busca el empleo de bacterias y microorganismos para medir la calidad de agua, con la ventaja de que las cepas que se utilizan no transmiten enfermedades y son muy fáciles de cultivar.

Cortón, que dirige el proyecto Desarrollo de Biosensores para la Determinación de Parámetros de Calidad de Aguas Naturales y de Aguas Residuales, subsidiado por el Conicet y la UBA, expresa: "Si uno coloca microbios en una celda bacteriológica y los expone a un tóxico, su metabolismo suele deprimirse. Y esta merma puede medirse perfectamente".

El parámetro que sirve de medición es la electricidad generada por los microorganismos. Por este motivo, el equipo inmoviliza el cultivo de bacterias sobre la membrana de un electrodo que permite censar su actividad biológica.

"Si las bacterias respiran más de lo habitual, eso podría indicar la presencia de una mayor acumulación de nutrientes, es decir es posible que exista contaminación orgánica o cloacal." Explica Cortón.

Otra gran ventaja es que se pueden tener millones de bacterias reunidas y su peso sería de algunos pocos gramos, con lo cual se puede tener un sistema portátil.

El funcionamiento es el siguiente: Las bacterias están adheridas a un electrodo de dióxido de carbono, que mide permanentemente la respiración de estos microorganismos. Si éstos muestran mayor respiración que la habitual, ello puede indicar que en el medio exista mayor acumulación de "alimento" para las bacterias, como ocurre cuando existe contaminación orgánica o cloacal.

El electrodo de dióxido de carbono es el sistema de transducción que convierte la señal bioquímica que producen los microorganismos en una señal eléctrica. En el laboratorio, el doctor Cortón y su equipo para conformar un biosensor cuentan con cultivos de microorganismos y electrodos como elementos principales. La señal eléctrica es medida y registrada en forma continua, y almacenada en la computadora mediante un sistema de adquisición de datos.

"Uno de los objetivos propuesto por estos científicos es que cada vez requiera menos tiempo y sea más eficiente a menor costo", finaliza Cortón.

En la Figura 5.6 se puede apreciar la imagen de un Biosensor.

## Biosensor

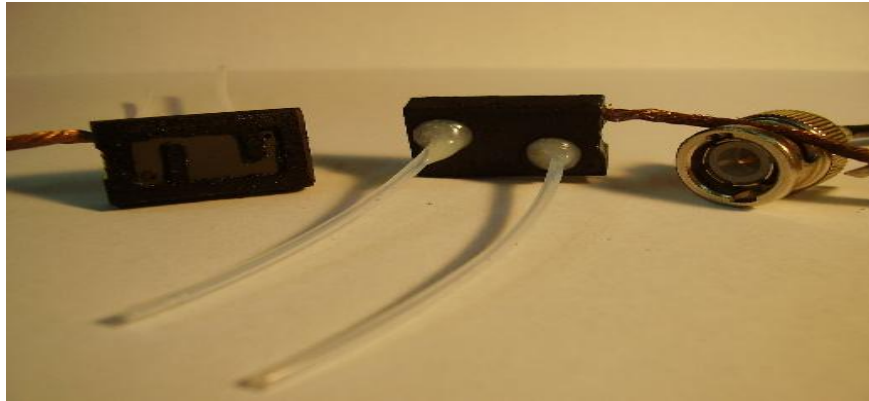


Fig. 5.6 Biosensor

Fuente: Diario La Nación, Sección Ciencia y Salud. Junio 16,2006.

En este rubro EUA también lleva la delantera, pues emplea CCM para alimentar sensores en el océano para detectar terremotos o submarinos.

Un equipo de investigadores de la Universidad de Nebraska, en EUA, dirigidos por el profesor Ravi Saraf construyó un dispositivo electrónico capaz de detectar el cambio de humedad en el ambiente, empleando una bacteria del tipo *Bacillus Cereus*, la cual es bañada en oro para después introducirse en un chip de silicio.

La bacteria se contrae o se dilata como respuesta a la humedad, y es capaz de sobrevivir en un entorno sin nutrientes durante un mes, y seguir dilatándose aún después de muerta.

El funcionamiento de este chip se debe a que las bacterias se agrupan formando un puente entre los electrodos; el aumento en la humedad provoca la dilatación de la bacteria, con lo que la distancia entre las partículas cercanas se hace mayor y reduce el flujo de corriente. Por el contrario la reducción de la humedad hace que el flujo de la corriente aumente.

### 5.5 Producción de hidrogeno

Finalmente se describe la producción de hidrógeno gaseoso.

El objetivo de esta obtención de hidrógeno es para ser empleado como energético, ya que no existen fuentes naturales de este gas.

Un método de extracción es mediante el proceso de electrólisis, pero deben existir condiciones especiales de presión y temperatura, sin contar que este proceso consume mucha energía.



En las CCM los microbios pueden romper compuestos orgánicos y generar electricidad directamente. Si los electrones que portan la carga eléctrica se combinan con los protones que los microbios producen en el proceso se podría pensar en la producción de hidrógeno gaseoso en una “electrolisis microbiana”.

Bruce Logan y sus colaboradores de Universidad Estatal de Pennsylvania han modificado uno de estos sistemas para producir hidrógeno directamente. Empleando bacterias del género *Geobacter* y sustancias orgánicas como glucosa, vinagre y celulosa entre otros compuestos, además de introducir una pequeña corriente eléctrica desde el exterior del sistema.

Las bacterias situadas en el electrodo positivo de la CCM cámara rompen las moléculas orgánicas produciendo protones y electrones. Los protones se difunden hacia el electrodo negativo de la segunda cámara a través de la membrana, mientras que los electrones viajan por fuera a través un cable de un electrodo a otro ayudados por una fuente de voltaje externa.

Una vez se recombinan en la segunda cámara, se desprende el hidrógeno gaseoso.

El empleo de hidrógeno como fuente de combustible ayudaría a disminuir el consumo de petróleo y gas natural, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero

En el Laboratorio Nacional de Brookhaven, Texas, EUA, el biólogo Daniel van der Lelie, informa que en sus montajes experimentales utilizando bacterias *Thermatoga neapolitana*, las alimentó con glucosa simple como materia prima, y éstas generaron cantidades de gas hidrógeno a temperaturas entre 70 y 85° C, y a presión atmosférica normal.

En colaboración con Paul King, científico del Laboratorio Nacional de Energías Renovables, el equipo de Brookhaven está estudiando los mecanismos mediante los cuales la *Thermatoga neapolitana* puede evitar la toxicidad del oxígeno durante la producción del hidrogeno. Entender la tolerancia al oxígeno de la *Thermatoga neapolitana* facilitará su aplicación práctica para producir hidrogeno a partir de materias primas agrícolas.

El funcionamiento de una Celda de Combustible Microbiana capaz de producir Hidrógeno se muestra en la figura 5.7

### Electrólisis microbiana

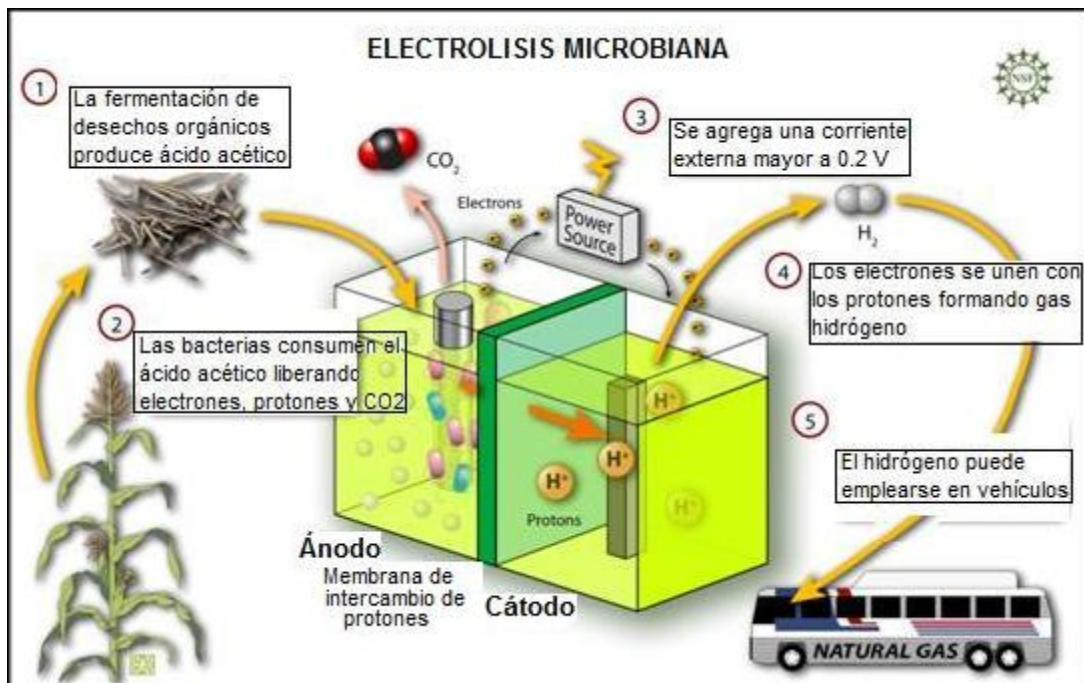


Fig. 5.7 Funcionamiento de una CCM para producir hidrógeno gaseoso.  
Fuente: Solo Ciencia. Biología

## Conclusiones

Después de la realización de esta tesis, podemos afirmar que se cumplió el objetivo de informar sobre las nuevas alternativas de generar electricidad con los llamados biocombustibles, principalmente con las bacterias de la familia *Geobacteraceae*.

En los últimos años el avance en la investigación de biocombustibles ha mostrado mucho crecimiento en poco tiempo, a tal grado que actualmente se están buscando aplicaciones para los llamados “biocombustibles de tercera generación”.

Durante el desarrollo del presente trabajo se observó que estas investigaciones se están llevando a cabo por profesionales en el campo de la biotecnología, sin embargo encuentro conveniente que los ingenieros se unan a este tipo de investigaciones.

Este tipo de generación requiere de mayores recursos económicos y humanos para su investigación y difusión, pues representa un campo con un gran potencial de aplicación.

La ingeniería es una ciencia exacta que requiere de resultados puntuales y tangibles, por lo que afirmamos que el uso de bacteria debe complementarse con otras alternativas para satisfacer las necesidades energéticas requeridas actualmente por los consumidores.

Ante los resultados obtenidos en los diversos desarrollos aquí mostrados se sugiere el empleo de bacterias, no únicamente *Geobacter Sulfurreducens*, en aplicaciones que demanden baja potencia o cuyos requerimientos energéticos sean mínimos, como puede ser el caso de alimentación a dispositivos móviles, plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o incluso alimentación a dispositivos electrónicos con fines médicos.

Actualmente en México encontramos investigaciones en el ámbito de la biorremediación éstas se llevan a cabo en Instituto de Biotecnología de la UNAM, por parte de la Dra. Katy Juárez, así mismo ha investigado la producción de bioelectricidad empleando *Geobacter*.

El Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY) dirigido por la Dra. Liliana Alzate Gaviría, ha empleado *Geobacter Sulfurreducens* en el desarrollo de CCM.

También en la Universidad Autónoma de Yucatán, la Dra. Xochitl Domínguez Benetton trabaja en producción de biocombustibles y bioelectricidad.

Enumerar las investigaciones de diversas universidades sería una tarea interminable, sin embargo se reafirma la búsqueda de contenidos e información se encuentra relacionada a desarrollos llevados a cabo especialistas en ciencias como biología, química y sus diversas ramas de conocimiento.

Otro de los aspectos a considerar es la búsqueda de aplicaciones en las que estas bacterias se encuentren en su hábitat natural, a fin de reducir los costos de implementación de una CCM.

Una ventaja en el empleo de *Geobacter Sulfurreducens* dentro de las CCM, es que pueden ser tan costosas como se desee, ya que se pueden emplear métodos y materiales para mantenerlas en ambientes ánoxicos, o tan sencillas como una lata de refresco o cualquier otro recipiente cerrado, pues son capaces de vivir en ambientes aerobios.

Una ventaja de este tipo de fuentes es la no dependencia a recursos que pertenezcan a otros países, propiciando el desarrollo económico de la región.

Esta bacteria ha sido investigada desde 1987 sin que hasta la fecha se reporten casos de peligrosidad en su manejo.

## BIBLIOGRAFÍA Y MESOGRAFÍA

### **Capítulo 1. Dependencia a los combustibles fósiles como fuente principal de generación de energía eléctrica en México.**

Manual de Energía. MORENO Coronado Tanya.

PROSPECTIVA DEL SECTOR ELÉCTRICO 2008-2017, SENER, Secretaría de planeación energética y desarrollo tecnológico

### **Capítulo 2. Centrales de generación de energía eléctrica actualmente en México empleando fuentes renovables**

Las fuentes de Energía. Comisión Federal de Electricidad, México DF, año 2000.

CFE y la electricidad en México:

<http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/queEsCFE/Paginas/CFEylaelectricidadenM%C3%A9xico.aspx>

Comisión Federal de Electricidad. Estadísticas:

<http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/queEsCFE/estadisticas/Paginas/Indicadoresdegeneracion.aspx>

Cuaderno Energías renovables para todos; Hidráulica:

[http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno\\_HIDRAULICA.pdf](http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_HIDRAULICA.pdf)

Energías hidroeléctricas:

<http://www.arghys.com/contenidos/hidroelectricas-energias.html>

Asociación Amigos del Legado Andalusi:

<http://www.amigoslegadoandalusi.com/diptico-viajesiria.htm>

Impacto ambiental causado por las centrales hidroeléctricas:

<http://hidroimpacto.blogspot.com/>

Informe de Geotermia. Instituto de Investigaciones Eléctricas:

<http://www.iie.org.mx/geotermia/informe1.doc>

El Heraldo ciudadano. Energías renovables. La Energía Geotérmica 2/2. Julio 10,2009:

<http://www.elheraldociudadano.com.mx/2009/07/10/energias-renovables-la-energia-geotermica-22/>

Cuaderno Energías renovables para todos; Eólica:

[http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno\\_EOLICA.pdf](http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_EOLICA.pdf)

Cuaderno Energías renovables para todos; Solar Fotovoltaica:

[http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno\\_FOTOVOLTAICA.pdf](http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_FOTOVOLTAICA.pdf)

Cuaderno Energías renovables para todos; Solar Térmica:

[http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno\\_SOLARTERMICA.pdf](http://www.energias-renovables.com/Productos/pdf/cuaderno_SOLARTERMICA.pdf)

Energía Solar:

[http://www.energiasrenovables.ciemat.es/suplementos/sit\\_actual\\_renovables/solar.htm](http://www.energiasrenovables.ciemat.es/suplementos/sit_actual_renovables/solar.htm)

### Capítulo 3. Nuevos Combustibles

Los biocombustibles:

<http://www.biodisol.com/que-son-los-biocombustibles-historia-produccion-noticias-y-articulos-biodiesel-energias-renovables/>

La producción de biodiésel:

<http://www.biodisol.com/biodiesel-que-es-el-biodiesel-definicion-de-biodiesel-materias-primas-mas-comunes/la-produccion-de-biodiesel-materias-primas-procesos-calidad/>

El Inti realiza estudios de prefactibilidad para instalar un biodigestor en Colón:

<http://lacobachadibujo.com.ar/adcadisweb/news/2.html>

Biocombustibles: incertidumbre. Energía a debate Año 5. Tomo V. No. 34, Septiembre-October 2009.

Las grandes bondades de la biomasa y del biogás:

<http://www.energiaadebate.com/Articulos/Noviembre2008/AriasNov2008.htm>

Biogás. El combustible alternativo:

<http://erenovable.com/2009/07/27/biogas-el-gas-combustible-alternativo/>

Biocombustibles de segunda generación: sopesando los riesgos:

<http://www.energiaadebate.com/Articulos/Noviembre2009/SarmientoNov09.htm>

Las algas:

<http://taninos.tripod.com/algas.htm>

Científicos desarrollan biocombustible a partir de virutas de madera:

[http://www.inifap.gob.mx/quienes\\_somos/noticias/cientificos\\_desarrollan\\_biocombustible.pdf](http://www.inifap.gob.mx/quienes_somos/noticias/cientificos_desarrollan_biocombustible.pdf)

Desventajas de la biomasa:

<http://www.renovables-energia.com/2009/03/desventajas-de-la-biomasa/>

Ventajas y desventajas del biodiésel:

<http://www.yoteca.com/pg/Informacion-de-ventajas-y-desventajas-del-biodiesel.asp>

España: Ventajas y desventajas del bioetanol:

[http://www.freshplaza.es/news\\_detail.asp?id=3899](http://www.freshplaza.es/news_detail.asp?id=3899)

Biogás:

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/ENERGIA22/HTML/articulo04.htm> Biogas

Biodigestor:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Biodigestor>

Pastos silvestres:

<http://www.eldia.com.ar/edis/20091018/revistadomingo24.htm>

Sacan a la jatropha del olvido para producir biodiesel

[http://www.imagenagropecuaria.com/articulos.php?id\\_art=669&id\\_sec=20](http://www.imagenagropecuaria.com/articulos.php?id_art=669&id_sec=20)

Termitas ticas abren puerta a nuevos biocombustibles:

[http://www.nacion.com/In\\_ee/2007/noviembre/25/aldea1328965.html](http://www.nacion.com/In_ee/2007/noviembre/25/aldea1328965.html)

Obtienen en la UNAM etanol con bacterias y residuos agroindustriales:

[http://www.portalautomotriz.com/content/site/module/news/op/displaystory/story\\_id/10771/format/html/](http://www.portalautomotriz.com/content/site/module/news/op/displaystory/story_id/10771/format/html/)

Biodiésel en el mundo:

<http://www.eco2site.com/informes/biodiesel-m.asp>

Usos del biodiésel, además de combustible para coches:

<http://www.deautomoviles.com.ar/articulos/combustibles/biodiesel.html>

Ahorro de energía. Bioetanol:

[http://www.enreparaciones.com.ar/ahorro\\_de\\_energia/bioetanol.php](http://www.enreparaciones.com.ar/ahorro_de_energia/bioetanol.php)

Alistan combustible a base de algas:

<http://www.planetaazul.com.mx/www/2009/03/14/alistan-combustible-a-base-de-algas/>

Combustible de algas:

<http://avances-tecnologicos.euroresidentes.com/2008/03/combustible-de-algas.html>

Científicos norteamericanos desarrollan biocombustible a partir de virutas de madera:

<http://www.laflecha.net/canales/ciencia/cientificos-norteamericanos-desarrollan-biocombustible-a-partir-de-virutas-de-madera/>

## Capítulo 4. Geobacter Sulfurreducens

BERGEY, David Hendricks: Bergey's manual of systematic bacteriology, Ed. Williams & Wilkins, 1984, Pag. 663.

SINGLETON Paul: Bacterias y biología. Ed. Acribia 2ª edición en español

Bacterias:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Bacteria>

Bacterias Productoras de electricidad:

<http://www.semico.es/pdf/actualidad/45/Geobacter.pdf?PHPSESSID=4a437f1379284b076c0f662cfffbb964>

Cosechando electricidad de las bacterias:

<http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/GCBA/1384/historia.html>

Bacterias secuenciadas:

<http://www.acapulcoenlinea.com.mx/portal/index.php/negocios/tecnologia/665-bacterias-secuenciadas>

Estudian en la UNAM bacterias que generan electricidad y biorremedian los suelos:

<http://sabersinfin.blogspot.com/2008/05/estufian-en-la-unam-bacterias-que.html>

Manual sobre vigilancia ambiental:

<http://www.cepis.org.pe/bvsea/e/fulltext/vigila/vigila.html>

Bacterias eléctricas vivas:

[http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/energia\\_y\\_ciencia/2006/08/07/154461.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2006/08/07/154461.php)

Cosechan energía a partir de bacterias:

<http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=172>

Tipos de celdas de combustible

<http://www.muscularmente.com/tecnologia/celdascombust.html>

Power from the deep: Microbially Powered fuel cells tap into an abundant ecosystem energy circuit: <http://www.geobacter.org/press/2002-07-01-natbiotech.pdf>

Celdas de Combustible.

[http://www.enedis.com.ar/GenDisProdSer/Detail/0,2378,ai\\_IcnAssoc\\_10953\\_ai\\_IcnLangu\\_age\\_202,00.html](http://www.enedis.com.ar/GenDisProdSer/Detail/0,2378,ai_IcnAssoc_10953_ai_IcnLangu_age_202,00.html)

Así funciona una pila de combustible:

<http://www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=50>



Generación de electricidad a partir de una celda de combustible microbiana tipo PEM:  
<http://www.scielo.org.ve/pdf/inci/v33n7/art08.pdf>

Electricity production by *Geobacter Sulfurreducens* attached to electrodes.  
<http://www.geobacter.org/publications/12620842.pdf>

Increased generation of electricity in a microbial fuel cell using *Geobacter Sulfurreducens*  
<http://www.springerlink.com/content/8x142505h57u60n1/fulltext.pdf?page=1>

Bioelectricidad:  
[www.smbb.com.mx/revista\\_2009\\_3/bioelectricidad.pdf](http://www.smbb.com.mx/revista_2009_3/bioelectricidad.pdf)

Electricidad de microbios:  
[http://servicios.laverdad.es/cienciaysalud/4\\_2\\_21.html](http://servicios.laverdad.es/cienciaysalud/4_2_21.html)

## Capítulo 5. Aplicaciones y usos actuales

Energía en el espacio: ¿La hora de una solución biológica?:  
<http://astrobiologia.astroseti.org/astrobio/lista.php?tema=ORIGENES>

Científicos superan la barrera de la fermentación:  
[http://www.astroseti.org/noticia\\_1186\\_cientificos\\_superan\\_barrera\\_fermentacion.htm](http://www.astroseti.org/noticia_1186_cientificos_superan_barrera_fermentacion.htm)

Generador eléctrico microbiano para cubrir necesidades básicas de electricidad:  
<http://www.solociencia.com/biologia/08013104.htm>

Las promesas de la quitina:  
[http://www.ambienteplastico.com/artman/publish/article\\_769.php](http://www.ambienteplastico.com/artman/publish/article_769.php)

Sistemas de energía renovable basados en células de combustible microbianas:  
<http://neofronteras.com/?p=184>

Lámpara potenciada por la tierra del subsuelo:  
<http://sustentator.org/blog-es/2009/03/lampara-potenciada-por-la-tierra-del-suelo/>

Energy Autonomy: Towards a truly Autonomous Robot:  
<http://www.ias.uwe.ac.uk/Energy-Autonomy-New/New%20Scientist%20-%20EcoBot%20II.htm>

Responsabilidad ambiental por partida doble:  
<http://www.invdes.com.mx/activacion-inf.asp?CategorialD=1&MesID=3&YearID=16&SubCategorialD=2089>

Bacterias que producen energía a través de aguas residuales:  
<http://sustentator.org/blog-es/2009/09/bacterias-energia-aguas-residuales/>

Microbial fuel cell cleans water, generates electricity:

<http://live.psu.edu/story/5717>

Bacterias eléctricas:

<http://www.madrimasd.org/informacionidi/noticias/noticia.asp?id=41640>

Biorremediación:

<http://allnatural.iespalomeras.net/biotecnologia/bioremediacion.html>

Electricidad de microbios:

[http://servicios.laverdad.es/cienciaysalud/4\\_2\\_21.html](http://servicios.laverdad.es/cienciaysalud/4_2_21.html)

La fortaleza de la vida:

<http://axxon.com.ar/zap/210/c-Zapping0210.htm>

Contaminación olvidada en El Hospital

<http://www.jornada.unam.mx/2005/11/21/056n1soc.php>

Estudian en la UNAM bacterias que generan electricidad y biorremedian los suelos:

[http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2008\\_293.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2008_293.html)

El uso de los microbios:

<http://resetyourmind.blogia.com/2006/081401-el-uso-de-los-microbios.php>

Cuando las bacterias “trabajan” para el hombre:

[http://www.fcen.uba.ar/prensa/noticias/2006/noticias\\_18jul\\_2006.html](http://www.fcen.uba.ar/prensa/noticias/2006/noticias_18jul_2006.html)

Intentan medir la contaminación del agua... con bacterias:

[http://www.lanacion.com.ar/nota.asp?nota\\_id=815024](http://www.lanacion.com.ar/nota.asp?nota_id=815024)

Fabrican el primer chip con una bacteria incorporada:

[http://www.tendencias21.net/Fabrican-el-primer-chip-con-una-bacteria-incorporada\\_a759.html](http://www.tendencias21.net/Fabrican-el-primer-chip-con-una-bacteria-incorporada_a759.html)

Descubren sistema microbiano para producir hidrógeno:

[http://www.gabinete.org.ar/Febrero\\_2008/microbios.htm](http://www.gabinete.org.ar/Febrero_2008/microbios.htm)

Bacteria productora de hidrógeno, resistente al oxígeno:

<http://www.solociencia.com/biologia/06102301.htm>