

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA



“FUENTES DE ENERGÍA Y SUS APLICACIONES”

Por:

ADONIRAM ESCALANTE PÉREZ

MONOGRAFÍA

Presentado como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Saltillo, Coahuila, México

Marzo de 2015

DEPARTAMENTO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

“FUENTES DE ENERGÍA Y SUS APLICACIONES”

MONOGRAFÍA

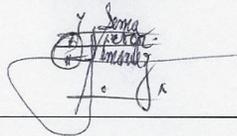
POR:

Adoniram Escalante Pérez

Que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito parcial para
obtener el título de:

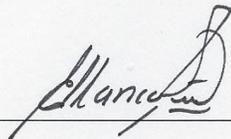
INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

APROBADA



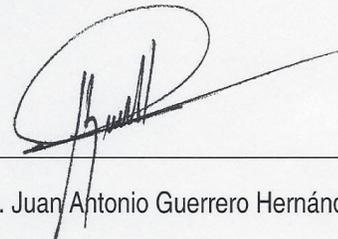
M.C. Héctor Uriel Serna Fernández

ASESOR PRINCIPAL



M.C. Elizabeth de la Peña Casas

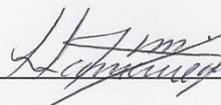
ASESOR



M.C. Juan Antonio Guerrero Hernández

ASESOR

Universidad Autónoma Agraria
“ANTONIO NARRO”



Dr. Luis Samaniego Moreno

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN

DE INGENIERÍA



Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Marzo de 2015

Agradecimientos

En primer lugar a **Dios** por su amor infinito e incondicional; al enviar a su hijo a morir por mí en la cruz del calvario para darme salvación, cuidarme, darme vida, salud y la oportunidad de lograr una de mis metas.

A mi “**Alma Mater**” que me dio cobijo durante la trayectoria y estancia en Saltillo. Hoy se hace realidad uno de mis más grandes sueños “gracias UAAAN por darme las herramientas necesarias para lograrlo y formarme profesionalmente”.

Al M.C. **Héctor Uriel Serna Fernández**, por asesorarme en esta monografía y su apoyo incondicional dentro y fuera de las aulas, sus críticas y consejos que fueron de mucha ayuda durante la estancia en la Universidad y por su amistad.

Al M.C. **Juan Antonio Guerrero Hernández** por su tiempo valioso invertido en esta investigación y sus recomendaciones que han sido de gran ayuda.

A la M.C. **Blanca Elizabeth de la Peña Casas** por su desinteresada colaboración en la revisión y valiosas sugerencias en esta investigación.

A los todos los maestros del departamento de maquinaria agrícola por los conocimientos brindados, por formar a personas con perspectivas diferentes, para ver de un problema una oportunidad de demostrar la capacidad del ser humano en la solución de problemas de ingeniería. Hoy tenemos las herramientas necesarias para enfrentar a un mundo y a un México que cada vez demanda más personas competitivas profesionalmente, y con visiones a futuro.

A mis compañeros de generación, que de alguna u otra manera me han brindado su apoyo y muchos que con el tiempo se convirtieron en amigos. Los hermanos **Méndez Ángel (Carlos, Abraham y Eliel), Víctor Hugo, Gilber, Moisés Pinto**.

A mis hermanos de la Iglesia “Peña de Horeb” por sus consejos, apoyo moral y oraciones.

A mi prima **Fanny** por los buenos momentos vividos y por sus palabras de aliento en todo momento.

Dedicatorias

Con respeto, amor y cariño a mis padres que son el principal motivo de inspiración en todo momento. El sacrificio que han hecho, y sus palabras de aliento han sido parte muy importante de lo que ahora soy.

Ciro M. Escalante Díaz y Emma J. Pérez López

A mis hermanos (as) que me han apoyado siempre, juntos hemos vivido momentos increíbles y soportado tristezas, hemos logrado muchas cosas y sé que este logro es uno de muchos que vienen gracias por formar parte de mi familia.

Mibsar N. Escalante Pérez

Anny K. Escalante Pérez

Raquel Escalante Pérez

Bequer Escalante Pérez

Elizabeth Escalante Pérez

Aminadab Escalante Pérez

Jonathan Escalante Pérez

A mis tíos (as) que me han apoyado económica y moralmente y así lograr lo que hasta ahora es mucho para mí.

Índice de contenido

Agradecimientos	ii
Dedicatorias	iii
Índice de contenido	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	vii
Resumen	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO	2
I. PANORAMA ENERGÉTICO ACTUAL	3
2.1 MUNDIAL	3
2.2 NACIONAL	8
II. FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLES	11
3.1 PETRÓLEO Y GAS NATURAL	11
3.2 CARBÓN	14
3.3 URANIO	15
3.4 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ENERGÉTICOS NO RENOVABLES	17
III. FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA RENOVABLES	19
4.1 ENERGÍA DE LA BIOMASA	20
4.1.1 Digestores anaeróbicos	22
4.2 ENERGÍA SOLAR	24
4.3 ENERGÍA EÓLICA	25
4.4 ENERGÍA GEOTÉRMICA	26
4.5 ENERGÍA HIDRÁULICA	27
4.6 ENERGÍA MARINA	29
4.6.1 Energía mareomotriz	29
4.6.2 Energía undimotriz	29
4.6.3 Energía térmica oceánica	29

4.6.4 Energía gradiente salino	30
4.7 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ENERGÉTICOS RENOVABLES.....	30
IV. MÉTODOS PARA OBTENER HIDRÓGENO	35
5.1 PROCESOS DE CONVERSIÓN QUÍMICA	35
5.1.1 Reformado.....	35
5.1.2 Procesos de pirólisis.....	39
5.1.3 Proceso de gasificación	39
5.2 TERMÓLISIS	41
5.2.1 Procesos de clase I	42
5.2.2 Procesos de Clase II.....	44
5.3 PROCESO DE ELECTRÓLISIS.....	47
5.4 FERMENTACIÓN	48
5.4.1 Fermentación alcohólica	48
5.4.2 Fermentación Anaeróbica.....	49
5.5 FOTOLÍTICOS.....	50
5.5.1 Procesos fotobiológicos	50
5.5.2 Procesos fotoelectroquímicos.....	51
V. CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	52
6.1 MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)	55
6.2 ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)	59
6.3 ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC).....	61
6.4 CONVERSIÓN DIRECTA DE METANOL (DMFC)	63
6.5 ALCALINA (AFC)	66
6.6 CARBONATO FUNDIDO (MFCF).....	67
6.7 REVERSIBLE (REGENERATIVA).....	69
VI. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE.....	70
VII. CONCLUSIONES	74
Bibliografía.....	75

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama que muestra las diferentes fuentes de energía.....	1
Figura 2. Petróleo, proceso y usos finales.....	13
Figura 3. Fuentes de energía primaria renovables.....	19
Figura 4. Paneles solares	24
Figura 5. Aerogeneradores	26
Figura 6. Central geotérmica	27
Figura 7. Proceso de reformado con vapor de agua	36
Figura 8. Proceso de gasificación	40
Figura 9. Ciclo termoquímico	43
Figura 10. Diagrama de bloques de proceso.....	44
Figura 11. Procesos de reformado con vapor	45
Figura 12. Reformado de alta temperatura	46
Figura 13. Producción de óxidos metálicos	46
Figura 14. Composición esquemática de las celdas de combustible	53
Figura 15. Estructura de una celda de combustible	54
Figura 16. Tipo de celdas de combustible	55
Figura 17. Principio de operación de una celda de combustible PEM.....	59
Figura 18. Principio de funcionamiento de una Celda SOFC	61
Figura 19. Principio de Funcionamiento de la Celda de Combustible PAFC	62
Figura 20. Principio fundamental de una Celda de Combustible tipo DMFC	65
Figura 21. Principios de operación de una Celda de combustible Alcalina	66

Índice de tablas

Tabla 1. Consumo mundial de energía.	3
Tabla 2. Reserva mundial probadas de petróleo por país a partir del 01 de enero 2013 (billones de barriles).....	6
Tabla 3. Reserva mundial de gas natural por país a partir del 01 de enero 2013 (trillones de pies cúbicos)	7
Tabla 4. Consumo nacional de energía.....	10
Tabla 5. Consumo nacional total	10
Tabla 6. Proceso de termólisis.....	41
Tabla 7. Balances termodinámicos para la reacción de la electrólisis a 1 atm y diferentes temperaturas	47

RESUMEN

En la segunda mitad del siglo xx, surgió la preocupación por el ambiente y los posibles efectos sobre el clima, la inquietud sobre el agotamiento de los combustibles fósiles, trajo un gran impulso de nuevas fuentes de energía renovables.

Nuestro trabajo, nuestro ocio y nuestro bienestar económico, social y físico dependen de que el establecimiento de energía sea suficiente y no se interrumpa. Pese a esta situación continuamos actuando como si estuviera garantizada la suficiencia, y la demanda de energía continúa creciendo año tras año.

La demanda mundial de energía está creciendo a un ritmo alarmante. La «Perspectiva mundial sobre política climática y tecnología energética» (WETO) europea predice para la energía primaria en el mundo un crecimiento medio del 1.8% anual durante el período 2000-2030. Esta mayor demanda se satisface fundamentalmente utilizando las reservas de combustibles fósiles, que emiten gases de invernadero y otros contaminantes. Reservas que, por otra parte, irán encareciéndose a medida que vayan disminuyendo. La progresiva disminución de las reservas de combustibles fósiles y los problemas medioambientales asociados a su combustión obligan a la búsqueda de nuevas alternativas energéticas. Una de las respuestas a esta crisis que se avecina es el uso de hidrógeno como fuente de energía y su transformación en electricidad por medio de las llamadas celdas de combustible.

Estas celdas no se agotan como lo haría una batería, ni precisan recarga, ya que producirán energía en forma de electricidad y calor en tanto se les provea de combustible.

Una de las principales propiedades es que su combustión produce solamente agua, evitando emitir gases de efecto de invernadero.

Palabras clave: *Energía, hidrógeno, celdas de combustible, renovable, impacto ambiental.*

Correo electrónico: doniescalante@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

La energía constituye la columna vertebral del desarrollo social y económico de los países, sin embargo muchas de las vías empleadas para su producción, no son lo suficientemente adecuadas para garantizar la creciente demanda de manera sustentable.

Existen diferentes fuentes de energías (renovables y no renovables) para satisfacer la creciente demanda de energía a nivel mundial.

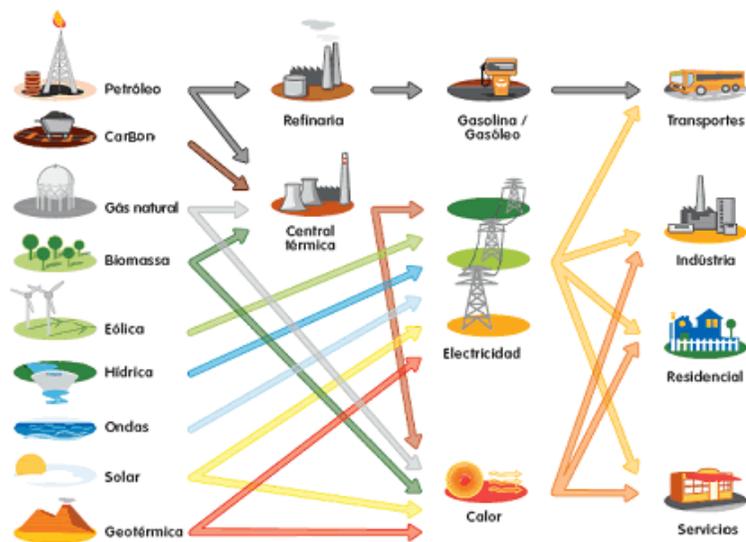


Figura 1. Diagrama que muestra las diferentes fuentes de energía

La progresiva disminución de las reservas de combustibles fósiles y los problemas medioambientales asociados a su combustión obligan a la búsqueda de nuevas alternativas energéticas.

La tecnología de las pilas de combustible ofrece la posibilidad de disponer de energía de manera eficiente, limpia y abundante. Son aparatos electroquímicos análogos a las baterías convencionales: ambos poseen electrodos positivos y negativos y un electrolito. Sin embargo, a diferencia de las baterías, que pueden suministrar potencia sólo por un tiempo definido, luego del cual hay que recargarlas o reemplazarlas, puede operar continuamente, porque, produce electricidad mientras se esté alimentando con combustible y oxidante.

Esta investigación ofrecerá mediante la recopilación de datos, estadísticas y conceptos el panorama energético a nivel mundial y nacional. Se abordará acerca de los energéticos no renovables (petróleo y el gas natural, carbón y uranio) y los energéticos renovables (biomasa, digestores anaeróbicos, solar, eólica, geotérmica, hidráulica, marina), como también el impacto de cada uno en el ambiente. Se incluye información sobre el hidrógeno y los métodos para obtenerla. Además, el funcionamiento de las celdas de combustible, aplicaciones, ventajas y desventajas.

1.1 OBJETIVO

Recabar información sobre las fuentes de energía renovable y no renovable que permita a los estudiantes y maestros ampliar sus conocimientos sobre dichas energías y las implicaciones a considerar por los cambios acelerados en tecnología y buscar alternativas de energías más limpias debido al cambio climático por el uso de combustibles fósiles.

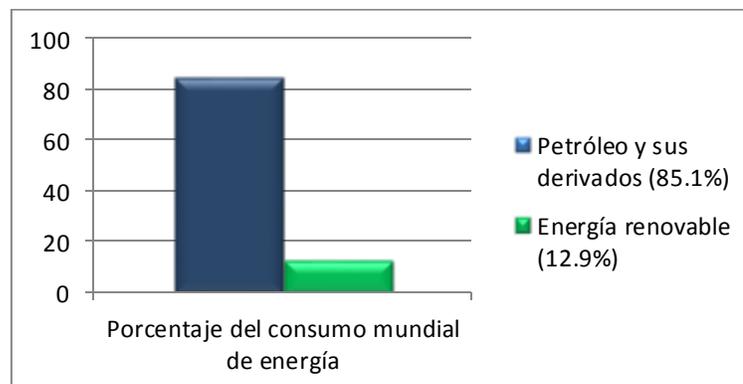
I. PANORAMA ENERGÉTICO ACTUAL

En la civilización moderna, la disponibilidad de energía está ligada al nivel de bienestar, a la salud y a la duración de vida del ser humano. Los países más pobres muestran los consumos más bajos de energía, mientras que los países más ricos utilizan grandes cantidades de la misma. Sin embargo este escenario está cambiando de forma drástica, cambio que se acentuará en los próximos años, donde serán precisamente los países en vías de desarrollo quienes experimenten con mayor rapidez un aumento en su consumo de energía debido al incremento que tendrán tanto en sus poblaciones como en sus economías [1].

2.1 MUNDIAL

Según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), establece que para cubrir el 85.1% de la demanda mundial de energía se emplean fuentes fósiles como el petróleo y sus derivados (34.6%), el carbón (28.4%) y el gas natural (22.1%); mientras que las denominadas fuentes de energía renovables, conocidas así por su capacidad ágil y natural de autogenerarse, cubren apenas el 12.9% de la demanda global de energía. Este último porcentaje se desglosó así: biomasa energía generada con elementos orgánicos derivados de cultivos (10.2%); hidráulica (2.3%); energía eólica (0.2%); geotérmica y solar (0.2%) [2].

Tabla 1. Consumo mundial de energía



La International Energy Outlook 2013 (IEO2013) proyecta que el consumo mundial de energía crecerá un 56% entre 2010 y 2040.

Las energías renovables y la energía nuclear son de más rápido crecimiento de fuentes de energía del mundo, cada aumento de un 2.5% por año.

Sin embargo, los combustibles fósiles continúan suministrando casi el 80% del consumo mundial de energía hasta el 2040. El gas natural tiene el más rápido crecimiento de combustibles fósiles en las perspectivas. El consumo global de gas natural se incrementa en un 1.7% por año. El uso de carbón crece más rápido que el petróleo y otros combustibles líquidos hasta después de 2030 [3].

El consumo mundial de energía primaria en el año 2012 moderó su crecimiento, presentando una tasa de crecimiento del 1.8% frente a la media del 2.6% de los últimos 10 años. Este descenso estuvo asociado en parte a la recesión económica y que a particulares y empresas respondieron a los elevados precios de la energía siendo eficientes en su consumo y uso. El consumo de los países de la OCDE cayó un 1.2% encabezado por el descenso del 2.8% en EEUU. Las economías emergentes fueron los responsables del crecimiento de la demanda de la energía siendo en China e India las responsables de cerca del 90% de ese crecimiento y ocupando el 56% del consumo mundial.

El petróleo sigue siendo la principal fuente de energía primaria con un 33.1% del consumo mundial, aunque sigue perdiendo cuota de mercado por 13 años consecutivos llegando a su nivel más bajo desde 1965. El petróleo tuvo la tasa de crecimiento más débil (0.9%) entre los combustibles fósiles, descendiendo así el consumo en los países del OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) un 1.3%. La producción mundial de petróleo creció el 2.2% con producciones records en Arabia Saudí, Emiratos Árabes y Qatar.

La segunda fuente primaria por importancia fue el carbón, que alcanzó la mayor cuota de consumo mundial de energía primaria (29.9%) desde 1970. El consumo de carbón creció un 2.5% en 2012, muy por debajo de la media de 4.4% de la última década, pero sigue siendo el combustible fósil con mayor crecimiento en consumo. La producción mundial de carbón creció un 2% compensando la caída de producción en EEUU (-7.5%) el crecimiento en china (+3.5%) e indonesia (+9%). Con el aumento de la producción de gas natural abaratando los precios en EEUU, el gas

natural desplazó al carbón en la generación eléctrica lo que supuso que EEUU experimentase el mayor descenso de consumo de carbón del mundo.

El gas natural se convirtió en la tercera fuente de energía primaria por consumo. El gas supuso el 23.9% del consumo de energía con un crecimiento anual del 2.2% por debajo de su promedio histórico del 2.7%. Estados Unidos (4.1%), China (9.9%) y Japón (10.3%) fueron los países que experimentaron mayores aumentos en el consumo de gas natural. La producción de gas natural creció un 1.9% con EEUU como mayor producción mundial.

La producción mundial de energía nuclear, por su parte cayó un 6.9% en el año 2012 la mayor reducción por segundo año consecutivo. La producción japonesa cayó un 89%, lo que supone el 82% de la caída mundial. La producción de energía nuclear supuso el 4.5% del consumo mundial de energía, la menor cuota desde 1984.

Las reformas renovables de energía supusieron el 2.4% del consumo mundial de energía, lo cual está por encima del 0.8% alcanzando en el 2002. La producción mundial de biocombustibles cayó por primera vez desde el año 2000 debido a la debilidad de EEUU, pero en las renovables de generación eléctrica crecieron un 15.2%, suponiendo un 4.7% de la generación eléctrica mundial. Las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) originadas por el uso de la energía continuaron creciendo en 2012, pero en menor ritmo que en 2011 [3].

El consumo de energía sigue cayendo en el mundo desarrollado (los países de la OCDE utilizaron en 2012 un 1.2% menos que en el año anterior) y ralentiza su crecimiento en el resto de países, que ya suponen el 56% del consumo energético global. Esta tendencia se explica por la situación de crisis económica y la mayor eficiencia en el consumo provocada por los altos precios. Esta conclusión se desprende del Anuario Estadístico de la Energía Mundial 2013 (que recoge los datos de 2012), elaborado por la empresa petrolera British Petroleum (BP).

En cuanto a la producción de crudo, creció el 2.2%, en esa subida tuvo su protagonismo Estados Unidos, que produjo un millón de barriles más al día y fue el país que más aumentó su generación de crudo.

La energía nuclear, por su parte, cayó un 6.9%, en lo que es la mayor reducción anual de este tipo de energía. La principal explicación se encuentra en la bajada de la producción nuclear japonesa, de un 89%, que sigue arrastrando los efectos del desastre ocurrido en la central de Fukushima en 2011.

El único combustible que creció por encima de la media fueron las energías renovables, que, pese a resentirse por la retirada de ayudas y subsidios a causa de la recesión, creció un 15.2%. Sin embargo, el porcentaje del consumo global de energía que cubren las renovables todavía se sitúa en el 2.4%. Aunque la cifra supera con creces el 0.8% de 2002, aún está lejos de alcanzar a la energía nuclear.

Las emisiones de CO₂, por su parte, también siguieron creciendo, aunque a un ritmo todavía más lento que en 2011. El hecho de que Estados Unidos redujese su consumo de carbón ha contribuido a que sus emisiones caigan a niveles de 1994. La Unión Europea, pese a quemar más carbón que en el año anterior, también emitió menos dióxido de carbono gracias al menor uso de gas natural [4].

Tabla 2. Reserva mundial probadas de petróleo por país a partir del 01 de enero 2013 (billones de barriles)

País	Reservas de petróleo	Porcentaje total mundial
Venezuela	297.6	18.2
Arabia Saudita	265.4	16.2
Canadá	173.1	10.6
Irán	154.6	9.4
Irak	141.4	8.6
Kuwait	101.5	6.2
Emiratos Árabes Unidos	97.8	6
Rusia	80	4.9
Libia	48	2.9
Nigeria	37.2	2.3
Kazakstán	30	1.8
China	25.6	1.6

Qatar	25.4	1.5
Estados Unidos	20.7	1.3
Brasil	13.2	0.8
Argelia	12.2	0.7
Angola	10.5	0.6
México	10.3	0.6
Ecuador	8.2	0.5
Azerbaiyán	7	0.4
Resto del mundo	78.4	4.8
Total	1637.9	100

Tabla 3. Reserva mundial de gas natural por país a partir del 01 de enero 2013 (trillones de pies cúbicos)

País	Reservas (Trillones de pies cúbicos)	Porcentaje mundial total
Rusia	1,688	24.9
Irán	1,187	17.5
Qatar	890	13.1
Arabia Saudita	288	4.2
Estados Unidos	273	4
Turkmenistán	265	3.9
Emiratos Árabes Unidos	215	3.2
Venezuela	195	2.9
Nigeria	182	2.7
Argelia	159	2.3
China	124	1.8
Irak	112	1.6
Indonesia	108	1.6
Kazajstán	85	1.3
Malasia	83	1.2
Egipto	77	1.1

Noruega	73	1.1
Canadá	68	1
Uzbekistán	65	1
Kuwait	63	0.9
Resto del mundo	593	8.7

2.2 NACIONAL

Es importante señalar que en nuestro país, el sector energético representa casi el 8% del PIB. Del 2000 al 2011, el consumo de energía en el país creció a un promedio anual de 2.08%, tasa superior a la que presentó el Producto Interno Bruto (PIB), cuyo crecimiento anual fue de 1.82%. Por su parte, la producción de energía primaria disminuyó a una tasa anual de 0.3%. De continuar estas tendencias, tanto en consumo como en producción de energía, para el 2020 México se convertiría en un país estructuralmente deficitario en energía.

En lo que se refiere a la producción de petróleo, entre 2000 y 2004, ésta se incrementó hasta llegar a su máximo nivel, y comenzó a declinar hasta alcanzar 2.5 millones de barriles diarios (MBD) en 2012, pese a que la inversión en actividades para exploración y producción de hidrocarburos se incrementó más de tres veces en los últimos doce años, pasando de 77,860 millones de pesos a 251,900 millones en el periodo 2000 a 2012. De esta forma, mantener la producción a su actual nivel representará un importante reto técnico y económico, ya que la mayor parte de los campos productores en el país se encuentran en etapas maduras o en vías de declinación. Entre 2003 y 2012, a pesar de la mayor inversión en la historia, las reservas probadas de petróleo disminuyeron 31.2% pasando de 20,077 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (MMbpce) a 13,810 MMbpce, en tanto que en el mismo periodo las reservas probables disminuyeron en 27.2%, pasando de 16,965 MMbpce a 12,353 MMbpce. En el mediano plazo, un aumento sostenido en la producción de hidrocarburos deberá respaldarse con una reposición continua de reservas probadas superior al 100%, la diversificación del portafolio y el crecimiento de la producción en yacimientos de mayor complejidad. México enfrenta retos en

materia ambiental, donde los costos a la salud y al medio ambiente derivados de la generación y del uso de la energía son significativos. Los efectos del cambio climático también representan un reto importante, lo que ocasionará impactos en la salud y sobre diversos sectores económicos. Por ello, es necesario tomar acción pronta para reducir los riesgos asociados al cambio climático. Lo anterior requiere una reducción considerable en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), al tiempo que se identifique y reduzca la vulnerabilidad ante el cambio climático.

Estos retos requieren una transformación en nuestros patrones de producción y uso de energía. Actualmente existe una meta de 30% de reducción de emisiones, con relación a la línea base para el año 2020 del potencial de mitigación identificado, casi dos tercios se encuentran en el sector energético.

Desde la década de los ochenta, las actividades petroleras han formado parte fundamental del desarrollo de nuestro país. Desde el punto de vista de la matriz energética nacional, el petróleo es la principal fuente de energía en México. A partir de la explotación de los yacimientos del Activo Cantarell, México despegó como productor y exportador de petróleo, que lo ubicó como uno de los países más relevantes en materia petrolera. En diciembre de 2003, dicho activo alcanzó su pico de producción, lo que contribuyó a que en el año siguiente se alcanzara el nivel máximo promedio anual de la producción nacional de crudo. A partir de ese momento, la producción nacional ha disminuido, debido a que Cantarell inició un proceso natural de declinación, a una tasa promedio cercana a 20%, misma que se logró disminuir a 1% en 2012, como resultado de una administración eficiente de la operación de pozos.

De acuerdo con los estudios geológicos y geofísicos realizados a la fecha, se estima que México cuenta con 54.7 miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente de recursos prospectivos al 1° de enero de 2012. Sin embargo, es necesario realizar más estudios para contar con una mejor evaluación del potencial y mejorar la coordinación de los trabajos de exploración [5].

Tabla 4. Consumo nacional de energía

	2010	2011	2012	2013	2014
Consumo nacional de energía (petajoules)	8219.428	8624.302	8800.432	N/D	N/D
PIB nacional (miles de millones de pesos de 2008) ¹	12272.55	12761.28	13244.2	N/D	N/D
Población nacional (millones de habitantes) ²	114.2556	115.6829	117.0537	N/D	N/D
Intensidad energética (KJ/\$ producido)	669.7408	675.8178	664.4742	N/D	N/D
Consumo per cápita de energía (GJ/hab.)	71.93898	74.55125	75.18282	N/D	N/D
Consumo de electricidad (GWh)	212231.5	226896.5	233808.1	N/D	N/D
Consumo de electricidad per cápita (kWh/hab.)	1857.516	1961.366	1997.442	N/D	N/D
Producción (petajoules)	9316.503	9292.509	9073.829	N/D	N/D
Oferta interna bruta (petajoules)	8219.428	8624.302	8800.432	N/D	N/D
Relación producción entre oferta interna bruta	1.133473	1.077479	1.031066	N/D	N/D

Notas:

1 INEGI. Sistema de Cuentas Nacionales de México.

2 Con información de CONAPO.

Fuente: Sistema de Información Energética con información de SENER.

Tabla 5. Consumo nacional total

	2010	2011	2012	2013	2014
Consumo energético total	4692.758	4864.41	4901.972	N/D	N/D
Carbón	85.37424	131.4513	109.3024	N/D	N/D
Renovables	301.8161	305.4198	304.1589	N/D	N/D
Leña	259.3109	258.0858	256.7428	N/D	N/D
Bagazo de caña	37.64919	41.67059	40.99307	N/D	N/D
Solar	4.856037	5.663447	6.422938	N/D	N/D
Coque de carbón	62.82464	61.75298	64.3357	N/D	N/D
Coque de petróleo	80.58071	82.84967	100.024	N/D	N/D
Total de petrolíferos	2868.162	2900.077	2891.381	N/D	N/D
GLP	448.612	435.739	430.2063	N/D	N/D
Gasolinas y naftas	1494.219	1504.514	1506.983	N/D	N/D
Querosenos	114.5656	115.5358	121.5361	N/D	N/D
Diésel	752.8774	793.7767	799.1438	N/D	N/D
Combustóleo	57.88794	50.51148	33.51203	N/D	N/D
Gas seco	529.9675	566.0314	591.0602	N/D	N/D
Electricidad	764.0334	816.8273	841.7091	N/D	N/D

Nota:

La suma de los parciales puede no coincidir con los totales debido al redondeo de las cifras.

Fuente: Sistema de Información Energética, SENER.

II. FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLES

La energía es una magnitud física que asociamos con la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo mecánico, emitir luz, generar calor, etc. Para obtener energía se tendrá que partir de algún elemento que la tenga y pueda experimentar una transformación. A estos cuerpos se les llaman “fuentes de energía”. En otras palabras se llama fuente de energía a todo fenómeno natural, artificial o yacimiento que puede suministrar energía [6].

Los combustibles no renovables son el carbón, el petróleo y el gas natural. Han sido los grandes protagonistas del impulso industrial desde la invención de la máquina de vapor hasta nuestros días; entre los tres superan casi el 90% de la energía comercial empleada en el mundo.

Se llaman no renovables porque han tardado miles de años en formarse y se consumen en poco tiempo y las reservas de estos combustibles van disminuyendo a un ritmo creciente. Además también estamos agotando un recurso del cual se pueden obtener productos muy valiosos, como plásticos, medicinas, etc. [7]

3.1 PETRÓLEO Y GAS NATURAL

El gas y el petróleo son la principal fuente de energía, y la materia prima más importante objeto de comercio entre los países; representan más de la mitad del consumo de energía primaria que mantiene en actividad nuestra civilización. Uno de los factores que hace que el petróleo sea tan valioso es su extrema versatilidad, como fuente de energía y como materia prima. La facilidad de transporte y almacenamiento permite usarlo como fuente de energía en cualquier lugar.

El gas natural no es un producto básico mundial en la misma medida que el petróleo, pero tecnologías como los gasoductos y los buques de GNL facilitan cada vez más su comercialización a mayores distancias [8].

Los crudos de petróleo y los gases naturales están constituidos por una mezcla de hidrocarburos: unas moléculas formadas por átomos de carbono e hidrógeno, que contienen de 1 a 60 átomos de carbono. Las propiedades de estos hidrocarburos dependen del número y de la disposición de los átomos de carbono e hidrógeno en sus moléculas. Los hidrocarburos que tienen hasta 4 átomos de carbono suelen ser gases; si comprenden entre 5 y 19 átomos son generalmente líquidos, y cuando abarcan 20 o más, son sólidos [9].

En la composición del petróleo están fundamentalmente hidrocarburos gaseosos, líquidos y sólidos, estando estos últimos disueltos o suspendidos en los líquidos. También se encuentran otras sustancias consideradas como impurezas, tales como compuestos de azufre, oxígeno, nitrógeno, trazas de metales y sales de sodio, calcio y magnesio [10].

El gas natural es un compuesto no tóxico, incoloro e inodoro, constituido por una mezcla de hidrocarburos en la que su principal componente es el metano. Una propiedad a destacar del gas natural es la limpieza en su combustión adecuada con el aire, quema sin desprendimiento de cenizas, óxido de carbono u otros productos contaminantes además de producir una llama de color azul muy característica.

La primera operación para iniciar con la actividad de la industria petrolífera y gas natural es la prospección o búsqueda de los yacimientos. Una vez terminada la fase de prospección, se realiza un sondeo para averiguar si un pozo contiene suficiente petróleo o gas natural para que su explotación sea rentable. El siguiente paso es la perforación donde los métodos más utilizados son: perforación por percusión o con cable, perforación rotativa (método más común), perforación rotopercutiva, electroperforación y turboperforación y perforación direccional. Terminada la perforación, el pozo está listo para empezar a producir. El petróleo crudo que sale de los pozos es prácticamente inservible, motivo por el cual ha de ser refinado a fin de extraer los productos realmente útiles. El refino del petróleo comienza con la destilación fraccionada de los crudos, que permite separar los hidrocarburos por su punto de ebullición. Los procesos y operaciones de refino de petróleo se clasifican en: separación, conversión, tratamiento, formulación y mezcla, operaciones auxiliares.

Aproximadamente el 90% del petróleo se utiliza con finalidades energéticas. Son los productos combustibles los que impulsan los medios de transporte o las centrales de producción de energía. El otro 10% son la materia prima de la Industria petroquímica.

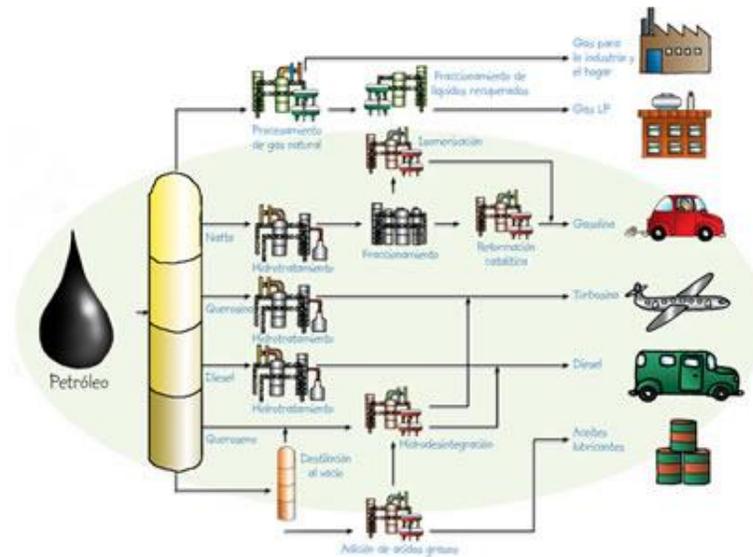


Figura 2. Petróleo, proceso y usos finales

Mediante la destilación del petróleo se obtienen: Gases, éter de petróleo, naftas y gasolinas, querosenos, gasóleos, fuelóleos, aceites lubricantes, ceras, asfaltos y coques [9].

Por su parte el gas natural no precisa prácticamente ningún tipo de transformación, por lo que una vez extraído del subsuelo, es transportado a aquellos lugares donde se aprovecha su potencial calorífico, el cual se realiza a través de gasoductos terrestres y marinos, o bien con grandes barcos metaneros que lo transportan en forma líquida.

Desde que se comenzaron a desarrollar las redes de gas natural, este combustible ha ido desplazando a los derivados del petróleo de los nichos anteriormente ocupados por estos en la industria, el sector terciario y en generación eléctrica. Las ventajas del gas natural son múltiples: el menor coste de combustible, de los equipos

y del mantenimiento de las instalaciones, la mayor eficiencia y las menores emisiones.

El potencial del gas natural como sustituto de los derivados del petróleo en la automoción dependerá de su capacidad de desligar sus precios de los del petróleo, además del necesario desarrollo tecnológico. En efecto, mientras los precios del gas natural sigan ligados a los precios del petróleo, no se alcanzará el punto en el que la utilización del gas natural sea rentable en el transporte [11].

3.2 CARBÓN

El carbón fue el primer mineral que la humanidad comenzó a explotar industrialmente. Se produce a lo largo de decenas de millones de años por la descomposición anaeróbica de plantas y árboles, al ser cubiertos por el agua y luego sepultado por sedimentos.

Primero se forma la turba en los pantanos, luego por compresión y aumento de la temperatura (100 °C) la turba va perdiendo los elementos volátiles, como el agua, y lentamente se transforma en lignito, un carbón mineral blando donde todavía se pueden reconocer formas vegetales, entre un 60% y 75% de carbono y un poder calórico bajo. Si la mineralización continua aparece la hulla, entre un 45% y un 85% de carbono.

Tras unos 250 millones de años de presiones subterráneas y altas temperaturas, se forma una negra y brillante antracita, que tiene hasta un 95% de carbono.

El carbón es el más sucio de todos los combustibles ya que genera la mayor cantidad de CO₂ por kilo quemado, como también grandes cantidades de dióxido de sulfuro (SO₂). El carbón reacciona con el nitrógeno e hidrógeno del aire para formar HCN y nitrato de sulfuro (SNO₃), elementos muy tóxicos.

Su combustión genera también lluvia acida. A pesar de las advertencias sobre el calentamiento global que genera su combustión, el consumo de carbón aumenta

rápidamente, el 2006 tuvo un 8.8% de incremento sobre el 2005 y un 92% de aumento en los últimos 25 años.

Para utilizar la energía atrapada en el carbón para producir electricidad, se pulveriza y quema en hornos que calientan estanques de agua que es transformada en vapor. Este vapor es posteriormente utilizado para hacer girar turbinas conectadas a generadores de electricidad.

En el proceso se pierde la mayor parte de la energía del carbón como calor. Las turbinas más eficientes construidas actualmente son capaces de transformar sólo el 35% en electricidad, el 65% restante se pierde, se habla de una eficiencia energética del 35%, en las turbinas más antiguas es de un 30% o menos.

Las centrales eléctricas obtienen unos 2 kWh por kilogramo de carbón. Como quemar 1 kg de carbón produce 1.83 kg de CO₂, podemos afirmar que por cada kwh estas centrales producen 0.915 kg de CO₂ (0.254 kg CO₂ /MJ) [12].

La AIE considera que el carbón seguirá siendo uno de los combustibles más consumidos en el planeta en las próximas décadas, junto con el gas y el petróleo. El consumo mundial de carbón se eleva a una tasa promedio de 1.3% por año, a partir de 147 cuatrillones de BTU en 2010 a 180 billones de BTU en el 2020 y 220 billones de BTU en 2040 pero su producción tenderá a estancarse [3].

3.3 URANIO

Esta energía es resultado, por la relación de equivalencia masa-energía, de reacciones de los núcleos de ciertos elementos ligeros (fusión) o pesados (fisión). En la actualidad se produce mediante la fisión de átomos de uranio o de átomos de plutonio resultantes de la transmutación del uranio. La fisión depende del calor que, en general, se transforma inmediatamente en energía mecánica y, después, en energía eléctrica [7].

Es el elemento más pesado, de origen natural, que existe en la Tierra en una proporción de 2.7 partes por millón (ppm), también está presente en el agua de los

océanos. Su nivel de actividad radioactiva es bajo, muy inferior al de otros elementos, lo que facilita su minería, transformación y fabricación como combustible nuclear.

Aparece en formaciones de donde puede ser extraído a precio económico. Está compuesto por tres isótopos, cada isótopo tiene, con relación a los otros dos, el mismo número de protones pero distinto número de neutrones, es decir, difieren únicamente en el número de componentes del núcleo.

Para su empleo en los reactores nucleares convencionales actuales necesita ser enriquecido en el isótopo U235, que es el que se fisiona y, a través del proceso de fisión, genera la energía que se extrae del reactor [13].

La manera de extraer energía del uranio es muy diferente a aquella utilizada tradicionalmente para extraer energía de la combustión de carbón, gasolina, madera, etc. Para extraer en forma eficiente la energía del uranio se requieren los reactores nucleares, en donde, en forma controlada, por medio del proceso de fisión del uranio-235 se libera una enorme cantidad de energía del núcleo del átomo. Así pues, sólo si se dispone de los reactores nucleares adecuados y de otras instalaciones es posible aprovechar este elemento [14].

La posición de la nuclear en el sector energético es, altamente favorable. La subida de precios del petróleo ha roto todas las previsiones sobre su utilización futura como fuente de generación de electricidad afectando igualmente al gas cuyo precio se mueve en la misma dirección y con efectos similares que el del petróleo. El combustible nuclear, al ser altamente intensivo en energía, ocupa mucho menor volumen que los combustibles fósiles facilitando su almacenamiento y permitiendo así unas reservas muy superiores a las posibles con los demás combustibles [13].

Cabe destacar que las centrales nucleares no envían a la atmósfera óxidos de carbono, azufre, nitrógeno ni otros elementos derivados a la combustión, como las cenizas. Por lo tanto, no contribuyen al calentamiento global, el cual es el responsable del clima del planeta o la lluvia ácida.

No obstante, debe tenerse precaución en la generación de electricidad mediante la energía nuclear, tanto en la extracción, el concentrado y enriquecimiento del uranio como en la propia producción de energía eléctrica.

La producción de energía eléctrica en centrales nucleares genera residuos radioactivos de larga duración que deben almacenarse en la misma central y en depósitos especiales para materiales radioactivos.

Las centrales nucleares han estado siempre sujetas a un estricto control reglamentario institucional difícil de igualar por otras actividades industriales. Esta reglamentación tiene en cuenta todas y cada una de las fases que forman el ciclo de producción, contemplando también la protección de los trabajadores, el público en general y el desmantelamiento de la central al final de su vida útil [15].

3.4 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ENERGÉTICOS NO RENOVABLES

El **petróleo y el gas natural** causan contaminación tanto al usarlos como al producirlos y transportarlos.

Uno de los problemas más estudiados en la actualidad es el que surge de la inmensa cantidad de CO₂ que estamos emitiendo a la atmósfera al quemar los combustibles fósiles, ya que este gas contiene un importante efecto de invernadero y se podría estar provocando un calentamiento global de todo el planeta como cambios en el clima que podrían ser catastróficos.

Otro impacto negativo asociado a la quema de petróleo y gas natural es la lluvia ácida por la producción de óxidos de nitrógeno. Los daños derivados de la producción y el transporte se producen por los vertidos de petróleo, accidentes o no, y por el trabajo en las refinerías.

La minería del **carbón** y su combustión causan importantes problemas ambientales y consecuencias negativas para la salud humana.

Las explotaciones mineras a cielo abierto tienen un gran impacto visual y los líquidos que de ellas se desprenden suelen ser contaminantes.

El agua de lixiviación sino es controlada y depurada; después que sale de la zona de mina y fluye hasta los ríos o los alrededores va cargado de materiales muy tóxicos, como metales pesados y productos químicos usados en la minería.

En el proceso de uso del carbón también se producen importantes daños ambientales porque al quemarlo se liberan grandes cantidades de gases responsables de efectos tan nocivos como la lluvia ácida, el efecto de invernadero, la formación del smog.

El **Uranio** comparado con carbón, petróleo y gas natural es menos contaminante. Las centrales nucleares emiten muy pocos contaminantes a la atmósfera [7].

III. FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA RENOVABLES

Las energías renovables son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, y que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua. Las fuentes renovables de energía perdurarán por miles de años. Las energías renovables se pueden clasificar de distintas formas: por su origen primario de la energía, por el nivel de desarrollo de las tecnologías, y por las aplicaciones de las energías.



Figura 3. Fuentes de energía primaria renovables

La energía en cualquiera de sus formas no puede crearse ni destruirse; solo se puede cambiar de una forma a otra (primera ley de la Termodinámica). Aunque la energía no se pierde, si se degrada en un proceso irreversible (segunda ley de la Termodinámica). Por ello, la energía no puede considerarse renovable. Lo que puede renovarse es su fuente, por ejemplo el viento, o una caída de agua. Sin embargo, el uso del lenguaje ha llevado a las fuentes renovables de energía a denominarse simplemente energías renovables [16].

En este capítulo abordaremos:

- Energía de la biomasa
 - Digestores anaeróbicos
- Energía solar
- Energía eólica
- Energía geotérmica

- Energía hidráulica
- Energía marina

4.1 ENERGÍA DE LA BIOMASA

La Biomasa es una energía renovable y dentro de las fuentes energéticas, es la que posee más posibilidades de desarrollo ya que la tecnología que requiere existe en el mercado y su costo es muy inferior al de otras energías alternativas.

En una acepción estrictamente ecológica, se define como un conjunto de sustancias orgánicas procedentes de seres vivos depositados en un determinado lugar. También se entiende como el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma [17].

La biomasa es la fuente de energía renovable en la actualidad más antigua y más utilizada. Ambos pertenecen a la basura doméstica y los residuos de poda de vegetación urbana. La biomasa es toda una materia orgánica existente en la Tierra, todas las sustancias de origen vegetal o animal biodegradable. Biomasa son sobras de la producción agrícola, residuos forestales, industriales y los residuos urbanos.

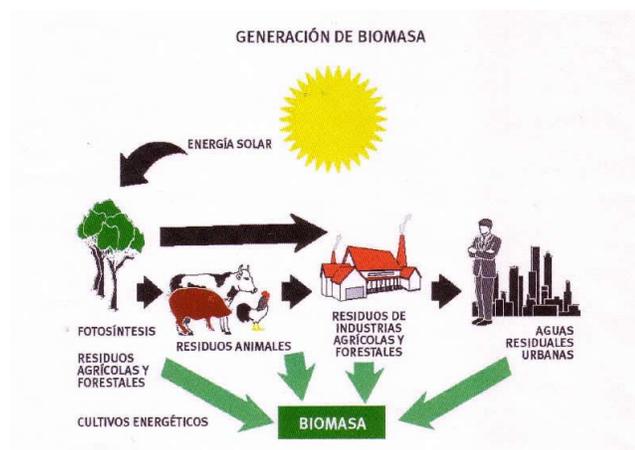


Figura 4. Generación de biomasa

La biomasa es un producto renovable, que puede ser empleado para la generación de combustibles y con ello generar electricidad, calor o energía mecánica a través de procesos biológicos o termoquímicos.

En 2009, las energías renovables representaron el 16% de todo el consumo mundial de energía primaria, y el 10% correspondió a la biomasa [18].

En 1995, según la Agencia Internacional de la Energía, AIE, el consumo energético mundial de biomasa fue de 930 millones de toneladas equivalentes de petróleo, lo que representa el 14% del consumo final de energía. Hasta finales del siglo XIX, la biomasa fue la principal fuente de energía en todo el mundo y, aunque desde entonces su participación en el consumo final ha descendido, aún hoy representa más que el carbón y una cifra equivalente al gas natural. La importancia relativa de la energía de la biomasa varía considerablemente entre las naciones ricas y pobres. En los países industrializados, en el antiguo Bloque Oriental y en Oriente Próximo, proporciona sólo del 2 al 3% de la energía total mientras que en África, Asia y Latinoamérica representa la tercera parte del consumo energético. El 90% del consumo de energía de la biomasa tiene lugar en los países en vías de desarrollo.

En algunos de los países más pobres del mundo, la biomasa significa entre el 80 y el 90% del consumo energético. Para 2000 millones de personas, la biomasa es la principal fuente de energía para usos domésticos. También cubre las necesidades energéticas de muchas industrias tradicionales y agrícolas como la fabricación de pan, el sector textil, el secado del tabaco y del té, el ahumado del pescado y la fabricación de ladrillos.

El 10% restante del consumo de la biomasa en el mundo industrializado, representa el 3% de la energía global de esa región, principalmente, leña para usos domésticos y producción de electricidad y calor en la industria. En Estados Unidos, representa el 4%; en Austria, Suecia y Finlandia, el 12, 18 y 23% respectivamente. En Europa Occidental, cubre el 3% del consumo de energía, y la Unión Europea quiere llegar al 8.5% para el 2010. Las recientes preocupaciones se han centrado en el impacto ecológico potencial de los cultivos energéticos y de las plantaciones forestales, como la pérdida de biodiversidad, la pérdida de nutrientes del suelo, la erosión y la contaminación de aguas. Es por ello que se han elaborado normas para reducir el impacto de la biomasa en muchos países occidentales.

A pesar de todo, se acepta que el impacto ambiental provocado por la biomasa es menor que el producido por los combustibles fósiles, y que los cultivos energéticos pueden gestionarse para que sean mucho menos dañinos que la agricultura intensiva. En la actualidad, está cambiando la visión tradicional de la biomasa como forma de energía no tradicional, antesala de los combustibles fósiles. El futuro de la biomasa en el suministro mundial de energía es incierto; mientras unos prevén que su porcentaje sea entre el 14 y el 22% en el 2060, el Panel intergubernamental sobre Cambio Climático prevé del 25 al 46% para el 2100.

Aunque es probable que su uso global aumente, la energía de la biomasa se enfrenta a dos problemas ecológicos: el gran consumo de agua y la baja eficiencia de la fotosíntesis. Esto limita la producción de biomasa a las regiones con lluvias suficientes y entra en competencia con otros usos de la tierra, como la producción de alimentos, la absorción de carbono y la protección de hábitats [19].

4.1.1 Digestores anaeróbicos

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno, y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en productos gaseosos o biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , S, etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

El biogás es el producto gaseoso de la digestión anaerobia de compuestas orgánico. Su composición, que depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente:

- 50-70% de metano (CH_4).
- 30-40% de anhídrido carbónico (CO_2).
- $\leq 5\%$ de hidrógeno (H_2), ácido sulfhídrico (H_2S), y otros gases.

Debido a su alto contenido en metano, tiene un poder calorífico algo mayor que la mitad del poder calorífico del gas natural.

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos:

- En una caldera para generación de calor o electricidad.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- En pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H_2O y otros contaminantes de las membranas.
- Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural.
- Uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como el metanol o el gas natural licuado.
- Combustible de automoción [20].

En la práctica ingenieril se acostumbra a considerar tres etapas para residuos sólidos o lodos (hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis) y dos para residuos líquidos (acidogénesis y metanogénesis).

- Hidrólisis o liquefacción. Es la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.
- Acidogénesis. En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos (acético, propiónico y butírico).
- Acetogénesis. Conocido también como acidogénesis intermedia en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrogeno y CO_2 .
- Metanogénesis. En esta etapa metabólica el CH_4 es producido a partir del ácido acético o mezclas de H_2 y CO_2 .

En la actualidad el tratamiento anaerobio está muy difundido dada sus ventajas técnico-económicas, no obstante hay que controlar diferentes factores que influyen en el proceso y que son imprescindibles para su buen funcionamiento.

Este tipo de sistemas asimila altas y bajas cargas orgánicas. La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida al proceso de degradación, es cualquier biomasa residual que posea un alto contenido en humedad [21].

4.2 ENERGÍA SOLAR

Es la energía producida por el sol y que es convertida a energía útil por el ser humano, ya sea para calentar agua o producir electricidad. La intensidad de energía disponible en un punto determinado de la Tierra depende, del día del año de la hora y de la altitud. Además, la cantidad de energía que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

Es abundante y un recurso renovable fiable, sostenible y se puede utilizar para múltiples propósitos. Se ha utilizado durante siglos para calentar el agua y sigue siendo una opción para el calentamiento de agua en la actualidad. Sin embargo, el mercado de las tecnologías actuales es limitado en algunos países debido a los altos costos de instalación de sistemas de calentamiento solar de agua y el bajo costo de los combustibles fósiles.



Figura 4. Paneles solares

El sistema de generación de energía solar, se desarrolla a través de tecnología de punta, con paneles fotovoltaicos, siendo éstos los que generan energía eléctrica bajo la acción del flujo luminoso permanente de los rayos solares. Los paneles se disponen en forma tal, que obtengan la mayor cantidad de luminosidad durante gran parte del día; la radiación obtenida se concentra en las células fotovoltaicas, que son obleas de aproximadamente 400 micras, las que procesan la radiación, generando energía eléctrica limpia, sin impacto sobre el medio ambiente, como son otras formas de generación de electricidad [17]. Del 12.9% para cubrir el consumo energético mundial un 0.2% corresponde a la energía solar porcentaje que comparte con la geotérmica [22].

4.3 ENERGÍA EÓLICA

Esta energía renovable es la que se obtiene del movimiento constante del viento o de la brisa. En todas las regiones del Planeta, existen masas de aire ciclónicas y anticiclónicas, que circulan permanentemente en las mismas direcciones, variando algunas según la estación del año. Lo relevante es que existen todo el año, suelen ser intensos, otras veces en calma, pero jamás desaparecen; por esta razón, son de gran relevancia al momento de generar energía alternativa basada en el factor eólico [17].

Es una fuente de energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores, “molinos de viento” de tamaño variable que transforman con sus aspas la energía cinética del viento en energía mecánica. Puede obtenerse instalando los aerogeneradores tanto en suelo firme como en el suelo marino [23].

Se considera una forma indirecta de energía solar. Entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento, debido al movimiento del aire ocasionado por el desigual calentamiento de la superficie terrestre. La energía cinética del viento puede transformarse en energía útil, tanto mecánica como eléctrica.

Transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala desde mediados de la década de los 70 en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles.

Según los números de la AMDEE en el 2013 se operaron 1917 Mega watts en México, y se espera que entre 2020-2022 aumente a 15000 mega watts. 411000 son las casas que cubren necesidades eléctricas por medio de la energía eólica, lo cual se puede representar en que los estados de Campeche (211000) y Colima (177000) son abastecidos mediante energía eólica.



Figura 5. Aerogeneradores

Del 40% de la meta nacional (México) de renovables, dependen de la energía eólica. En el mundo el 2.5 es el porcentaje de la electricidad mundial que puede ser abastecida por la eólica y se espera que para el 2020 tenga un crecimiento de 8-12% [24].

4.4 ENERGÍA GEOTÉRMICA

Se obtiene, gracias al calor interno terrestre. Esta energía se obtiene en géiseres, volcanes, aguas termales y zonas tectónicas. Es una energía muy limpia y eficiente (1 km cúbico de roca que se encuentre a 250 °C produciría la misma energía que 40 millones de barriles de petróleo), y se puede utilizar en centrales geotérmicas para la producción de energía eléctrica, para producir agua sanitaria o en sistemas de calefacción y refrigeración en viviendas.

La energía geotérmica explota la energía térmica accesible del interior de la Tierra. En esta modalidad, el calor es extraído de reservorios geotérmicos mediante pozos, o por otros medios. Los reservorios que se hallan suficientemente calientes y permeables en estado natural se denominan "reservorios hidrotérmicos", mientras que otros, cuya temperatura es suficientemente elevada pero que es necesario mejorar mediante estimulación hidráulica, se denominan "sistemas geotérmicos

mejorados". Una vez en la superficie, es posible utilizar fluidos a distintas temperaturas para generar electricidad, o destinarlos más directamente a aplicaciones alimentadas de energía térmica, en particular la calefacción de áreas residenciales o la utilización de calor a baja temperatura extraído de pozos poco profundos y enviado a bombas de calor geotérmicas, utilizadas con fines de calefacción o refrigeración.

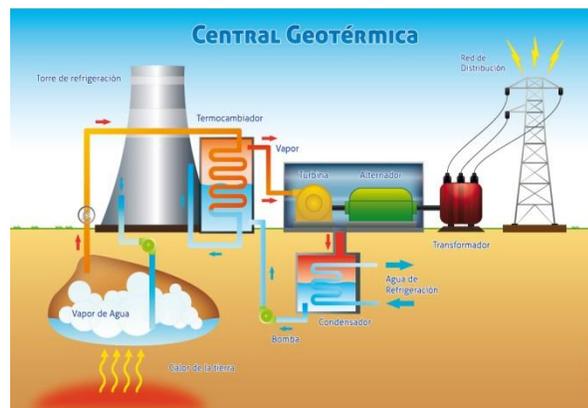


Figura 6. Central geotérmica

Las centrales de energía hidrotérmicas y las aplicaciones térmicas de la energía geotérmica son tecnologías evolucionadas, mientras que los proyectos de sistemas geotérmicos mejorados se encuentran en fase de demostración o fase piloto, y están todavía en fase de I+D. Cuando se utilizan para generar electricidad, las centrales de energía geotérmica ofrecen, por lo general, una producción constante [25].

4.5 ENERGÍA HIDRÁULICA

La energía hidráulica o energía hídrica es una fuente de energía renovable que aprovecha la caída de agua desde cierta altura para generar energía eléctrica. Se aprovecha así la energía cinética de una corriente o salto de agua natural. Para conseguir aprovechar esa energía se aprovechan los recursos tal y como surgen en la naturaleza (cataratas, gargantas, etc.) o se construyen presas. Las instalaciones más comunes hoy en día son las centrales hidroeléctricas [23].

Los proyectos de energía hidroeléctrica pueden consistir en presas con embalses, proyectos a lo largo de un río o en mitad de la corriente, y pueden abarcar todo tipo de escalas [25].

Es electricidad generada aprovechando la energía del agua en movimiento. Una central hidroeléctrica clásica es un sistema que consiste en tres partes: una central eléctrica en la que se produce la electricidad; una presa que puede abrirse y cerrarse para controlar el paso del agua; y un depósito en el que se puede almacenar agua. El agua de atrás de la presa fluye a través de una entrada y hace presión contra las palas de una turbina, lo que hace que éstas se muevan. La turbina hace girar a un generador para producir electricidad. La electricidad puede transportarse mediante cables eléctricos de gran longitud hasta casas, fábricas y negocios.

Este tipo de energía proporciona casi un quinto de electricidad de todo el mundo, es la que genera electricidad de forma más barata en la actualidad debido a que una vez que la presa se ha construido y se ha instalado el material técnico, la fuente de energía (agua en movimiento) es gratuita [26].

Son muchas las ventajas de la energía hidráulica, entre ellas destaca su potencial como energía renovable. Se trata de un recurso procedente del agua de la lluvia y, además, esa agua empleada en el proceso puede volver a utilizarse.

La larga vida útil de este tipo de instalaciones las convierte en uno de los recursos renovables más utilizados en la actualidad. Además, ayuda a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, al servir como sustituto de otras fuentes más contaminantes para producir electricidad [27].

Algunas de las desventajas que presenta esta fuente de energía en su mayor parte del impacto ambiental de las infraestructuras necesarias para su explotación:

- Las centrales hidroeléctricas requieren de un importante desarrollo de infraestructura para producir electricidad.

- La construcción de las grandes presas, como cualquier otra obra civil, genera efectos negativos sobre el entorno que ya puestas en operación, pueden seguir ocasionando daños al medio ambiente, ya que modifican el hábitat ecológico de la vegetación del entorno y de los peces y demás especies que viven en el agua. En ocasiones puede afectar la calidad del agua embalsada [28].

4.6 ENERGÍA MARINA

Es aquella que utiliza el mar como fuente natural. Dentro de esta energía renovable existe una clasificación basada en el tipo de fuente de energía. Aunque en todos los casos la fuente es el mar, la energía se obtiene debido a diferentes fenómenos que se dan en los océanos.

4.6.1 Energía mareomotriz

La energía mareomotriz es aquella que resulta de aprovechar las mareas, se aprovecha embalsando agua del mar en bahías naturales. Durante el ascenso y descenso de las mareas el agua pasa a través de una serie de turbinas hidráulicas, lo que genera energía mecánica y, en última instancia, energía eléctrica.

4.6.2 Energía undimotriz

Este tipo de energía tiene su origen en las olas que se forman en el mar. Una de las propiedades características de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias sin apenas pérdida de energía, por ello, la energía generada en cualquier parte del océano acaba en el borde continental.

4.6.3 Energía térmica oceánica

Un proceso llamado conversión de energía térmica oceánica (OTEC), utiliza la energía térmica almacenada en los océanos para generar electricidad.

OTEC funciona mejor cuando la diferencia de temperatura entre el calor (la capa superior del océano) y el frío (el agua profunda del océano) es de aproximadamente 20 grados C. En las centrales térmicas oceánicas se aplica el ciclo Rankine. Es el único ciclo práctico termodinámico que ha sido desarrollado para la conversión termal de la energía del océano. En este ciclo se emplea calor para evaporar un líquido, que posteriormente se utiliza en el accionamiento de una turbina, la cual se acopla a un generador para producir energía eléctrica.

4.6.4 Energía gradiente salino

Se utiliza como fuente de energía la diferencia de salinidad entre el agua del mar y de los ríos. Es una fuente de energía que se encuentra en fase de experimentación y desarrollo. Dentro de la energía oceánica es la que menos avanzada se encuentra.

Actualmente se está trabajando en dos tecnologías diferentes para el aprovechamiento del gradiente salino:

1. Pressure-Retarded Osmosis (PRO). Es decir, el retardo de la presión osmótica. Este proceso consiste en bombear agua marina a un depósito, donde la presión es inferior a la presión osmótica entre el agua dulce y la salada. El agua dulce mana a través de una membrana semipermeable incrementando el volumen de agua en el depósito que puede generar electricidad mediante una turbina hidráulica.
2. Reverse electrodialysis (RED). La electrodiálisis inversa, consiste en el fenómeno inverso a la desalación de agua. Mediante membranas selectivas a los iones se crea electricidad en forma de corriente continua [29].

4.7 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS ENERGÉTICOS RENOVABLES

El impacto ambiental de la **Biomasa** sigue dependiendo de la naturaleza de los reactivos y de las tecnologías utilizadas para la combustión supone la aparición de

productos contaminantes en mayor o menor grado. Hay que tener en cuenta que en los diferentes procesos de transformación de la biomasa en otras sustancias combustibles, también se producen sustancias contaminantes que se vierten al medioambiente. Destacando entre ellas, dióxido y monóxido de carbono, compuestos de azufre, óxidos de nitrógeno y los residuos sólidos y líquidos.

En la biomasa se realiza un uso incontrolado como fuente de energía, ya que existen muchos de combustión de pequeño tamaño para uso doméstico que no incorporan sistemas de retención de partículas. El dióxido de carbono originado por el proceso de combustión de la biomasa es devuelto a la atmósfera desde donde fue tomado durante su generación. A partir de esto, el uso de la biomasa combustible no hace aumentar el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera, por lo tanto, no atribuye el efecto invernadero.

En el caso del monóxido de carbono, las emisiones que se producen al quemar biomasa son superiores que cuando se quema carbón, aunque influye notablemente la tecnología utilizada. La reducción en la formación de este compuesto se consigue cuando el equipo de combustión funciona adecuadamente y se garantiza que ésta sea completa.

Los compuestos de azufre que se forman durante la combustión son los óxidos de azufre, que pueden llegar a convertirse en ácido sulfúrico, siendo una de las sustancias que contribuyen a la lluvia ácida. Estos compuestos no constituyen un problema en el caso de la biomasa ya que no suele tener azufre, o si lo tiene es en pequeñas cantidades.

En la combustión de la biomasa, se obtienen cenizas como productos sólidos. La retención, extracción y tratamiento de estas sustancias puede contaminar el agua y el suelo debido a la presencia de sustancias tóxicas entre los compuestos que constituyen las cenizas, como son el plomo o el cadmio, siendo necesario un control exhaustivo en las diferentes etapas que constituyen el tratamiento de éstas.

También se obtienen residuos sólidos en la **gestión anaerobia**, pero en este caso los residuos no son contaminantes, sino que, por el contrario, se usan como fertilizantes orgánicos. Los afluentes son sólidos en suspensión y con compuestos metálicos, que se tienen que evacuar fuera de las instalaciones que trabajan con biomasa, son los que pueden ocasionar la contaminación del agua, siendo necesario su control y tratamiento. Hay una gran cantidad de afluentes líquidos como una alta concentración en nutrientes que se utilizan como fertilizantes, o como materia prima en la industria química, pero hay que tener en cuenta que aquellas cantidades que no puedan ser usadas en dichas aplicaciones pueden causar daños en el entorno.

En general, para los diferentes tipos de biomasa, en los distintos procesos en que se trabaja con ella, y para los diversos tipos de contaminantes que produce el uso de la misma, el principal problema para conseguir que aquella no sea contaminante es la falta de control de su uso, debido a que en la mayoría de los casos es utilizada en pequeñas instalaciones, lo que dificulta la reducción y el control de las emisiones, mientras que en las grandes, la adopción de medidas e implantación de sistemas de limpieza es norma habitual [30].

Cuando se aprovecha la **energía solar** no se genera contaminación directa por sustancias de los colectores o de las células fotovoltaicas, pero los sistemas colectores contienen a menudo sustancias para la transmisión térmica que pueden producir contaminantes si acceden al medio ambiente. Los paneles pueden generar molestias ópticas-estéticas, esto se resuelve a través de una integración a su ambiente; las reflexiones molestas disminuyen si se elimina el espejado u opacando los elementos.

La sombra y la modificación del albedo generados por las grandes instalaciones pueden, según las condiciones locales, ejercer impactos tanto sobre el microclima (tasas de evaporación, movimiento del viento, temperatura) como la flora y la fauna.

Otros impactos ambientales se producen durante la fabricación de los materiales que se utilizan para los colectores y células solares. Para las células solares se utilizan

en parte metales raros y tóxicos (cadmio, arsénico, selenio, galio) que ya durante su procesamiento pueden conducir a problemas aunque pequeños [31].

La generación de electricidad mediante la energía solar fotovoltaica requiere la utilización de grandes superficies colectoras y por tanto de una cantidad considerable de materiales para su construcción. La extracción, producción y transporte de estos materiales son los procesos que suponen un mayor impacto ambiental.

La fabricación de un panel solar quiere la utilización de materiales como aluminio (para los marcos), vidrio (como encapsulante), acero (para estructuras) etc., siendo estos componentes comunes con la industria convencional.

En la producción del panel solar produce un gasto energético que genera residuos, como partículas de NO_x, SO₂, CO₂, etc. Debido a la energía de fabricación de los paneles.

Otros impactos ambientales de esta fuente de energía están relacionados con las infraestructuras necesarias para la operación de la ESFV (Energía solar fotovoltaica) es la ocupación de espacio por parte de los paneles solares no integrados en la arquitectura. Hay que añadir también la ocupación de terreno debido a carreteras, líneas de transmisión de instalaciones de acondicionamiento de energía, subestaciones [32].

La instalación de parques eólicos para la obtención de **energía eólica**, producen impactos ambientales de poca importancia. No obstante, el funcionamiento de estos sistemas de generación energética produce cierta contaminación ambiental:

- Emisión de ruido
- Degradación del aspecto paisajístico
- Peligro de accidentes por desprendimiento de palas de rotor
- Interferencias electromagnéticas
- Impacto sobre cierto tipo de faunas (aves)

El único elemento ambiental afectado con **energía geotérmica** es el paisaje. La construcción de las infraestructuras asociadas conlleva una merma de los valores paisajísticos que muchas veces es incompatible con el entorno en el que se sitúan.

Otro tipo de efectos, sería la emisión de efectos de invernadero o contaminantes pueden ser evitados creando circuitos cerrados por los que circule el agua para posteriormente ser reintroducida en la tierra o mediante la adopción de filtros. La tecnología disponible actualmente posibilita reducir a cero las afecciones el medio (suelo y atmósfera) derivada de las emisiones de estos gases [33].

Algunos ecologistas responsables de la organización para la defensa del medio ambiente afirman que el uso de la **energía hidráulica** a afectado hasta el 20% de los espacios protegidos, y son los responsables de la pérdida de varios ecosistemas en el mundo, cultivos, poblados, como así también paisajes y construcciones de alto valor cultural.

Las represas que se construyen para su aprovechamiento repercuten en una medida la vida de los peces que cuando es época de desove no pueden pasar por los muros y se corta la cadena de reproducción. Además podemos agregar que la construcción de las represas obliga a los habitantes del lugar a desplazarse de las zonas anegadas de sus tierras cultivables a otros lugares. De alguna manera el territorio se ve alterado, reduce la biodiversidad, dificulta la migración de los peces, así como también la navegación fluvial y el transporte de elementos nutritivos abajo [34].

En la **Energía marina** el efecto más destacado sobre los diferentes factores ambientales es el causado sobre las poblaciones de seres vivos que ven transformado su hábitat natural. La modificación de los ecosistemas se produce principalmente por la alteración del lecho marino motivado por la barrera creada. Este tipo de barreras provoca alteraciones en la dinámica litoral que pueden afectar a especies muy sensibles a variaciones del medio, alterando todo el equilibrio ecológico [35].

IV. MÉTODOS PARA OBTENER HIDRÓGENO

El hidrógeno no es una fuente primaria de energía como el carbón, el petróleo o el gas natural [36]. No es un combustible más. No se encuentra de forma aislada en la naturaleza, sino que se encuentra combinado en otros compuestos, como los hidrocarburos o el agua. El hecho de que no se encuentre de manera aislada en la naturaleza obliga a tener que obtenerlo por distintos procedimientos a partir de otras materias primas [37].

Puede producirse de diferentes fuentes, por ejemplo, carbón, gas natural, gas licuado del petróleo (LPG), propano, metano, gasolina, diésel ligero, residuo pesado, biomasa seca, biomasa derivada de combustibles líquidos (tales como metanol, etanol biodiesel), nuclear, así como del agua.

Actualmente se produce principalmente de combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón) [38]. En la actualidad existen muchos métodos para producir hidrógeno, con grandes diferencias entre ellos en cuanto a materia prima contenedora, al propio proceso de producción o a la madurez de la tecnología asociada al proceso.

5.1 PROCESOS DE CONVERSIÓN QUÍMICA

Este proceso se clasifica en: reformado, procesos de pirólisis y procesos de gasificación.

5.1.1 Reformado

Los procesos de reformado son los más habituales hoy en día para la obtención de hidrógeno. Desde un punto de vista termodinámico se pueden clasificar en endotérmicos y exotérmicos. Los primeros requieren el aporte de calor desde una fuente externa; los segundos liberan calor en la reacción. En el reformado autotérmico se produce una combinación de los dos procesos, obteniéndose un balance neto de calor nulo.

El reformado puede clasificarse de la siguiente manera: Reformado con vapor de agua, oxidación parcial y reformado autotérmico.

a. Reformado con vapor de agua

El proceso de reformado con vapor de agua (conocido por las siglas SMR, Steam Methane Reforming.) Se puede aplicar a gran variedad de hidrocarburos (gas natural, GLPs, hidrocarburos líquidos.), y alcoholes. De todos ellos el más utilizado por su disponibilidad y facilidad de manejo es el gas natural, que es para el que se particularizarán las reacciones químicas expuestas seguidamente. El proceso consta de tres fases que se desarrollan en equipos diferentes, tal como muestra la figura 7.

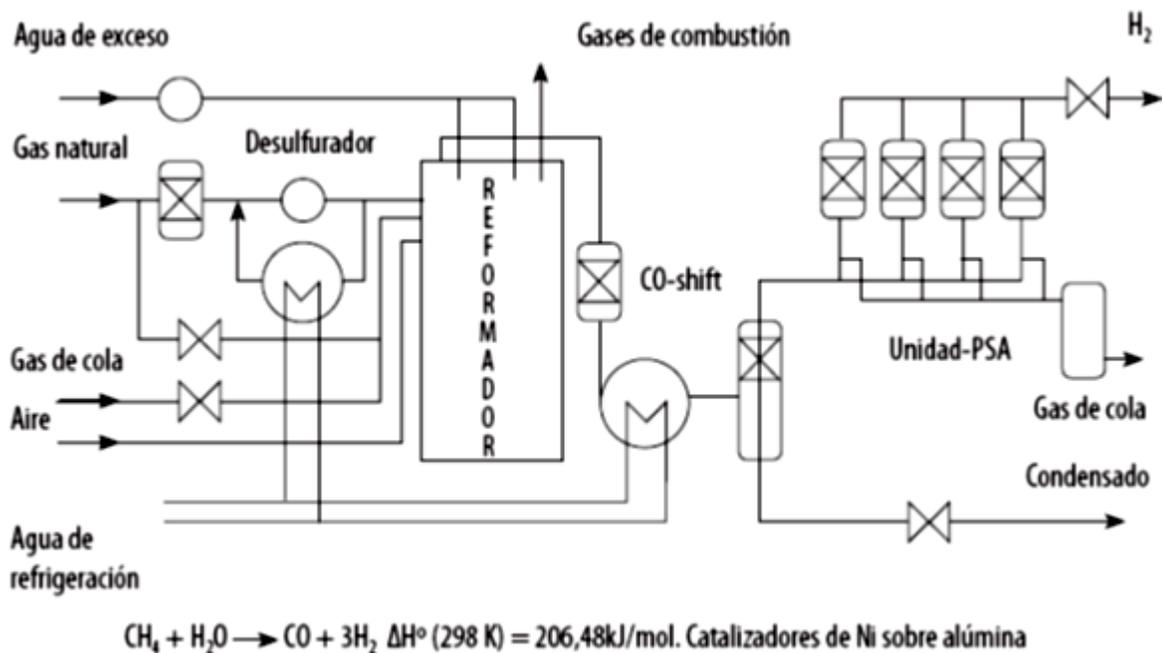
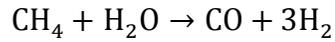
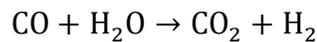


Figura 7. Proceso de reformado con vapor de agua

La reacción que se verifica en la primera fase es la de reformado propiamente dicho, que posee una entalpía de reacción estándar de 206.14 KJ/mol, por tanto es endotérmica. Se produce a temperaturas alrededor de 900 °C en unos tubos por los que circulan el metano y el vapor de agua a través de lechos catalizadores de base níquel. Los tubos están contenidos en un horno cuya temperatura es de alrededor de 960 °C, que se mantiene mediante quemadores.



En la salida del reformador el gas dirige hacia la unidad de desplazamiento de CO en la que se verifica la reacción siguiente sobre catalizadores de cobre. Ésta posee una entalpía de reacción estándar de -41.17 KJ/mol , siendo por tanto exotérmica. La cantidad de calor liberada y su nivel de temperatura no es suficiente para satisfacer totalmente la demanda de la reacción de reformado, por la parte del gas natural se emplea en los quemadores para mantener la temperatura de operación del reformador. El calor liberado en la reacción de desplazamiento se aprovecha para precalentar el gas natural a su entrada al reformador, como se ilustra en el esquema del proceso.



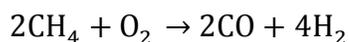
El gas producido como consecuencia de las dos reacciones anteriores pasa por un condensador en el que se retira el vapor de agua finalmente llega a la tercera fase del proceso, la depuración. El gas que llega a esta unidad es rico en hidrógeno con dióxido de carbono, restos de agua, monóxido de carbono y metano. Esta corriente gaseosa se depura en un sistema separador de membranas o de adsorción-desorción (PSA, .Pressure Swing Adsorption.) de donde se obtiene hidrógeno con una pureza de 99.999%. Los gases adsorbidos constituyen el llamado “gas de cola” que, al ser combustible, se recircula hacia los quemadores del reformador.

El rendimiento del proceso de reformado de gas natural con vapor de agua se sitúa aproximadamente en el 80% (medio respecto a los poderes caloríficos inferiores del hidrógeno producido y el gas natural consumido).

Aunque minoritario, también es posible aplicar el reformado con vapor de agua a alcoholes y a gasolinas. La utilización de alcoholes, especialmente de metanol, resulta menos endotérmica que la del gas natural y se verifica a temperaturas mucho más bajas (de 200 a 300 °C), alcanzándose conversiones del gas natural próximas al 99% del gas entrante.

b. Oxidación parcial

La oxidación parcial (conocida por las siglas POX, .Partial Oxidation.) consiste en una oxidación incompleta de un hidrocarburo, por ejemplo gas natural, donde sólo se oxida el carbono (y sólo hasta monóxido de carbono), quedando libre el hidrógeno, según la reacción siguiente. La entalpía estándar de reacción es de -36 KJ/mol, siendo por tanto una reacción exotérmica, pudiendo así prescindir de quemadores externos para mantener la reacción.



La reacción se verifica con oxígeno puro o con aire en presencia de catalizadores y transcurre con oxígeno puro o con aire en presencia de catalizadores y transcurre a temperaturas superiores a 800 °C. La elevada presencia de CO en el gas obtenido tiene el riesgo de la deposición de carbonillas, especialmente si la reacción ocurre a presión elevada, lo que es deseable para lograr reformadores más compactos. Esta carbonilla depositada sobre catalizadores inhibe la continuación del proceso.

El CO formado se puede eliminar oxidándolo para formar CO₂ o bien desplazándolo con agua según la reacción para obtener más hidrógeno y nuevamente CO₂.

El hecho de que la reacción sea exotérmica y de que se active con facilidad abre una expectativa interesante a la POX como medio para producir hidrógeno embarcado en aplicaciones de transporte, al poder utilizar así la experiencia de vehículos alimentados con gas natural. En este caso sería factible la captura de CO₂.

La eficiencia del proceso es de alrededor del 70% en grandes producciones industriales.

c. Reformado autotérmico

El reformado autotérmico (ATR, "Auto-Thermal Reforming") es un proceso bien estudiado aplicado industrialmente en grandes unidades centralizadas. Sólo recientemente se ha trasladado esta tecnología a pequeños equipos. Se trata de un método que combina el SMR y el POX, de modo que el calor liberado en el último se

aproveche para el primero, dando lugar a un balance neto nulo. El CO producido es desplazado con agua para producir más hidrógeno y CO₂. La eficiencia del proceso es similar a la del método de oxidación parcial [37].

5.1.2 Procesos de pirólisis

Consiste en la descomposición de un combustible sólido (carbón o biomasa) mediante la acción de calor (normalmente a unos 450 °C para la biomasa y 1200 °C para el carbón) en ausencia de oxígeno. Los productos finales de este proceso dependen de la naturaleza del combustible empleado, de la temperatura y presión de la operación y de los tiempos de permanencia del material en la unidad. Los productos que se pueden obtener son:

- Gases compuestos por hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono e hidrocarburos (normalmente metano)
- Líquidos hidrocarbonados
- Residuos carbonosos (coque)

Desde el punto de vista de la producción de hidrógeno interesa controlar la reacción para que se produzca un gas de síntesis que posteriormente pueda ser acondicionado mediante la reacción de desplazamiento y un proceso de purificación, similar a las dos últimas fases del reformado con vapor de gas natural. Es decir, lo más beneficioso es que el gas de síntesis sea rico en hidrógeno y el resto sea monóxido de carbono.

5.1.3 Proceso de gasificación

El proceso de gasificación consiste en una combustión con defecto de oxígeno en la que se obtiene monóxido y dióxido de carbono, hidrógeno y metano, proporciones diversas según la composición de la materia prima y las condiciones del proceso. El oxígeno se limita entre un 10% y un 50% del estequiométrico y la temperatura oscila

entre 700 y 1500 °C. La gasificación puede aplicarse tanto a la biomasa como al carbón.

Si la reacción se verifica con aire se obtiene un “gas pobre” (gas de gasógeno) que en el caso de proceder de carbón o coque contiene entre el 25 y 30% de monóxido de carbono, entre el 65 y el 70% de nitrógeno y algo de oxígeno de carbono. Para obtener hidrógeno sería necesario efectuar una reacción de desplazamiento sobre dicho gas. Por el contrario, si la reacción se verifica con oxígeno y vapor de agua se obtiene un gas de síntesis (formado por hidrógeno y monóxido de carbono) que puede ser empleado, además de para producir hidrógeno, para obtener combustibles líquidos como metanol y gasolina.

Por tanto, desde el punto de vista de la producción de hidrógeno interesan los procesos de gasificación con vapor de agua y oxígeno puro, ya sean a partir de carbón o de biomasa [36].

La figura 8 recoge el esquema básico del proceso de gasificación. Una vez limpiado de compuestos de azufre y cenizas, el gas obtenido tras el proceso de gasificación se somete a reacción de desplazamiento con lo que se llega a una mezcla de hidrógeno y dióxido de carbono. Éste último es separado para finalmente purificar el hidrógeno dejándolo con una concentración del 99.99%.

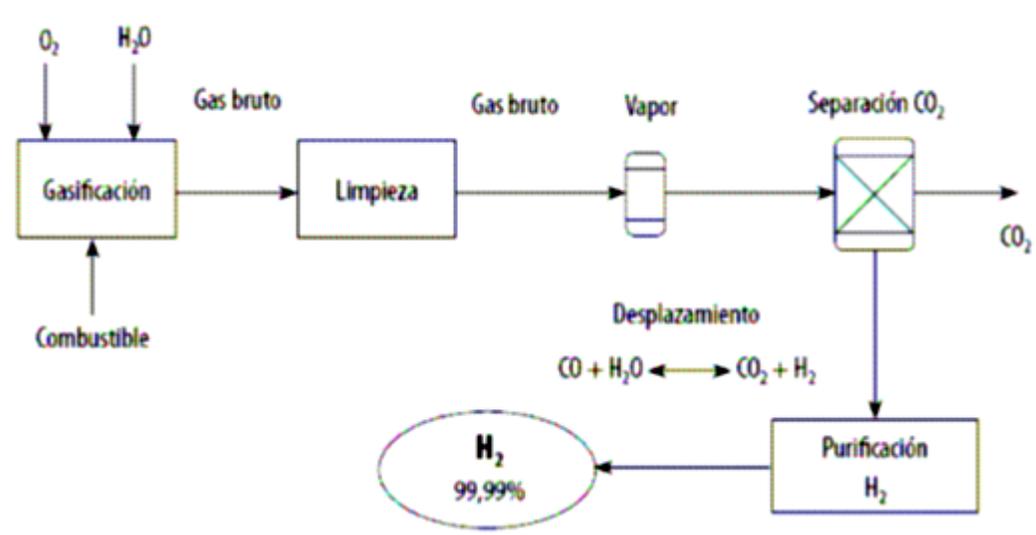


Figura 8. Proceso de gasificación

5.2 TERMÓLISIS

Los procesos de termólisis implican la extracción del hidrógeno de la molécula que lo alberga (hidrocarburo o agua) mediante la aplicación de calor. Bajo esta definición el reformado, la gasificación y la pirólisis se pueden entender como procesos de termólisis. La consideración de estos procesos como métodos químicos o termilíticos depende de la fuente de calor empleada. Así, se habla de procesos químicos, en el sentido del apartado anterior, cuando el calor para el proceso se extrae de la propia materia a través de una combustión; por el contrario, se habla de procesos de termólisis cuando el calor procede de una fuente externa, como la energía solar concentrada o la energía nuclear de alta temperatura.

Los principales tipos de procesos termilíticos se pueden agrupar en función de la temperatura de operación en tres clases de procesos, tal como aparecen recogidos en la siguiente tabla. El proceso que mayor temperatura requiere es la termólisis directa del agua, que se verifica a partir de 2500 K y por tanto resulta inabordable en la práctica. A temperatura intermedia Clase II se tienen los procesos de descarbonización (pirólisis, gasificación y reformado), situados todos alrededor de 1000 K y ya tratados en el apartado de conversión química. La inclusión en esta sección se debe al aporte de calor se realiza con una fuente externa (solar o nuclear de alta temperatura). También pertenece a la Clase II las reacciones de reducción de óxidos metálicos que se sitúan en un nivel superior de temperaturas, sobre 2500 K.

Por último, a “baja temperatura” (entre 900 y 1000 K) se verifican ciertos ciclos termoquímicos, de los que el yodo-azufre es el más prometedor.

Tabla 6. Proceso de termólisis

Clase 1 $T \leq 1000$ K			
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)
Ciclos termoquímicos de temperaturas “moderadas”	Ciclos de la familia del azufre	Descomposición del ácido sulfúrico $H_2SO_4(g) \rightarrow SO_2(g) + H_2O(g) + \frac{1}{2}O_2(g)$	T=1000
	Ciclos del tipo	Hidrólisis del bromuro del calcio y el	T=900

	UT-3	bromuro de hierro $CaBr_2(s) + H_2O(g) \rightarrow CaO(s) + 2HBr(g)$ $3FeBr_2(s) + 4H_2O(g) \rightarrow Fe_3O_4(s) + 6HBR(g) + H_2(g)$	
Clase II $1000 \leq T \leq 2500$ K			
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)
Ciclos termoquímicos de temperaturas "elevadas"	Reducción óxidos metálicos	Disociación del óxido metálico $M_xO_y \rightarrow xM + \frac{y}{2}O_2$	T=2500
	Pirólisis (cracking)	Descomposición térmica de hidrocarburos $C_xH_y \rightarrow xC(G) + \frac{y}{2}H_2$	T=1000
	Reformado	Descarbonización de hidrocarburos ligeros $C_xH_y + xH_2O \rightarrow xCO + \left(\frac{y}{2+x}\right)H_2$	T=1000
Descarbonización de combustibles fósiles	Gasificación	Descarbonización de hidrocarburos pesados o carbón	T=1100
Clase III $T > 2500$ K			
Proceso		Reacción endotérmica	T(K)
Termólisis directa del agua		Disociación del agua $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2}O_2$	T=2500

5.2.1 Procesos de clase I

La integran los llamados ciclos termoquímicos de temperatura moderada, siendo éstos principalmente dos: los basados en la familia del azufre y los de tipo UT-3.

a. Familia del azufre

Se trata de un ciclo termoquímico desarrollado por General Atomics en los años 70 y que requiere básicamente de dos niveles térmicos, uno a 850 °C para la descomposición del ácido sulfúrico y otro a aproximadamente 360 °C para la descomposición del HI, tal como se muestra en la figura 9.

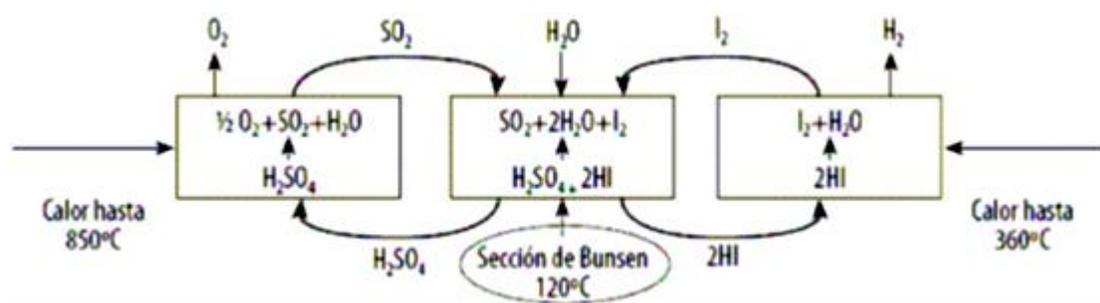
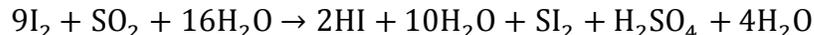
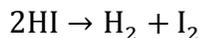


Figura 9. Ciclo termoquímico

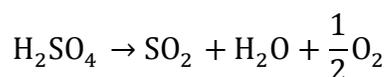
El núcleo del proceso es la reacción Bunsen, que transcurre a 120 °C. Es la siguiente.



Tras esta reacción se realizan dos procesos de destilación, uno sobre los productos 2HI, 10H₂O y SI₂ y otro sobre los demás. La destilación sobre los primeros produce HI y se verifica a 230 °C; con el HI separado se procede a su descomposición según la reacción siguiente, que ocurre aproximadamente 360 °C y que es donde se obtiene el hidrógeno.

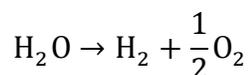


La destilación sobre los productos H₂SO₄ y H₂O, a 360 °C, produce H₂SO₄, que finalmente es descompuesto a 870 °C según la reacción siguiente. Esta reacción es la que fija la demanda de calar de alta temperatura del proceso.



El proceso descrito supone un ciclo porque SO₂ y el H₂O producto de la reacción anterior y el I₂ producto de la primera reacción de destilación indicada se dirigen

hacia la reacción Bunsen, que sólo consume del exterior H₂O. Como productos del ciclo se tienen H₂ y O₂. Atendiendo sólo a las entradas y salidas de especies se verifica la reacción global propia del proceso de termólisis, ésta es la siguiente.



b. Ciclo UT-3

Es un ciclo desarrollado por la Universidad de Tokio y requiere también diversos niveles térmicos, siendo el máximo de 750 °C. Precisamente este nivel térmico intermedio provoca un mal acoplamiento con las fuentes de calor disponibles (reactores nucleares de alta temperatura), lo que reduce la eficiencia del proceso.

Por otra parte, la separación del hidrógeno de los productos se realiza mediante membranas que operan por debajo de la presión atmosférica, por lo que es preciso comprimir el H₂ y el O₂, con el consiguiente consumo energético. La figura 10 muestra un diagrama de bloques del proceso.

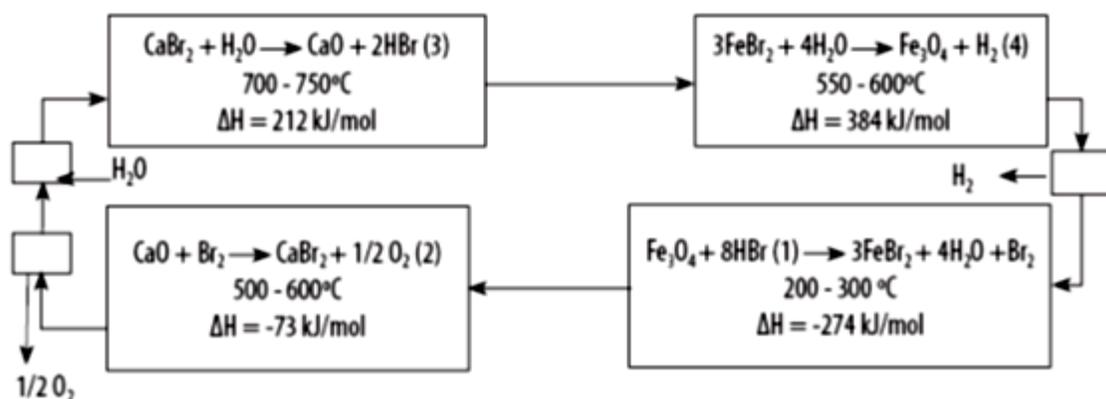


Figura 10. Diagrama de bloques de proceso

5.2.2 Procesos de Clase II

Como ya se ha mencionado, los procesos de reformado con vapor (SMR), pirólisis y gasificación, se incluyen en los medios termolíticos en la medida en que el calor que

consumen se suministre mediante fuentes externas adecuadas y no mediante la combustión del propio recurso. La figura 11 muestra el esquema de los principales procesos. Como se aprecia, una vez se ha aportado la energía térmica el proceso continúa de la misma manera que se describió en los métodos de conversión química.

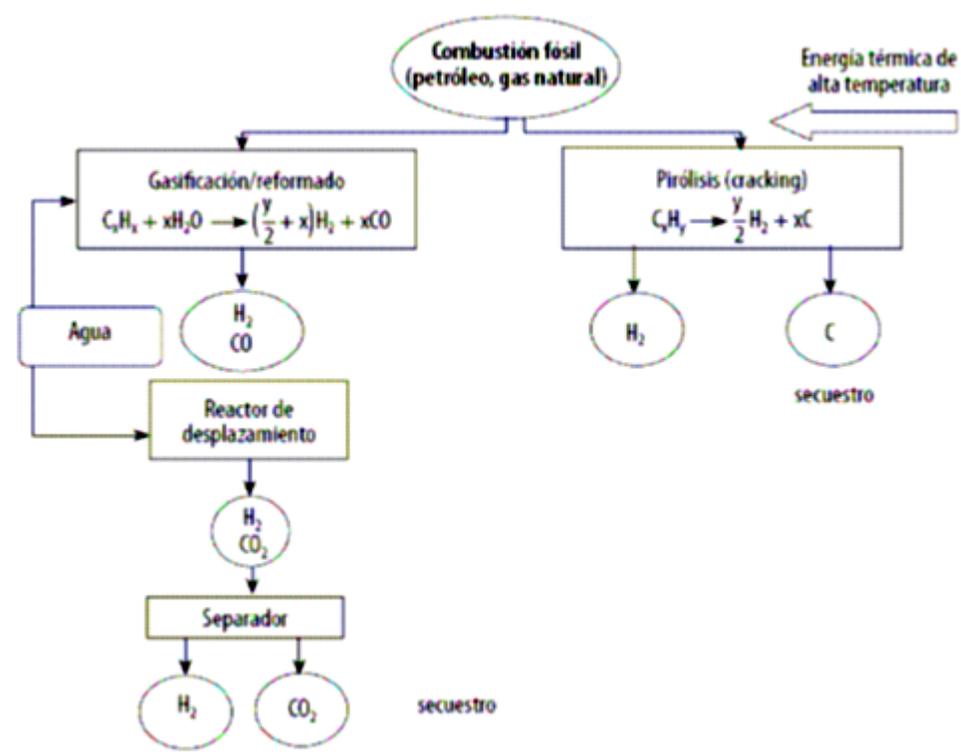


Figura 11. Procesos de reformado con vapor

a. Proceso de descarbonización

En el caso de la descarbonización por termólisis los equipos para la reacción pueden variar respecto a los empleados en el proceso de conversión química. Así, el SMR realizado con aporte exterior de calor se lleva a cabo en un reformador de membrana que opera a temperatura intermedia y que resulta más compacto, tal como se muestra en la figura 12. Más adelante se detallarán los procesos de acoplamiento de la fuente a este tipo de equipos.

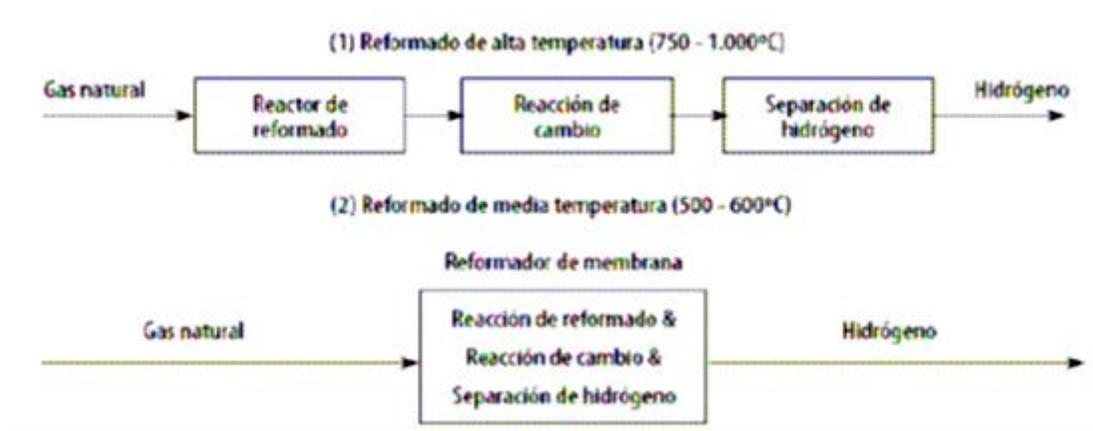
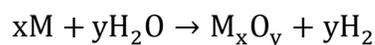
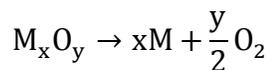


Figura 12. Reformado de alta temperatura

b. Procesos por producción de óxidos metálicos

Este proceso queda descrito genéricamente mediante las reacciones siguientes, donde M_xO_y representa un óxido metálico.



Aunque se pueden emplear varios óxidos metálicos, el que parece tener más posibilidades es el ZnO, denominándose al ciclo Zn/ZnO. El inconveniente de este ciclo es que la reacción la primera de las reacciones expuestas se verifica a unos 2300 K. Para alcanzar esas temperaturas se están proyectando sistemas de concentración solar que serán comentados más adelante. El esquema de este procedimiento se representa en la figura 13.

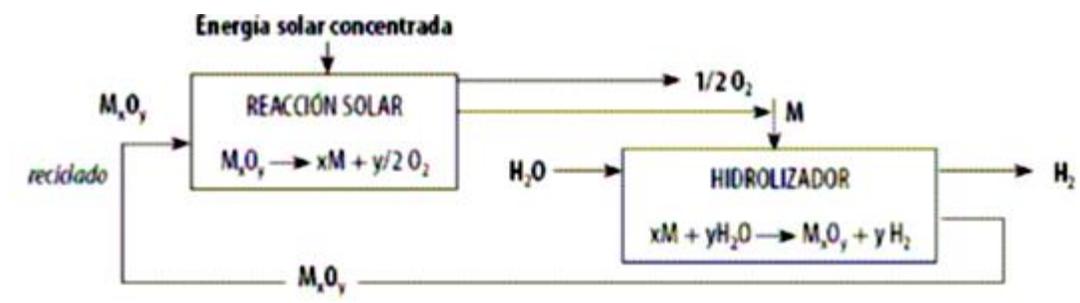
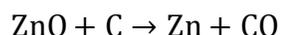


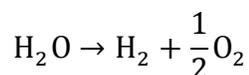
Figura 13. Producción de óxidos metálicos

Actualmente se está trabajando en variantes de este ciclo que producen la descomposición del ZnO con la ayuda de carbono (disociación carbotérmica) procedente de biomasa, coque, etc., según la reacción siguiente. La ventaja de este procedimiento es que se reduce la temperatura de la reacción a 1300 K, es decir, unos 1000 K por debajo de la temperatura de la primera reacción.



5.3 PROCESO DE ELECTRÓLISIS

Consiste en la ruptura de la molécula de agua por acción de una corriente eléctrica. Cuando ocurre en condiciones ambiente (25 °C y a 1 atm) se trata de un proceso poco interesante, como muestra el balance energético llevado a cabo sobre la siguiente ecuación.



En efecto, a partir de los datos de la siguiente tabla se obtiene que la electricidad (Δg) necesaria para disociar 1 mol de H_2O líquido a 25 °C es 237.75 KJ, resultando un mol de hidrógeno. Como el poder calorífico inferior del hidrógeno es de 241.82 KJ/mol resulta que se consumen 237.75 KJ eléctricos por cada 241.82 contenidos en el hidrógeno, es decir, se producen 1.02 KJ de hidrógeno por cada KJ eléctrico consumido. Sin embargo si la reacción transcurre con vapor de agua a 1000 °C se producen 1.36 KJ de hidrógeno por cada KJ consumido.

Tabla 7. Balances termodinámicos para la reacción de la electrólisis a 1 atm y diferentes temperaturas

	$\Delta h(\text{KJ/mol})$	$\Delta h_s(\text{KJ/mol})$	$\Delta g(\text{KJ/mol})$
25 °C	286.43	48.72	237.75
1000 °C	249.87	72.17	177.66

Los resultados anteriores sugieren por tanto dos formas de llevar a cabo la electrólisis:

- **Electrólisis a baja temperatura:** el consumo eléctrico es muy elevado, del orden de la energía contenida en el hidrógeno producido. Un electrolizador teórico que operase a 83 °C consumiría 2.83 KWh de electricidad para producir 1 Nm³ de hidrógeno, que contiene 3 KWh de energía química (sobre el poder calorífico inferior).
- **Electrólisis de alta temperatura.** El consumo de electricidad, siendo alto, comienza a resultar aceptable. Para esta operación se precisa disponer de vapor de agua y de una fuente térmica de elevada temperatura, que puede ser energía solar concentrada o energía nuclear de reactores avanzados. Los electrolizadores también han de ser modificados, pasando a ser óxidos sólidos.

5.4 FERMENTACIÓN

Dentro de las formas de producir hidrógeno a partir de biomasa destacan las técnicas de fermentación, que pueden ser de tipo alcohólica o de tipo anaeróbica.

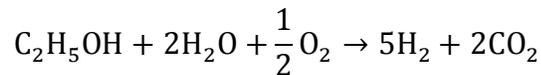
5.4.1 Fermentación alcohólica

Las plantas almacenan la energía solar captada en forma de hidratos de carbono simples (azúcares) o complejos (almidón o celulosa), a partir de los que se pueden obtener etanol por fermentación según las siguientes fases:

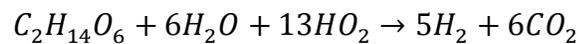
- **Pretratamiento de la biomasa.** Consiste en procesos de trituración, molienda o pulverización para favorecer la fermentación.
- **Hidrólisis.** Las moléculas complejas se transforman, en medio acuoso, en moléculas más sencillas ya sea por la acción de enzimas o por reactivos químicos.
- **Fermentación.** Los azúcares se convierten en etanol por la acción de levaduras. El proceso dura unos 3 días, obteniéndose finalmente una concentración de etanol inferior al 14%.
- **Separación y purificación.** Finalmente se destila para obtener una concentración de etanol del 96%, pudiendo llevarse a cabo una destilación

adicional con benceno para obtener una concentración del 99.5%. Es la etapa con mayor consumo energético.

Sobre el etanol conseguido se puede llevar a cabo un reformado con vapor (VPR, "Vapor Phase Reforming"), que tras el tratamiento de desplazamiento produce la reacción global siguiente.



Una variante del proceso consiste en sustituir la fermentación por un proceso de reformado con agua (APR, "Aqueous Phase Reforming") de productos tales como el sorbitol, obtenidos en el proceso de hidrólisis. En este caso se sigue la ecuación siguiente.



5.4.2 Fermentación Anaeróbica

También conocida como digestión anaerobia, se trata de una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que produce una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono) conocida como biogás, y a una suspensión acuosa o lodo que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa.

La materia prima para producir biogás es biomasa residual con alto contenido en humedad, especialmente purines ganaderos y lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas. Aunque hay mucha experiencia en el proceso su química y microbiología no son conocidas en detalle. Como variables importantes en el proceso se han identificado la temperatura (lográndose un funcionamiento óptimo a 35 °C), la acidez (valor óptimo de pH entre 6.6 y 7.6), contenido en sólidos (deseable inferior al 10%), existencia de nutrientes para las bacterias y ausencia de inhibidores del proceso como amoníaco, sales minerales, detergentes y pesticidas. En función de

todas estas variables se logra un biogás con un contenido en metano que oscila entre el 50% y el 70%, siendo el resto mayoritariamente dióxido de carbono.

Dado el elevado contenido de metano en el biogás, éste puede ser tratado con cualquiera de los procedimientos de reformado (SMR, POX o ATR) vistos en el punto dedicado a la conversión química.

5.5 FOTOLÍTICOS

Estos procesos utilizan la luz solar para producir la hidrólisis del agua. Existen dos alternativas, en la actualidad bajo investigación y que pueden transformarse en prometedoras vías de obtención de hidrógeno a largo plazo.

5.5.1 Procesos fotobiológicos

Existen algunos microorganismos que pueden actuar como catalizadores biológicos produciendo hidrógeno a partir de agua y enzimas como la hidrogenasa y la nitrogenasa. Estos organismos son algas verdes, las cianobacterias, las bacterias fotosintéticas y las bacterias de fermentación oscura.

La diversidad de organismos susceptibles de generar hidrógeno hace posible la hibridación.

- Fotorreactor. Contiene tanto algas verdes, sensibles a la luz visible como bacterias fotosintéticas y cianobacterias, sensibles a la luz infrarroja. Además de hidrógeno producen azúcares que son conducidos al fermentador.
- Fermentador. Se trata de un digestor anaeróbico que contiene otro tipo de bacterias que producen la fermentación de los azúcares enviados desde el fotorreactor y la biomasa alimentada desde el exterior. Como producto de esta fermentación queda hidrógeno además de otros efluentes que son enviados al fotorreactor.

En cuanto a las eficiencias, actualmente es de un 10% en el caso de la conversión a partir de algas verdes y de un 6% en la de bacterias fotosintéticas.

5.5.2 Procesos fotoelectroquímicos

Este tipo de procesos utiliza la luz del sol para lograr la electrólisis del agua utilizando semiconductores especializados. Cada semiconductor opera de forma óptima con una longitud de onda, por tanto la investigación se está centrando en seleccionar aquellos que disocien el agua y sean estables en ella.

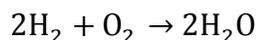
Lo atractivo de este procedimiento es que ofrece gran potencial de reducción de coste, presenta una eficiencia un 30% mayor que la electrólisis realizada con células fotovoltaicas y en laboratorio se están obteniendo eficiencias de conversión energía solar-hidrógeno de hasta 16%. [38]

V. CELDAS DE COMBUSTIBLE

Según Baez, “una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma la energía química almacenada por un combustible, directamente en energía eléctrica y, lo que es más importante, de forma continua” [39].

Son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de la reacción de combustible (hidrógeno, metano, gas natural) con un agente oxidante (O_2 , aire) directamente en un flujo de electrones el cual puede ser utilizado para energizar un dispositivo eléctrico o electrónico [40]. Han sido objeto de amplio estudio ya que representan una amplia opción limpia y segura para la generación de energía eléctrica [41].

Es un dispositivo electroquímico capaz de convertir directamente en electricidad la energía contenida en un combustible. Para obtener la electricidad, en forma de corriente continua, se lleva a cabo sin la necesidad de ningún proceso de combustión, ya que la oxidación del combustible y la reducción del comburente se producen en lugares físicos diferentes [42]. Está esencialmente basada en la reacción dada por la siguiente ecuación:



En una celda de combustible, el combustible y el oxidante reaccionan esotéricamente, por lo cual se produce una reacción en cada electrodo separado.

Una reacción ocurre en la superficie de un electrodo que ioniza el combustible y manda los electrones liberados a un circuito eléctrico externo, y en la superficie del otro electrodo ocurre una reacción que recibe electrones del circuito externo que cuando se combinan con el oxidante crean iones. Los iones se combinan en electrolito para completar la reacción total. El electrolito que no es conductor eléctrico, transporta los iones entre los electrodos, para completar el circuito y continuar con el flujo de electrones [43].

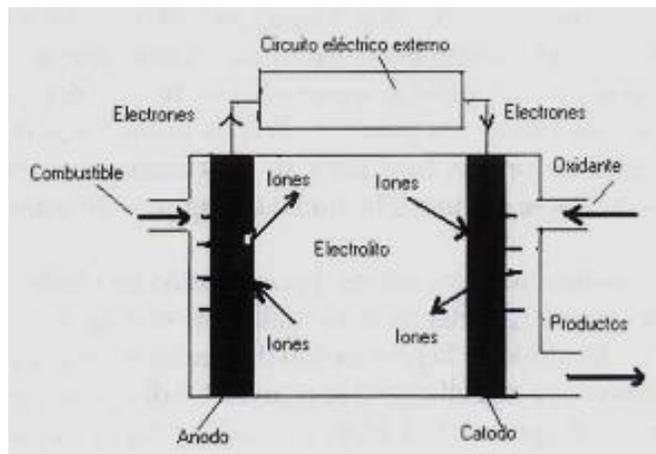


Figura 14. Composición esquemática de las celdas de combustible

Una celda de combustible está constituida por las siguientes partes:

- a. Los electrodos. Separan al combustible y al oxidante del electrolito, y están hechos de materiales porosos para incrementar el área sobre la cual ocurre la reacción. En el **ánodo** se lleva a cabo la reacción de disociación de hidrógeno en la que se generan los electrones para la conducción eléctrica y suministra los electrones al circuito externo, y en **el cátodo** se lleva a cabo la reacción de reducción de oxígeno.
- b. El electrolito. A través de este fluyen los iones positivos generados en relación anódica. El tipo de electrolito usado clasifica a las celdas de combustible, y determina el flujo de iones y la temperatura de operación de la celda.
- c. El combustible. Los combustible utilizados en las celdas de combustibles son el hidrógeno, el gas natural, hidrocarburos ligeros; sin embargo, el hidrógeno gaseoso es el único que podría ser el de mayor aplicación. El hidrógeno tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible, y en caso de accidente se dispersa rápidamente.
- d. Catalizadores. Aumentan la velocidad de la reacción de los electrodos.
- e. Colectores de corriente. Como su nombre lo indica, se encargan de conducir los electrones generados en la reacción anódica para ser utilizados por la carga conectada a la celda de combustible.
- f. Unidad de control. Mantiene la generación de corriente eléctrica a un nivel sostenible para que no haya condiciones de alta temperatura y/o corto circuito.

- g. Acumulador. Almacena la energía generada por el ensamble de la celda de combustible.
- h. Reformador. Su función es la de reformar (convertir en H_2) el combustible empleado por la celda.
- i. Electrolizador. Genera el hidrógeno molecular necesario para la reacción anódica.
- j. Auxiliares. Cables, sustratos, tornillería y demás dispositivos empleados en el ensamble.
- k. Oxidante. Aunque el oxígeno es el gas oxidante, no es necesario utilizarlo puro, ya que para muchas de las aplicaciones se usa el aire como el oxidante [43] y [44].

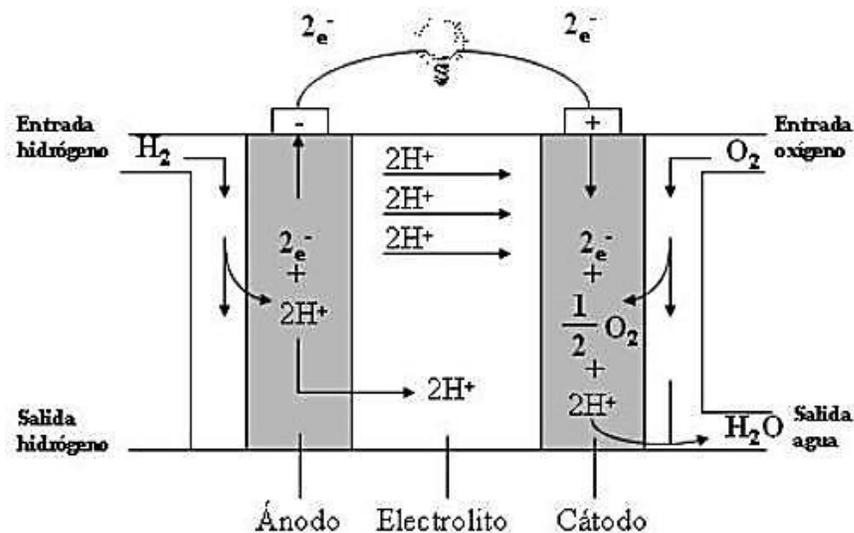


Figura 15. Estructura de una celda de combustible

De las distintas celdas de combustible que hablaremos en este apartado:

- Membrana polimérica (PEM)
- Óxido sólido (SOFC)
- Ácido fosfórico (PAFC)
- Conversión directa de metanol (DMFC)
- Alcalina (AFC)
- Carbonato fundido (MFCF)
- Reversible (REGENERATIVA)

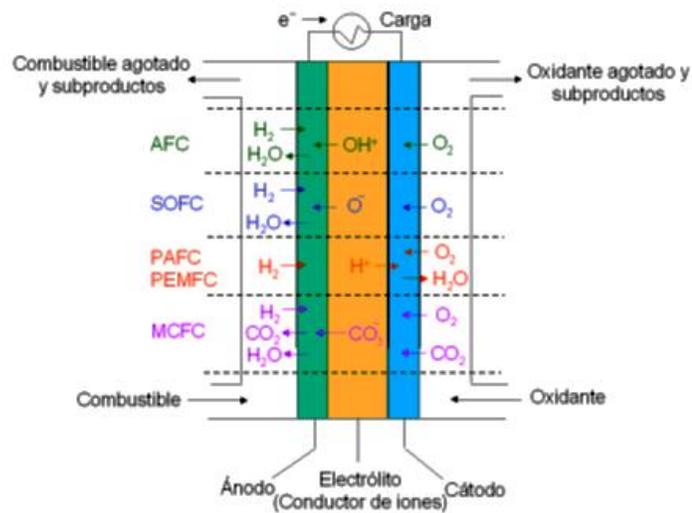


Figura 16. Tipo de celdas de combustible

6.1 MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)

Las pilas de combustible de tipo PEM se denominan así porque el electrolito está constituido por una membrana polimérica que separa la parte anódica y catódica de una celda. Se trata de un conductor protónico, que permite el paso a través de él de los iones H^+ , pero con la particularidad de ser impermeable de sus sustancias [45].

En automoción, las pilas de combustible más prometedoras corresponden al tipo de electrolito polimérico, dada su moderada temperatura de operación ($60-80\text{ }^{\circ}\text{C}$), alta densidad energética en relación al peso y al volumen, y alto rendimiento. En estas pilas el electrolito es una membrana polimérica permeable al paso de protones [42].

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico es una de las tecnologías relativamente más recientes y prometedoras. Las primeras aplicaciones estaban limitadas a sistemas militares y espaciales en hospitales, donde el costo no es un problema pero que se requiere de un funcionamiento excepcional.

Estas pueden ser alimentadas por hidrogeno puro o por combustible formados y con oxígeno el cual se obtiene directamente del aire. Su temperatura de funcionamiento es baja y no requieres de aislamientos [46].

Utilizan como electrólito una membrana polimérica conductora de protones. Dicha membrana se encuentra dos electrodos porosos impregnados en el lado de la membrana con un catalizador y un material hidrofóbico del otro lado. Operan a temperaturas relativamente bajas (unos 80 °C), tienen una densidad de potencia alta, pueden variar su salida rápidamente para satisfacer cambio en la demanda de potencia, también adecuadas donde se requiere una demanda inicial alta. El único líquido que utiliza la celda PEM es agua, por lo que los efectos por corrosión son mínimos.

El desempeño de las celdas PEM es muy variado, ya que éste depende de la presión, temperatura y calidad de los gases, entre otros parámetros. Son los principales candidatos para vehículos ligeros [47]. El electrolito está constituido por una membrana cuyo material constituyente es un polímero. Este tipo de membrana es un buen conductor de protones bajo determinadas condiciones al mismo tiempo que es aislante de electrones.

En una celda de combustible el hidrógeno fluye a través de los canales de alimentación del ánodo, se difunde a través de la capa de difusión del mismo y alcanza la capa catalizadora donde es oxidado liberando electrones y protones.

Los electrones liberados no pueden atravesar la membrana y son conducidos a través de la capa catalizadora del ánodo y arriban al cátodo vía el circuito externo, mientras que los protones son transportados a través de la membrana a la capa catalizadora del cátodo.

Al mismo tiempo, oxígeno o aire es inyectado en los canales de alimentación del cátodo y se difunde a través de la capa de difusión del mismo hacia la capa catalizadora, donde reacciona con los protones y los electrones, generando agua. Un requerimiento de las pilas de tipo polimérico es mantener un alto contenido de agua en el electrolito para asegurar alta conductividad iónica. La conductividad iónica del electrolito es alta cuando la membrana está completamente saturada de agua, y así ofrece resistencia mínima al paso de iones, incrementándose la eficiencia de la celda

especialmente con altas densidades de corriente. El voltaje producido por la celda depende de la temperatura de la celda y de la presión parcial de los reactantes [48].

Componentes de una pila PEM

Electrolito: Se caracterizan precisamente por la naturaleza polimérica de su electrolito. Se trata de una membrana sólida compuesta por un polímero sulfonado de politetrafluoroetileno (PTFE). En las pilas de tipo PEM de baja temperatura, el electrolito comercial más común es el Nafion desarrollado por Dupont. Estas membranas se caracterizan por poseer un alto grado de conducción protónica a través de ellas, ser impermeables a los gases y aislantes eléctricos. Sin embargo, todas estas características no se cumplen absolutamente, o se dan sólo en condiciones de operación específicas, convirtiéndose en las principales causas de pérdidas de voltaje en la pila.

Aunque todavía no se tiene un conocimiento exacto de cuál es el mecanismo de transporte de los protones a través de la membrana, sí se ha comprobado que la cantidad de agua contenida en el polímero es determinante en el funcionamiento de una pila. Una correcta hidratación fomenta la circulación protónica al formarse mayor número de clusters conductivos o dipolos reorientados y, por tanto, disminuye la existencia de resistencias iónicas. Estos aspectos convierten la gestión del agua en una de las principales claves en el desarrollo de las pilas.

Capas catalíticas: Básicamente el electrodo es una delgada capa catalítica localizada entre la membrana y las capas difusoras, tanto en el ánodo como en el cátodo. Los electrodos están formados por un material carbonoso altamente poroso (alta superficie específica) en el cual se soportan las moléculas de catalizador homogéneamente distribuidas. Es en estos centros activos donde se producen las reacciones electroquímicas del ánodo y del cátodo. En general, cuanto mayor sea el número de estos puntos de contacto, mayor número de reacciones podrán producirse simultáneamente, siendo el voltaje efectivo obtenido también más alto.

El soporte carbonoso debe poseer una elevada conductividad eléctrica, una alta porosidad y una alta estabilidad química y mecánica. Por otro lado, es necesario que la fase activa o catalizador tenga un elevado número de centros activos (deben ser partículas pequeñas y muy bien dispersas), así como una alta actividad intrínseca de los sitios activos para que sea capaz de superar los sobrepotenciales de reacción anódica y catódica, las resistencias óhmicas y las de transporte de masa.

Capas difusoras: Las capas difusoras sirven de soporte mecánico a los electrodos. Están formadas por materiales porosos buenos conductores de la electricidad, de forma que distribuyan los gases uniformemente sobre las capas catalíticas, favorezcan la extracción del agua líquida de la capa catalítica catódica y sirvan de conexión eléctrica entre las capas catalíticas y las placas bipolares. Los principales parámetros que caracterizan a los materiales con los que se fabrican las capas difusoras son la porosidad, la compresibilidad, la permeabilidad y la conducción eléctrica y térmica.

Placas bipolares y monopolares: Son los elementos que forman las celdas ubicadas entre las placas terminales. A diferencia de las bipolares, las cuales tienen celdas a ambos lados, las monopolares son aquellas que sólo tienen una celda en una de sus caras, mientras que la otra está en contacto con el colector de corriente de una de las placas terminales.

Colectores de corriente: Este elemento tiene como función cerrar el circuito eléctrico de la pila y permitir la conexión con la aplicación exterior que demande la corriente eléctrica generada. Incluso en el caso de monoceldas suelen ser un elemento independiente separado de las placas terminales. Por lo general, suelen estar hechos de un material muy buen conductor, como cobre, o bien de otro metal recubierto con una fina capa de oro para mejorar la conducción.

Placas terminales: En los casos en los que existen colectores de corriente como elementos individuales, las placas terminales quedan exentas de esta función y pueden ser fabricadas en materiales no conductores. Sobre ellas recae la

responsabilidad del cierre y hermeticidad de la pila, por tanto su diseño debe estar enfocado para permitir un apriete homogéneo de todos los elementos interiores.

Sellos y juntas: Los sellos y juntas forman parte del sistema de sellado de las pilas. Son los elementos encargados de evitar las fugas de gas al exterior de la pila o el cruce de gases de una cara a otra de una misma celda. Pueden ser elementos individuales o componentes integrados en el propio electrodo.

Los materiales más comunes para su fabricación son polímeros termoplásticos capaces de soportar las condiciones de operación de la pila, como el teflón (PTFE), caucho de etileno propileno dieno (EPDM), fluoruro de vinildieno (VDF), siliconas, etc. [45].

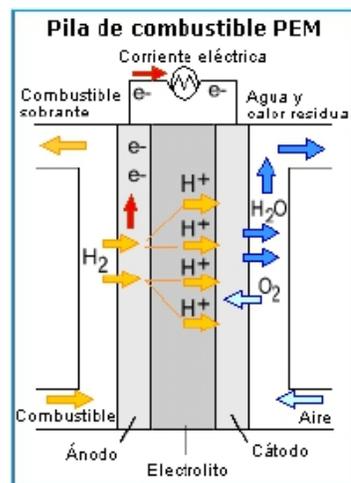


Figura 17. Principio de operación de una celda de combustible PEM

Una representación esquemática de una pila de combustible PEM se muestra en la figura anterior, a diferencia de una batería convencional, el combustible y el oxidante se suministran con el dispositivo de fuentes externas. El dispositivo puede ser operado hasta que el combustible (u oxidante) se haya agotado.

6.2 ÓXIDO SÓLIDO (SOFC)

Las Pilas de óxido sólido (SOFC) son candidatos prometedores para la futura conversión de energía debido a su eficiencia en la generación de electricidad a partir

de una variedad de combustibles, tales como combustibles de hidrógeno o hidrocarburos [49].

El futuro de SOFC se asocia con el desarrollo de nuevos materiales para la aplicación como electrolitos, electrodos e interconexiones para ser operado a una temperatura intermedia (IT) (600-800 °C) [50].

Usan electrólito sólido, generalmente el conductor de iones óxido circona. Este óxido es buen conductor de ión óxido a partir de unos 1000 °C. Los combustibles más adecuados son el H₂, el CO y el metano, mientras que en el cátodo se suministra aire u oxígeno. La elevada temperatura de operación hace posible el reformado interno de metano, evita el uso de catalizadores caros como el Pt, y hace eficiente la utilización del calor transportado por los productos de la reacción en calefacción y producción de agua caliente o turbinas.

Las SOFC son dispositivos sencillos, ya que constan fundamentalmente de un electrolito sólido adheridos con dos electrodos (ánodo y cátodo).

Requisitos comunes para los componentes de una pila SOFC:

1. Los componentes no deben reaccionar entre sí en las condiciones de fabricación y operación (temperatura y presión de oxígeno), esto para evitar una posible formación de fases secundarias en las interfaces que puedan producir caídas óhmicas en la pila.
2. La microestructura no debe evolucionar con el tiempo a la temperatura de trabajo, ya que esto produciría una variación de la respuesta de la pila durante su funcionamiento.
3. Los materiales deben presentar coeficientes de expansión térmica semejantes para minimizar roturas o separación de los mismos por fatiga mecánica.
4. Es deseable que los componentes sean baratos y que su procesado sea sencillo de cara a su producción a gran escala y bajo coste [51].

Materiales de interconexión conectan el lado del ánodo de una sola célula con el de cátodo de una sola célula adyacente, actuando como una barrera física para evitar cualquier contacto entre las atmósferas reductoras y oxidantes [52].

Interconexiones deben presentar las siguientes propiedades:

- Buena conductividad eléctrica.
- Química adecuada y estabilidad térmica a temperaturas de funcionamiento de aproximadamente 800 °C en ambas reductoras y oxidantes atmósferas.
- Su coeficiente de expansión térmica (TEC) entre las temperaturas ambientales y de servicio debe ser comparable a la de los electrodos y electrolito.
- No hay reacción o inter-difusión entre la conexión y sus componentes adyacentes.
- Una baja permeabilidad a los gases de reactante, una buena resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.
- Facilidad de fabricación y bajo costo [53] y [54].

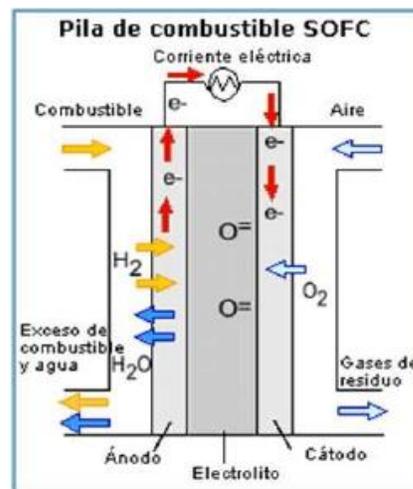


Figura 18. Principio de funcionamiento de una Celda SOFC

6.3 ÁCIDO FOSFÓRICO (PAFC)

La Pila de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC, del inglés Phosphoric Acid Fuel Cell) es la tecnología más madura en cuanto a desarrollo y comercialización se refiere lleva más de 20 años en desarrollo y ha recibido una inversión mundial total cercana a los 500 millones de dólares. Tuvo un crecimiento considerable hace unos años ya que se creía que de todas las tecnologías de baja temperatura, era la única tecnología que podía proporcionar una tolerancia relativa a combustibles provenientes de hidrocarburos reformados, por lo que su implantación sería más fácil a corto plazo [55].

Sólo cambios menores ha experimentado el desempeño de estas celdas debido principalmente a condiciones de operación. El desempeño puede verse afectado adversamente por las impurezas en el combustible y el gas oxidante.

El desempeño de las celdas de combustible de ácido fosfórico es inferior al desempeño de las PEMFC, la diferencia principal entre las dos celdas de combustible es el electrólito. En las PAFC, es distribuido en una capa porosa de carburo de silicio (SiC) se separa el ánodo y el cátodo. Este tipo de electrolito requiere de un buen control del líquido, en los depósitos del electrólito para evitar derrames.

Las PAFC son operadas con temperaturas superiores a los 150 °C (aproximadamente 220 °C). Esta es una de las principales ventajas; altas temperaturas de funcionamiento generalmente están asociadas a una buena cinética de CO en el ánodo, las hace tolerante a aproximadamente 1% CO en el combustible. El ambiente electroquímico dentro de las PAFC a esas temperaturas de funcionamiento es muy corrosivo [56].

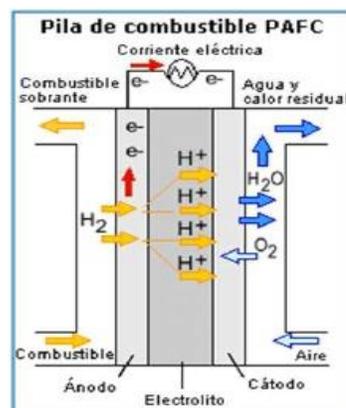


Figura 19. Principio de Funcionamiento de la Celda de Combustible PAFC

El desempeño de las Celdas de Combustible de ácido fosfórico es inferior al desempeño de las PEMFC, la diferencia principal entre las dos Celdas de Combustible es el electrolito. En las PAFC, es distribuido en una capa porosa de carburo de silicio (SiC) que separa al ánodo y al cátodo. Este tipo de electrolito requiere de un buen control del líquido, en los depósitos del electrolito para evitar derrames.

Las PAFC son operadas con temperaturas superiores a los 150 °C (aproximadamente 220 °C). Esto es una de las principales ventajas; altas temperaturas de funcionamiento generalmente están asociadas a una buena cinética. La excelente oxidación cinética de CO en el ánodo, las hace tolerante a aproximadamente 1% CO en el combustible. El ambiente electroquímico dentro de las PAFC a esas temperaturas de funcionamiento es muy corrosivo.

Por consiguiente, se requieren platos bipolares de carbono sólido, y los apoyos de catalizador de carbono pueden requerir el tratamiento térmico previo especial para mejorar su resistencia a la corrosión. Las PAFC generalmente padecen degradación del desempeño a largo plazo (en el orden de los 5 mV por 1000 h), con la proporción más baja publicada igual a los 2 mV por 1000 h durante 10000 horas, con densidades de corriente alrededor de los 0.2 y 0.2 A/m² [57].

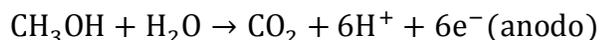
6.4 CONVERSIÓN DIRECTA DE METANOL (DMFC)

Hoy en día las Celdas de combustible PEM, puede ser alimentadas con metanol (o combustibles con estructura química similar), de allí surge la creación de la Celda de Combustible DMFC, conceptualmente, esto podría conducir a un sistema simple con un combustible que posee una alta densidad de energía y el metanol es un líquido que se encuentra a bajas temperaturas en condiciones de ambiente. Los niveles de rendimiento alcanzados con la DMFC, usando aire, se encuentra ahora en el rango de (180-250 mA/cm²), pero el rango de los voltajes de las celdas se encuentran típicamente entre (0.25-0.4V) [58].

Las Celdas de Combustible de metanol directo (DMFC) pertenecen a una familia de combustible de baja temperatura. Estas celdas ofrecen una serie de ventajas sobre las celdas de hidrógeno. Las tecnologías modernas permiten producción de masas de hidrógeno a presión hasta 700 bares, incluso en esta presión la densidad de energía del hidrógeno es 3 veces menor, que la de un metanol líquido. El metanol es fácil de almacenar y transportar. Estas celdas se reducen a una simple sustitución de los cartuchos de metanol o recargar el tanque. Estos beneficios estimulan el

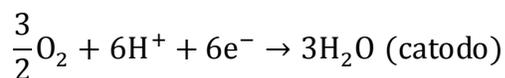
crecimiento de la DMFC. Sin embargo, DMFC tiene una serie de inconvenientes, que aún dificultan su comercialización. En primer lugar la cinética lenta de oxidación de metanol, es mucho más lento que el de hidrógeno. En contraste con una Celda de hidrógeno, en donde la pérdida de tensión anódica es insignificante en una DMFC esta pérdida constituye una fracción significativa de las pérdidas en el voltaje. En segundo lugar, el rendimiento de la DMFC disminuye con el cruce de metanol a través de la membrana de electrolito de polímero. Este cruce reduce drásticamente la tensión de la Celda, específicamente cerca de las condiciones a circuito abierto. En tercer lugar, la oxidación de metanol es acompañado por la liberación de una gran cantidad de gases de CO_2 , lo que perturba el flujo en el ánodo, dificulta el transporte del metanol hacia el catalizador. Por último, pero no menos importante, el alto flujo de líquido (agua) que pasa a través de la membrana, retrasa la transferencia de oxígeno a los catalizadores aumentando así la pérdida de tensión en el cátodo [59].

El principio de operación de una Celda de Combustible DMFC, que emplea una membrana de polímero sólida. El metanol y el agua reaccionan electroquímicamente (es decir, el metanol se electro-oxida) en el ánodo para producir dióxido de carbono, protones y electrones como se muestra en la siguiente ecuación.



Es ventajoso un electrolito ácido para ayudar en el rechazo de CO_2 , que reforma los carbonatos insolubles en los electrolitos alcalinos.

Los iones positivos producidos en el ánodo emigran a través del electrolito de polímero al cátodo, donde ellos reaccionan con el oxígeno (usualmente al aire) y producen agua como se observa en la siguiente ecuación, los electrones producidos por el ánodo transportan la energía libre, que viaja a través del circuito externo donde ellos pueden hacer trabajo útil, como impulsar un motor eléctrico [57].



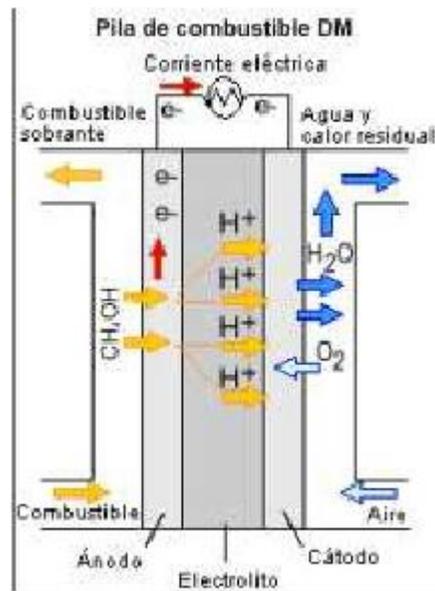


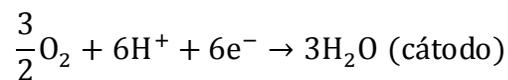
Figura 20. Principio fundamental de una Celda de Combustible tipo DMFC

El principio de operación de una Celda de Combustible DMFC, que emplea una membrana de polímero sólida, se muestra en la figura anterior. El metanol y el agua reaccionan electroquímicamente (es decir, el metanol se electro-oxida) en el ánodo para producir dióxido de carbono, protones y electrones, como se observa en la siguiente ecuación.



Es ventajoso un electrolito ácido para ayudar en el rechazo de CO₂, que forma los carbonatos insolubles en los electrolitos alcalinos.

Los iones positivos producidos en el ánodo emigran a través del electrolito de polímero al cátodo, donde ellos reaccionan con el oxígeno (usualmente el aire) y producen agua como se observa en la siguiente ecuación.



Los electrones producidos por el ánodo transportan la energía libre de Gibbs, que viaja a través del circuito externo donde ellos pueden hacer un trabajo útil, como impulsar un motor eléctrico [57].

6.5 ALCALINA (AFC)

El alto rendimiento de la celda alcalina respecto al ácido fosfórico y otras celdas conducen a la verosimilitud de desarrollar la tecnología para la aplicación terrestre. El líder en el desarrollo de tecnología de alcalino para aplicación espacial, UTC fuel cells, investigó las adaptaciones tecnológicas para aplicaciones de potencia terrestres, estacionarios que utilizan aire oxidante en la década de 1970 [58].

Las Celdas alcalinas han sido una de las primeras Celdas de Combustible modernas empleadas entre los años 60 y 70 en forma extensiva en los programas espaciales como el programa Apolo, para suministrar potencia a equipos de las naves y agua pura; hoy en día se emplean para suministrar potencia a bordo del transportador espacial (Space Shuttle Orbiter).

La celda de combustible utiliza como electrolito el hidróxido de potasio (KOH), el cual es una solución concentrada (85%), soportada generalmente en asbesto. Se emplea KOH por tener excelente conductividad iónica. Su temperatura de operación se encuentra entre 25 a 220 °C. En esta celda el combustible es el hidrógeno y se emplea aire oxidante [60].

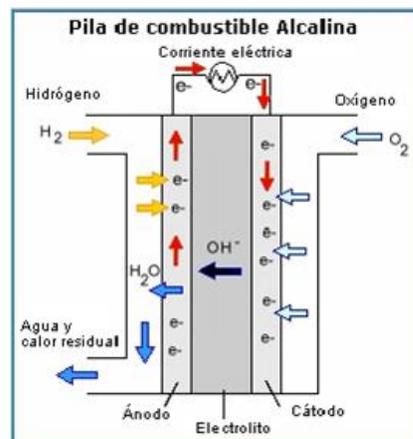


Figura 21. Principios de operación de una Celda de combustible Alcalina

Como se muestra en la figura anterior se produce la oxidación del hidrógeno en el ánodo a través de la reacción con los iones del hidróxido (OH^-) en el electrolito para generar agua. En el cátodo, el cambio de balance de energía del hidróxido se forma a través de la reacción con el agua, los electrones y oxígeno. En alta densidad de

corriente, el consumo del agua en el cátodo tiende a secar el mismo y puede incluso causar la solidificación del electrolito [61].

Las condiciones de funcionamiento de la Celda de Combustible AFC, es amplia, ya que operan con una variedad de catalizadores sobre un rango amplio de temperaturas, presión, y de la concentración de solución del electrolito [56].

6.6 CARBONATO FUNDIDO (MFCF)

La celda de combustible de carbonato fundido opera aproximadamente a 650 °C (1200 °F). La alta temperatura de funcionamiento es necesaria para alcanzar la conductividad suficiente del electrolito de carbonato. Una de las ventajas asociadas con esta temperatura es que no se requiere de catalizadores de metal nobles, para la oxidación electroquímica de la celda o en el proceso de reducción. Están desarrollándose las celdas de combustible de carbonato fundido para gas natural y plantas de potencia a base de carbón para utilidad industrial, eléctrica, y aplicaciones militares [58].

El electrolito en las MCFC es una mezcla de carbonatos alcalino, típicamente Li_2CO_2 y K_2CO_3 . Por consiguiente, el ion portador de carga no es más grande que un protón pero el ion de carbonato, CO_3^{2-} , se mueve desde el cátodo hasta el ánodo. Una peculiaridad de las MCFC es el agotamiento de iones de carbonato formados en el cátodo necesario para el reciclaje de CO_2 del ánodo al cátodo o para proporcionar CO_2 de alguna fuente alternativa. El gas del cátodo está compuesto típicamente de 12.6% O_2 , 18.4% CO_2 , y 69% N_2 .

En temperaturas relativamente altas, es decir 600 °C, las sales se derriten y conducen aniones de carbonato (CO_3^{2-}). Cuando funcionan a temperaturas elevadas, los metales nobles no son necesarios en los electrodos que por lo general están hechos del Ni (ánodo) y NiO (cátodo), lo que reduce los costes.

La potencia de una celda depende solo de la presión parcial del H_2 , O_2 y H_2O . Normalmente la presión del CO_2 es diferente en el ánodo y el cátodo.

Las pilas MCFC son más eficientes y cuestan menos que las pilas de ácido fosfórico (PAFC). Estas pilas pueden tener un rendimiento de aproximadamente el 60%, mientras las PAFC sólo obtienen entre un 37 y un 42% de rendimiento. Cuando el calor que se desprende es captado y utilizado, el rendimiento total del combustible puede ser de hasta un 80-85%.

Al contrario que las pilas alcalinas, de ácido fosfórico y de membrana de electrolito polímero, las pilas MCFC no necesitan un reformador externo para convertir en hidrógeno otros combustibles de energía más densa. Debido a las altas temperaturas a las que operan, estos combustibles se convierten en hidrógeno dentro de la propia pila de combustible mediante un proceso que se denomina conversión interna, lo que también reduce costes.

Las pilas de carbonato fundido no son propensas a la contaminación por monóxido o dióxido de carbono (pudiendo incluso emplear óxidos de carbono como combustible), permitiendo que se puedan usar en ellas como combustible gases fabricados a partir del carbón. Estas altas temperaturas también favorecen la reformación de vapor, de manera que los combustibles convencionales, por ejemplo el gas natural, pueden alimentar la pila sin reformadores externos abultados y costosos.

Aunque son más resistentes a las impurezas que otros tipos de pilas la vida útil de las MCFC se ve limitada por el deterioro que sufren al trabajar a altas temperaturas. Los científicos buscan materiales resistentes a la corrosión, como la provocada por el sulfuro, para fabricar los componentes. Así como diseños que aumenten la duración de la pila sin hacer que disminuya su rendimiento [62], [63] y [64].

6.7 REVERSIBLE (REGENERATIVA)

Estas pilas son dispositivos híbridos capaces de separar agua en sus componentes básicos, hidrógeno y oxígeno, por medio de un electrolizador que funciona con energía solar. El hidrógeno y el oxígeno son posteriormente utilizados como combustibles y oxidantes de una pila de combustible que generará electricidad, calor y agua. El agua se vuelve a recircular hacia el electrolizador y así puede continuar el proceso regenerativo. La principal ventaja es que no hay que desarrollar una infraestructura específica para el manejo del hidrógeno, mientras que el inconveniente serían los costes extras de hacer pila reversible [51].

El agua es separada en hidrógeno y oxígeno mediante un electrolizador solar. El hidrógeno y el oxígeno alimentados en la celda de combustible generan electricidad, calor y agua. El agua es entonces recirculada de regreso hacia el electrolizador alimentado con energía solar y el proceso comienza de nuevo. Estos tipos de celda de combustible están siendo investigados por la NASA y otras organizaciones a nivel mundial [65].

VI. APLICACIONES DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible comprenden una amplia variedad de aplicaciones: desde dispositivos portátiles (ordenadores, teléfonos móviles, pequeños electrodomésticos), vehículos de todo tipo (coches, autobuses, barcos), hasta sistemas estacionarios de generación de calor y energía para empresas, hospitales, zonas residenciales, etc.

Las celdas de combustible son muy útiles como fuentes de energía en lugares remotos, como por ejemplo naves espaciales, estaciones meteorológicas alejadas, parques grandes, localizaciones rurales, y en ciertos usos militares. Un sistema con celda de combustible que funciona con hidrógeno puede ser compacto, ligero y no tiene piezas móviles importantes [66].

Las celdas de combustible podría reemplazar a los motores de combustión interna en automóviles, autobuses, camiones y aún embarcaciones y locomotoras. Los beneficios serían extraordinarios en términos de seguridad de energía, aire limpio y la creación de cientos de miles de empleos [67].

Una de las primeras celdas de combustible desarrollada fue la celda de combustible alcalina. Este tipo de celda ha generado electricidad y agua en el espacio para el programa espacial de los estados unidos desde las misiones de Apolo, en la década de 1960. Otra primitiva celda de combustible que aún se utiliza es la celda de combustible de ácido fosfórico. En este momento aún funcionan más 200 unidades de estas celdas de combustible de primera generación. La mayor parte de ellas producen electricidad para edificios, pero algunos impulsan vehículos como autobuses.

Las celdas de combustible de carbonato fundido, originariamente desarrolladas a mediados de la década de 1960, hoy en día se fabrican para uso industrial, militar y en servicios públicos. El motivo principal: funcionan a altas temperaturas, alrededor de 650 °C (unos 1200 °F). Desde la década de 1950, los investigadores han trabajado con celdas de combustible de óxido sólido. Estas celdas también funcionan

a altas temperaturas y por ello es muy probable que se las utilice para generar electricidad destinada a edificios y servicios públicos.

La celda de combustible de membrana de electrolito polimérico, también denominada de membrana de intercambio de protones (PEM) está en desarrollo con el fin de que reemplace los motores de gasolina y diésel. Al igual que muchas de las otras celdas, en un primer momento estas celdas proporcionaron electricidad a las naves espaciales. Las celdas PEM viajaron al espacio con la misión estadounidense Gemini de la década de 1960. Estas celdas funcionan a una temperatura relativamente baja de 100 °C (212 °F), por lo que obtienen una capacidad operativa total bastante rápidamente, algo muy importante para su uso en transportes [68].

- 1959, un equipo encabezado por Harry Ihrig construyó un tractor basado en un celda de combustible de 15 Kilovatios para Allis-Chalmers. En este año Bacon y sus colegas mostraron una de 5 KW capaz de accionar en máquina de soldadura.
- 1960, patentes de Bacon licenciadas por el fabricante de motores de aviación Pratt y Whitney fueron utilizadas en los Estados Unidos en su programa espacial para proveer de electricidad y de agua potable a los astronautas (hidrógeno y oxígeno que está fácilmente disponible de los ataques de la nave espacial).
- 1993, se desarrolló el primer vehículo comercial con pila de combustible por la empresa canadiense Ballard, utilizando la tecnología PEM.
- 2007, las celdas de combustible se comercializan para las aplicaciones estacionarias y auxiliares.
- 2008, Honda comienza la venta de un vehículo eléctrico basado en pila de combustible.
- 2009, Panasonic fue la primera empresa en el mundo en vender la pila de combustible para uso doméstico. Desde su lanzamiento ha vendido 31000 unidades en Japón (hasta septiembre de 2013).
- 2013, se presenta una pila de combustible que podría representar la transición a las pilas asequibles. La empresa británica "ACAL Energy" ha desarrollado

una pila de combustible que ha logrado un tiempo de ejecución de 10000 horas en las pruebas de resistencia de una pila de combustible utilizando su tecnología FlowCath. A diferencia del diseño de una pila de combustible convencional de hidrógeno, la tecnología FlowCath de ACAL no se basa en el platino como catalizador, ofreciendo así una alternativa de coste potencialmente menor. El platino ha sido sustituido por un catalizador líquido patentado que actúa como refrigerante y catalizador para las células y mejora radicalmente la durabilidad de la pila de combustible al tiempo que reduce el coste del sistema.

Desventajas

- Disponibilidad de hidrógeno almacenamiento y distribución.
- Los materiales con los que se fabrican las celdas son costosos.

Ventajas

- Producen cantidades mucho más pequeñas de gases de efecto invernadero y ninguno de los contaminantes del aire que crean el smog y causan problemas de salud.
- Si se utiliza hidrógeno puro como combustible, pilas de combustible emiten sólo agua y calor como subproducto. las pilas de combustible impulsados por hidrógeno son también la energía mucho más eficiente que las tecnologías de combustión tradicional.
- Al no tener partes en movimiento son muy silenciosas.
- No usa la combustión como mecanismo de generación de energía, lo que la hace prácticamente libre de contaminación. La energía producida es 100% limpia, ya que el único producto que se obtiene es agua o vapor de agua dependiendo de la temperatura de operación del dispositivo.
- Pueden conectarse en paralelo para suplir cualquier requerimiento energético. Las celdas de combustible individuales pueden combinarse para producir motores más potentes impulsados por ejemplo a hidrógeno.

- Pueden ser fabricadas de distintos tamaños y para distintas aplicaciones que van desde su uso en telefonía celular, hasta el uso de éstas para impulsar automóviles.
- El hidrógeno puede obtenerse fácilmente por electrólisis del agua. Estos equipos de electrólisis se pueden alimentar de energía eléctrica obtenida por paneles fotovoltaicos o aerogeneradores.
- El aspecto económico también es de gran relevancia, los precios de las celdas de combustible no son altos cuando se los compara con los gastos anuales de electricidad y gas natural, con lo que su compra se amortiza en pocos meses. Con respecto a los costos de mantenimiento, éstos se consideran mínimos o casi nulos.

VII. CONCLUSIONES

De acuerdo a estudios realizados; seguiremos dependiendo de las fuentes de energía no renovables como el petróleo, el carbón y el gas natural. Sin embargo las fuentes de energía renovables tomarán un papel muy importante dentro de éstas. La energía hidroeléctrica junto con la energía eólica serán dos de las más importantes y en las cuales se tendrán los avances tecnológicos y técnicos con la finalidad de optimizar y disminuir los costos en la fabricación de dichos equipos, con el fin de disminuir los efectos negativos sobre el clima y el posible agotamiento de las fuentes no renovables.

Dentro de las alternativas de energía renovables se encuentran las llamadas celdas de combustible, que por las ventajas que ofrece será tomada como una excelente opción para generar energía limpia y con el avance tecnológico en el campo de investigación para mejorar la eficiencia de estas celdas.

Se vislumbra el desarrollo tecnológico de motores eléctricos que permitan el desarrollo de automóviles con energía limpia, evitando con ellos grandes volúmenes de contaminantes en las grandes urbes, pero desarrollando a la vez los centros de recarga para las pilas de los carros eléctricos.

Se espera también la innovación en la tecnología para la captación de energía solar, mejorando las celdas solares que permitan aumentar la eficiencia y disminuir los costos de las mismas.

Finalmente esta monografía desea contribuir en el conocimiento de las energías no renovables para darlas a conocer y que permita a los ingenieros mecánicos agrícolas adecuarlas en el desarrollo tecnológico de la mecanización agrícola.

Bibliografía

- [1] International energy agency , World energy outlook 2000, 2000.
- [2] «www.eluniverso.com,» 08/01/2012. [En línea]. Available: <http://tinyurl.com/m9b6kem>. [Último acceso: marzo 2014].
- [3] Independent Statistics & Analysis, International Energy Outlook 2013, Washington, DC : EIA, 2013.
- [4] C. Loarden, «El peso del petróleo en el consumo mundial de energía cae a niveles de 1965,» *El país*, 26/06/2013.
- [5] SENER, Estrategía Nacional de energía 2013-2027, 2013.
- [6] P. Capitanelli, 15/07/2002. [En línea]. Available: http://www.lineaverdebio.it/-/modulos_pdf/6/Energia_renovabl_y_no_renovable.pdf. [Último acceso: abril 2014].
- [7] A. Moya Moreno, Especialista en fuentes de energía e impacto ambiental, Córdoba: Andalucía, 2010.
- [8] I+D y Tecnología de ABB, «Petróleo y gas,» *ABB revista*, vol. 2, nº 11, p. 79, 2011.
- [9] J. Vega Calle, El petróleo y el gas natural. El recorrido de los minerales, Madrid: Doménech, 2007.
- [10] A. Á. Cerutti, La refinación del petróleo, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria / Universidad Nacional de Cuyo, 2001.
- [11] EVE, El petróleo y la energía en la economía. Los efectos económicos del encarecimiento del petróleo en la economía vasca., Servicio central de publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria-Gasteiz., 2008.
- [12] J. Ianiszewski R., «Círculo Astronómico,» 1/04/2007. [En línea]. Available: <http://www.circuloastronomico.cl/energia/carbon.html>.
- [13] Foro de la industria nuclear española, El uranio como fuente de energía, Foro Nuclear, 2008.
- [14] S. Bulbalian, La radiactividad, México D.F: Fondo de cultura económica, 1996.
- [15] ENDESA, «Endesa Educa,» [En línea]. Available: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/x.-las-centrales-nucleares.

- [16] F. Torres Roldán y E. Gómez Morales, Energías renovables para el desarrollo sustentable en México, México: SENER, 2006.
- [17] A. M. Cabello Quiñonez, Energías alternativas: Solución para el desarrollo sustentable, ADNUMA CHILE - REFINOR ARGENTINA, 2006.
- [18] S. Bhattacharya, A. Siddique y H. L. Pham, Un estudio sobre la gasificación de la madera para la producción de gas bajo en alquitrán energía, 1999 .
- [19] Ambientum, «Ambientum.com,» Green Tal, [En línea]. Available: http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/Balance_de_la_biomasa.asp#.
- [20] Idae, Biomasa: Digestores anaerobios, Madrid: Ministerio de industria, Turismo y comercio. IDAE, 2007.
- [21] Y. Lorenzo Acosta y M. C. Obaya Abreu, «La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I.,» *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XXXIX, nº 1, pp. 35-48, 2005.
- [22] El universal, «Energía renovable cubre el 12,9% de la demanda mundial,» 08 Enero 2012.
- [23] ENDESA ENERGY, «Twenergy,» Endesa, [En línea]. Available: <http://twenergy.com/energia-eolica>.
- [24] AMDEE, «Asociación Mexicana de Energía Eólica,» [En línea]. Available: <http://www.amdee.org/viento-en-numeros>. [Último acceso: 13 Agosto 2014].
- [25] IPCC Grupo de trabajo III, «informe especial sobre Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático,» IPCC, 2011.
- [26] National geographic, «National geographic,» [En línea]. Available: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/hydropower-profile>.
- [27] ENDESA ENERGY, «Twenergy,» [En línea]. Available: <http://twenergy.com/a/ventajas-de-la-energia-hidraulica-433>.
- [28] ENDESA ENERGY, «Twenergy,» Endesa, [En línea]. Available: <http://twenergy.com/a/desventajas-de-la-energia-hidraulica-434>.
- [29] C. Castillo Martín, Energía renovables. Energía oceánica, Madrid: ICAI, 2009.
- [30] Ambientum, «Ambientum.com,» Green Tal, [En línea]. Available: http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/energia/Impacto_ambiental_de_la_biomasa.asp#.

- [31] «Tedel.org,» [En línea]. Available: http://tedel.org/nuestroambiente/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid. [Último acceso: 8 Septiembre 2014].
- [32] Energy, «Ecologistas en acción,» [En línea]. Available: <http://www.ecologistasenaccion.org/article10057.html>.
- [33] ALLPE, «ALLPE medio ambiente,» [En línea]. Available: http://www.allpe.com/seccion_detalle.php?idseccion=273.
- [34] «Energía Solar,» [En línea]. Available: <http://www.energiasolar.ws/informacion/energia-hidraulica-impacto-ambiental.html>.
- [35] ALLPE, «ALLPE medio ambiente,» [En línea]. Available: http://www.allpe.com/seccion_detalle.php?idseccion=272.
- [36] A. Pino priego, Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno., Sevilla: Universidad de Sevilla, 2009.
- [37] J. I. Linares Hurtado y B. Y. Moratilla Soria, El hidrógeno y la energía, Madrid: Asociacion nacional de ingenieros del ICAI, 2007.
- [38] TESE, Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-pilas de combustible como fuente de energía, Edo. de México: Tecnológico de Estudio superiores de Ecatepec, 2009.
- [39] V. Báez y W. González, Estado del arte de las celdas de combustible: Fuente energética del futuro., Departamento de tecnología de materiales y Centro de información Técnica de petrolera de Venezuela S.A de C.V, 2002.
- [40] A. Bieberle, The electrochemistry of solid oxide fuel cell anodes: experiments, modeling and simulations., Zurich: Swiss federal institute of technology, 2000.
- [41] K. D. Kreuer, «On the development of proton conducting polymer membranes for hydrogen and methanol fuel cells,» *Journal of membrane science*, nº 185, pp. 29-39, 2001.
- [42] A. Mayandia Aguirre, Descripción y modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [43] F. Acuña Garrido y V. Muñoz Yi, «Celdas de Combustible. Una alternativa amigable con el medio ambiente para la generación de potencia y su impacto con el desarrollo sostenible de Colombia en el siglo XXI,» Universidad del Norte, 2001.
- [44] S. Mukerjee, S. J. Lee, E. A. Ticianelli, J. McBreen, B. N. Grgur, N. M. Markovic, P. N. Ross, J. R. Giallombard y E. S. De Castro, Investigation of enhanced CO tolerance in proton Exchange membrane fuel cells by carbon supported PtMo alloy catalyst, *Electrochemical and solid state*

letters, 1999.

- [45] F. Barreras y A. Lozano, «Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.energia2012.es/sites/default/files/Hidr%C3%B3geno.%20Pilas%20de%20combustible%20de%20tipo%20PEM.pdf>.
- [46] B. A. Del Valle Soberanes, J. S. Pathiyamatton , G. Alonso Nuñez, S. Gamboa Sánchez, M. Gutierrez Macedo, A. Alday Chavez, C. Romano Acevedo , A. Pitoll García y E. R. Zavaleta Olea, «Fabricación de una celda de combustible tipo PEM por control numérico, para el sector automotriz,» de *8vo Congreso Nacional de Mercadotecnia* , Veracruz, 2009.
- [47] U. Cano Castillo, «Las celdas de combustible: verdades sobre la generación de electricidad limpia y eficiente vía electroquímica,» *Boletín iee*, pp. 208-215, 1999.
- [48] D. Feroldi, M. Serra y J. Riera , Control de sistemas basados en pilas de combustible tipo PEM, Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 2006.
- [49] S. Singhal y K. Kendall, Alta temperatura de óxido Sólido Pilas de combustible: Fundamentos, Diseño y aplicaciones, Oxford, Reino Unido: Elsevier, 2003.
- [50] A. Martínez Amesti, A. Larrañaga, L. M. Rodríguez Martínez y A. T. Aguayo, Fuentes de Alimentación, 2008.
- [51] J. Peña Martínez, «Pilas de combustible de óxidos sólido (SOFC),» de *Pilas de combustible*, DECHEMA e.v, 2006, pp. 5-13.
- [52] K. Hilpert, W. J. Quaddakers, L. S. W. Vielstich, H. Gasteiger y A. Lamm, Manual de células - Fundamentos de combustible, tecnología y aplicaciones, Nueva Jersey: EE.UU, 2003.
- [53] Z. Yang , K. Weil, P. Axton D. M. y J. Stevenson, «Selección y Evaluación de aleaciones resistentes al calor para aplicaciones de interconexión SOFC,» *Revista de la sociedad Electroquímica*, vol. 9, nº 150, pp. A1188-A1201, 2003.
- [54] D. Brett, A. Atkinson, N. Brandon y S. Skinner, «Células de combustible de óxido de temperatura intermedia,» *REV CHEM SOC*, vol. 8, nº 37, pp. 1568-1578, 2010.
- [55] APPICE, «APPICE,» [En línea]. Available: http://www.appice.es/esp/2/2_3.htm .
- [56] M. C. Fernández Valecillos, Celdas de Combustible, Mérida: Universidad de los Andes, 2009.
- [57] A. Facendo, Caracterización del comportamiento Eléctrico de una planta de Celda de Combustible como fuente de Generación de Electricidad. Trabajo de grado., Universidad experimental politécnica de la fuerza armada nacional, 2007.

- [58] Fuel Cell Handbook, Séptima Edición, EG&G Technical Services, 2004.
- [59] K. D. Kreuer, T. Van NGuyen y T. S. Zao, Advances in fuel cell vol 1, 2007.
- [60] V. Sánchez, Fuentes de energía alternativas. Tecnologías emergentes..
- [61] M. M. Mench, Fuel cell engines, John Wiley & Sons, 2008.
- [62] I. Hidalgo, TFC: Estudio sobre un motor brushless para su aplicación a un avión no tripulado, Escuela politécnica de Abacete, 2007.
- [63] J. Canales Vázquez y J. C. Ruiz Morales, Fuel Cells in materials for sustainable Energy Applications. Conversion, Storage, Trabsmission and Consmpction, Pan Stanford Publishing Pte Ltd, 2013.
- [64] Ecomotriz, «Pila de combustible: Tipos, usos y propiedades.,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.ecomotriz.com/2011/11/pila-combustible-bateria-alkalina/>. [Último acceso: 12 Octubre 2014].
- [65] A. T. Yoder López, TESIS. El hidrógeno como fuente alterna de energía, México D.F.: Instituto Politécnico Nacional, 2007.
- [66] Centro Nacional del hidrógeno, «Centro Nacional del Hidrógeno,» [En línea]. Available: <http://www.cnh2.es/info-h2/pilas-de-combustible/>. [Último acceso: 2 Noviembre 2014].
- [67] [En línea]. Available: http://www.claudio-otero.cl/fuel_cells/. [Último acceso: 2 Noviembre 2014].
- [68] «SEED,» [En línea]. Available: <http://www.planetseed.com/es/node/15755> . [Último acceso: 2 Noviembre 2014].