

Tema 2: Combustibles fósiles e hidrógeno

2.1 Carbón

2.1.1 Procesos de formación

2.1.2 Tipos, estructura y composición

2.1.3 Usos

2.2 Petróleo

2.2.1 Formación y extracción

2.2.2 Procesamiento de gasolinas

2.1.3 Gas natural

2.3 Aplicaciones del hidrógeno en la producción de energía.

2.4 Celdas Combustibles

- Los combustibles fósiles son aquellos formados a partir de materia orgánica durante millones de años.
- Se estima que cada año se forman nueve millones de toneladas de carbón, 0.25 de petróleo y 0.15 de gas natural.

6.1 Carbón.

6.1.1 Procesos de formación

- El carbón se origina a partir de la densa vegetación que crece en lugares pantanosos. Poco se conoce acerca de las reacciones químicas que se encuentran involucradas en este proceso.
- La energía que se dispone a partir de la combustión del carbón fue almacenada durante el proceso de fotosíntesis en el vegetal.
- El tiempo y la temperatura son probablemente bastantes importantes en la determinación del contenido de carbono del carbón, el cual nunca se encuentra libre.

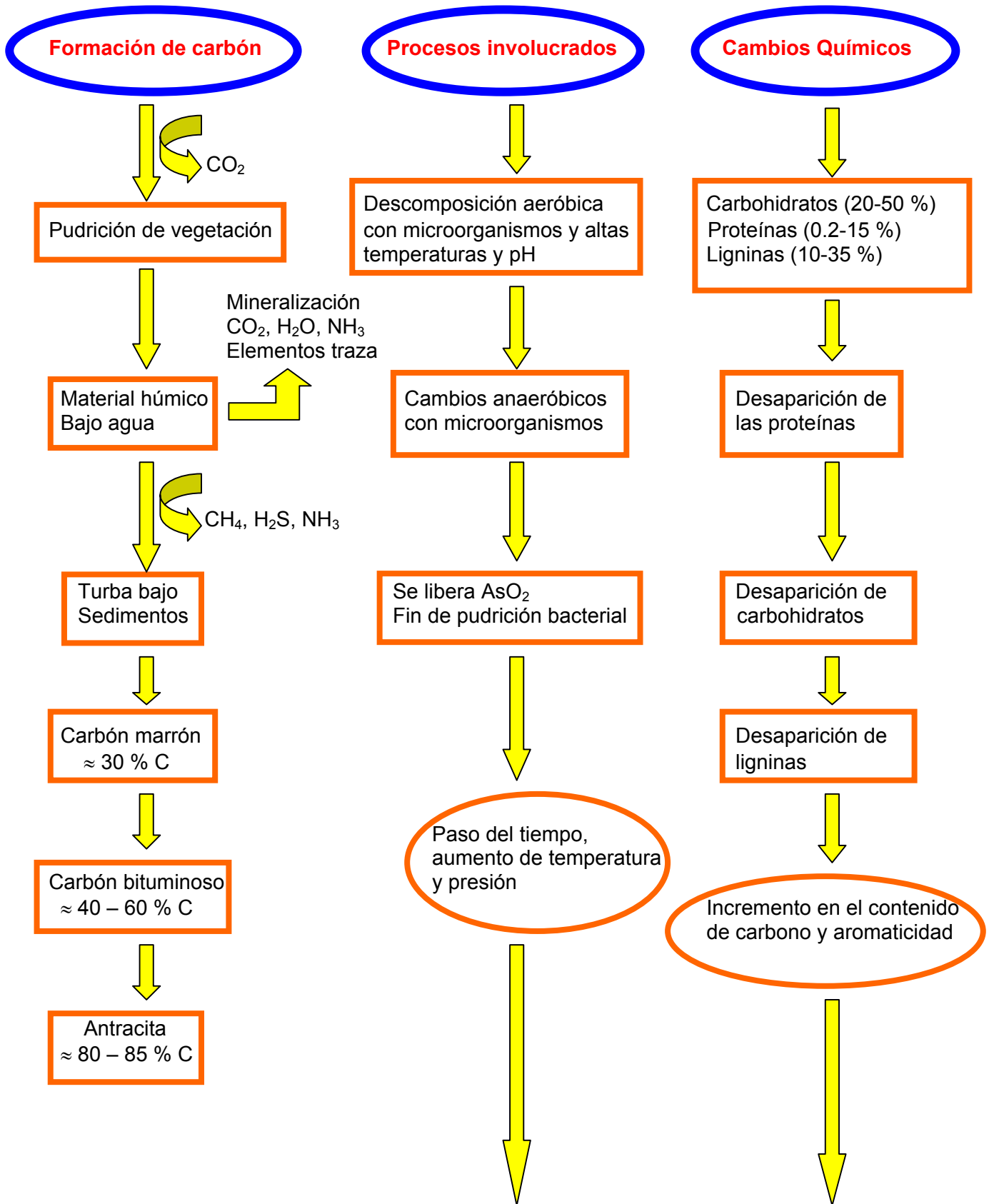


Figura 2.1

6.1.2 Tipos, estructura y composición.

- Aquellos carbones con mayor contenido de carbono son los que tienen un mayor contenido energético y su estructura es más parecida al tipo grafito.

Tabla 2.1: Tipos de carbón.

Carbón	%C	% cenizas	% volatiles	% humedad	E ($\times 10^9$ J/Tm) ^a
Antracita	82	9	5	4	30.5 – 37.5
Bituminosos:					
Volatilidad baja	66	12	20	2	25.8 – 35.2
Volatilidad media	64	10	23	3	25.8 – 35.2
Volatilidad alta	46	4	44	6	25.8 – 35.2
Sub-bituminosos	40	9	32	19	18.8 – 28.1
Lignito	30	5	28	37	12.9 – 18.8

a) La combustión de madera suministra una energía de $(10 - 14) \times 10^9$ J/Tm.

- El carbón, más bien una roca carbonácea, contiene capilares ultrafinos y materiales inorgánicos como la calcita y las piritas. La estructura consiste en un ordenamiento tridimensional de anillos condensados, siendo algunos heteroatómicos, contienen O, S, N.
- Aproximadamente el 50 % del azufre es de tipo orgánico, como tiofenos y sulfuros, y el otro 50 % se encuentra como FeS_2 , *pirita*. La pirita se puede haber formado como depósito hidrotermal, tras la etapa anaeróbica, cuando el sulfato es reducido de S^{2-} a S_2^{2-} .

- Otros componentes minoritarios del carbón:

Tabla 2.2: Constituyentes minoritarios del carbón (> 50 mg/kg).

Elemento	% presente	Elemento	mg/kg
Al	0.3 – 3.0	Ba	1 – 3000
Ca	0.05 – 0.37	Cl	10 – 8000
Fe	0.05 – 4.3	F	1 - 480
H	5.0	Mn	3 – 900
K	0.005 – 0.65	Na	100 – 6000
Mg	0.01 – 0.35	P	6 – 4000
N	1.5	Sr	20 – 1000
O	0.1 – 28.0	Ti	200 – 1800
S	0.1 – 12.0	Zn	3 - 300
Si	0.5 – 11.0		

2.1.3 Usos.

- El carbón extraído de la mina puede ser calcinado para la obtención de energía, pero en general esto resulta ser un proceso ineficiente y bastante contaminante.
- En cambio el carbón pulverizado, a través de cual se hace pasar una corriente de aire de tal manera que adopta la apariencia de un líquido (*fluidizado*), combustiona de un modo más eficiente y limpio.
- Alrededor del 60 % del carbón que se extrae se utiliza para la generación de electricidad. No obstante, este método no es muy eficiente, ya que se produce unas pérdidas en la generación y transmisión de electricidad entorno al 67 %.
- Un método más eficiente es la producción de electricidad mediante hidrodinámica magnética (MHD).

- El futuro del carbón probablemente sea su conversión en carburantes líquidos y gaseosos. Para ello, se ha de incrementar su relación H/C, que es de 0.3 en la antracita y 0.8 en el carbón bituminoso, hasta los valores de 1.9 y 4.0 del petróleo y metano, respectivamente. Esta hidrogenación se realiza utilizando bien H₂O ó H₂.

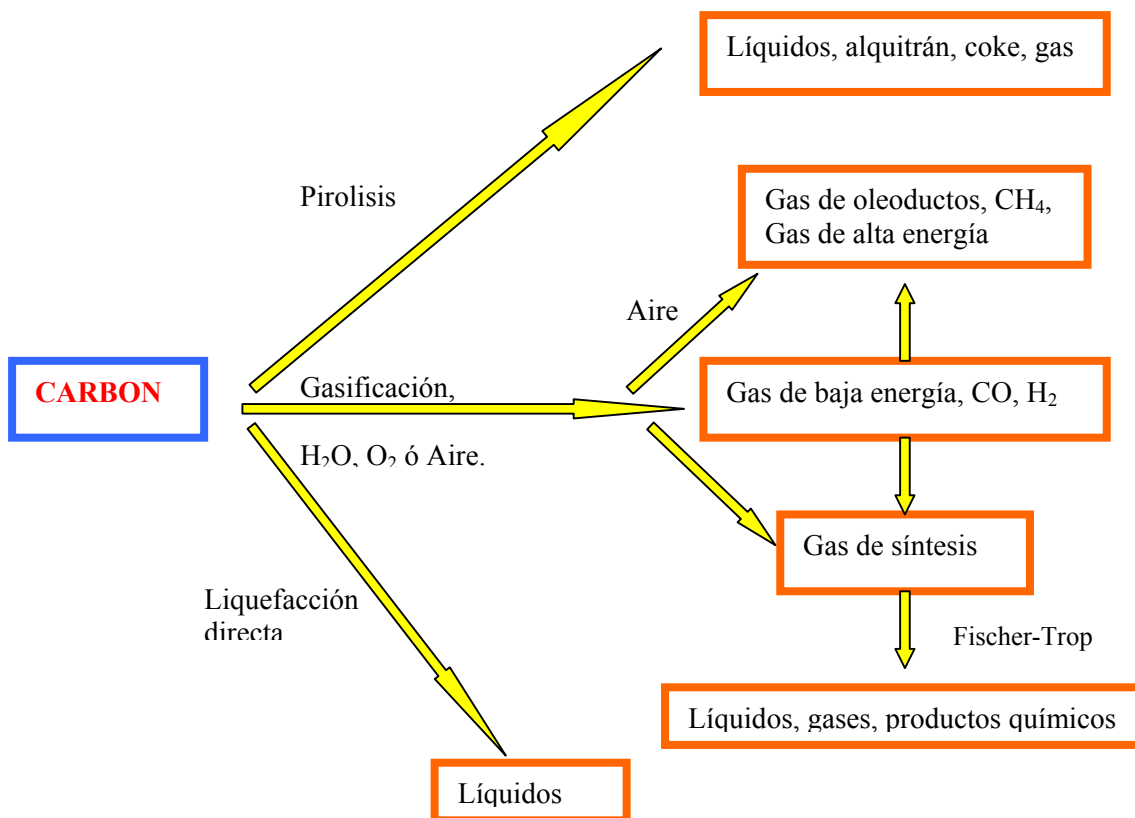
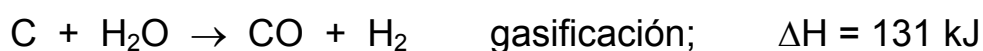
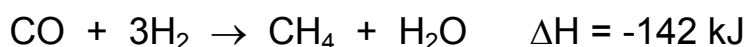


Figura 2.3: Rutas para la conversión de carbón en otras fuentes de energía.

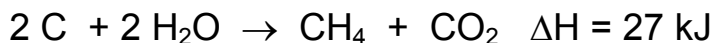
- Los reactivos para la producción de gas son el carbón, oxígeno y vapor:



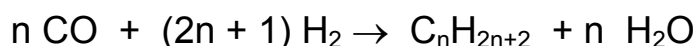
- El hidrógeno generado se puede utilizar para producir metano:



La reacción general quedaría:

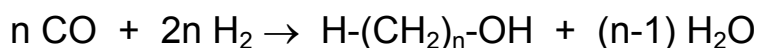
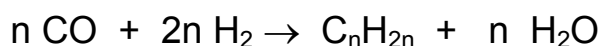


- Los combustibles líquidos, como los hidrocarburos y el metanol, se producen a partir de una mezcla de CO e H₂ en la relación estequiométrica requerida, llamada *gas de síntesis*.
- Los alcanos pueden obtenerse a partir de la reacción de *Fischer-Tropsch*:



que para el metano tiene una entalpía libre de reacción de 206 kJ/mol.

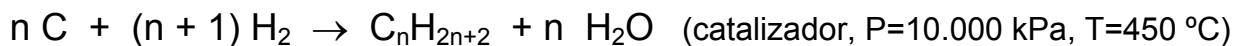
- Alquenos y alcoholes también se pueden producir;



- El metanol se forma en la reacción:



- La liquefacción directa del carbón se lleva a cabo por hidrogenación. El carbón es disuelto en un solvente. Posteriormente la solución es hidrogenada para producir una amplia variedad de productos.



2.2 Petróleo

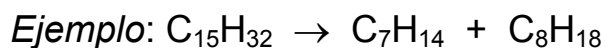
- La gran explotación de los recursos petrolíferos se justifica por su mayor contenido energético en relación al carbón (1.5 veces mayor por unidad de masa), y por ser el origen de una gran número de productos orgánicos e inorgánicos.

2.2.1 Formación y extracción

- El petróleo es un carburante fósil más joven que el carbón, que se origina por la muerte de microorganismos y plantas sepultados bajo sedimentos. La compactación de los sedimentos estruja el petróleo en las rocas porosas donde queda atrapado y se almacena.
- El mecanismo por el cual la materia animal o vegetal se transforma en hidrocarburos no está bien definido. En este proceso ocurre un fraccionamiento de moléculas complejas bio-inorgánicas hacia parafinas moleculares, y cuanto más antiguo sea el petróleo, mayor proporción de materiales de bajo peso molecular existe.
- Hoy en día no se ha conseguido ningún proceso satisfactorio para sintetizar petróleo en el laboratorio, quedando por resolver cuestiones tales como: influencia bacterial, catalizadores (aluminosilicatos), temperatura y tiempo.
- Actualmente se extrae entre un tercio y la mitad del petróleo existente en los pozos petrolíferos, siendo desarrollados día a día mejores métodos para su extracción. Así una técnica empleada es la conocida como *inundación química*, en la que se inyectan sustancias surfactantes en los pozos para reducir la tensión interfacial petróleo-agua y poder desplazar más petróleo.

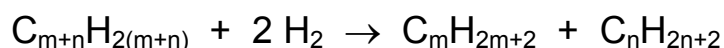
2.2.2 Procesamiento de gasolinas.

- El objetivo principal del refinamiento del petróleo es la producción de gasolinas y la utilización de aquellos otros derivados de petróleo que caen fuera del rango de las gasolinas.
- Aproximadamente el 20 % del petróleo crudo es gasolina, cantidad que puede ser incrementada hasta el 40 – 45 % mediante procesos de refinamiento. Las técnicas utilizadas son:
 - Craqueado: ruptura de grandes moléculas.
 - Reformado catalítico: producción de componentes aromáticos y de alto índice de octanos.
 - Alquilación: incremento de la proporción de cadenas de parafinas ramificadas, con el incremento de la proporción de octanos.
 - Polimerización: construcción de las moléculas más grandes.
- El craqueado se puede realizar por vía térmica a temperaturas comprendidas entre 700 – 800 °C, o utilizando catalizadores como el potasio soportado sobre SiO₂/Al₂O₃ a 450 °C. Las reacciones que ocurren son:

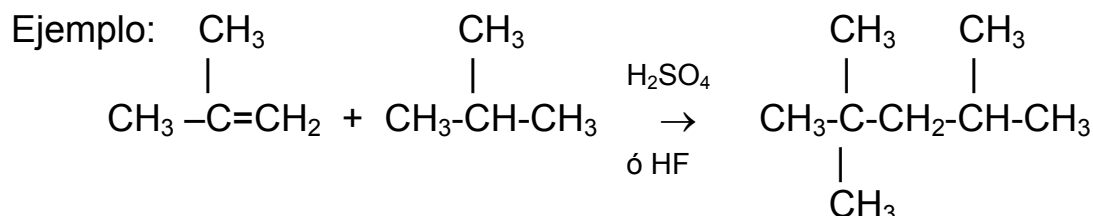
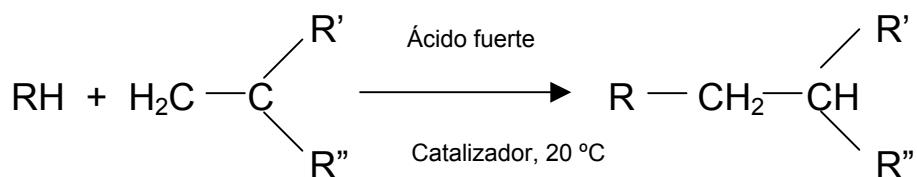


- También puede llevarse a cabo utilizando hidrógeno:

Alta presión



- La alquilación se puede representar por la ecuación:



- El reformado catalítico se realiza con catalizadores de MoO_3 soportado en alúmina o Re/Pt soportado en arcillas, a altas presiones (1500 – 2000 kPa) y temperaturas en el rango de 500 – 600 °C. Por ejemplo:

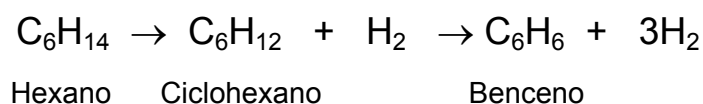


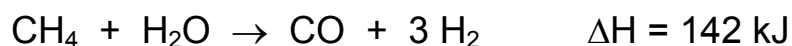
Tabla 2.3: Algunos constituyentes del petróleo (mg/kg).

Elemento	Concentración	Elemento	Concentración	Elemento	Concentración
Ca	15	K	5	Na	4
Cl	39	N	7000 – 20000	Ni	10
Cu	1.3	O	6 – 44000	V	50
Fe	25	S	15000	Zn	30

- Los residuos de la destilación del petróleo, así como el petróleo crudo, presenta los mismos problemas que el carbón si se pretende obtener hidrocarburos ligeros; se ha de aumentar la relación H:C desde 1.4 hasta 2.0 como mínimo.
- En el presente el 10 % del petróleo se utiliza en la fabricación de productos químicos.

[2.2.3 Gas natural.](#)

- El gas natural se forma en la naturaleza del mismo modo que el petróleo, y normalmente se localizan juntos, bien con el gas disuelto en el petróleo o bien permaneciendo encima de él.
- El gas natural, principalmente metano, también se utiliza como carburante primario.
- El metano puede ser reformado para dar *gas de síntesis*, o bien se puede utilizar para fabricar metanol o hidrocarburos líquidos. La reacción de reformado resulta ser un proceso endotérmico:



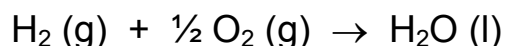
- También se ha utilizado el gas natural para la producción de petróleo sintético, transformándolo previamente en metanol. Posteriormente, mediante el empleo de zeolitas como catalizadores, el metanol se transforma en parafinas:



tomando n valores entre 5 y 10.

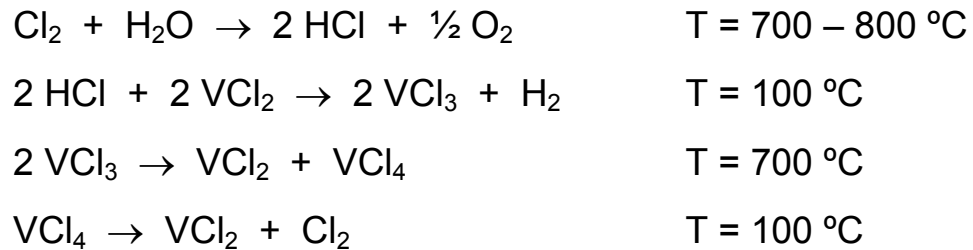
2.3 Aplicaciones del hidrógeno en la producción de energía.

- La combustión del hidrógeno produce agua y libera una energía de 284 kJ/mol.

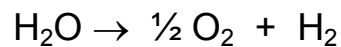


- El hidrógeno es un carburante limpio, liberando óxidos de nitrógeno como principales contaminantes.
- El suministro de hidrógeno a partir del agua es abundante pero

resulta ser caro pues se ha de emplear técnicas de electrolisis. Una alternativa es la utilización de catalizadores de vanadio:



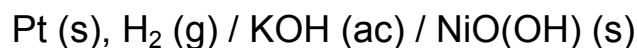
Con lo que se llega a:



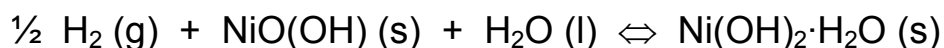
- También se ha abordado la descomposición fotoquímica del agua en hidrógeno, mediante el empleo de Rh y Ru como catalizadores.
- Un problema adicional es el almacenamiento del hidrógeno como consecuencia de su pequeña masa. Se puede convertir en gas líquido, o almacenar el hidrógeno como hidruros intersticiales (TiH_2 , Pd_2H).

Celdas hidrógeno-metal

- Este tipo de celdas electroquímicas se consideran un híbrido entre las celdas galvánicas y las celdas combustible, en las que se utiliza la tecnología del electrodo de hidrógeno de las celdas combustible y la del electrodo de Ni o Ag de las celdas alcalinas secundarias.
- La celda Hidrógeno-Ni se representa:



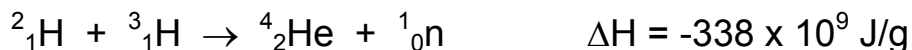
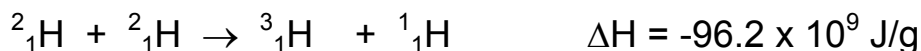
- En estado de carga posee un voltaje de 1.5 – 1.6 V en circuito abierto. La reacción electroquímica global resulta ser:



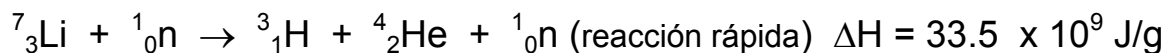
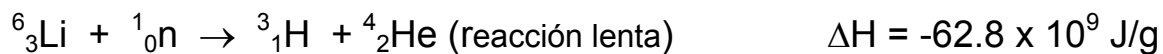
- Estas baterías se construyen en un rango de 10 – 60 A·h de capacidad, poseen una densidad de energía práctica de 40 –50 W·h/kg y pueden realizar unos mil ciclos.

Reacciones nucleares de fusión.

- La realización controlada de los procesos nucleares de fusión de átomos promete ser una más que satisfactoria fuente de energía, con menor peligro radioactivo que la obtención de energía a partir de procesos de fisión nuclear. En estas reacciones suele intervenir el hidrógeno:



- El Deuterio (${}^2_1\text{H}$) existe en una proporción de 1 átomo por cada 6700 átomos de hidrógeno, por lo que está asegurada su suministro para las reacciones.
- El Tritio (${}^3_1\text{H}$) se obtiene a partir del litio y sus isótopos:



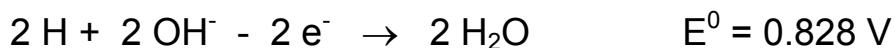
- El problema de llevar a cabo estas reacciones radica en las altas temperaturas de ignición que requieren, 4×10^7 a 10^8 °C, y posteriormente mantener la temperatura de fusión entorno a 24×10^6 °C.

2.4 Celdas combustibles.

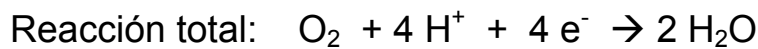
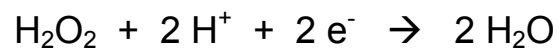
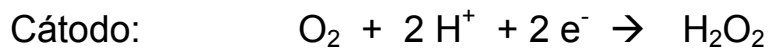
- La energía química almacenada en el hidrógeno y combustibles hidrocarbonados es significativamente mayor que la que disponen los materiales de las baterías comunes
- Variedad de aplicaciones:
 - Las celdas combustibles son dispositivos ideales de conversión de energía primaria para localizaciones en sitios remotos y encuentran aplicación cuando se requiere un suministro seguro de energía eléctrica. Por ejemplo, algunas compañías, hospitales y edificios, instalan celdas combustibles de 200 - 300 kW.
 - Hoy se desarrollan celdas combustibles más pequeñas, 50 – 75 kW, para uso en automoción dada su baja emisión de contaminantes.
 - También, celdas combustibles de metanol (5 – 25 W) se proponen para sustituir el uso de las baterías Li-ion en los aparatos electrónicos.
 - El uso más prometedor desde el punto de vista comercial es el de funcionar como fuente de energía estacionaria en centrales de energía (megavatios).
- En general, las celdas combustibles se utilizan como fuente estacionaria de energía y no para suministrar una demanda de energía continua.
- El uso comercial de estos sistemas depende de reducir los altos costes de su producción (catalizador, componentes, producción, etc.).

Funcionamiento de la celda combustible.

- Las celdas combustibles, como las baterías, convierten la energía química latente en un combustible en energía eléctrica.
- Constan de un ánodo (donde ocurre la oxidación), un cátodo (donde ocurre la reducción) y un electrolito (en el que los iones transportan la corriente entre los electrodos).
- Se diferencian de las baterías en que el combustible y oxidante no están contenidos en el interior de la celda, sino que se suministran continuamente desde una fuente externa.
- Las celdas combustibles no se recargan eléctricamente, pero después de su uso, se recarga el tanque de combustible.
- El gas combustible es el hidrógeno, con el agua como gas de escape. Otros combustibles son hidrocarburos que se deben convertir en hidrógeno para su uso en celdas combustibles, siendo posible en ciertas condiciones la conversión directa de combustibles como CH₃OH y CH₄.
- La celda combustible más común es la de hidrógeno, en la que el oxígeno del aire y el H₂ alimentan una celda que contiene una solución acuosa de KOH.
- Las reacciones que se producen son las siguientes:



- Las celdas combustibles se clasifican en baja-temperatura (< 200 °C) y alta-temperatura (> 450 °C).
- Las celdas combustibles de baja-temperatura usan electrolitos alcalinos o ácidos. Cuando se utilizan electrolitos ácidos las reacciones en el electrodo son:



- No es deseable la aparición del intermedio estable H_2O_2 , pues disminuye el potencial de la celda y corroe el material carbonáceo del que se forman los electrodos.
- Se utilizan los mejores catalizadores posibles para acelerar la descomposición del H_2O_2 y minimizar sus efectos sobre la reacción global.
- De igual modo, la presencia de un catalizador puede mejorar la velocidad de disociación del hidrógeno en el ánodo.
- Los catalizadores más empleados son el platino o aleaciones de platino. Se requiere mayor cantidad de catalizador en el cátodo que en el ánodo, pues la cinética de descomposición del hidrógeno se acelera rápidamente.
- El uso de estos catalizadores encarece el coste de las celdas combustibles, no obstante la cantidad de catalizador depende del tipo de celda y su aplicación, y además se suelen dispersar en materiales carbonáceos porosos.

- Se intenta reducir la carga y coste del catalizador.
- Como quiera que la cinética de disociación de O_2 e H_2 mejora a alta temperatura ($> 400\text{ }^\circ\text{C}$), se ha pensado en catalizadores alternativos de bajo coste como Ni u óxidos tipo espinela o perovskita, para sustituir al Pt, presentando todos ellos estructuras de alta superficie.
- Los electrodos de las celdas combustibles son estructuras más complejas que los electrodos de baterías.
- Estos electrodos realizan tres funciones:
 - i) asegurar una interfase estable entre el gas reactante y el electrolito,
 - ii) catalizar las reacciones del electrodo
 - iii) conducir los electrones entre los sitios de reacción.
- Un factor muy importante es el control de la interfase electrolito, electrodo y gas, cuya estabilidad es crítica para un buen rendimiento y larga vida de la celda combustible. → Ajustar la porosidad y comportamiento de humedecimiento entre la superficie del electrodo y el electrolito.
- Las celdas combustibles operan con eficiencias eléctricas de 60 – 70 %, y el calor residual que generan se puede reutilizar en valores del 90 %.
- El rendimiento de la celda se controla por su curva de potencial-intensidad.

- El electrolito de la celda debe de ser un conductor puramente iónico, de modo que se evite un cortocircuito interno, y debe tener una matriz inerte que sirva para separar los electrodos físicamente.
- Estas celdas pueden contener varias clases de electrolitos: líquido, polimérico, sal fundida, o cerámico.

- Entre los combustibles se prefiere el H_2 para las celdas de baja-temperatura, aunque tiene como inconveniente de que no es un combustible de disposición inmediata.
- En celdas de alta-temperatura se puede suministrar directamente combustibles hidrocarbonatos como el metano o la gasolina.
- Cualquier traza de CO , CO_2 y HS_2 debe de ser eliminada del gas reformado rico en hidrógeno, pues bloquean de forma irreversible la acción del catalizador de Pt (*envenenamiento del electrodo*).
- Otros combustibles: hidracina, amonio y metanol.

- En general, el sistema de celda combustible requiere sofisticados sistemas de control para asegurar los contenidos de combustible y aire y eliminar los productos de reacción.
- Entre los factores más importantes de trabajo están:
 - Estequiometría de reactantes
 - Balance de presión a través de la membrana separadora
 - Liberación de las impurezas que acorten la vida de la celda
- En este tipo de celdas no existe un gran aprovechamiento del volumen → exhiben densidades de energía ($Wh \cdot L^{-1}$, $Wh \cdot kg^{-1}$) inferiores a otras baterías.

Tipos de celdas combustible

- *AFC (Alkaline fuel cell)*
 - El electrolito es KOH
 - Como catalizadores se utilizan metales nobles. No obstante, la cinética del oxígeno e hidrógeno se facilita en los electrolitos alcalinos, por ello se pueden utilizar otros catalizadores más económicos: Ni de Raney, plata y óxidos espinela, ftalocianina y porfirina.
 - Muy susceptible a la contaminación por CO₂, por lo que el H₂ y O₂ han de ser muy puros, lo que limita su uso sólo a aplicaciones espaciales (60 % eficiencia).
 - Los electrodos se forman de carbón, que en una cara presenta el catalizador y en otra PTFE como límite de las tres fases.
- *PEMFC (Polymer electrolyte membrana fuel cell)*
 - Los electrodos se forman como una capa delgada sobre una membrana polimérica conductora de protones que se usa de electrolito.
 - La hidratación de la membrana lleva a la disociación y solvatación del grupo ácido del electrolito. Los protones solvatados son móviles dentro del polímero y proporcionan conductividad al electrolito.
 - La celda opera a 30-180 °C con eficiencias de 30 – 60 %.

- *DMFC (Direct methanol fuel cell)*
 - Utiliza el mismo esquema de construcción que la PEMFC.
 - Tiene la ventaja de que el combustible líquido (metanol) es fácil de almacenar y transportar.
 - No hay necesidad de reformar el combustible a gas hidrógeno.
 - Se desarrolla para usar en aparatos electrónicos portátiles.
 - Necesita más cantidad de catalizador (Pt-Ru) que las celdas PEMFC.
 - La reacción global es: $\text{CH}_3\text{OH} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

- *PAFC (Phosphoric acid fuel cell)*
 - Celda de tipo ácido usada generalmente para almacenamiento de energía.
 - Trabaja a unos 200 °C, a menor temperatura la conductividad es reducida y a mayor se descompone el ácido fosfórico.
 - El ácido se soporta en una matriz de SiC.
 - A 150 °C tolera ciertas cantidades de CO en la alimentación del ánodo.
 - El fosfórico caliente rechaza el agua, producto de reacción en el cátodo, siendo esta la mayor fuente de pérdida de energía.
 - A alta temperatura de favorece la descomposición de H_2O_2 .

- *MCFC (Molten carbonate fuel cell)*
 - Celda para almacenamiento de energía. Trabaja a 560 °C, y el calor residual se utiliza en cogeneración.
 - No utiliza catalizadores de metales nobles, y tiene mayor eficiencia que las celdas PEMFC y PAFC.
 - El separador cerámico, LiAlO_2 , se rellena de carbonato fundido.
 - El rendimiento de la celda se encuentra limitado por la resistividad del electrolito y la evacuación del calor generado por las pérdidas en la polarización del electrodo.

- *SOFc (Solid oxide fuel cell)*
 - Trabaja a 800 – 1000 °C con conducción de O^{2-} en la fase sólida.
 - Las altas temperaturas de trabajo limita la elección de materiales, que deben tener similares coeficientes de expansión y ser estables a las reacciones redox.
 - A estas temperaturas los combustibles hidrocarbonatos se reforman rápidamente y completamente in-situ.
 - El sistema tiene una eficiencia termodinámica del 96 % y tolera muchas impurezas.
 - No requiere de catalizadores de metales nobles.
 - El ánodo consta de catalizadores de Ni o Co sobre circonio estabilizado con ytrio. El cátodo es una perovskita manganita-lantano dopada con Sr. El electrolito es también circonio estabilizado con ytrio.

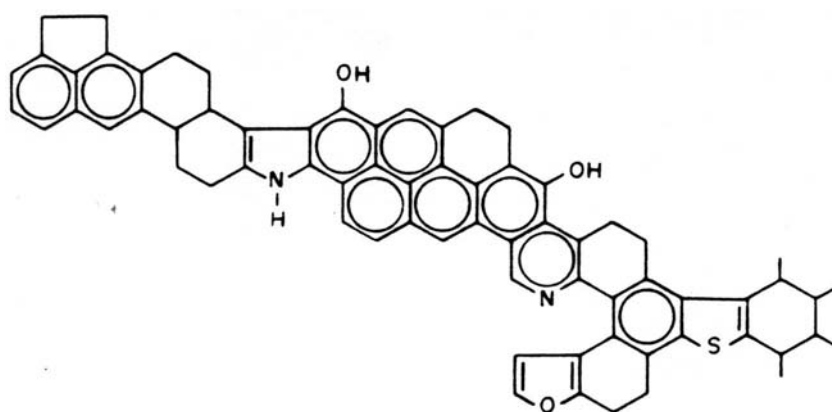


Figura 2.2: Esquema parcial de la estructura del carbón.

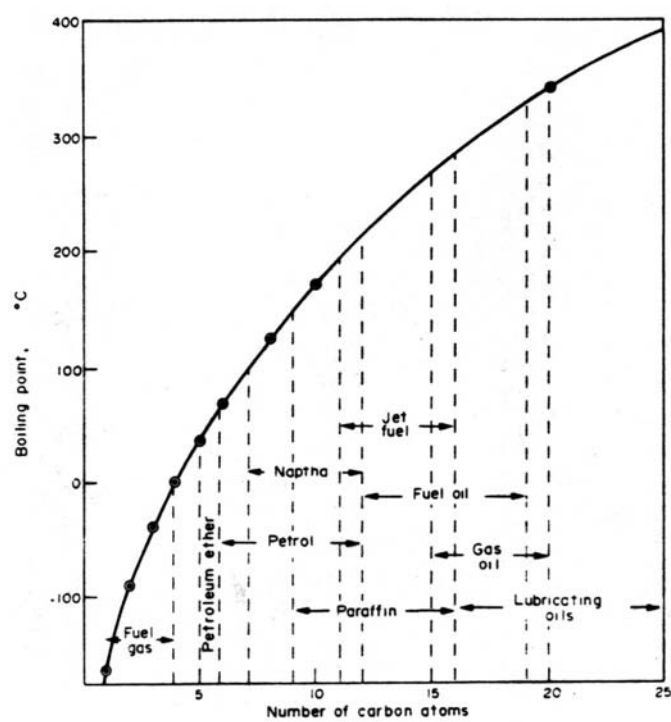


Figura 2.4: productos derivados de la destilación fraccionada del petróleo.

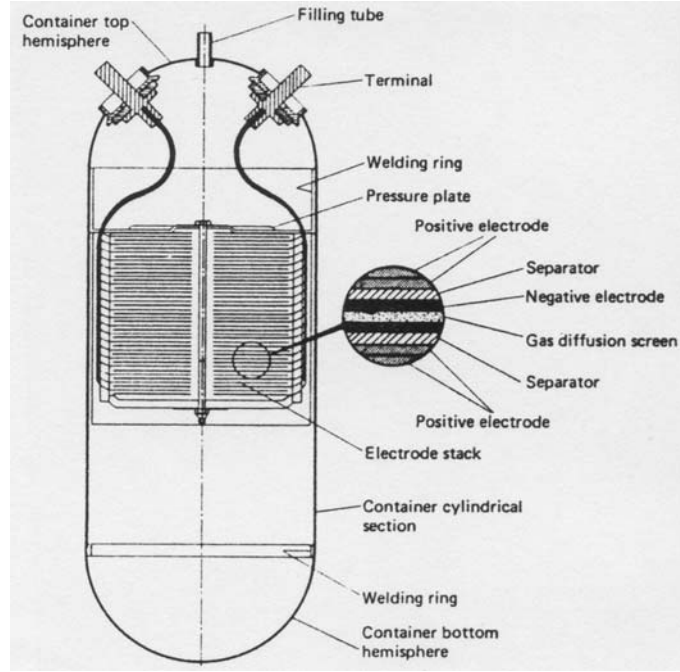


Figura 2.5: Esquema de una batería SAFT Hidrógeno-Ni.

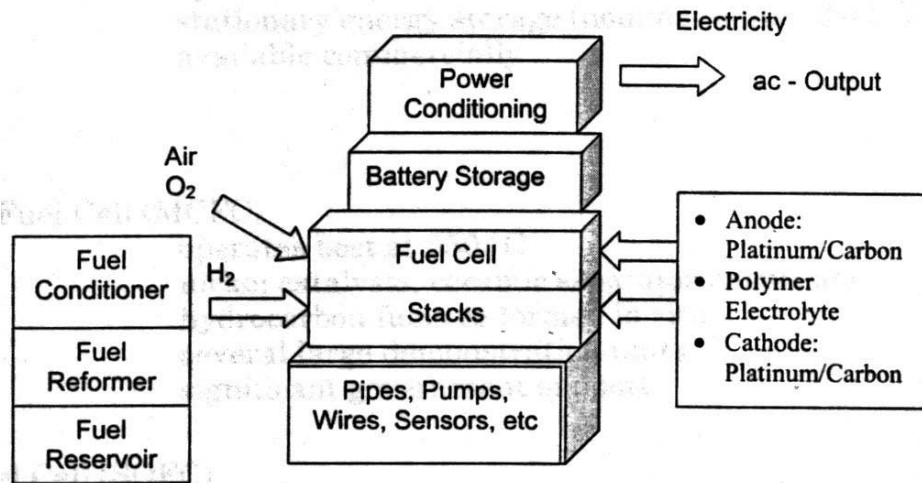
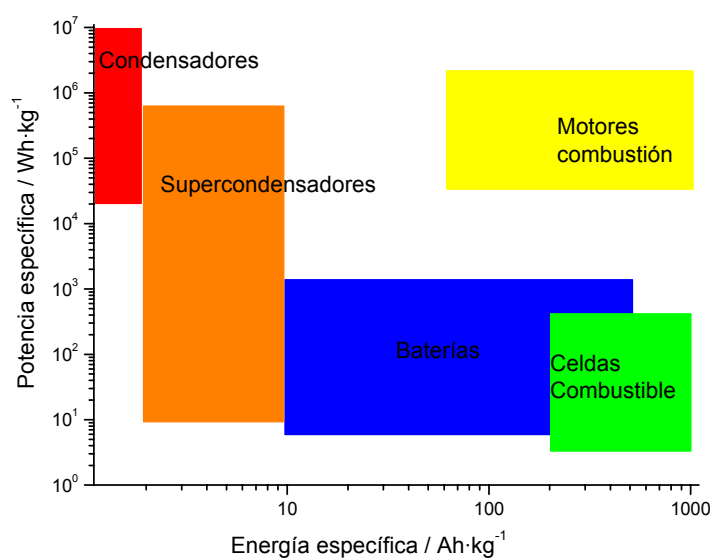
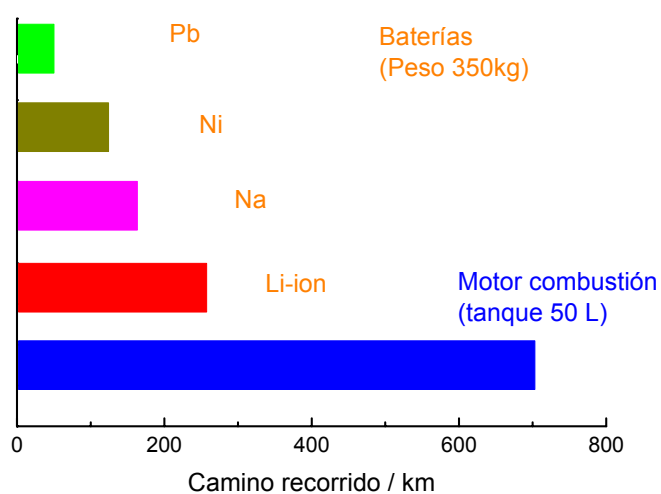


Figura 2.6: Descripción de los componentes del sistema completo de una celda combustible que incluye la unidad de reformado y acondicionamiento de energía.

Tabla 2.4: Características de las celdas combustibles.

Ventajas	Desventajas
Eficiencia conversión energía	Complejas de operar
Construcción modular	Mejor como fuente primaria de energía
No contaminantes	Impurezas en flujo de gases acortan vida
Bajo mantenimiento	Demandas de pulsos acortan vida celda
Silenciosas	Caras
Seguras	Disponibilidad limitada
Alta densidad de energía	Baja durabilidad
	Baja densidad de energía por volumen

**Figura 2.7:** Gráfica Ragone de los dominios de energía de diversos sistemas electroquímicos**Figura 2.8:** Camino recorrido por un vehículo con diversas fuentes de energía.

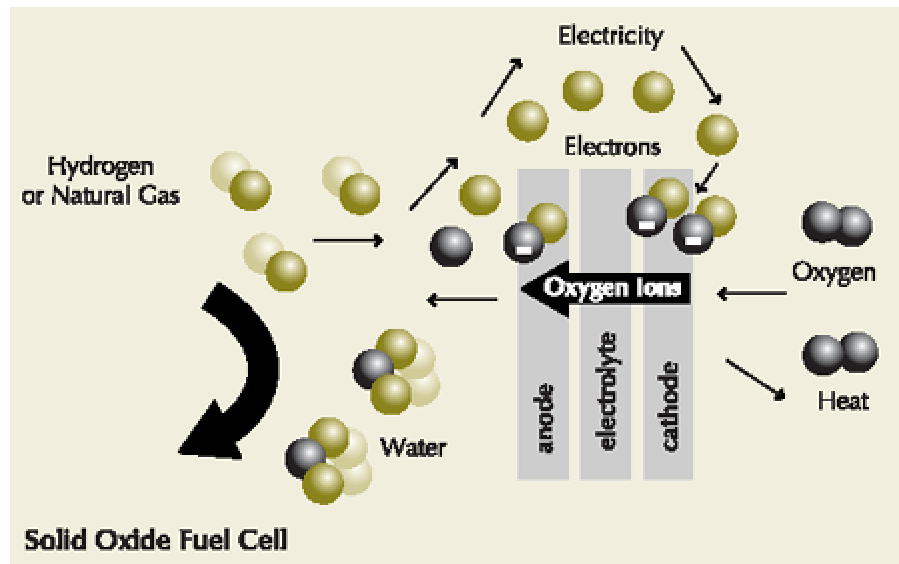
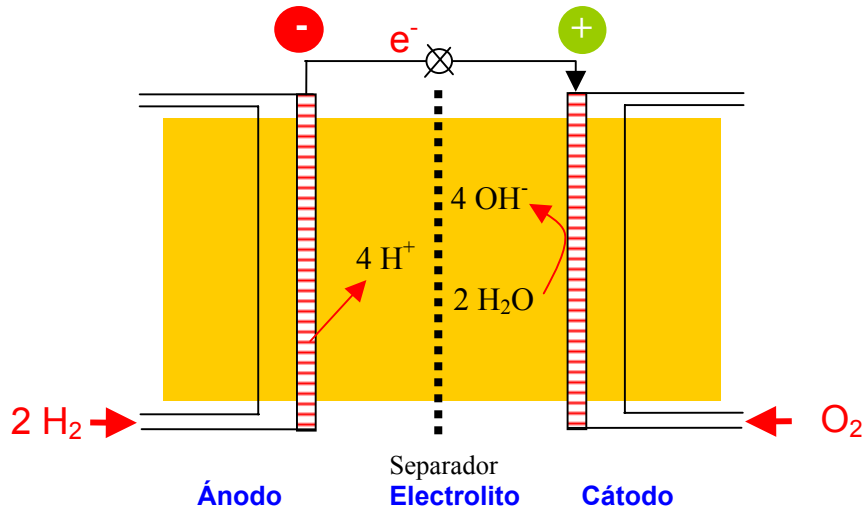


Figura 2.9: Funcionamiento de una celda combustible.

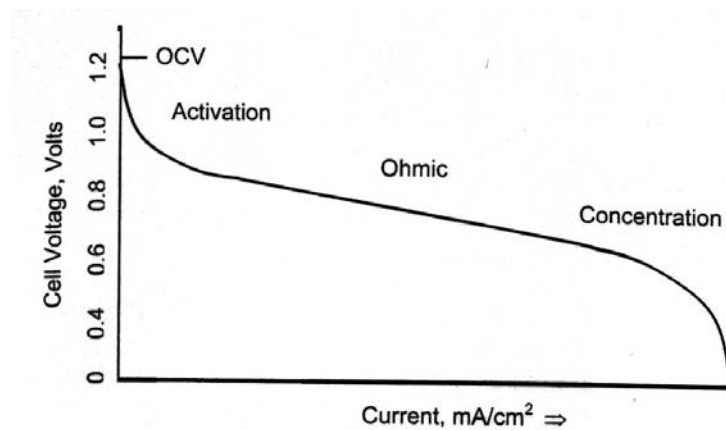


Figura 2.10: Curva de potencia típica de una celda combustible.

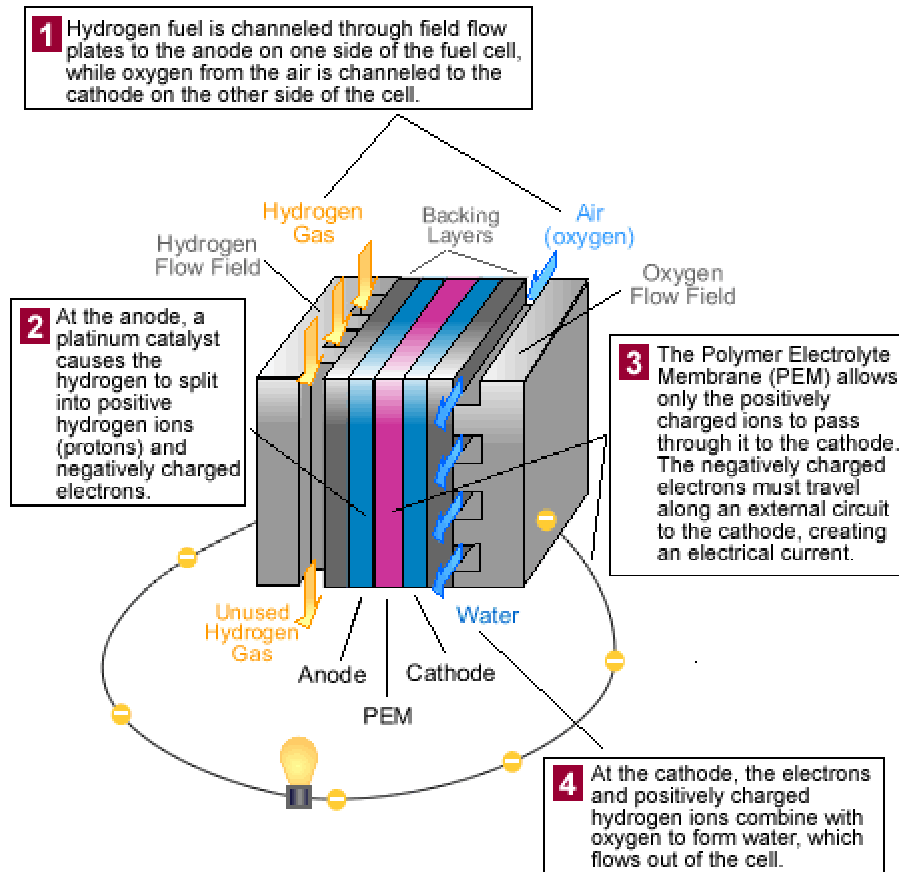


Figura 2.11: Esquema de la membrana electrolito polimérico de una celda combustible PEMFC.

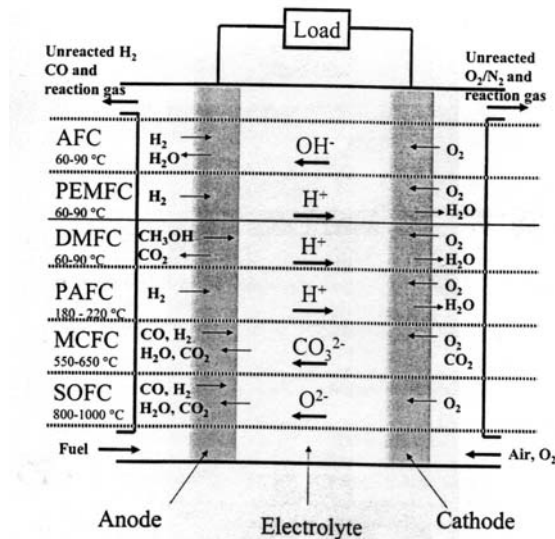


Figura 2.12: Resumen de las reacciones y procesos que ocurren en diferentes celdas combustibles.

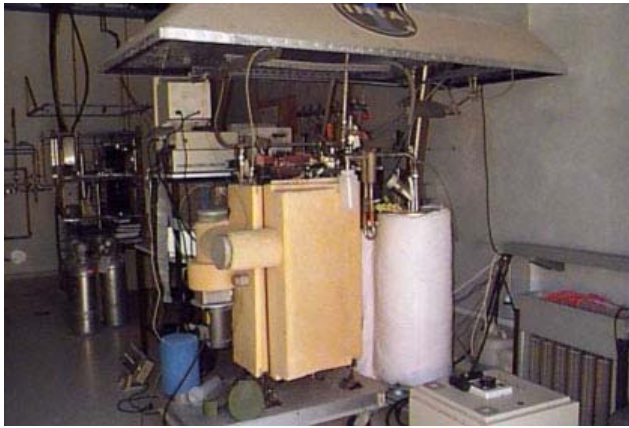
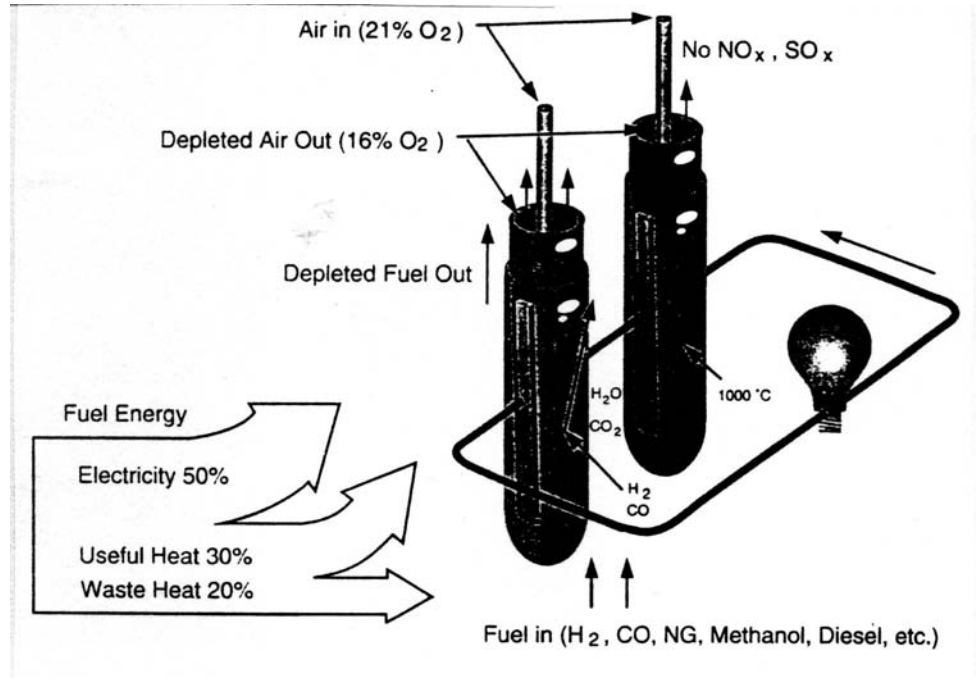


Table 3. Types of Fuel Cells

advantages	disadvantages	comments
	Alkaline (AFC)^a	
mechanically rechargeable low-cost KOH electrolyte	limited activated life intolerant of impurities in gas streams CO ₂ and CO pure H ₂ only suitable fuel	original development > 30 years ago Apollo fuel cell operates at room temp to 80 °C demo in vehicles in the 1970s
	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)	
nonvolatile electrolyte few materials problems CO ₂ rejecting electrolyte pressure differential between anode and cathode polymer electrolyte	expensive catalysts required CO a strong poison H ₂ O management essential high-cost electrolyte pure H ₂ only suitable fuel oxygen kinetics are slow intolerant of impurities limited life water management essential	operates best at 60–90 °C originally developed for space by GE hydrogen fuel (re-formed hydrocarbons, pure H ₂ , MH storage) main development efforts for automotive and stationary applications
	Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)	
direct fuel conversion slow electrode kinetics improved wt and vol polymer electrolyte	stable reaction intermediates high catalyst loadings water management essential low overall efficiency methanol hazardous	operates best at 60 to 90 °C) same construction as PEMFC methanol fuel eliminates reformer lower current capability methanol crossover reduces efficiency needs new membrane, higher efficiency high catalyst loadings main effort for portable electronic devices
	Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	
CO ₂ rejecting electrolyte high fuel efficiency	H ₂ only suitable fuel anode CO catalyst poison O ₂ kinetics hindered low conductivity electrolyte high-cost catalysts limited life	operates best at ~200 °C stationary energy storage (nominal units, 250 kW) available commercially
	Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	
fast electrode kinetics high efficiency CO/CH ₄ usable fuel direct reforming feasible high-grade heat available	materials problems and life low sulfur tolerance high ohmic electrolyte low tolerance to sulfur need to recycle CO ₂ limited life	operates best at 550 °C nickel catalysts, ceramic separator membrane hydrocarbon fuels re-formed in situ several large demonstration units significant government support
	Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	
high grade heat available fast electrode kinetics in situ reforming feasible no electrolyte management high system efficiency tolerant of impurities	high fabrication costs severe materials constraints high electrolyte conductivity	operates at 900 °C conducting ceramic oxide electrodes hydrocarbon fuels re-formed in situ least sensitive to sulfur, etc.
^a Metal air batteries with replaceable anodes are often considered to be a fuel cell but are not considered here.		

Table 4. Typical Characteristics of Various Fuel Cell Systems

type	anode feed	anode composition	cathode feed	cathode composition	electrolyte	operating temp, °C
alkaline (AFC)	pure hydrogen	carbon/platinum catalyst	oxygen (or air)	carbon/platinum catalyst and alternatives	aq KOH	ambient–90
PEM (PEMFC)	pure hydrogen	carbon/platinum catalyst	oxygen or air	carbon/platinum catalyst	acidic polymer	ambient–90
direct methanol (DMFC)	methanol or methanol–water	carbon/platinum catalyst	oxygen or air	carbon/platinum catalyst	acidic polymer	60–90
phosphoric acid (PAFC)	pure hydrogen	carbon/platinum catalyst	oxygen or air	carbon/platinum catalyst	phosphoric acid in SiC matrix	200
molten carbonate (MCFC)	hydrogen or natural gas	porous Ni	oxygen or air	porous NiO	molten Li ₂ CO ₃ in LiAlO ₂ ⁻	550
solid oxide (SOFC)	gasoline or natural gas	porous cermet of Ni or Co and yttria–zirconia	oxygen or air	strontia-doped lanthanum–manganite Perovskite	yttria-stabilized or yttria/calcia-stabilized zirconia support	900 ^a

^a Mg- or Sr-doped lanthanum chromate as cell interconnects.