

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al
suministro de energía eléctrica a una vivienda.

Autor: Rocío Martínez Reyes

Tutor: Manuel Felipe Rosa

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda.

Autor:

Rocío Martínez Reyes

Tutor:

Manuel Felipe Rosa Iglesias

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Pilas de combustible tipo PEM. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda.

Autor: Rocío Martínez Reyes
Tutor: Manuel Felipe Rosa Iglesias

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis profesores

Agradecimientos

Agradezco a todos los profesores que me han acompañado durante todos estos años de carrera. En especial a los profesores del Departamento de Ingeniería Energética que fueron quienes despertaron en mí el interés en el estudio de las diferentes fuentes y usos de la energía.

Me gustaría agradecerle en especial también a mi tutor Felipe por la ayuda ofrecida en todo momento para la elaboración de este trabajo. Gracias por atenderme cuando lo he necesitado y siempre con la mayor brevedad posible.

Y por último, pero no por ello menos importante, quería darle las gracias a mi familia. A mi madre por la paciencia y apoyo que ha depositado en mí todos estos años. A mi padre por ayudarme a elegir la mejor carrera para mi futuro. A mi hermana María por todo el cariño y confianza en mí. Y sobre todo a mi hermana Marta, ingeniera como yo, por todas las horas compartidas delante de tantos apuntes. Nada de esto hubiera sido posible sin ellos.

Resumen

El hidrógeno es considerado el combustible del futuro. Las pilas de combustible son una alternativa para la generación de energía eléctrica con numerosas ventajas. Existen diferentes tecnologías de pilas que trabajan a distintas temperaturas y con materiales diferentes. Cada una de ellas tiene un campo de aplicación más adecuado. Las pilas de combustible de membrana polimérica (PEM) son unas de ellas. Teniendo como único residuo agua, se trata de una tecnología muy limpia y de alta eficiencia. Una de las aplicaciones más prometedoras de las pilas PEM es su uso para el suministro de energía eléctrica en los hogares. En este proyecto se realiza un predimensionado del sistema necesario para el suministro de energía eléctrica a una vivienda. Dicho sistema consta de la pila de combustible tipo PEM y de un banco de baterías donde se almacena energía. La energía proveniente de las baterías se usará en aquellos momentos del día en los que la demanda sea superior a la potencia suministrada por la pila. Se lleva a cabo además, un pequeño análisis económico de la viabilidad de dicho proyecto.

Abstract

Hydrogen is considered the fuel of the future. Fuel cells are an alternative to power generation with many advantages. There are different fuel cells technologies working at a wide range of temperature and materials. Each one has its appropriate application. Proton Exchange Membrane fuel cells are one of them. Taking water as the only residual substance, it is a very clean and highly efficient technology. One of the most promising applications of the PEM fuel cells is their use for the supply of electricity in homes. In this project there is a pre-dimensioning of the required system for generating electricity which is demanded by a house. That system is composed by the PEM fuel cell and a battery bank. The batteries will save the energy that will be later be used in those moments when the demand of power in the house is higher than the fuel cell power. Moreover it includes a small economic analysis of its viability.

Índice

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xiv
Notación	xvii
1. Evolución histórica	20
2. Hidrógeno como combustible	24
2.1 Situación energética actual	24
2.1.1 Importancia de la eficiencia energética	31
2.2 Hidrógeno como alternativa	32
2.2.1 Producción de hidrógeno	33
2.2.2 Transporte, almacenamiento y seguridad	39
3. Generalidades de una pila de combustible	43
3.1 Definición	43
3.2 Principio de funcionamiento	44
3.2.1 Apilamiento de celdas	45
3.2.2 Sistemas auxiliares	45
3.3 Fundamentos químicos	46
3.3.1 Reacciones básicas	47
3.3.2 Calor de reacción	47
3.3.3 Poder calorífico del hidrógeno	49
3.3.4 Trabajo eléctrico teórico	49
3.3.4.1 Primer Principio de la Termodinámica	49
3.3.4.2 Segundo Principio de la Termodinámica	50
3.3.4.3 Energía Libre de Gibbs	51

3.3.5 Potencial teórico	52
3.3.5.1 Efecto de la temperatura, presión y concentración	53
4. Tipos de pilas de combustible	55
4.1 Solid Oxid Fuel Cell (SOFC)	56
4.2 Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)	58
4.3 Alkaline Fuel Cell (AFC)	59
4.4 Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)	61
4.5 Comparativa	62
5. Pilas de combustible de membrana polimérica	63
5.1 Componentes	64
5.1.1 Electrodos y membrana (MEA)	65
5.1.1.1 Gestión del agua	66
5.1.2 Capa difusora (GDL)	68
5.1.3 Placas bipolares	68
5.1.4 Placas terminales	69
5.2 Curva de polarización	69
5.2.1 Pérdidas por activación	71
5.2.2 Pérdidas por efecto Crossover y corrientes internas	72
5.2.3 Pérdidas óhmicas	73
5.2.4 Pérdidas por concentración	73
6. Ventajas e inconvenientes	75
7. Aplicaciones	77
7.1 Aplicaciones portátiles	79
7.2 Aplicación estacionaria	80
7.3 Aplicación en el sector del transporte	81
8. Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda	83
8.1 Curva de demanda	86
8.2 Elección del tamaño de la pila y de la batería	89
8.3 Equipos comerciales seleccionados	92
8.3.1 Pila de combustible PEM	93
8.3.2 Banco de baterías	95
8.3.3 Inversor y controlador de carga	98
8.4 Análisis de viabilidad económica	98
9. Consideraciones finales y conclusiones	101
Referencias	105

Índice de tablas

Tabla 1. Datos de energía consumida en ktep por cada sector.	26
Tabla 2. Consumo energía final en ktep por fuente de energía.	27
Tabla 3. Consumo de energía sector residencial según servicios y zonas climáticas. Fuente: IDAE.	30
Tabla 4. Propiedades del hidrógeno relativas a la seguridad.	39
Tabla 5. Posibilidades de almacenamiento del hidrógeno en estado líquido.	41
Tabla 6. Diferentes medios en los que almacenar hidrógeno en estado sólido.	42
Tabla 7. Entalpías de formación estándar (25°C, 1 atm) de algunos compuestos inorgánicos.	48
Tabla 8. Entropías en condiciones estándar.	51
Tabla 9. Clasificación pilas de combustible según su temperatura de operación.	55
Tabla 10. Tabla comparativa de los distintos tipos de pilas de combustible.	62
Tabla 11. Potencia comercializada de las pilas de combustible por aplicación.	78
Tabla 12. Producción de pilas de combustible.	79
Tabla 13. Consumo y disponibilidad de cada equipo en un hogar.	88
Tabla 14. Valor máximo y mínimo de la curva de demanda.	88
Tabla 15. Tamaño pila y batería necesarias para la instalación.	92
Tabla 16. Propiedades más importantes del modelo de batería seleccionada.	96
Tabla 17. Coste de la inversión inicial por equipos.	99

Índice de figuras

Figura 1. Experimento original de Sir William Robert Grove.	21
Figura 2. Científicos de la NASA trabajando en uno de los tres stacks de la nave Apollo (1964).	22
Figura 3. Gráfico de consumos mundiales de 2014 vs. 2013.	25
Figura 4. Gráfico consumo total de energía de los principales sectores en España.	26
Figura 5. Evolución del consumo total por fuente de energía.	27
Figura 6. Mapa de España con la distribución de las zonas climáticas.	28
Figura 7. Gráfico con el consumo de electrodomésticos según el tipo de equipamiento.	29
Figura 8. Gráfico con los porcentajes de los distintos métodos de producción de hidrógeno.	34
Figura 9. Obtención de hidrógeno a partir de fuentes renovables.	37
Figura 10. Esquema de un sistema fotovoltaico unido a un electrolizador.	38
Figura 11. Esquema transformación de energía de las máquinas térmicas y de las pilas de combustible.	43
Figura 12. Esquema de un apilamiento de celdas en una pila.	45
Figura 13. Esquema de corrientes de entrada y salida de una pila.	46
Figura 14. Esquema de una pila de combustible tipo SOFC.	56
Figura 15. Disposición tubular y plana de una pila SOFC.	57
Figura 16. Esquema de una pila de combustible tipo MCFC.	58
Figura 17. Esquema de una pila de combustible tipo AFC.	60
Figura 18. Esquema de una pila de combustible tipo PAFC.	61
Figura 19. Procesos que tienen lugar en una pila PEM.	64
Figura 20. Estructura de la molécula de Nafión.	66
Figura 21. Conjunto de pila de combustible PEM.	67

Figura 22. Diseño de las placas bipolares para el “método de flujo interdigital”.	68
Figura 23. Curva de polarización típica de una pila a baja temperatura.	70
Figura 24. Curva de polarización típica de una pila a alta temperatura (800°C).	71
Figura 25. Comparación eficiencia de las pilas de combustible frente a sistemas convencionales.	75
Figura 26. Aplicaciones de las pilas de combustible.	77
Figura 27. Esquema de un vehículo con pila de combustible.	82
Figura 28. Gráfico distribución consumo de energía eléctrica en España.	85
Figura 29. Estructura de generación anual de energía eléctrica peninsular 2014/15.	85
Figura 30. Curvas de demanda de electricidad en verano y en invierno en España.	87
Figura 31. Curva de demanda de energía de una vivienda.	88
Figura 32. Curva de demanda de una vivienda con una pila de combustible del 90% de la demanda máxima.	90
Figura 33. Curva de demanda de una vivienda con una pila de combustible del 70% de la demanda máxima.	91
Figura 34. Energía en cada instante.	92
Figura 35. Esquema de la instalación.	93
Figura 36. Catálogo de la pila de combustible Jupiter Future E Fuel Cell Solutions.	94
Figura 37. Dimensiones de la pila PEM.	95
Figura 38. Dimensiones de la batería.	96
Figura 39. Esquema simplificado del banco de baterías.	97
Figura 40. Tabla de análisis de inversión (I).	99
Figura 41. Tabla de análisis de inversión (II).	100
Figura 42. Tabla de análisis de inversión (III).	100
Figura 43. Visión futura del hidrógeno en Europa.	102

Notación

ΔH	Variación de la entalpía
ΔH_f	Entalpía de formación
H_{FG}	Calor de formación del agua
$d(\text{Energía})_{\text{Universo}}$	Variación de la energía del universo
$d(\text{Energía})_{\text{Sistema}}$	Variación de la energía de un sistema
$d(\text{Energía})_{\text{Entorno}}$	Variación de energía del entorno
dU	Variación de la energía interna
dQ	Variación del calor
dW	Variación del trabajo
$dW_{\text{Mecánico}}$	Variación del trabajo mecánico
p	Presión del sistema
dV	Variación del volumen del sistema
ΔS	Variación de la entropía del sistema
ΔS_f	Entropía de formación
ΔG	Variación de la energía libre de Gibbs
T	Temperatura del sistema
W_{el}	Trabajo eléctrico
q	Carga eléctrica
E	Potencial eléctrico
n	Número de electrones transferidos por molécula

N_{AV}	Número de Avogadro
e	Carga del electrón
F	Constante de Faraday
a_{H_2O}	Actividad del agua
a_{H_2}	Actividad del hidrógeno
a_{O_2}	Actividad del oxígeno
E°	Potencial estándar
p_{H_2}	Presión del hidrógeno

1 Evolución histórica

Muchos de los descubrimientos tecnológicos que se han producido a lo largo de los años de nuestra historia empezaron siendo simplemente curiosidades. Muchas de esas novedades continuaron siendo investigadas por científicos y consiguieron su completo desarrollo. Sin embargo, hay otras que quedaron en el olvido durante algunos años. Esto fue lo a grandes rasgos le ocurrió a la pila de combustible: pasó casi un siglo desde su descubrimiento hasta la creación del primer prototipo de pila.

El descubrimiento del principio de funcionamiento de las pilas de combustible se le atribuye al científico galés Sir William R. Grove en 1839. Aunque existe constancia de que los primeros estudios efectuados acerca de este fenómeno los realizó el científico alemán Christian Friedrich Schönbein sobre el año 1838. En Enero de aquel año, Grove hizo público sus conocimientos sobre la corriente que se generaba al combinar hidrógeno y oxígeno.

Su experimento consistió en cuatro recipientes rellenos de ácido sulfúrico y agua, con dos cavidades; una con oxígeno y otra con hidrógeno. Por cada uno de estos orificios introdujo un electrodo de platino. Observó que a través de la reacción de oxidación del hidrógeno que tenía lugar en el electrodo negativo, junto con la de reducción del oxígeno en el electrodo positivo, se generaba una corriente de electricidad. Como la diferencia de potencial que obtuvo era insuficiente, decidió unir estos recipientes en serie para así obtener mayor potencial.

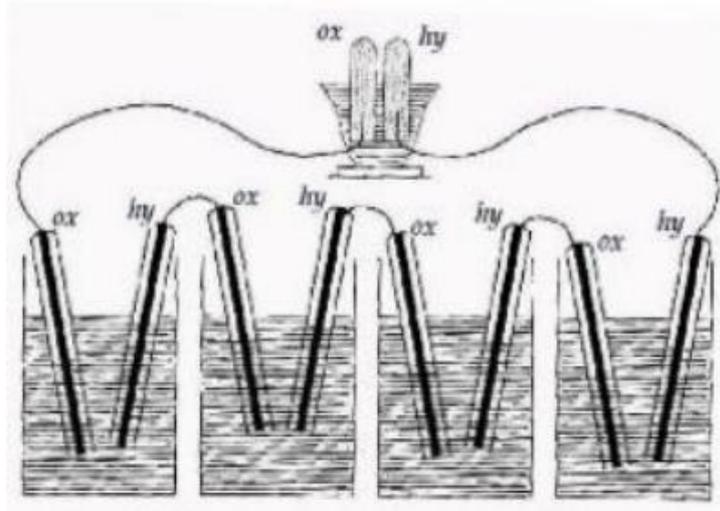


Figura 1. Experimento original de Sir William Robert Grove.
Fuente: Google Imágenes

Grove continuó investigando sobre su experimento hasta que en 1845 presentó los resultados de su estudio a la Royal Society de Londres, la sociedad científica más antigua del Reino Unido y una de las más antiguas de Europa. En ese mismo año propuso que su batería de gas, como él mismo llama a su pila, podría ser usada como fuente de electricidad. Sin embargo, no fue hasta unos años después, en 1889, cuando dos científicos, Charles Langer y Ludwig Mond, usaron por primera vez el término “pila de combustible”. Estos dos científicos se centraron en la investigación de pilas de combustible que trabajaban con aire y gas de hulla.

Fue en 1932 cuando un profesor de ingeniería de la Universidad de Cambridge, Francis Bacon, modificó la pila con la que Langer y Mond habían estado trabajando. Veintisiete años más tarde, Bacon consiguió demostrar públicamente, con ayuda de la empresa Marshall of Cambridge Ltd., una pila de combustible de 5 kW de cuarenta celdas y una eficiencia del 60%.

Durante todos esos años, el profesor y su equipo habían centrado su estudio en encontrar electrodos que tuvieran poros grandes para el lado de los gases y pequeños para el lado del electrolito, de manera que se consiguiera una interfase más estable. Además consiguieron superar los problemas de corrosión del electrodo de oxígeno.

Sin embargo, la primera vez que se usaron estas pilas fue en programas espaciales de Estados Unidos. A finales de 1950 la NASA, en colaboración con otros socios, empezó a desarrollar pilas de combustible para su uso en misiones espaciales tripuladas. Como resultado de ello, Williard Thomas Grubb, miembro de General Electrics, creó la primera PEMFC (pila de combustible de membrana de intercambio de protones). Con la mejora propuesta por parte de otro miembro de General Electrics, Leonard Niedrach, de usar platino como catalizador en las membranas, esta PEMFC fue usada por primera vez en el programa espacial Gemini a mediados de 1960 [12]. Estas pilas de combustible se usaron para producir electricidad necesaria durante la misión espacial, pero además se aprovecharon para proporcionar agua a los

astronautas en su viaje. Unos años más tarde, se volvieron a emplear en la misión espacial Apollo, en la que sirvieron tanto para generar electricidad a bordo, como para los sistemas de guía y comunicaciones. Pero no solo Occidente mostraba interés por esta tecnología: la Unión Soviética empezó a desarrollar este tipo de pilas para su uso en misiones militares. Se sabe que se usó para proporcionar electricidad a bordo a submarinos durante misiones militares. Todo esto, propició que muchas empresas y gobiernos empezaran a tener interés en el estudio de esta fuente de energía.



Figura 2. Científicos de la NASA trabajando en uno de los tres stacks de la nave Apollo (1964). Fuente: appice.es

Por otra parte, el hecho de que en la década de los 70 empezara a existir una preocupación por la contaminación del medio ambiente ayudó al desarrollo de esta tecnología. El interés por el aire limpio y la eficiencia energética, a parte del cambio climático y el tema de seguridad en la eficiencia, colaboraron también con dicho desarrollo. En 1970 varias empresas manufactureras del sector automovilístico de diferentes países del mundo empezaron a experimentar con vehículos eléctricos, lo cual favoreció el desarrollo principalmente de las PEMFC y de los sistemas de almacenamiento de hidrógeno. El primer vehículo de hidrógeno que rodó por las calles de una ciudad fue el modelo Austin A 40. Se trataba de un coche para cuatro pasajeros de 950 kg de peso, híbrido puesto que llevaba una pila de combustible de 6 kW además de una batería convencional de 7,5 kW. El depósito de combustible estaba constituido por seis tanques de 25 m³ de hidrógeno. El diseñador de dicho vehículo fue Karl Kordesch, profesor del Instituto de Tecnología Química de Materiales Inorgánicos de la Universidad Técnica de Gratz, Austria.

En la década de los 90, la atención se centró fundamentalmente en las pilas PEMFC y SOFC (pilas de combustible de óxido sólido). Esto se debe a que presentaban mayores posibilidades de comercialización debido al menor coste por unidad. Por otro lado, las nuevas políticas de los

gobiernos que promovían transporte limpio, ayudaron al desarrollo de las pilas tipo PEMFC para aplicaciones en el sector del automóvil.

Hasta la actualidad, estas políticas siguen impulsando el desarrollo de las pilas de combustible como una de las fuentes de energía con mayor potencial debido a su capacidad de proporcionar energía de forma eficiente y limpia. El objetivo principal hoy en día para las empresas del sector, es conseguir que estas pilas puedan competir con la tecnología más convencional.

2 Hidrógeno como combustible

2.1 Situación energética actual

El ser humano, desde la Revolución Industrial, ha estado explotando todos aquellos recursos que ha ido conociendo para la obtención de energía. Es cierto que los recursos energéticos en el mundo son abundantes, sin embargo, las reservas de energía primarias son escasas, no se reparten por igual en todo el mundo y son variables. Además, existen diversos factores como, un aumento de la preocupación por el efecto que todo esto tiene sobre el medio ambiente, la situación geopolítica actual debido al incremento de la población mundial y al número de países emergentes, y sobre todo, al consumo de las reservas principalmente de combustibles fósiles, los que determinan la situación energética actual.

Según estudios realizados recientemente acerca del mercado mundial de la energía, los consumos mundiales de energía no dejan de crecer. Cabe señalar, que no solo es el consumo de las fuentes de energía convencionales las que crecen, sino que también crece el consumo de aquellas energías más modernas como por ejemplo las renovables [15]. Aún así, este tipo de energía representó en 2014 solo el 3% de la energía primaria.

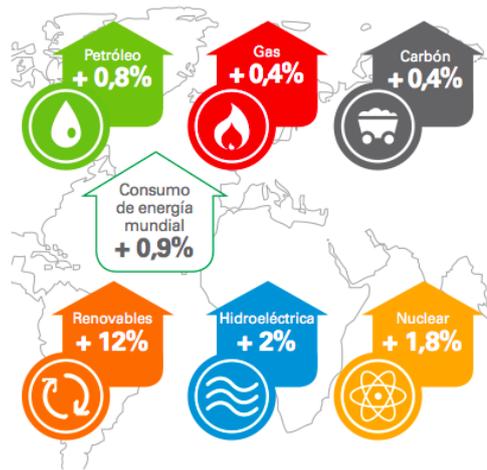


Figura 3. Gráfico de consumos mundiales de 2014 vs. 2013. [12]

Debido a la gran dependencia que tenemos de la energía, más aún en los países más desarrollados, expertos de todo el mundo tratan de buscar alternativas a este problema. Se trata de buscar un sistema sostenible que, en primera instancia, podría basarse en las fuentes de energía renovables. Sin embargo, esta opción no es aplicable a todos los campos. Es por eso que el hidrógeno y las pilas de combustible se muestran como una buena alternativa para diversas aplicaciones, desde hogares autosuficientes hasta misiones espaciales.

Llevaremos a continuación un análisis del consumo final de energía en España. Los datos que se han usado para este apartado se han obtenido de la página web del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). Se trata de datos referidos a los consumos de 2014, puesto que es el último año del que se dispone acceso a esta información.

En primer lugar analizaremos este consumo por sectores. Según datos de MINETUR (Ministerio de Industria, Energía y Turismo) e IDAE, el consumo final de energía en España se puede dividir en los siguientes sectores:

- Industria: engloba subsectores como la industria química, textil, alimentación, construcción, etc. Tomaremos los datos del sector en total, sin entrar en detalle en los distintos sectores que lo conforman.
- Transporte: tanto por carretera, ferrocarril, marítimo, aéreo e incluso oleoductos. Al igual que en la industria, analizaremos los datos de forma global para este sector, sin entrar en detalle en los distintos subsectores que lo forman.
- Usos diversos: este grupo abarca el sector de la agricultura, la pesca, el comercio, el sector residencial y otros. Respecto a este sector, lo compararemos primero como tal con los otros dos sectores. No obstante, más adelante entraremos en detalle en los datos relativos al sector residencial.

Encontramos a su vez, cinco fuentes energéticas diferentes que se exponen a continuación. Es importante también señalar que los datos que hemos tomado para este proyecto son los referentes al total de cada una de estas fuentes.

1. Carbones: hulla, antracita, coque, alquitranes de carbón, etc.
2. Productos petrolíferos: GLP, gasolina, queroseno, gasóleo, fuel oil, coque de petróleo, otros.
3. Gases: gas natural y otros gases.
4. Energía renovables: solar térmica, geotermia, biomasa, biogás y biocarburantes.
5. Energía eléctrica.

El consumo de energía final en España en el año 2014 fue de 78.872 ktep. En el siguiente gráfico podemos ver en términos de porcentajes el consumo total de energía de cada uno de los sectores.

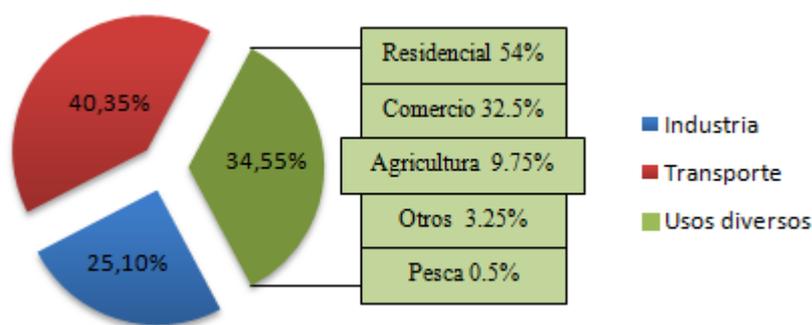


Figura 4. Gráfico consumo total de energía de los principales sectores en España.

Como se puede ver, el sector del transporte es el que mayor consumo final de energía tiene en España. Le sigue el sector de usos diversos en el que se encuentra el sector residencial, siendo dentro de este grupo, el 54% del total. Y por último, el sector de menor consumo es el industrial. En la siguiente tabla se muestran los datos que se han usado para la elaboración del gráfico anterior:

	INDUSTRIA	TRANSPORTE	USOS DIVERSOS	CONSUMO ENERGÍA FINAL
TOTAL [ktep]	19.797	31.828	27.247	78.872

Tabla 1. Datos de energía consumida en ktep por cada sector. Fuente: IDAE.

Si analizamos el consumo de energía final según los cinco tipos de fuentes de energía que se definen en este estudio, podemos ver como el mayor consumo es de productos petrolíferos, representando el 49% del total. Hay que señalar que, según el informe sobre el Estado de la Unión Energética que elaboró la Comisión Europea en 2015, el principal problema de España en cuanto a la energía, es su fuerte dependencia de los combustibles fósiles (petróleo y gas). Esta dependencia se encuentra 17 puntos por encima de la media de la UE28. [37] El principal

motivo de esta situación es que nuestro país carece de yacimientos de petróleo y tampoco posee bolsas de gas. Es por este motivo que en nuestro país cada vez más se está apostando por las energías renovables. La siguiente fuente de energía con mayor consumo es la energía eléctrica y la que menos, los carbones. Debemos destacar, que al comparar estos datos con los datos ofrecidos para años anteriores, el consumo en cuanto a energía renovables está en alza: respecto al año 2013, se produjo un ligero aumento del 0,008%, mientras que las otras fuentes de energía han disminuido.

CONSUMO ENERGÍA FINAL [ktep]	
CARBONES	1.322
PRODUCTOS PETROLÍFEROS	38.642
GASES	14.293
ENERGÍAS RENOVABLES	5.102
ENERGÍA ELÉCTRICA	19.513
TOTAL	78.872

Tabla 2. Consumo energía final en ktep por fuente de energía. Fuente: IDAE.

En la siguiente gráfica podemos ver la evolución del consumo total de energía final según las cinco fuentes de energía que se han definido. Se representa esta evolución desde el año 2008, momento en el que se inició en España la crisis económica, hasta 2014, último año del que se disponen datos de consumo. Determinando la línea de tendencia de cada una de estas fuentes en este período de tiempo y calculando la pendiente en cada caso, se puede ver con mayor facilidad la evolución de cada una.

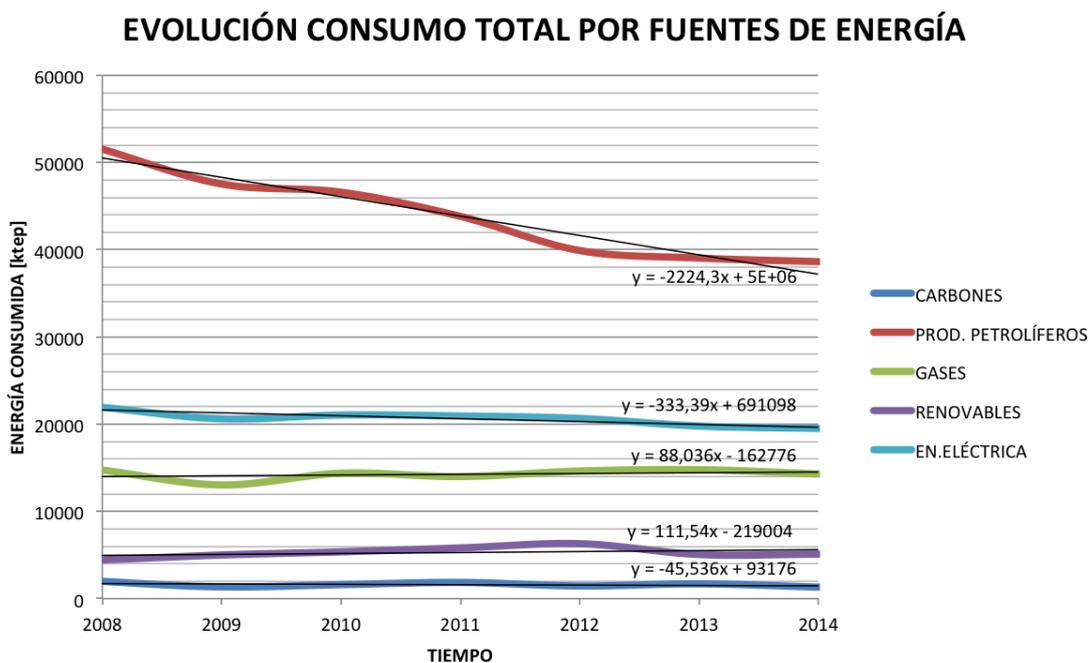


Figura 5. Evolución del consumo total por fuentes de energía.

Lo que primero llama nuestra atención es la caída del consumo de productos petrolíferos en los últimos años. Esto puede tener su origen en la crisis del petróleo que se inició en el siglo XIX.[38] Por otro lado, disminuyen también el consumo en energía eléctrica y carbones. Respecto a las energías renovables y los gases, son las dos únicas fuentes que tienen tendencia positiva. Aún así, cabe destacar que el incremento de consumo de las fuentes renovables es mayor. Esto es importante para el futuro. Estos datos muestran los efectos de la concienciación por el medio ambiente, entre otros factores.

En cuanto al sector residencial, sector que resulta de nuestro particular interés, aportaremos una serie de datos más detallados para poder analizar y entender mejor el consumo de este sector. Nos basaremos en datos ofrecidos por Eurostat, MINETUR e IDAE del año 2013.

En primer lugar, se definen en nuestro país tres zonas climáticas diferentes en función de las temperaturas promedio máximas, medias y mínimas de las provincias españolas. Puesto que las condiciones climáticas no son las mismas, los consumos energéticos en los hogares tampoco serán iguales. Concretamente estas tres zonas son las siguientes: Atlántico Norte, Continental y Mediterráneo.



Figura 6. Mapa de España con la distribución de las zonas climáticas.
 Fuente: epicere.wordpress.com

El consumo total medio por hogar en nuestro país es de 0,852 tep. Los hogares en la zona continental superan este valor medio; consumen de media 1,087 tep. Sin embargo, las viviendas de las zonas atlánticas y mediterránea, presentan un consumo por debajo de la media: 0,799 tep y 0,719 tep, respectivamente.

La estructura de consumo total en porcentajes según los diferentes servicios que existen en un hogar español que encontramos es la siguiente:

Calefacción : 47%

ACS : 18,9%

Cocina : 7,4%

Refrigeración : 0,8%

Iluminación : 4,1%

Electrodomésticos : 19,4%

Standby : 2,3%

Por lo que la calefacción es el servicio de mayor consumo en nuestro país. Y aún mayor en las zonas más frías, es decir en la zona definida como Continental. En la mayoría de las viviendas existe multiequipamiento, es decir, existen diferentes tipos de equipos de calefacción: radiadores, caldera, etc. Sin embargo, el más común es la caldera convencional. Otro dato a destacar es que en más del 80% de las viviendas el sistema de calefacción suele ser individual y apenas en el 8% es centralizada. Por otro lado, el consumo de electrodomésticos es prácticamente el mismo en las tres zonas. Por último, en cuanto a la refrigeración, el 49% de los hogares españoles disponen de algún sistema de aire acondicionado, aunque generalmente suelen ser de tipo individual. El sistema más común es la bomba de calor reversible. Además, destacar que el mayor consumo en refrigeración se produce en la zona Mediterránea, siendo en la zona Atlántica prácticamente nulo.

Puesto que el consumo en electrodomésticos tiene un gran peso dentro de la estructura del consumo total de una vivienda, se expone a continuación los porcentajes de consumo de los electrodomésticos más comunes en los hogares españoles.

Consumo electrodoméstico según tipo de equipamiento

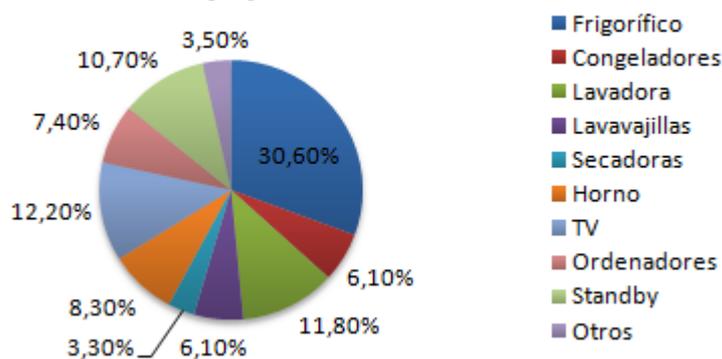


Figura 7. Gráfico con el consumo de electrodomésticos según el tipo de equipamiento.

Aunque en el gráfico de arriba no se representa, por no ser un electrodoméstico como tal, la iluminación en una vivienda representa el mayor consumo: 410 kWh/hogar. Dentro de los electrodomésticos, como se puede ver en el anterior gráfico, el frigorífico es el de mayor consumo: 655 kWh/equipo. Los electrodomésticos como el frigorífico, la lavadora y la televisión, están presentes en más del 90% de los hogares en España. Cada uno de ellos con una media de un aparato por hogar, aunque en el caso de la televisión esta media es algo mayor: 2,2 equipos por hogar. Sin embargo, el lavavajillas se encuentra en el 53% de las viviendas españolas y la secadora o el congelador en el 25% aproximadamente, ambos equipos también con una media de uno por hogar.

Una vez conocida la estructura de consumo de energía de una vivienda, analizamos las fuentes de suministro para cada uno de los servicios del hogar. Es decir, se trata ahora de establecer, de dónde se obtiene la energía para cada uno de estos servicios. Este análisis lo haremos a los cuatro siguientes servicios: calefacción, ACS, refrigeración y cocina. Los datos son los siguientes:

		España	Zona Atlántica	Zona Continental	Zona Mediterránea
Calefacción	Electricidad	46,3%	35,7%	21,0%	66,8%
	Gas Natural	32,0%	39,3%	45,7%	20,4%
	GLP	4,5%	6,0%	4,7%	4,0%
	Gasóleo	14,3%	16,1%	26,0%	5,7%
	Carbón	0,9%	0,6%	1,5%	0,6%
	Renovables	1,9%	2,2%	1,0%	2,5%
ACS	Electricidad	21,5%	1,8%	17,0%	25,3%
	Gas Natural	40,3%	4,2%	46,6%	36,0%
	GLP	25,9%	3,0%	15,4%	31,5%
	Gasóleo	10,1%	1,0%	19,6%	4,2%
	Carbón	0,1%	0,0%	0,2%	0,1%
	Renovables	1,7%	0,2%	1,3%	2,4%
Refrigeración	Electricidad	99,70%	100,00%	99,20%	99,90%
	Renovables	0,30%	0,00%	0,80%	0,10%
Cocina	Electricidad	63,00%	68,10%	72,40%	55,80%
	Gas Natural	17,90%	8,80%	15,80%	21,40%
	GLP	18,90%	22,70%	11,50%	22,70%
	Carbón	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Renovables	0,20%	0,20%	0,30%	0,10%

Tabla 3. Consumo de energía sector residencial según servicios y zonas climáticas. Fuente: IDAE.

Si observamos la columna que se refiere a España, sin entrar en detalle en lo particular de cada una de las tres zonas ya definidas, podemos concluir lo siguiente:

- En prácticamente los cuatro grupos que se han distinguido en este análisis, la mayor fuente de suministro energético es la electricidad. Solamente en el caso de agua caliente sanitaria, la electricidad no es la primera opción. En este caso, se trata del tercer mayor porcentaje.
- La refrigeración en los hogares españoles se abastece prácticamente al 100% por electricidad. La única otra fuente de energía es la renovable, ocupando apenas un 0,3%.
- En el caso del ACS el mayor suministro se produce mediante gas natural, seguido de gas licuado de petróleo y de la electricidad. La energía renovable en este caso tiene un peso algo más destacable: 1,7%.
- En cuanto a la calefacción, como ya se ha dicho, vuelve a ser la electricidad el mayor porcentaje de suministro (46,3%). Es en este concreto grupo en el que las energías renovables toman más peso: casi un 2% del suministro.
- Por último, el segundo grupo en el que la electricidad tiene mayor peso es en la cocina. Es en ella donde se localizan la mayoría de los electrodomésticos en una vivienda. Las energías renovables aquí son escasas, más aún que en el caso de la refrigeración: apenas un 0,2% del suministro.

2.1.1 Importancia de la eficiencia energética

La energía es en la actualidad imprescindible para el desarrollo de las actividades del ser humano. El consumo de energía depende, a grandes rasgos, de dos factores: de las necesidades de energía que tenemos y por otro lado, de la optimización de dicha energía. Vivimos en un mundo cada vez más tecnológico y desarrollado. Esto hace que la demanda de energía sea cada vez más elevada. Es por esto que la optimización de la energía es crucial. Debemos ser conscientes de que es importante no solo optimizar el proceso de transformación u obtención de la energía, sino que también debe ser óptimo el uso de la energía final. De esto trata la eficiencia energética.

Esta necesidad de concienciación se debe aplicar a los tres sectores que ya se han definido. El sector del transporte es el responsable del 40% del consumo de energía. Cada vez son más las tecnologías limpias que se aplican en estos sistemas: vehículos eléctricos o híbridos, etc. Aunque en la actualidad estos vehículos son más caros esto se ve compensado con un ahorro de combustible a lo largo de la vida del mismo. Además, por supuesto, que un uso extendido de estos vehículos contribuiría notablemente con la disminución de las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero). La industria utiliza el 25% de la energía consumida. En ella se deben por tanto, aplicar metodologías de sistemas productivos que sean eficientes. Esto daría lugar a beneficios medioambientales para la comunidad, pero además, sería económicamente más favorable para el sector. Puesto que de esta forma se conseguiría reducir el consumo energético y a su vez, disminuir la emisión de sustancias contaminantes. Finalmente, el sector denominado de usos diversos supone el 35% del consumo de energía. Dentro de este grupo el sector residencial es el subsector de mayor peso. La eficiencia energética en la edificación es muy importante. Se deben buscar conceptos innovadores que ayuden a la disminución del consumo energético de una vivienda. El uso de instalaciones fotovoltaicas, electrodomésticos eficientes o

incluso de materiales más óptimos en los cerramientos de los edificios, colaborarían con dicha disminución.

Nos centraremos en este apartado en la importancia de la eficiencia energética en el sector residencial. Encontramos los siguientes productos de eficiencia energética:

- Cerramientos: según el Código Técnico de la Edificación, la envolvente térmica de un edificio se compone de los cerramientos del edificio que separan los recintos habitables del ambiente exterior. Para mejorar la eficiencia de dicha envolvente se puede actuar sobre las fachadas, cubiertas, suelos, techos, tabiques y ventanas. En este caso, la forma más común es el uso de aislantes térmicos. Estos materiales presentan una elevada resistencia al paso del calor. En este sentido, se deben buscar materiales que presenten valores bajos de transmitancia térmica. Un factor también importante es el espesor del aislante. Cuanto mayor espesor, mayor aislamiento pero mayor coste. Se trata entonces de encontrar el valor óptimo.
- Calderas de alta eficiencia: una de las tecnologías más eficientes para la obtención de energía térmica es la caldera de condensación. Esta caldera aprovecha el calor latente de condensación del vapor de agua que hay en los gases de combustión para incrementar el rendimiento de la instalación en torno a un 18%. Estas calderas pueden llegar a consumir hasta un 30% menos que una convencional.
- Iluminación: existen en la actualidad numerosos sistemas de iluminación, cada uno de ellos con diferentes propiedades. Las lámparas cuentan con etiquetas energéticas obligatorias que nos indican la clase energética, la potencia absorbida, el flujo luminoso y el ciclo de vida medio. En cuanto a la penetración de las bombillas de bajo consumo en el sector residencial, el 86% de las viviendas dispone de ellas en su hogar. El número medio de este tipo de bombillas en las viviendas españolas es de 7,04 frente a 8,3 de las bombillas convencionales por hogar. Estas bombillas llegan a consumir hasta un 80% menos de electricidad frente a las convencionales.
- Electrodomésticos: en este caso existe también un sistema de etiquetado energético que nos informa sobre la eficiencia del equipo. Existen siete niveles de eficiencia que se representan por colores y letras. Los equipos más eficientes llevan una etiqueta con la letra A y color verde, mientras que los menos eficientes son los de la letra G y color rojo. Un electrodoméstico de clase A, a lo largo de su vida útil puede ahorrarnos en consumo hasta unos 600€ frente a otro de clase G.

2.2 Hidrógeno como alternativa

El hidrógeno es uno de los elementos con mayor importancia en la actualidad. Se emplea desde hace muchos años en distintos procesos de la industria química y petroquímica. Se utiliza en la

síntesis del amoníaco, en la hidrogenación de grasas y aceites, etc. Y debido a la necesidad energética actual es considerado como el combustible del futuro [24].

Aunque el hidrógeno sea el elemento con mayor presencia en el universo (hasta un 75% de la masa de la materia visible en estrellas y galaxias es hidrógeno), este elemento no es en realidad un recurso de energía, sino que se trata de un vector energético. Es decir, de una sustancia que almacena energía generada primero mediante otros medios. Esto se debe a que el hidrógeno no se encuentra en estado puro en la naturaleza. Consecuentemente, para su obtención se hace necesaria la aplicación de energía.

Podemos encontrarlo en la tabla periódica en el primer grupo y primer período, es decir, es el primer elemento de dicha tabla. Esto hace que sea el elemento más liviano que existe. Eléctricamente un átomo de hidrógeno es neutro ya que consta de un protón con carga positiva y un electrón con carga negativa y químicamente es muy reactivo, por eso generalmente se encuentra en forma molecular [5]. En condiciones ambientales se encuentra en estado gaseoso y posee los puntos de ebullición y fusión más bajos de todas las sustancias conocidas. Además se trata de un elemento que no tiene ni color ni olor, y posee una rápida capacidad de dispersión en el aire, lo cual puede ser una ventaja en caso de escape en zonas abiertas, pero un problema en zonas cerradas.

Una de las principales ventajas que presenta el hidrógeno como alternativa a los combustibles más tradicionales es que solo deja como subproducto de su reacción con el oxígeno agua, mientras que otros combustibles producen en su combustión sustancias como dióxido o monóxido de carbono. Por eso se le conoce como combustible limpio. Asimismo, la energía de activación (la necesaria para que se produzca una reacción) es muy baja, sobre todo en comparación con la mayoría de hidrocarburos.

Desde el punto de vista energético, el hidrógeno es, de todos los combustibles, el que tiene mayor poder calorífico por unidad de masa. Es decir, un gramo de hidrógeno contiene más del doble de energía que un gramo de gas natural por ejemplo. No obstante, se ve limitado por su baja densidad por unidad de volumen: un metro cúbico de este gas libera mucha menos energía que otros combustibles gaseosos.

2.2.1 Producción de hidrógeno

Existen diferentes métodos a partir de los cuales obtener hidrógeno. La mayoría de estos procesos están basados en el reformado de combustibles fósiles y en la electrólisis del agua. En

la actualidad, el reparto en porcentajes según el uso de las diferentes vías que existen para la producción de hidrógeno es el siguiente:

Métodos de producción de hidrógeno

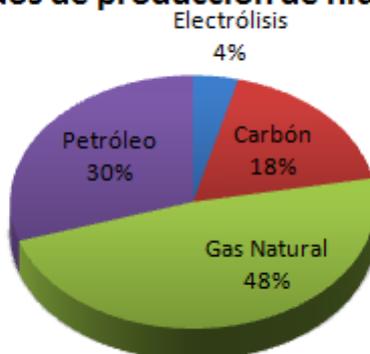


Figura 8. Gráfico con los porcentajes de los distintos métodos de producción de hidrógeno.

Aunque no aparece en este gráfico, también se podría obtener el hidrógeno a partir de la biomasa o del biogás, o incluso ser producido mediante otras fuentes de energías renovables como la solar o eólica, aunque estos métodos son aún muy costosos.

Tal y como se puede ver en el anterior gráfico, la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles es la opción más empleada hoy en día. La generación de hidrógeno a partir de combustibles fósiles abarca diferentes técnicas. De forma genérica, el proceso de reformado consiste en la ruptura de hidrocarburos (también puede ser de otros productos como alcoholes) en sus tres componentes elementales: carbono, oxígeno y obviamente hidrógeno. Esta división se consigue haciendo reaccionar el combustible a reformar con agua en forma de vapor. Uno de los principales inconvenientes de esta técnica es que se obtiene, a parte de los citados, como producto otros no deseados como monóxido y dióxido de carbono. A pesar de ello, estos productos puede reaccionar nuevamente para producir más hidrógeno. No obstante, según estudios, la cantidad liberada en este proceso es menor que la que emite, por ejemplo, un automóvil propulsado por gasolina. Por esto es necesario a menudo unos pasos intermedios para la eliminación de estos gases indeseados. Como ya se ha mencionado, el hidrógeno se puede obtener de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural o el carbón.

El gas natural es el combustible más empleado (en un 48%) en la industria para la producción de hidrógeno en grandes cantidades debido a su elevado contenido en metano. Por este motivo vamos a nombrar los diferentes procesos que existen para la producción de hidrógeno a partir de este gas. Son tres los principales métodos químicos:

1. Reformado de vapor: se trata de la conversión de metano y vapor de agua en hidrógeno y monóxido de carbono.



Esta reacción es endotérmica, es decir, para que tenga lugar necesita cierta aportación de calor. A menudo este calor se aporta por la combustión de parte de la alimentación de metano gas. El monóxido de carbono que se obtiene en el producto gaseoso de esta reacción se puede convertir en dióxido de carbono e hidrógeno a través de la reacción con vapor de agua.



Debido a la presencia de impurezas de azufre y de pequeñas proporciones de otros hidrocarburos en el gas natural, se hacen necesarios ciertos pasos previos. Se requiere una etapa previa para la eliminación de las pequeñas impurezas de azufre de este combustible. Esto es necesario para evitar el deterioro de la actividad catalítica ya que la corriente limpia de gas se hace reaccionar en presencia de un catalizador de níquel. Por otro lado se deben eliminar las pequeñas cantidades que haya de otros hidrocarburos puesto que pueden descomponerse con facilidad generando residuos carbonosos. Se lleva entonces a cabo una etapa previa denominada pre-reformado. En esta fase se transforman estos hidrocarburos en una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno. Para este método suelen emplearse reactores multitubulares y se alcanzan rendimientos en hidrógeno elevados del orden del 90%. [24]

2. Oxidación parcial del gas natural: se trata de obtener hidrógeno a partir de la combustión parcial de metano con oxígeno produciendo monóxido de carbono, carbón e hidrógeno.

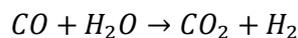
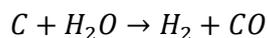


Se trata pues, de una reacción exotérmica en la que se libera energía en forma de calor. En este caso, al no ser necesario un aporte de energía, el diseño del sistema puede ser más compacto. Al igual que en el caso anterior, el monóxido de carbono podría convertirse posteriormente en dióxido de carbono e hidrógeno.

3. Reformado auto-térmico: se trata de la combinación de los dos procesos anteriores. Con la correcta combinación de alimentación de entrada, el calor de reacción de la oxidación parcial es suficiente para que tenga lugar la reacción de reformado por vapor. El metano reacciona con el vapor de agua y aire para producir un gas rico en hidrógeno. El principal inconveniente de este método es que se requiere un sistema de recuperación del calor.

Por otro lado, se puede obtener hidrógeno a través de un proceso de gasificación del carbón. Este proceso se inicia con la conversión del carbón en estado gaseoso mediante su

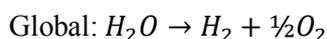
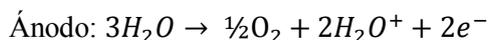
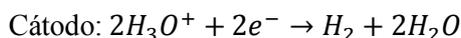
calentamiento en un reactor de alta temperatura. Este carbón gaseoso es después tratado con vapor y oxígeno dando como resultado hidrógeno gaseoso, monóxido de carbono y dióxido de carbono.



En la primera reacción el carbono contenido en el carbón se transforma en monóxido de carbono, que será posteriormente transformado en dióxido de hidrógeno. En ambas reacciones se produce hidrógeno.

Se trata del proceso más antiguo de obtención de hidrógeno. Este método se convierte económicamente viable si el dióxido de carbono es capturado para después ser usado para recuperar el metano atrapado en las minas de carbón. Sin embargo, debido a que el ratio hidrógeno carbono es mucho menor en el carbón que en el gas natural, esta producción de hidrógeno es casi dos veces más costosa.

El 4% de los métodos empleados se refiere a la electrólisis. Sin embargo, en los últimos años se está intentando aumentar la tendencia a la obtención del hidrógeno a partir del agua, puesto que un 70% de la superficie de la Tierra está cubierta por agua. La electrólisis del agua es un proceso en el cual la molécula de agua se rompe en hidrógeno y oxígeno a través de la aplicación de electricidad. En realidad, no es más que la operación inversa de una pila de combustible. Se trata por tanto de un método sencillo: se hace pasar la corriente eléctrica por unos electrodos metálicos que están sumergidos en agua de manera que el hidrógeno se desprende. Por tanto, las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



Uno de los inconvenientes de este proceso es que el gas obtenido tiene menos energía que la empleada para su obtención [13]. Por este motivo a menudo se intenta usar fuentes de energía primaria que sean accesibles y de bajo coste. Pese a esto, el hidrógeno que se obtiene es de elevada pureza y además es aplicable tanto a pequeña como a grande escala.

El electrolizador es el dispositivo en el que tiene lugar esta transformación. Consta básicamente de una serie de celdas con electrodos positivos y negativos que están sumergidos en agua, a la que generalmente se le añade hidróxido de potasio (electrolisis alcalina) para que se ionice y sea conductora de la electricidad. Comúnmente, el ánodo es de níquel y cobre, revestido con metales como por ejemplo manganeso o tungsteno, y el cátodo está fabricado de níquel que se reviste con pequeñas partículas de platino que funcionará como catalizador.

Puesto que para la electrólisis es necesario un aporte de electricidad, es posible la combinación de este método con las fuentes de energía renovables. Se trata de generar electricidad a través de una fuente de energía renovable, eólica, solar, hidráulica o geotérmica, para después llevar a cabo la electrólisis del agua.



Figura 9. Obtención de hidrógeno a partir de fuentes de energía renovables. Fuente: hychico.com

Hay que destacar que existen ya en el mercado sistemas fotovoltaicos unidos a electrolizadores. En estos sistemas se produce la energía necesaria a partir de las células fotovoltaicas y el hidrógeno a partir del electrolizador. Se trata por tanto de procesos electroquímicos. La mejora de estos sistemas está en el progreso de la ciencia e ingeniería de los materiales. Es muy importante mejorar los materiales usados en los fotoelectrodos para así mejorar su eficiencia y resistencia a la corrosión.

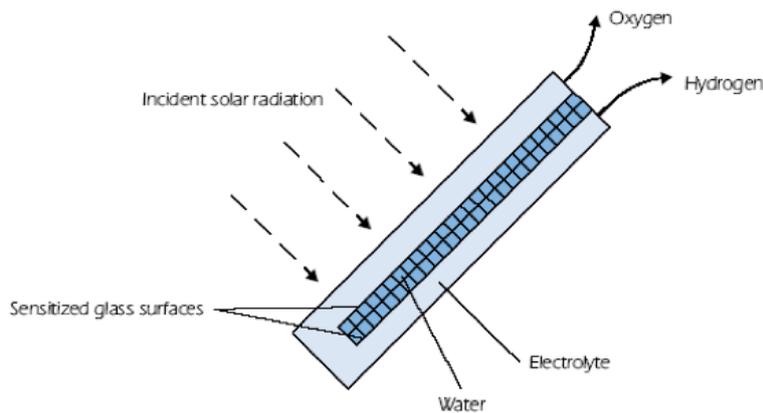


Figura 10. Esquema de un sistema fotovoltaico unido a un electrolizador.

Pero no solo se puede aprovechar la energía solar para usarla conjuntamente con electrolizadores. En los procesos termoquímicos se usa la energía solar como fuente de calor para producir reacciones químicas endotérmicas tales como:

- La termólisis directa del agua: disociación de la molécula de agua usando energía solar.
- Ciclos termoquímicos: conjunto de reacciones químicas tanto endotérmicas como exotérmicas que constituyen ciclos compuestos de varias etapas para la descomposición del agua en hidrógeno y oxígeno.

Estos procesos usan la energía solar concentrada. Para ello se usan los sistemas de discos parabólicos y sistemas de torre, de manera que se consigan razones de concentración elevadas. Cuanto mayor es la razón de concentración, mayor es la temperatura que se alcanza en el receptor, sin embargo, mayor es el coste de la instalación. Consecuentemente es siempre necesario buscar para cada caso el punto óptimo de dicha instalación. [30]

Por último, cabe mencionar la obtención de hidrógeno a partir de la biomasa. Esto es posible debido a que todos los organismos vivos, animales y vegetales, contienen hidrógeno. Mediante la gasificación de la biomasa se obtiene un gas de síntesis compuesto por monóxido de carbono e hidrógeno. Se trata de un proceso de calentamiento controlado del residuo en una atmósfera de oxígeno o vapor de agua. El rendimiento de este proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología empleada, no obstante, está dentro del rango de 70-80%. [13]

2.2.2 Transporte, almacenamiento y seguridad

Son muchas las propiedades del hidrógeno que hacen que se tenga que tener especial cuidado en cuanto su almacenamiento y transporte. Los sistemas deben ser diseñados con precisión y además deben tener un mantenimiento importante con el fin de evitar posibles fugas. No obstante, no se trata del elemento más peligroso ni tampoco del menos. Las propiedades relativas a la seguridad del hidrógeno en comparación con otros combustibles son las siguientes:

Probabilidad de fugas	↑
Volumen de combustible liberado en la fuga	↑
Energía del combustible liberado en la fuga	↓
Límite inferior de inflamabilidad en aire	↑
Energía mínima de ignición	↓
Energía explosiva por energía almacenada	↓
Visibilidad de la llama	↓
Emisividad de la llama	↓
Toxicidad de los gases de la llama	↓

Tabla 4. Propiedades del hidrógeno relativas a la seguridad.

Al ser una molécula pequeña, el hidrógeno en comparación con otros combustibles líquidos o gaseosos, presenta mayor tendencia al escape. Si comparamos con el gas natural, la probabilidad de escape del hidrógeno en conductos de baja presión es entre 1,26 a 2,8 veces mayor. En cuanto a la velocidad de fuga, ésta viene limitada por la velocidad sónica. El hidrógeno tiene una velocidad sónica superior a la del gas natural, consecuentemente será mayor su velocidad de fuga. Sin embargo, la densidad energética del gas natural es más de tres veces mayor que la del combustible hidrógeno. Esto supone que la cantidad de energía liberada en una fuga de hidrógeno es menor que en el caso de una fuga de gas natural. El hidrógeno además presenta la ventaja de que su fuga presenta muchos menos riesgos ya que se dispersa relativamente rápido.

El mayor problema que presenta el hidrógeno en comparación con otros elementos es la mínima energía de ignición que necesita, [31] sin embargo se debe tener en cuenta que para este combustible se necesita una concentración mínima mucho mayor para la detonación. La mezcla hidrógeno/aire puede arder en porcentajes de volumen amplios: entre el 4% y el 75% de hidrógeno en aire. En cambio, los límites de inflamabilidad de otros combustibles son muchos más reducidos: el gas natural entre el 5% y el 15% o la gasolina entre el 1% y el 8%.

En cuanto al almacenamiento de este combustible dependerá fundamentalmente de su posterior aplicación [21]. Así como para sistemas estacionarios de almacenamiento no existen restricciones de volumen, superficie o peso, para aplicaciones en el sector de la automoción, por ejemplo, es importante mantener un equilibrio en cuanto al peso y volumen del depósito.

El hidrógeno se puede almacenar tanto en estado líquido, como en estado gaseoso o incluso sólido. A continuación se analizan por separado las distintas opciones.

- Estado gaseoso: se trata de almacenar el hidrógeno como un gas a presión. Esta es la opción más sencilla y usada para el almacenamiento de pequeñas cantidades de hidrógeno. Este tipo de almacenamiento se caracteriza por la necesidad de altas presiones y grandes volúmenes. Para ello se necesita un compresor. En él, el aire se comprimirá hasta aproximadamente unos 20 MPa. Para minimizar en la medida que sea posible los costes, la compresión se suele realizar en distintas etapas. Una vez comprimido, el gas se almacena en botellas cilíndricas con paredes lo suficientemente gruesas para soportar tanta presión. Hay que señalar que el material del que se fabrican estas botellas es muy importante: el material no puede ser permeable puesto que el hidrógeno es una molécula que se escapa con gran facilidad y además, debido a su alta reactividad, puede ocurrir la difusión de sus átomos dentro del material. [31] Por estos motivos, estos sistemas suelen llevar válvulas y sensores con el objetivo de controlar de forma segura tanto su almacenamiento como su posterior suministro. En cuanto al transporte, se realiza vía camiones de reparto en estas botellas presurizadas. Esto es solo viable para transportar pequeñas cantidades de hidrógeno así como a cortas distancias. No obstante, se cree que en un futuro, cuando la economía del hidrógeno esté muy desarrollada, será viable el transporte de este gas comprimido mediante tuberías presurizadas (0,4-6 MPa) que usen la misma tecnología que se emplea en la actualidad para el transporte de gas natural y petróleo. Cuando el transporte se haga a grandes distancias, el hidrógeno se repartiría mediante sistemas interurbanos de tuberías a altas presiones (6-8 MPa). En cambio, el hidrógeno localmente producido se distribuiría a presiones medias (2 MPa) y bajas (0,4-0,04 MPa) mediante gasoductos. Se requerirán probablemente de estaciones de recompresión. [22] No obstante, en Octubre de 2012, la compañía Air Products finalizó la construcción del gasoducto para el suministro de hidrógeno más largo del mundo. Se trata de una red de 290 km que se extiende desde el Canal de Navegación de Houston, en Texas, hasta Nueva Orleans, en Luisiana. Esta red completa los 965 km de gasoducto que ofrece en la actualidad suministro de hidrógeno a 22 plantas estadounidenses. [3]
- Estado líquido: se trata del método comúnmente usado para almacenar grandes cantidades de hidrógeno. La NASA dispone en la actualidad de tanques de hasta 3200 m³ para asegurarse la disponibilidad de hidrógeno para el programa espacial. [31] Para mantener el hidrógeno en estado líquido se necesitan condiciones criogénicas: temperaturas de entre 14 y 20 K. Es por eso que en este caso se necesitan tanques de doble pared con fuerte aislamiento. Las posibilidades que existen [40] son las siguientes:

Almacenamiento en superficie	Almacenamiento subterráneo
<i>Pared simple</i>	Congelado en el suelo o en cavernas interiores
Aislados externamente	Hormigón pretensado
Aislados internamente	
<i>Doble pared (ambas rígidas)</i>	
Aislamiento de perlita	
Aislamiento de perlita con vacío en el espacio intermedio	
Aislamiento de capas múltiples con vacío en los espacios intermedios	
<i>Doble pared (una pared flexible)</i>	
Aislamiento mediante esferas de vidrio hueco con vacío en los espacios intermedios	

Tabla 5. Posibilidades de almacenamiento del hidrógeno en estado líquido.

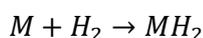
Suelen tener forma esférica debido a la menor relación superficie/volumen. Sin embargo, a pesar del fuerte aislamiento, existe cierto intercambio de calor con el exterior. Esto provoca que el hidrógeno se evapore y la presión aumente. Por este motivo este tipo de almacenamiento no es viable para largos periodos de tiempo, en consecuencia, se suele emplear en aplicaciones aéreas o espaciales. De cualquier forma, disponen de válvulas de alivio que sirven para que cuando la tasa de evaporación exceda la demanda, se pueda purgar cierta cantidad de hidrógeno. La principal ventaja de esta metodología es que se consigue almacenar energía con alta densidad y además, en comparación con los otros dos métodos, para la misma cantidad de energía almacenada, el peso de estos depósitos es menor. Sin embargo, el principal problema que presenta es que el proceso de licuación de este gas requiere mucha energía: según estudios, en el mejor de los casos, se emplearía alrededor del 25% del poder calorífico del hidrógeno. Otra de las desventajas de este método de almacenamiento es el peligro de congelación. Si en algún momento el hidrógeno criogénico entrara en contacto con una persona se produciría el congelamiento inmediato de la piel. Es por esto que es necesario que todo el sistema de tuberías y demás que intervengan en el sistema completo estén perfectamente aislados. En relación a su transporte se realiza a través de carreteras, por ferrocarril o a través transporte marítimo. En los tres casos el hidrógeno se transporta en depósitos cilíndricos aislados de diferentes capacidades que se disponen horizontalmente.

- Estado sólido: la capacidad de reaccionar con distintos metales hace que el hidrógeno se pueda almacenar en forma de hidruros de metal. Los materiales más comunes son las aleaciones de titanio, hierro, manganeso, níquel o cromo, entre otros. A continuación se muestra una tabla con diferentes materiales y sus principales características:

Medio	Contenido en	Capacidad de almacenamiento de	Densidad de	
	H ₂	H ₂	energía	
	[kg/kg]	[kg/L]	[kJ/kg]	[kJ/L]
MgH ₂	0,0700	0,101	9933	14330
Mg ₂ NiH ₄	0,0316	0,081	4484	11494
VH ₂	0,0207		3831	
FeTiH _{1,95}	0,0175	0,096	2483	13620
TiFe _{0,7} Mn _{0,2} H _{1,9}	0,0172	0,090	2440	12770
LaNi ₅ H ₂	0,0137	0,089	1944	12630
R.E.Ni ₅ H _{6,5}	0,0135	0,090	1915	12770

Tabla 6. Diferentes medios en los que almacenar hidrógeno en estado sólido. [31]

La ecuación general que tiene lugar es la siguiente:



En el sentido en el que se ha definido, se trata de una reacción moderadamente exotérmica. El funcionamiento es el siguiente: una vez suministrado dentro del contenedor el hidrógeno a una presión ligeramente por encima de la atmosférica a la aleación del metal, se forma el hidruro metálico. Una vez que esto ocurre, empieza a aumentar la presión y es entonces cuando cesa el suministro de hidrógeno. Se tiene entonces en el contenedor el hidruro metálico que se conectará por ejemplo, a la pila de combustible para el aporte de hidrógeno. La reacción ahora tiene lugar en el sentido inverso siendo entonces endotérmica y necesitando por tanto un pequeño aporte de calor. Una vez liberado todo el hidrógeno se puede volver a repetir el proceso. Por lo general se pueden completar cientos de ciclos de carga y descarga. [31] La principal ventaja de este método es que no se necesitan altas presiones. Esto hace que sea una forma muy segura de almacenar hidrógeno ya que no existe peligro de descarga rápida. Para que el hidrógeno se pueda almacenar de esta forma, se necesita que el hidruro metálico cumpla ciertos requisitos: [39]

1. Debe ser fácilmente reformado y descompuesto.
2. La cinética de las reacciones de absorción y desorción debe ser suficientemente rápida.
3. Presión de equilibrio compatible con los requisitos de seguridad del sistema.
4. Debe presentar máxima tolerancia a las impurezas que pueda aportar el hidrógeno.

En contraste, este sistema es menos ventajoso cuando se trata de almacenar grandes cantidades de hidrógeno puesto que la energía específica es pobre.

En conclusión, el sistema de almacenamiento y transporte del combustible hidrógeno dependerá de su aplicación. Se deberá elegir siempre el método más favorable y que, por supuesto, no entrañe ningún peligro.

3 Generalidades de una pila de combustible

3.1 Definición

Una pila de combustible no es más que un dispositivo electroquímico que es capaz de convertir la energía química contenida en un combustible directamente en energía eléctrica.

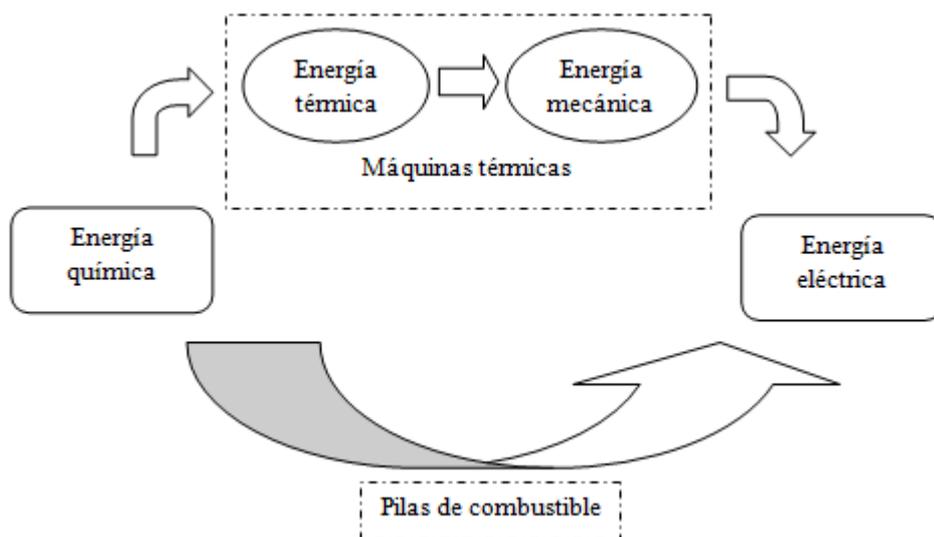


Figura 11. Esquema transformación de energía de las máquinas térmicas y de las pilas de combustible.

Una de las ventajas más importante que sería conveniente mencionar en su definición es que, a diferencia de las máquinas convencionales de generación de electricidad, las pilas de

combustible tienen una alta eficiencia en su transformación. Las máquinas térmicas tienen su eficiencia limitada por el ciclo de Carnot [28]. En cambio, en las pilas de combustible los límites que existen, sin tener en cuenta factores constructivos o económicos, son los principios que rigen la termodinámica.

Se podría decir que de alguna forma las pilas de combustible se asemejan a las baterías actuales. Poseen un electrolito y dos electrodos: uno positivo y otro negativo. Y además, con todo ello, es capaz de generar electricidad a través de una serie de reacciones electroquímicas. Sin embargo, la gran diferencia que existe entre estos dos dispositivos es que las pilas de combustible necesitan un suministro constante de reactivos. Además, otra diferencia es que en las baterías los electrodos sufren cambios químicos, sin embargo, esto no ocurre en las pilas de combustible. Como ya sabemos, en las baterías se produce un proceso de descarga debido a que las sustancias químicas en su interior se agotan. Algunas baterías son recargables, lo que significa que las reacciones ocurren en sentido inverso cuando se les aplica una fuente de electricidad externa. Por el contrario, en las pilas de combustible no existirá descarga siempre y cuando se alimenten de reactivos.

3.2 Principio de funcionamiento

La característica más relevante de estos sistemas es su capacidad de transformar energía química directamente en energía eléctrica, sin necesidad de transformaciones intermedias.

El principio de funcionamiento de estas pilas es bastante sencillo. El elemento básico de una pila de combustible es la celda electroquímica formada principalmente por dos electrodos (ánodo y cátodo) y un electrolito. Existen muchos tipos de pilas de combustible que más adelante se explicarán. Las reacciones que tengan lugar dependerán del tipo de pila del que se trate.

A grandes rasgos, lo que en la celda ocurre son dos reacciones simultáneas. En el ánodo es donde tiene lugar la reacción de oxidación del combustible. En esta reacción se liberan electrones, que pasarán por un circuito externo proporcionando trabajo útil, y protones, que atravesarán el electrolito para llegar al otro electrodo. Por otro lado, en el cátodo es donde se produce la reducción del oxidante. Los cationes que, como hemos dicho atraviesan el electrolito, llegan hasta el cátodo, así como los electrones que han viajado por el circuito externo. La sustancia que se ha reducido en el cátodo gana entonces dichos electrones y se recombina formando una especie neutra. Dicha especie dependerá del tipo de pila que se trate así como del combustible empleado [28].

Aunque más adelante se explicarán los diferentes tipos que existen, nos centraremos en el tipo de pilas PEM (Proton Exchange Membrane), que traducido al español significa “Pilas de combustible con membrana de intercambio de protones”. Este tipo de pilas usa como combustible hidrógeno puro, como comburente oxígeno y la especie neutra que se forma es agua.

3.2.1 Apilamiento de celdas

Es importante señalar que como ya se ha dicho, la unidad básica de estas pilas es la celda electroquímica. Sin embargo, el término pila proviene del término inglés primero empleado “Fuel cell stack”, que en español significa “apilamiento de celdas de combustible”. Es decir, una pila es el resultado de la unión en serie de varias celdas, puesto que cada celda de forma independiente sería capaz de suministrar apenas 0,7 V. Por otro lado, aunque idealmente podría producir aproximadamente unos 1,3 V, este valor es en realidad menor debido a las pérdidas producidas en su interior. Se explicarán a lo largo de este documento dichas pérdidas.

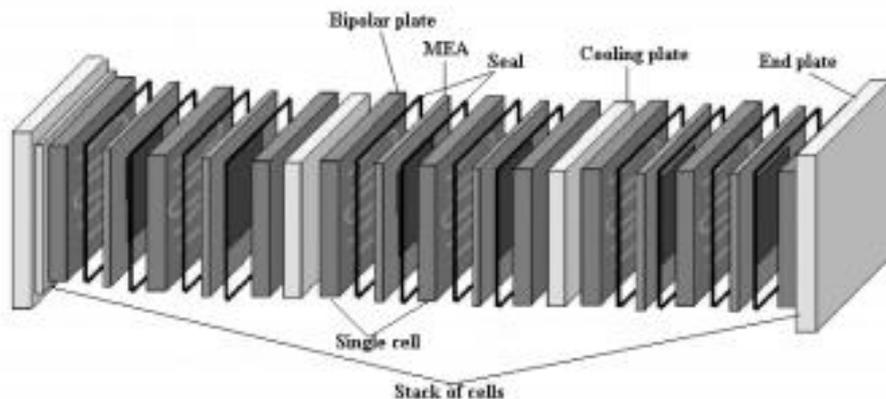


Figura 12. Esquema de un apilamiento de celdas en una pila.

3.2.2 Sistemas auxiliares

A menudo, dependiendo fundamentalmente de la aplicación y del tamaño de la pila, podemos encontrar una serie de sistemas auxiliares [28]. Estos sistemas se colocan para aprovechar al máximo la electricidad que la pila es capaz de producir.

El sistema auxiliar más importante es el de control. Su función es mantener las diferentes variables en sus valores determinados. Consta de distintos subsistemas. Destacaremos el subsistema de control de caudal de los reactivos. Se encarga, mediante una válvula para el hidrógeno y un compresor para el oxígeno, de regular la cantidad de reactivo que entre en la pila de manera que se asegure una respuesta rápida y una operación segura de la misma. Por otro lado, este subsistema cuenta también con equipos cuya misión es controlar variables como la temperatura ambiental, la humedad relativa, etc.

Otro de los equipos auxiliares es el sistema de refrigeración, necesario para disipar el calor generado en la pila. Si se usa aire para refrigerar, se necesita entonces de un ventilador que distribuya el aire por la pila. En cambio, si el refrigerante es líquido, se emplea un sistema de radiador con canalizaciones cerradas y recorrido en by-pass que permita a un termostato abrir o cerrar este circuito.

3.3 Fundamentos químicos

A grandes rasgos, podemos considerar la pila de combustible como un sistema con las siguientes corrientes de entrada y salida:



Figura 13. Esquema de las corrientes de entrada y salida de una pila.

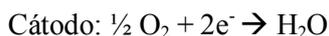
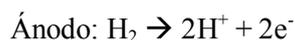
Como se puede ver, existen dos corrientes de entrada: los dos reactivos. El hidrógeno como combustible y oxígeno como comburente [11]. Como ya se ha explicado, de su reacción se obtendrá una corriente de agua. También tendremos, obviamente, puesto que este es el objetivo de la pila de combustible, una corriente de salida de energía eléctrica. Y por último, tendremos una corriente de calor, resultado de las reacciones que tienen lugar en el interior de la pila.

3.3.1 Reacciones básicas

Las reacciones que tienen lugar en los electrodos, tanto positivo como negativo, dependerán del tipo de pila de que se trate, es decir, del tipo de combustible empleado. Sin embargo, llevaremos a cabo un análisis de la reacción básica que tiene lugar entre el hidrógeno y el oxígeno puros.

Estas dos sustancias presentan características que debemos remarcar: el hidrógeno es el combustible mayormente elegido debido a su alta densidad energética y a su elevada capacidad para reaccionar en presencia del catalizador adecuado y el oxígeno es el comburente más común dada su enorme disponibilidad.

Tal y como se ha explicado, en la pila se oxida el combustible de acuerdo a las siguientes reacciones:

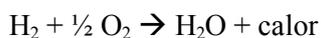


Estas dos reacciones se pueden agrupar en una única reacción global que describe a grandes rasgos los procesos fundamentales que ocurren en una celda elemental:



3.3.2 Calor de reacción

La reacción global arriba descrita no es más que la reacción de combustión del hidrógeno. Esta reacción es exotérmica. Esto implica que se libera cierta cantidad de energía en forma de calor durante el proceso.



Este calor liberado es en realidad la diferencia que existe entre los calores de formación de productos y reactivos de dicha reacción. Estos calores de formación son la variación de entalpía

de la reacción de formación de dicho compuesto a partir de las especies elementales que lo componen. Así para una PEM, objetivo fundamental de este documento, tomando 25°C de temperatura y presión atmosférica, se tiene que:

$$\Delta H = \Delta H_f(H_2O) - \Delta H_f(H_2) - \frac{1}{2} \Delta H_f(O_2)$$

Por convenio, se toman como valor de referencia las entalpías de formación de los elementos puros con valor nulo. Luego, el valor del calor de esta reacción es el calor de formación del agua, valor que podemos encontrar en tablas termodinámicas como la que se muestra a continuación. Hay que señalar que para las condiciones elegidas, el agua se encuentra en estado líquido. [14]

Compuestos Inorgánicos [kJ/mol]	ΔH_f°
H₂O (g)	-241,818
H₂O (l)	-285,83
HF (g)	-268,6
HCl (g)	-92,3
NaCl (s)	-411,0
CaO (s)	-635,09
CaCO₃ (s, calcita)	-1206,92
CO (g)	-110,53
CO₂ (g)	-393,51
NO (g)	90,25
NH₃ (g)	-46,11
SO₂ (g)	-296,83
SO₃ (g)	-395,72

Tabla 7. Entalpías de formación estándar (25°C, 1 atm) de algunos compuestos inorgánicos. [11]

Tenemos entonces la siguiente expresión para la formación del agua:

$$\Delta H = \Delta H_f(H_2O) - \Delta H_f(H_2) - \frac{1}{2} \Delta H_f(O_2) = -285,83 - 0 - 0 = -285,83 \text{ kJ/mol}$$

El signo negativo en el resultado de esta expresión, por convenio, significa que la reacción es exotérmica: se libera energía.

3.3.3 Poder calorífico del hidrógeno

El cambio de entalpía asociado a una reacción de combustión se denomina “calor de combustión”. Para el caso concreto del hidrógeno, recibe el nombre de Poder Calorífico del hidrógeno. Se trata de la cantidad de calor que se generaría en la combustión completa de un mol de hidrógeno.

Dependiendo de las condiciones en las que tenga lugar la reacción, podemos distinguir entre dos tipos de poder calorífico: superior e inferior. El poder calorífico superior es la cantidad de calor desprendido cuando el vapor de agua originado en la combustión del hidrógeno está condensado. Como ya hemos visto, tiene un valor aproximado de -286 kJ/mol. En cambio, el poder calorífico inferior está referido al calor desprendido cuando el agua obtenido en la reacción de combustión se encuentra en estado gaseoso. Su valor es aproximadamente, según podemos ver en la tabla anterior, -241 kJ/mol. La diferencia entre estos dos valores no es más que el calor de formación del agua a 25°C.

$$H_{FG} = 286 - 241 = 45 \text{ kJ/mol}$$

3.3.4 Trabajo eléctrico teórico

La energía intrínseca de cualquier sustancia, y en este caso concreto, del combustible, se puede determinar mediante su energía interna. Esta energía está asociada a los movimientos e interacciones de las partículas que forman un compuesto. Para una Pila de Membrana de Intercambio de Protones solo una parte de la energía interna contenida en el hidrógeno se convertirá en electricidad. Los límites sobre estas conversiones de energía quedan establecidos por la Primera y Segunda ley de la Termodinámica.

3.3.4.1 Primer Principio de la Termodinámica

También conocido como Ley de la Conservación de la Energía, el primer principio de la termodinámica establece que la energía ni se crea ni se destruye, simplemente se transforma.

$$d(\text{Energía})_{\text{Universo}} = d(\text{Energía})_{\text{Sistema}} + d(\text{Energía})_{\text{Entorno}} = 0$$

La transferencia de energía de un sistema de energía a su entorno puede ocurrir de dos formas diferentes: mediante calor o mediante trabajo. Podemos entonces expresar:

$$dU = dQ - dW$$

Esta ecuación viene a explicar que, si en un sistema cerrado se produce algún cambio de su energía interna, éste debe ser igual al calor transferido por el sistema al entorno (dQ) menos el trabajo realizado por éste (dW). Cuando el único trabajo que el sistema realiza es de tipo mecánico se deben de tener en cuenta tanto la presión del sistema como la variación de su volumen:

$$dW_{\text{Mecánico}} = p \cdot dV$$

En una pila de combustible el trabajo realizado es de tipo eléctrico pero para nuestro análisis se considerará simplemente el trabajo mecánico. De esta forma, se puede reescribir la ecuación de la energía interna de la siguiente forma:

$$dU = dQ - p \cdot dV$$

3.3.4.2 Segundo Principio de la Termodinámica

Este principio establece que “la cantidad de entropía en el Universo tiende a incrementarse en el tiempo”. Introduce por tanto un nuevo concepto: la entropía. Se trata de una función de estado que mide el número de microestados compatibles con el macroestado de equilibrio. Se podría definir, con otras palabras, como la magnitud que mide la parte de la energía interna que no puede utilizarse para realizar trabajo, o lo que es lo mismo, el grado de desorden de las moléculas del sistema.

Al igual que para la entalpía, la entropía se calcula como la diferencia entre las entropías de formación de productos y reactivos. Para el caso en estudio se tiene la siguiente expresión

$$\Delta S = \Delta s_f(H_2O) - \Delta s_f(H_2) - \frac{1}{2} \Delta s_f(O_2)$$

Si tomamos los datos de la tabla que se muestran a continuación podemos calcular la variación de entropía de nuestro sistema.

$$\Delta S = 0,06996 - 0,13066 - \frac{1}{2} \cdot 0,20517 = -0,16329 \frac{kJ}{mol} \cdot K$$

	Entropía S_f [kJ/mol·K]
Hidrógeno H_2	0,13066
Oxígeno O_2	0,20517
Agua H_2O (l)	0,06996
Agua H_2O (g)	0,18884

Tabla 8. Entropías en condiciones estándar. [11]

3.3.4.3 Energía libre de Gibbs

Por lo que se ha visto en los epígrafes anteriores, según el Primer Principio de la Termodinámica, toda la energía liberada en el proceso de combustión del hidrógeno debería transformarse en electricidad [11]. Sin embargo, debido a la entropía, parte del poder calorífico del hidrógeno no se convierte en trabajo útil.

La porción de energía contenida en el combustible que se puede transformar en electricidad viene determinada por la ecuación de la energía libre de Gibbs.

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

Esta energía representa la energía liberada por un sistema para realizar trabajo útil a presión constante. Si su valor es negativo significará que la reacción es espontánea, en cambio si es positivo la reacción no es espontánea en el sentido establecido. Cuando su valor es nulo implica que el sistema se encuentra en equilibrio.

Para el caso concreto de la pila de combustible se tiene que, la energía con la que se puede contar para obtener electricidad es:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S = -285,83 - 298,15 \cdot (-0,16329) = -237,145 \text{ kJ/mol}$$

Por el signo obtenido, se trata en este caso, de una reacción energéticamente favorable. Si analizamos, se tiene que de los, aproximadamente 286 kJ/mol de energía disponible (a 25°C), solo se transforman en calor unos 237 kJ/mol.

3.3.5 Potencial teórico

En general, el trabajo eléctrico se define como el producto de la carga que hay que transportar por el potencial:

$$W_{el} = q \cdot E$$

Para el caso de las pilas PEM, por cada mol de hidrógeno consumido, la cantidad de carga eléctrica que se debe transformar viene determinada por la siguiente relación:

$$q = n \cdot N_{AV} \cdot e$$

siendo:

n = número de electrones por cada molécula de hidrógeno

N_{AV} = número de Avogadro ($6,022 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol)

e = carga de un electrón ($1,3052 \cdot 10^{-19}$ C/electrón)

Cuando se tratan dispositivos que traten transformaciones electroquímicas, como es el caso de las pilas de combustible, se suele simplificar esta expresión usando la constante de Faraday.

$$q = n \cdot N_{AV} \cdot e = n \cdot F$$

La expresión “ nF ” representa la cantidad de electrones transferidos en forma de corriente eléctrica que circula entre las especies químicas reaccionantes. Esta expresión hace por tanto de puente entre todo aquello directamente relacionado con la termodinámica y la electricidad. El término F de esta expresión es lo que se conoce como la constante de Faraday y toma el valor de $F = 96400$ C/mol. Cabe señalar que el hecho de que esta constante sea un número tan grande, supone que se pueda obtener una cantidad relativamente elevada de electricidad a partir de una

pequeña reacción química. Por otro lado, en el caso de la pila PEM, el término n adopta el valor de 2, puesto que por cada mol de hidrógeno se generan dos electrones. Se puede entonces reescribir el trabajo eléctrico de la siguiente forma:

$$W_{el} = nF \cdot E$$

Además, como ya se ha explicado con anterioridad, la máxima cantidad de energía que se puede generar en la pila de combustible es la correspondiente a la energía libre de Gibbs. Por tanto se tiene que:

$$W_{el} = -\Delta G$$

Por lo que, teniendo todo esto en cuenta, si reescribimos la ecuación del trabajo eléctrico y despejamos, se tiene que el potencial teórico de una pila de combustible viene determinado por la siguiente ecuación:

$$E = -\frac{\Delta G}{nF}$$

3.3.5.1 Efecto de la temperatura, presión y concentración

Los cambios, como ya se ha visto, en la energía libre de Gibbs de un sistema dependen de la temperatura. Del mismo modo, estos cambios se ven también afectados por variaciones de presión y concentración en los reactivos [11]. Si sustituimos en la expresión a la que hemos llegado del potencial teórico de una pila de combustible la expresión de la variación de la energía libre de Gibbs se tiene que:

$$E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T \cdot \Delta S}{nF}\right)$$

De esta ecuación se puede deducir que un aumento de la temperatura provoca una disminución de la tensión en la pila. Además, tanto la entalpía como la entropía dependen a su vez de la temperatura. En esta dependencia interviene asimismo el calor específico que es a su vez función de la temperatura.

La ecuación de Nernst nos ayuda a entender la dependencia del potencial teórico de una reacción química con la temperatura. Mediante esta ecuación podemos calcular dicho potencial cuando las condiciones no coincidan con las estándar. La ecuación de Nernst es la siguiente:

$$E = E^o - \frac{R \cdot T}{nF} \cdot \ln \left(\frac{a_{H_2O}}{a_{H_2} \cdot a_{O_2}^{1/2}} \right)$$

siendo:

E^o = potencial en condiciones estándar

R = constante universal de los gases

T = temperatura de operación de la pila

a = actividad de cada una de las especies que intervienen en la reacción.

En termodinámica, la actividad es una medida de una “concentración efectiva” de una especie. Para el caso de los gases ideales, este coeficiente se puede expresar como el cociente entre la presión parcial de dicho elemento y la presión atmosférica de referencia ($p = 0,1\text{MPa}$). Se puede entonces plantear la ecuación de Nernst como:

$$E = E^o - \frac{R \cdot T}{nF} \cdot \ln \left(\frac{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right)$$

Es importante reseñar que todas estas ecuaciones son válidas siempre y cuando productos y reactivos se encuentren en estado gaseoso.

Si analizamos la expresión, por la ecuación de Nernst podemos deducir que un aumento de la presión parcial de los elementos produciría un aumento del potencial de la pila. Por otro lado, si se utiliza aire atmosférico en lugar de oxígeno puro en el cátodo, su presión parcial será proporcional a su concentración y el potencial de la pila será menor.

4 Tipos de pilas de combustible

Las pilas de combustible forman parte de una familia de tecnologías que usan distintos materiales y formas para los elementos que las componen y que además operan en diferentes rangos de temperatura. Así, hablamos de pilas de combustible de alta temperatura, que operan a temperaturas mayores de 200°C y pilas de baja temperatura, cuya operación alcanza como máximo los 200°C. Esta clasificación es quizás la más adecuada porque esta característica es determinante para el tipo de aplicación de cada una de ellas.

Pilas de alta temperatura	Pilas de baja temperatura
SOFC	AFC
MCFC	PAFC
	PEMFC

Tabla 9. Clasificación pilas de combustible según su temperatura de operación.

En general, las pilas de combustible de alta temperatura están diseñadas para la generación de energía eléctrica para una potencia superior a 1 MW, mientras que las de baja temperatura se diseñan para salidas menores de 1 MW, aunque existen excepciones. La razón principal de esta distinción es que las pilas que operan a temperaturas más elevadas tienen tendencia a trabajar con efectividades más altas. Esto se debe en parte a que las reacciones que en ella tienen lugar no requieren de materiales electrocatalizadores, ya que son capaces de producirse sin ayuda alguna. Por otra parte, la generación de vapor de alta temperatura con suficiente energía en las pilas de alta temperatura favorece la cogeneración incrementando así la eficiencia.

Sin embargo, aunque podemos diferenciar estos dos grupos, la clasificación más común es la que se realiza atendiendo al tipo de electrolito usado [16]. Asimismo, esta característica es la que le da nombre a cada uno de los tipos de pila de combustible que hay.

En los siguientes apartados se expondrán de forma general las características más destacables de los distintos tipos de pilas de combustible. El objetivo final será comparar estos tipos con las de tipo PEM; de las cuales se hablará en profundidad a continuación de esta clasificación.

4.1 Solid Oxid Fuel Cell (SOFC)

Conocida en español como la pila de combustible de óxidos sólidos. Forma parte del grupo de pilas que funcionan a altas temperaturas: alrededor de los 1000°C. Esto hace que en la pila no sea necesario el empleo de un electrocatalizador para que las reacciones tengan lugar. A su vez, el hecho de operar a temperaturas suficientemente elevadas permite el reformado interno del combustible.

Respecto a la conversión del combustible en electricidad son capaces de operar con rendimientos entre el 60%-85%, cuando se considera la posibilidad de usar en cogeneración. Por lo general, son capaces de suministrar una potencia de hasta entre 1 kW y hasta 2 MW.

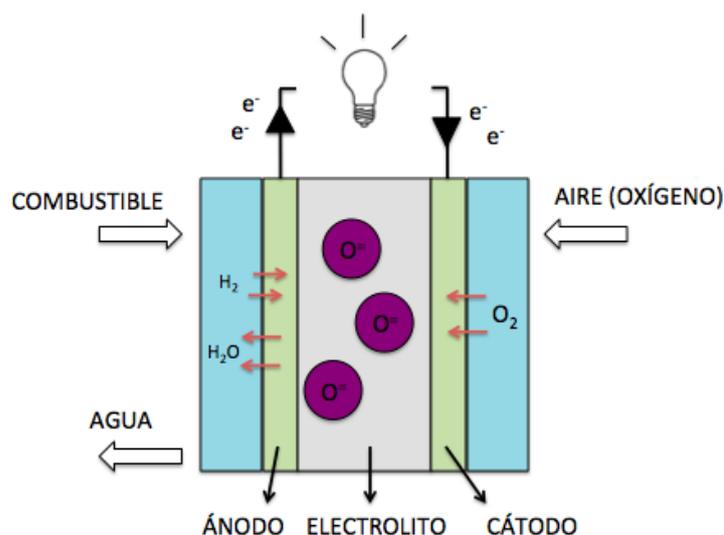
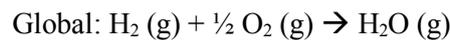
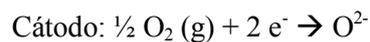
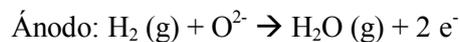


Figura 14. Esquema de una pila de combustible tipo SOFC.

El electrolito de esta pila es un óxido sólido no poroso, normalmente un material cerámico (zirconia estabilizada con alguna tierra como el ytrio), aunque también se suele dopar con calcio, escandio o lantano para mejorar sus propiedades. Debe ser un material no poroso para evitar la difusión de los gases de un lado del electrolito al otro, sin embargo debe permitir el paso de los iones de oxígeno (O^{2-}) desde el cátodo hasta el ánodo.

En cambio, los electrodos suelen ser de materiales porosos para permitir la difusión de gases hacia el electrolito y consecuentemente conseguir una buena superficie de reacción. Normalmente, el ánodo suele ser de óxido de níquel o cobalto aleados con circonio, mientras que el cátodo suele ser de estroncio dopado con óxidos de manganeso.

Las reacciones que tienen lugar son las siguientes:



Para esta tecnología existen dos posibles disposiciones dependiendo de las celdas:

- Tubular: se trata de tubos en paralelo conectados entre sí mediante placas de níquel. Este tipo opera en concreto dentro del rango de temperaturas entre 900°C y 1000°C .
- Plana: se construye por deposición de capas de material ultrafinas de manera que la resistencia eléctrica sea mínima y consecuentemente la eficiencia sea mayor. Para este tipo, el rango de temperaturas de operación está alrededor de los 800°C . Esto permite el empleo de una mayor diversidad de materiales.

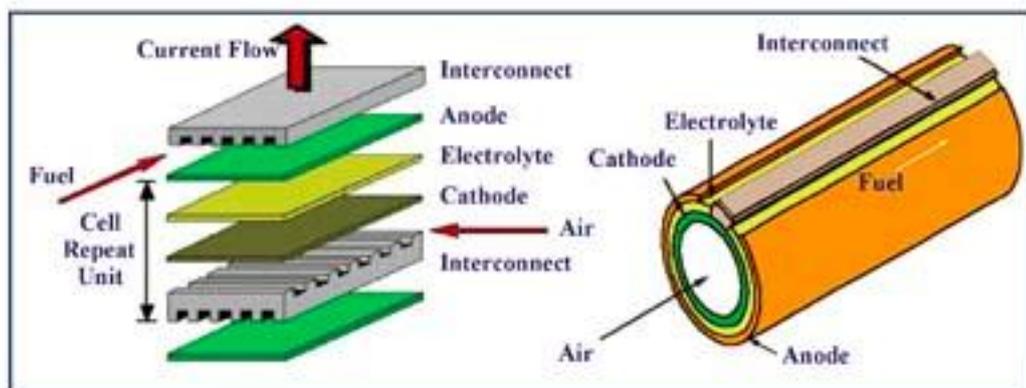


Figura 15. Disposición tubular y plana de una pila SOFC. Fuente: Google Imágenes.

Las ventajas más destacables de esta tecnología es que, debido fundamentalmente a las elevadas temperaturas de operación, la cinética de las reacciones es muy alta además de que son reacciones muy exotérmicas, lo que permiten su aprovechamiento para cogeneración. Sin embargo, ese hecho también provoca ciertos inconvenientes. Implican el desarrollo de materiales que soporten dichas temperaturas: deben ser materiales químicamente estable.

Las aplicaciones más comunes de estas pilas es para sistemas auxiliares en automóviles, sobre todo para la generación de electricidad y calor (cogeneración).

4.2 Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

Traduciendo su nombre del inglés al español, estas pilas se conocen como pilas de combustible de carbonatos fundidos. Se engloban también dentro del grupo de pilas de alta temperatura, en este caso, funcionan aproximadamente a unos 650°C . Esta alta temperatura es necesaria fundamentalmente para lograr suficiente conductividad de su electrolito. Además, esta característica le otorga flexibilidad para elegir combustible: hidrógeno, monóxido de carbono, propano, gas natural, entre otros.

Trabajan con eficiencias en torno al 60%-85%, incluyendo cogeneración, y son capaces de producir desde 10 kW hasta unos 2 MW.

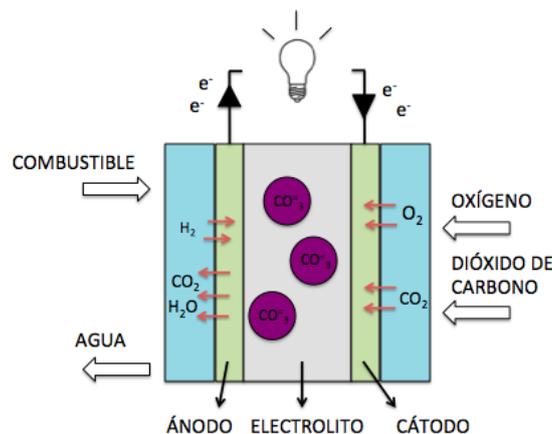


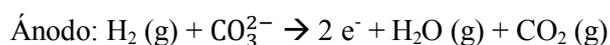
Figura 16. Esquema de una pila de combustible tipo MCFC.

Los iones carbonatos viajan, según podemos ver en la imagen anterior, desde el cátodo hasta el ánodo atravesando el electrolito. Éste está compuesto por una matriz impregnada de una

solución líquida de: carbonatos de litio y potasio cuando se trabaja a presión atmosférica, o de litio y sodio cuando se trabaja a más presión. Esto le aporta al electrolito ciertas propiedades: elevada conductividad a altas temperaturas, punto de fusión bajo y ausencia de toxicidad.

Por otro lado, el material empleado en el electrolito de esta pila es una aleación de níquel, comúnmente reducido con cromo en el lado del ánodo y oxidado con litio en del cátodo.

Tienen lugar las reacciones que se muestran a continuación:



Las principales ventajas de este tipo de pila de combustible es que, debido al rango de temperaturas en el que funcionan, no necesitan de electrocatalizador, lo que supone una reducción de su coste, y además, son capaces de reformar hidrocarburos. Sin embargo, como siempre, el hecho de funcionar a elevadas temperaturas implica el uso de materiales adecuados. El principal problema en este caso es la posible corrosión, ya que las altas temperaturas aumentan la actividad de ciertos compuestos que acaban oxidando los materiales de la pila. Por otro lado, otra desventaja es que el uso de electrolito líquido complica su manejo. Y por último, necesitan un excesivo periodo de calentamiento para su puesta en marcha.

Se emplean en aplicaciones típicamente estacionarias: generación centralizada de energía eléctrica y cogeneración para aplicaciones industriales.

4.3 Alkaline Fuel Cell (AFC)

Se trata de las pilas de combustible alcalinas. Puesto que trabajan entre los 65°C-200°C, se incluyen en el grupo de pilas de baja temperatura. Pueden producir potencia desde los 300 W hasta los 5 kW, con eficiencias en torno al 70%.

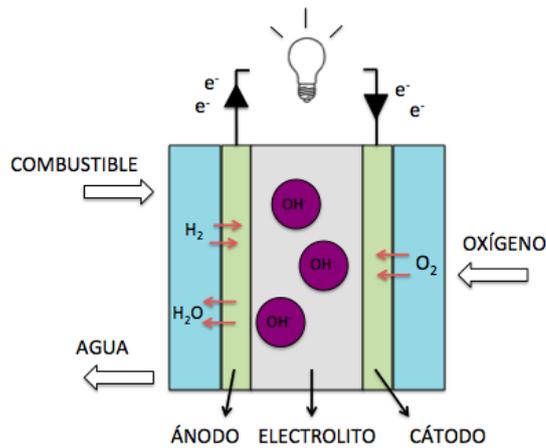
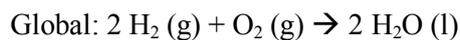
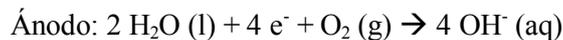


Figura 17. Esquema de una pila de combustible tipo AFC.

El electrolito de estas pilas se construye con frecuencia de una mezcla fundida de hidróxido de potasio de mayor concentración cuanto mayor sea la temperatura de operación. Esto es debido a que la temperatura, a consecuencia del calor desprendido, puede hacer que el electrolito vaporice o hierva, por lo que una concentración mayor en sales permite operar a temperaturas más elevadas. Asimismo, el hecho de que sea una mezcla fundida hace que la reacción en el cátodo sea más rápida. Los electrodos suelen ser de níquel o carbón activo.

Las reacciones que se producen son:



Los materiales para estas pilas son más baratos, se necesita menos tiempo de arranque y además tienen peso y volumen reducidos. Sin embargo, un inconveniente muy importante a tener en cuenta es que estas pilas son intolerables al monóxido y dióxido de carbono. Esto hace que sea imprescindible el suministro de hidrógeno y oxígeno puros. Adicionalmente, tienen una vida más corta y un manejo complicado por el hecho de que su electrolito sea líquido.

Se usan principalmente en misiones espaciales.

4.4 Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

Se trata de pilas de combustible de ácido fosfórico. Pertenecen al grupo de aquellas que funcionan a baja temperatura. Su rango de operación es entre los 150°C-205°C.

Trabajan con un 40% de eficiencia, de las más bajas. Por otra parte, son capaces de generar entre 50 kW y 400 kW. Aunque existen plantas que operan con potencias entre 1 MW y 5 MW. La mayor planta existente se encuentra en Tokio y es capaz de generar hasta 11 MW.

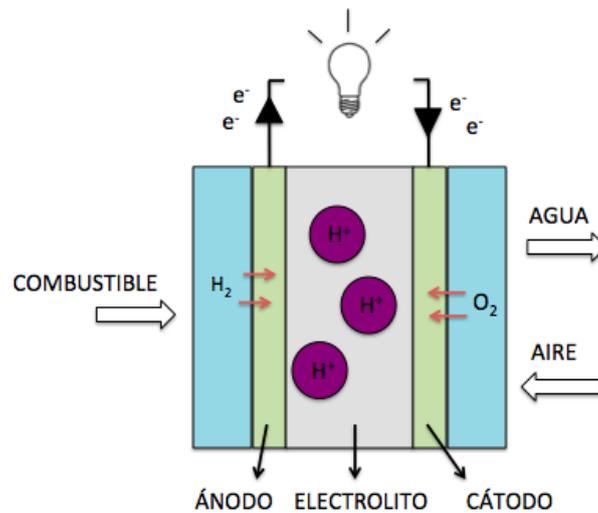
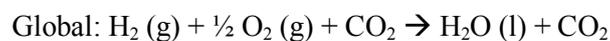
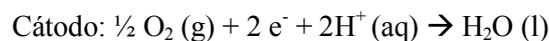
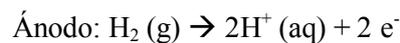


Figura 18. Esquema de una pila de combustible tipo PAFC.

En este caso, el electrolito es de ácido fosfórico puro y su función es la de conducir los iones hidrógeno desde el ánodo hasta el cátodo. Por otro lado, los electrodos están formados por delgadas láminas de carbón activo, que sirve como base para el catalizador y como colector de corriente, recubiertas de platino. La concentración de este recubrimiento de platino es mayor en el cátodo que en el ánodo.

Las reacciones de este tipo de pilas son las siguientes:



La principal ventaja que presenta esta tecnología es que se trata de pilas tolerantes al CO₂: admiten hasta un 30% de concentración en el electrolito. Sin embargo, tienen el inconveniente de que su peso y volumen es excesivo. Asimismo, requieren de un tiempo de arranque elevado antes de su puesta en marcha.

Se utilizan principalmente en aplicaciones estacionarias, pero pueden ser integradas en grandes vehículos como por ejemplo autobuses.

4.5 Comparativa

Una vez que se han explicado las características principales de cada uno de los diferentes tipos de pilas de combustible que existen, sin explicar aún en detalle las características de la pila en estudio de este trabajo (PEM), se expone en el siguiente cuadro una comparativa entre ellas, atendiendo a sus propiedades más importantes, sus ventajas y sus aplicaciones más comunes.

TIPO	ELECTROLITO	T _{OP} [°C]	POTENCIA	EFICIENCIA	APLICACIONES
<i>PEM</i>	Polímero compuesto por ácido perfluorosulfónico	< 120	< 1kW – 100 kW	60%	Portátiles Transporte Vehículos
<i>AFC</i>	Mezcla fundida de hidróxido de potasio	< 100	1-100 kW	70%	Misiones espaciales y/o militares Transporte
<i>MCFC</i>	Aleación de níquel	600 - 700	10 kW – 2 MW	60%	Generación centralizada de energía eléctrica para aplicaciones industriales
<i>SOFC</i>	Zirconia estabilizada con ytrio	500 - 1000	1 kW - 2 MW	60%	Sistema auxiliar en automóviles Generación de electricidad y calor
<i>PAFC</i>	Ácido fosfórico	150 - 205	50 kW – 400 kW	40%	Aplicaciones estacionarias

Tabla 10. Tabla comparativa de los distintos tipos de pilas de combustible.

5 Pilas de combustible de membrana polimérica

El objetivo de la pila PEM es la producción de una corriente de electricidad a través de las reacciones que sufren el hidrógeno y el oxígeno. A grandes rasgos, lo que ocurre en su interior es:

- 1) Las moléculas de hidrógeno que se alimentan por el lado del ánodo se transportan desde los canales que existen en la placa bipolar del ánodo hasta el ánodo como tal, pasando por la capa difusora de gases.
- 2) En el ánodo tiene lugar la oxidación del hidrógeno: la molécula de hidrógeno se separa en dos cationes y dos electrones.
- 3) Los protones de hidrógeno atraviesan la membrana para llegar al cátodo.
- 4) Mientras, en el lado del cátodo, el oxígeno atravesando la capa difusora de gases del correspondiente lado de la pila, viaja desde la placa bipolar hasta el mismo cátodo.
- 5) Se produce la reacción de reducción del oxígeno en el cátodo de la pila: la molécula de oxígeno se combina con cuatro protones y cuatro electrones generando dos moléculas de agua.
- 6) Queda entonces el cerrado el circuito eléctrico y se produce consecuentemente una intensidad de corriente.

Aunque aparentemente una celda de combustible es un equipo sencillo, en realidad, en ella tienen lugar muchos procesos a la vez y esto complica un poco su funcionamiento [12]. Este hecho hace que cuando se modifica un solo parámetro de ella, se verán afectados por consiguiente al menos otros dos parámetros más de la pila. Además, al menos uno de estos cambios tendrá un efecto contrario al que se espera. Esto es lo que comúnmente se conoce como “Primera Ley de las Pilas de Combustible”.

Si analizamos con un poco mas de detalle, los procesos que tienen lugar [11], de acuerdo con lo ya descrito, dentro de la celda son los siguientes:

1. Gases que circulan a través de los canales.
2. Difusión de los gases a través del medio poroso de las capas difusoras.
3. Reacciones electroquímicas: oxidación y reducción.
4. Transporte de protones a través de la membrana.
5. Conducción de electrones.
6. Transporte de agua a través de la membrana polimérica.
7. Transporte de agua a través de la capa catalítica.
8. Flujo bifásico de gases sin usar que transportan pequeñas gotas de agua.
9. Transferencia de calor, resultado de las reacciones en la pila.

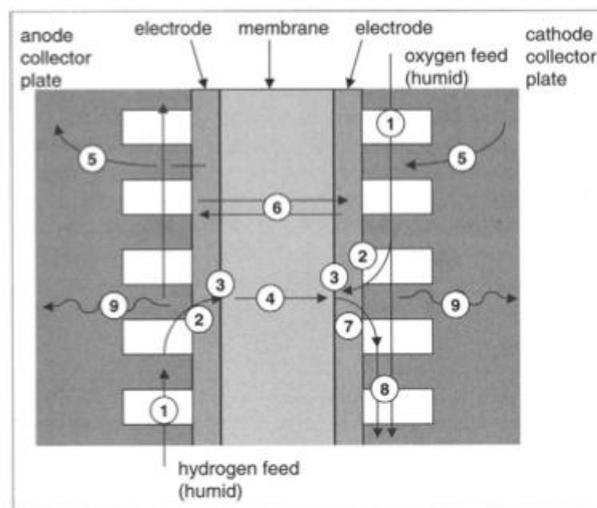


Figura 19. Procesos que tienen lugar en una pila PEM. [8]

5.1 Componentes

Debido a que cada uno de los procesos arriba descrito precisa de una serie de características, se trata de buscar entonces un equilibrio entre las distintas necesidades para lograr así su buen funcionamiento y tratando siempre de buscar las mínimas pérdidas [11]. Consecuentemente, se debe siempre optimizar el diseño y las propiedades de cada uno de los componentes de la celda.

Los componentes que forman una pila de combustible tipo PEM son:

- Electrodos y membrana (MEA)
- Capas difusoras de gases (GDL)
- Placas bipolares
- Placas terminales

5.1.1 Electrodo y membrana (MEA)

Se trata del conjunto electrodo y membrana, conocido por el término MEA (Membrane Electrode Assembly). Es el corazón de la pila de combustible PEM.

Existen dos electrodos, uno a cada lado de la membrana. En el electrodo positivo (cátodo) se produce la reacción de oxidación del combustible, y en el electrodo negativo (ánodo), la oxidación del comburente.

Son, básicamente, delgadas capas de catalíticas situadas entre la membrana y las capas difusoras. Están formadas por un material poroso sobre el cual se distribuyen homogéneamente las partículas del catalizador. En ambos electrodos se usa como catalizador pequeñas partículas de platino.

El catalizador es importante en estas pilas porque las reacciones que en ellas tienen lugar ocurren muy lentamente. Estas sustancias logran aumentar la velocidad de las semirreacciones mejorando la cinética de estos procesos. En este punto es importante destacar que la cinética de la reacción de reducción del cátodo es aproximadamente cien veces más lenta que la de oxidación en el ánodo.

Por otro lado, la membrana es de un material polimérico capaz de conducir protones. Esta es su característica principal: debe tener una alta capacidad para la conducción de protones. En cambio, debe ser una barrera para el paso de los gases reactantes y de las cargas negativas. Por último, debe ser tanto química como mecánicamente estable.

El material más empleado en estas pilas es el Nafión (registrado por Dupont). Se trata de un polímero perfluorado con grupos sulfonato polares [18]. Es importante señalar que existen otros materiales con propiedades similares que han sido desarrolladas por otras empresas.

Se trata entonces de un polímero orgánico compuesto por ácido poli-perfluorosulfónico que consta de tres partes:

1. Una cadena principal de fluorocarbonos (Teflon) repetida varias veces.
2. Cadenas laterales conectadas a la cadena principal.
3. Grupos iónicos formados por grupos sulfónicos.

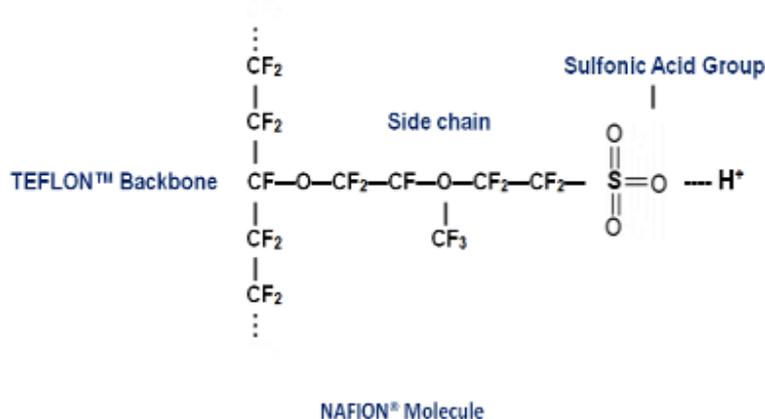


Figura 20. Estructura de la molécula de Nafión. Fuente: nafionstore.com

Hay que destacar que para el correcto funcionamiento de la membrana, ésta debe permanecer húmeda. Esto es necesario porque el transporte de cationes de hidrógeno se produce conjuntamente a las moléculas de agua. En cualquier caso siempre habrá que buscar un equilibrio en la humedad de la membrana. Puesto que un exceso de agua produciría su encharcamiento y provocaría el bloqueo de los poros del electrodo del cátodo haciendo que el oxígeno no alcanzara el catalizador y por consecuencia no se produjera la reacción de reducción. Sin embargo, si la membrana se deshidrata, su conductividad protónica disminuirá y en consecuencia disminuirán las prestaciones de la pila. Es por este motivo que la gestión del agua en las pilas PEM es crucial y supone uno de los fenómenos más estudiados en la actualidad por los investigadores.

5.1.1.1 Gestión del agua

El agua en las pilas PEM aparece como resultado de la reacción que tiene lugar en el cátodo. En condiciones ideales, la membrana podría mantenerse húmeda ya que al suministrar el aire por el cátodo, éste arrastraría consigo el agua que sobrara hasta fuera de la pila. La membrana, en condiciones ideales, absorbería la cantidad de agua necesaria extendiéndose por las restantes celdas. Sin embargo, esta situación ideal queda lejos de la realidad.

Se pueden destacar dos problemas principales: el arrastre electro osmótico y el calentamiento de la pila. Como es obvio, si la pila alcanza elevadas temperaturas, el agua contenida en membrana se evaporaría. Cuando se alcanzan temperaturas por encima de los 60°C, el aire es capaz de secar los electrodos más rápido de lo que se genera agua. Por otro lado, el arrastre de moléculas de agua con los protones en la membrana podría también provocar que ésta se deshidratara.

Luego, para que exista una distribución uniforme de la humedad por toda la superficie activa de la pila, se necesitará de un aporte externo de humedad.

Si insertamos la cantidad de aire necesaria para que a la salida el aire tenga una humedad en torno al 100%, podríamos conseguir un método de funcionamiento de la pila “en seco”. Este funcionamiento es solo apropiado para dispositivos que demanden pequeñas potencias. El motivo principal es que cuando no hay aporte externo de humedad, el rendimiento de la pila llega a disminuir en hasta un 40%, y además llega a detenerse en los picos de demanda de corriente. Este método consiste en hacer circular el combustible en sentido opuesto al comburente [16].



Figura 21. Conjunto de pila de combustible PEM. [13]

Por tanto, para aplicaciones de mayores potencias se necesitará este aporte externo. Existen diversos métodos para cumplir con esta función que aún están en proceso de estudio y mejora. Uno de los más eficientes es el conocido con el nombre de “Método de flujo interdigital”, acuñado por Wood et al. (1998). Se trata de la inyección directa de agua en la pila. Esta técnica se lleva a cabo conjuntamente con un diseño específico de las placas bipolares y canales de manera que fuerzan a los gases reactantes a impulsar el agua a través de cada celda y a lo largo de todo el electrodo. Otro de los métodos más sencillos es la inyección de agua mediante spray. Esto contribuye además con la refrigeración del gas. Este método encarece bastante el sistema puesto que implica el empleo de bombas para presurizar el agua y de válvulas para el control del agua. Sin embargo es uno de los métodos que se ha usado con más frecuencia hasta la actualidad [28].

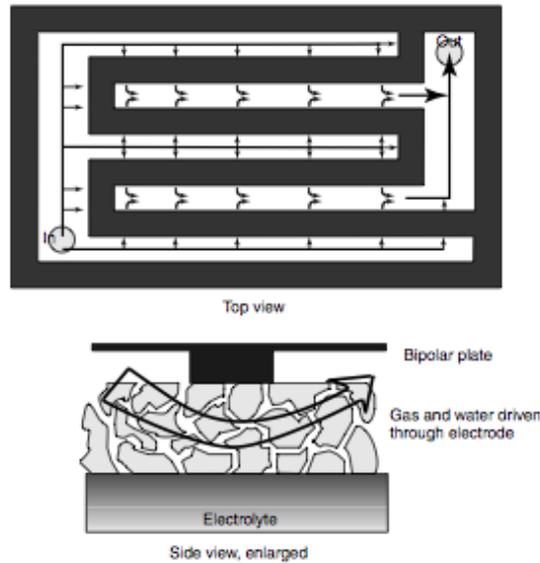


Figura 22. Diseño de las placas bipolares para el “método de flujo interdigital” [25]

5.1.2 Capa difusora (GDL)

Conocida por sus siglas en inglés GDL (“Gas Diffusion Layer”), se trata de una capa porosa normalmente de carbón. Se sitúa entre la placa bipolar y los electrodos, por lo que hay dos capas de este tipo en la pila, una a cada lado. Su función principal es asegurar la difusión homogénea de los gases reactantes sobre la capa del catalizador. Esta difusión homogénea es muy importante para que se pueda aprovechar de la mejor forma posible todas las partículas de catalizador que haya en la pila, puesto que estas partículas tienen un coste bastante elevado.

La conductividad eléctrica de estas capas también tienen que ser elevada. De esta forma se garantiza un transporte efectivo de los electrones desde y hacia la capa activa del catalizador. Cuanto más efectivo sea este transporte, menores serán las pérdidas óhmicas de la pila.

Otra de sus funciones es participar en el control de la gestión del agua. Por este motivo, en el caso de la GDL del cátodo, el material se suele tratar con un material hidrófobo para facilitar así la evacuación del agua líquida generada. Esto presenta la desventaja de que dificulta en cierto modo el transporte de oxígeno hasta el catalizador. Como ya se ha dicho, al igual que en el resto de procesos de la pila, se buscará una solución de compromiso entre los dos efectos.

5.1.3 Placas bipolares

Las placas bipolares en una celda cumple con varias funciones. Cuando se trata de un apilamiento de celdas, una de las funciones que debe cumplir es la de conectar las distintas celdas. Se colocan por tanto, dos placas bipolares por cada celda: una a cada lado. La función de estas placas es por tanto, unir el ánodo de una celda con el cátodo de la celda adyacente.

Además de esta función, debe cumplir con otras muchas. Y de acuerdo a cada una de estas funciones, las placas deben presentar una serie de características para su correcto funcionamiento.

Puesto que han de conectar eléctricamente las celdas en serie, las placas deben presentar una alta conductividad eléctrica. Por otro lado, deben impedir el paso de gases desde una celda a la siguiente, luego deben ser impermeables al paso de éstos. Aunque deben ser ligeras, puesto que suponen alrededor del 80% del volumen y peso total, deben tener el apriete adecuado de forma que aporten un soporte adecuado al conjunto de celdas. Por último, pero no por ello menos importante, deben de tener buena conductividad térmica, para poder así transferir el calor que se genera dentro de la pila.

Como en todos los demás elementos de la pila, se debe buscar siempre un equilibrio entre las propiedades requeridas y el coste de los materiales, para que así no se encarezca el sistema. Además de considerar este aspecto, se debe buscar siempre procesos de fabricación adecuados y económicos.

El material empleado al principio de esta tecnología para las placas bipolares era el grafito. Esto se debía fundamentalmente a su estabilidad química dentro de las condiciones de funcionamiento de la pila. En la actualidad se emplean dos familias de materiales: una de materiales basados en grafito/composite y otra de materiales metálicos. En caso de placas de materiales metálicos, se deben tratar con una fina capa de material no corrosivo pero que sea capaz de conducir la electricidad.[34]

5.1.4 Placas terminales

Son el último elemento del stack. Se colocan a los dos lados de la pila para cerrar todo el sistema. Su principal función es la de ofrecer hermeticidad a la pila en conjunto. Si esta función no se consigue con exactitud, podría ocasionar la fuga de gases reactantes al exterior, produciendo en consecuencia, una disminución de la eficiencia global de la pila. Debe incluir también las conexiones para la entrada y salida de reactivos y productos. Por todo ello, su principal característica es que deben ser ligeras y por supuesto, de bajo coste, y además deben tener alta conductividad eléctrica para el correcto transporte de electrones desde el ánodo hasta el cátodo.

5.2 Curva de polarización

Para estudiar el comportamiento de las pilas de combustible se usan las curvas de polarización. En ellas se representan la evolución de la tensión generada por la pila (V), en el eje de

ordenadas, frente a la densidad de corriente (A/m^2), en el eje de abscisas. Se suele representar en ellas además, la tensión ideal que podría generar la pila si no existieran pérdidas, es decir, la máxima tensión teórica.

Este valor teórico máximo se determina, como ya se ha explicado anteriormente en este documento, mediante la siguiente expresión:

$$E = -\frac{\Delta G}{nF}$$

Si en ella se sustituyeran los valores de la variación de la energía libre de Gibbs, el número de electrones y la constante de Faraday, se obtendría que para una pila operando a unos $25^\circ C$, el máximo valor teórico de la tensión sería unos $1,2V$.

Si analizamos la gráfica, observamos cuatro fenómenos:

1. La pila, incluso funcionando a circuito abierto, tiene un voltaje menor que el teórico.
2. Se produce una caída rápida del voltaje a bajas densidades de corriente.
3. Conforme la densidad de corriente aumenta, la disminución del voltaje se produce de forma más lineal y más lentamente
4. Existe un valor de la densidad de corriente a partir de la cual, el voltaje cae drásticamente.

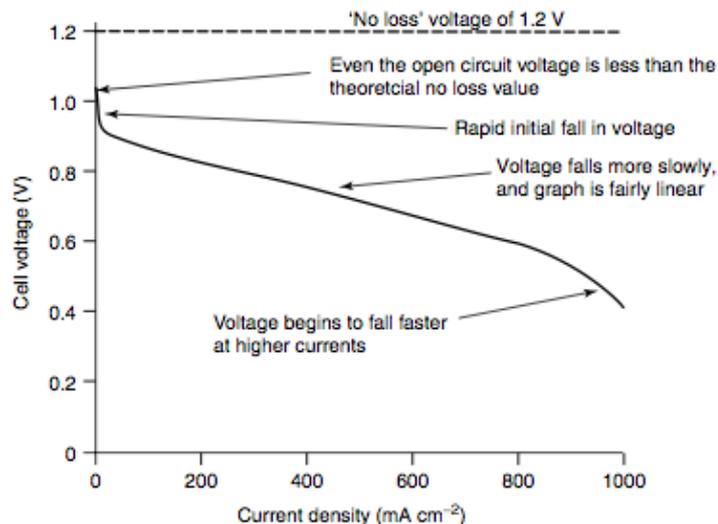


Figura 23. Curva de polarización típica de una pila a baja temperatura. [25]

Cuando se analiza el funcionamiento de una pila operando a temperaturas más elevadas, la forma de la gráfica cambia ligeramente [28]. Sin embargo, el comportamiento sigue siendo prácticamente el mismo.

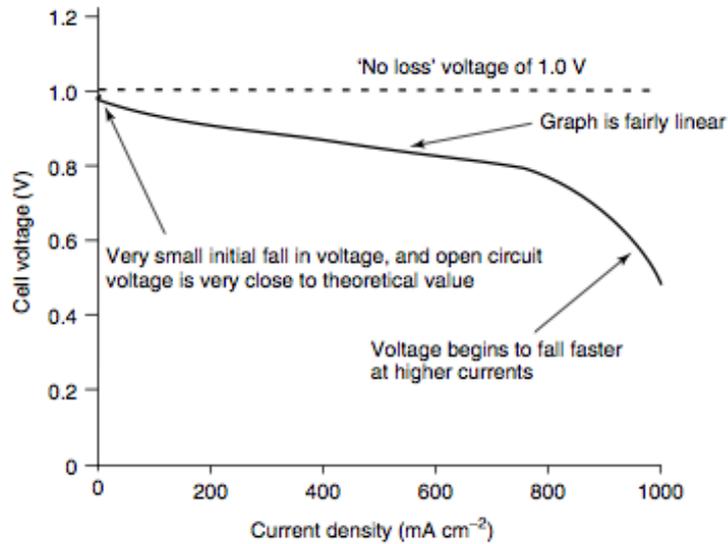


Figura 24. Curva de polarización típica de una pila a alta temperatura (800°C). [25]

En este caso, se observa que la tensión a circuito abierto es prácticamente igual o un poco por debajo del valor teórico. La caída inicial no es tan brusca como en el anterior caso, lo que hace que esta gráfica sea más lineal. Sin embargo, se observa que también existe un valor a partir del cual la tensión cae rápidamente. Este valor de la tensión en cambio, es ligeramente superior cuando se trabaja a altas temperaturas.

En cualquier caso, puesto que los comportamientos son similares, en las curvas de polarización de las pilas de combustible, y en particular las pilas PEM, se distinguen tres zonas [27]:

- Zona 1: pérdidas por activación.
- Zona 2: pérdidas óhmicas.
- Zona 3: pérdidas por concentración.

5.2.1 Pérdidas por activación

Tal y como su nombre indica, estas pérdidas se deben a la cinética de la reacción electroquímica. Toda reacción debe superar cierta energía de activación para que se produzca. Esto se traduce en la necesidad de que exista una diferencia de tensión desde el equilibrio. La energía de activación de una reacción está íntimamente ligada con su cinética, concretamente con la lentitud a la que ésta ocurra.

Estas pérdidas aparecen tanto en el ánodo como en el cátodo de la pila, puesto que en ambos se debe producir una reacción determinada. Pero, como ya se ha comentado con anterioridad, la cinética de la reacción de reducción del oxígeno es mucho más lenta que la de la oxidación del

hidrógeno. Tal es la diferencia, que se puede llegar a despreciar las pérdidas por activación en el ánodo.

Como se puede ver en la curva de polarización, estas pérdidas son predominantes en la zona de bajas densidades de corriente. Este fenómeno está afectado por distintos factores. Al tratarse de una barrera energética para que la reacción tenga lugar, el catalizador es en este caso muy importante. Se deberá elegir el catalizador más adecuado para cada reacción de manera que se mejore al máximo la cinética de la reacción en concreto. Además, la efectividad del catalizador dependerá de las condiciones de operación y de la presencia de impurezas. En este caso, la variable más importante es la temperatura: cuanto mayor sea, menor será la energía de activación necesaria. Por otro lado, se necesita que el catalizador no presente impurezas en la medida que sea posible, puesto que su presencia, hace que la energía de activación aumente. Por último, se tendrá que tener también en cuenta el estado en el que se encuentre el catalizador: la edad y el número de ciclos al que ha sido sometido.

5.2.2 Pérdidas por efecto Crossover y corrientes internas

Estas pérdidas explican que a circuito abierto, la tensión no coincida con el valor teórico. Aunque una de las principales propiedades que debe tener la membrana de la pila PEM es que no sea capaz de conducir electrones ni de permitir el paso de los gases reactantes, esto no es algo perfecto. La membrana presentará ciertas imperfecciones, haciendo que una pequeña cantidad de hidrógeno y de electrones la atraviesen pasando del ánodo al cátodo.

Esta cantidad de hidrógeno que atraviese la membrana, será combustible desperdiciado, y es lo que se denomina pérdidas por efecto crossover. Lo mismo ocurre con los electrones: será carga que no se aproveche para generar energía eléctrica, esto es lo que se denominan corrientes internas. Ambas pérdidas, aunque equivalentes, tienen efectos diferentes en una pila.

La pérdida de electrones ocurre después de que la reacción electroquímica tenga lugar, sin embargo, el hidrógeno que se desperdicia no llega a participar en la reacción del ánodo, sino que directamente atraviesa la membrana hasta llegar al cátodo. Una vez allí, debido a la presencia de catalizador en el cátodo, el hidrógeno reacciona con el oxígeno. Esto hará que el potencial del cátodo se reduzca.

También el oxígeno puede atravesar la membrana, viajando desde el cátodo hasta el ánodo. Sin embargo, este efecto, comparado con el del hidrógeno es prácticamente inapreciable.

5.2.3 Pérdidas óhmicas

Se trata de las pérdidas que tienen lugar debido a la resistencia del flujo a su paso por los distintos componentes de la pila. Como se puede ver en la curva de polarización, estas pérdidas tienen lugar en la zona de densidades de corrientes moderadas y tienen un comportamiento prácticamente lineal. Estas pérdidas se expresan, como su nombre intuye, mediante la ley de Ohm.

Dependen de tres factores: espesor del material, conductividad del mismo y resistencia de contacto. Ésta última, es la resistencia de contacto entre la placa bipolar y la capa difusora. El contacto entre ambos elementos no es perfecto provocando cierta resistencia al paso del flujo. Por otro lado, la conductividad y el espesor tienen que estar de acuerdo con las características de cada uno de los elementos. Se buscará siempre espesores pequeños, puesto que las pérdidas óhmicas son proporcionales a este parámetro. Y la conductividad dependerá de cada componente: las placas bipolares, los catalizadores y la capa difusora deben tener alta conductividad eléctrica, mientras que la membrana y, nuevamente, los catalizadores, deben tener la mayor conductividad iónica posible.

5.2.4 Pérdidas por concentración

Estas pérdidas se deben a los gradientes de concentración que existen en la pila. Cuando a altas densidades de corriente, la generación de agua es abundante, los poros de las capas de difusión se bloquean e impiden por tanto el paso del oxígeno hacia el catalizador. No se produce entonces la reacción de reducción del oxígeno. Esto hace que la tensión de la pila caiga bruscamente. Este efecto empieza a ser apreciable cuando la cantidad de caudal consumido es mayor que el transportado.

Pero no solo afecta la excesiva formación de productos, sino que estas pérdidas también están afectadas por fallos en el sistema de alimentación de hidrógeno y oxígeno. Como sabemos, la pila generará electricidad siempre y cuando se alimente continuamente de reactivos. Si la demanda de potencia es alta, será necesario suministrar más cantidad de reactante al sistema, y en el caso de que existiera algún fallo, la pila podría llegar a dejar de funcionar.

El transporte de masa dentro de la pila, no es más que el proceso tanto de alimentación de los reactivos como de extracción de los productos resultantes. Este transporte es en definitiva el que lleva asociado estas pérdidas, denominadas por concentración.

6 Ventajas e inconvenientes

Como ya se ha explicado en este documento, son muchas las ventajas que hacen que la pila de combustible empiece a ser considerada como un sustituto a los sistemas de producción de electricidad más convencionales. El hidrógeno, por sus propiedades e impacto nulo sobre el medio ambiente, es considerado como el combustible del futuro.

Sin embargo, en la actualidad, aún el coste de los materiales, fundamentalmente el platino en las pilas PEM, empleados en su fabricación hace que su desarrollo no consiga ser completo. Esto se ve además acentuado por el hecho de que, al no ser aún una tecnología muy empleada, la producción de algunos de sus componentes no se realiza a grandes escalas por lo que el coste de su producción es aún mayor. Es por esto que las empresas, organizaciones e incluso universidades dedicadas a la investigación de esta tecnología centran todos sus esfuerzos en lograr disminuir los costes. Cuando esto se consiga, las pilas de combustible supondrán una revolución energética.

Las principales ventajas que esta tecnología presenta son las siguientes:

- 1) Eficiencia: por lo general, una pila de combustible presenta mejor eficiencia que un motor de combustión. Además, la eficiencia de la pila no cambia con el tamaño: las pilas de potencias pequeñas trabajan con eficiencias relativamente similares a las de mayor potencia. Esto se debe principalmente a que las pilas convierten directamente la energía del combustible en energía eléctrica a través de las reacciones electroquímicas que tienen lugar en su interior. Si comparamos con los motores de combustión tradicionales, para una misma cantidad de energía del combustible, la eficiencia de la pila de combustible será mayor que la del motor. Por otro lado, el hecho de que se pueda aprovechar el calor residual hace que la eficiencia de las pilas pueda aún aumentar. En la siguiente gráfica podemos observar la comparación en cuanto a eficiencias de una pila de combustible con otros sistemas de producción de electricidad más convencionales.

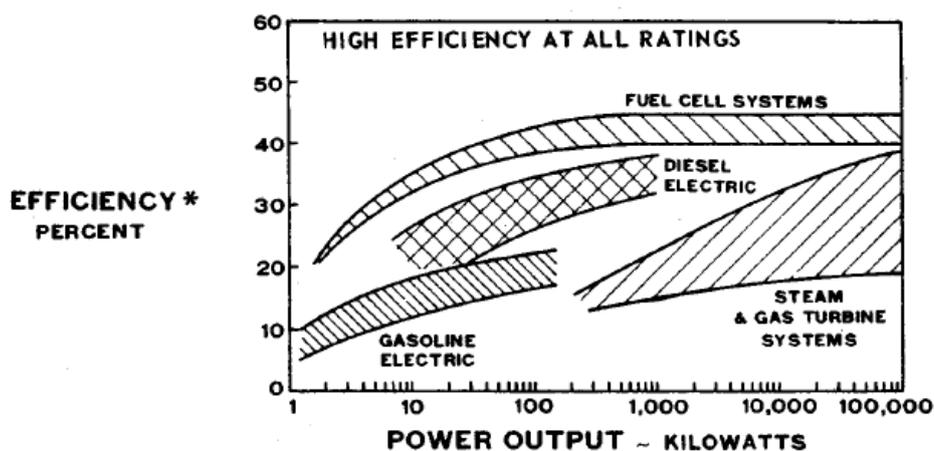


Figura 25. Comparación eficiencia de las pilas de combustible frente a sistemas convencionales.

- 2) Bajas emisiones: al ser el hidrógeno el combustible, el producto resultante es simplemente agua. No hay ningún contaminante. Esto hace que la pila sea una tecnología limpia, de emisión cero. Esto es interesante principalmente para su aplicación en el sector automovilístico.
- 3) Simplicidad de fabricación: como hemos visto en este trabajo, el principio de funcionamiento de una pila de combustible PEM es bastante sencillo. No dispone de una construcción complicada puesto que no necesita de muchos componentes y no presenta muchas partes móviles. Consecuentemente su diseño es simple. Esto además favorece la flexibilidad de emplazamiento: se pueden instalar en numerosos lugares, desde un dispositivo para cargar la batería de un teléfono móvil hasta otro capaz de mover un vehículo. Por otro lado, su carácter modular permite que, cuando se necesite aumentar la potencia requerida, se puedan conectar módulos en serie.
- 4) Nivel de ruido bajo: esto es muy interesante sobre todo para las aplicaciones portátiles. Las pilas de combustible no presentan ningún mecanismo que pueda provocar ruido en su interior. El poco ruido que pueda haber es el proveniente de los sistemas de alimentación de combustible o de refrigeración de la pila.

Todas estas ventajas son muy interesantes. Pero se debe trabajar aún para intentar que las desventajas no superen las implicaciones positivas de su uso. No sólo el coste de los materiales de la pila son un factor limitante.

La producción de hidrógeno es también a día de hoy uno de los principales problemas a resolver. El hidrógeno se puede obtener de distintas fuentes, no obstante, este hecho de no ser una fuente primaria, encarece bastante su producción. Lo más positivo es que se puede obtener de otras fuentes renovables. Sin embargo, aún cuando el hidrógeno se obtiene mediante el

reformado de combustible fósiles, las emisiones de este proceso son mucho menores que las que produciría una combustión tradicional de la misma cantidad de combustible. Todo esto ayuda a la reducción del impacto medioambiental. Otro de los problemas que presenta el uso del hidrógeno como combustible es que los sistemas de almacenamiento y distribución del mismo son aún muy costosos.

7 Aplicaciones

Debido al amplio rango de potencia que la pila de combustible puede proporcionar, también es amplio el rango de posibles aplicaciones que tiene.

Las pilas de combustible pequeñas pueden proporcionar electricidad a pequeños aparatos electrónicos como móviles u ordenadores portátiles, en cambio, pilas de dimensiones mayores podrían proporcionar electricidad a un conjunto de viviendas o a un submarino. Muchas de estas aplicaciones, sobre todo en el sector automovilístico, han sido ya desarrolladas por numerosos fabricantes del sector.

En algunas de las aplicaciones estacionarias, no solo se puede usar la energía eléctrica que la pila de combustible genera, sino que el calor que se desprende también se puede aprovechar, aumentando así la eficiencia del sistema. En aplicaciones domésticas, por ejemplo, se puede emplear dicho calor para la producción de agua caliente sanitaria. Cada una de estas aplicaciones tendrá su propio diseño, atendiendo a distintos factores como pueden ser el peso, el coste, la eficiencia, el tiempo de arranque, etc. Esto es un aspecto que debe ser estudiado en cada caso.

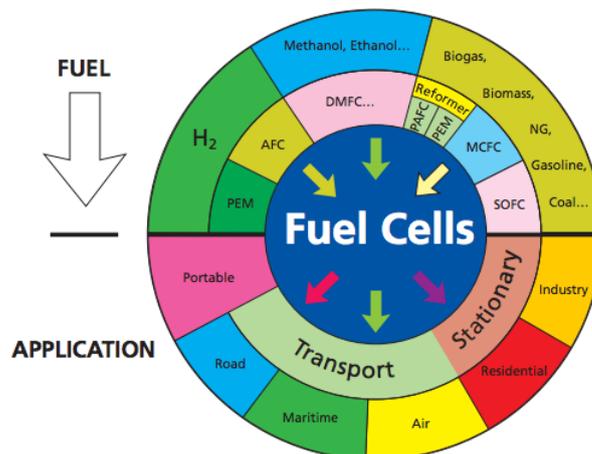


Figura 26. Aplicaciones de las pilas de combustible. [14]

Podemos distinguir tres posibles aplicaciones de esta tecnología:

- 1) Aplicación portátil: se trata de equipos que son diseñados para su desplazamiento, es decir, se utilizarán indistintamente en un lugar u otro. Como por ejemplo, teléfonos móviles u ordenadores portátiles.
- 2) Aplicación estacionaria: al contrario que las anteriores, se trata de equipos diseñados para proporcionar electricidad, y a veces calor, en un determinado lugar. El sector de la industria o el residencial son ejemplos de este tipo de aplicación.
- 3) Aplicación al sector del transporte: se emplean en equipos que generan la potencia necesaria para el transporte tanto terrestre, como aéreo o marítimo.

Es importante señalar que esta industria está aun desarrollándose. Es importante por tanto en este punto el apoyo por parte de los gobiernos para la financiación y desarrollo de la tecnología. La mentalidad es positiva, puesto que cada año el aumento en la potencia comercializada es mayor. En 2011 se superó por primera vez en este sector, los 10 MW de potencia comercializada. Sin embargo, en tan solo dos años después, esta cantidad se llegó a duplicar: se alcanzó la cifra de 215 MW de potencia. [20] Esto nos da una idea del crecimiento de esta tecnología.

Potencia comercializada por aplicación						
[MW]	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Portátil	1,5	0,4	0,4	0,5	0,3	0,5
Estacionaria	35,4	35,0	81,4	124,9	186,9	147,3
Transporte	49,6	55,8	27,6	41,3	28,1	28,2
TOTAL	86,5	91,2	109,4	166,7	215,3	176,0

Tabla 11. Potencia comercializada de las pilas de combustible por aplicación. [20]

Como se puede ver en la anterior tabla, la aplicación que más ha crecido en términos de potencia comercializada es la estacionaria: en tan solo cinco años su potencia ha llegado a multiplicarse por cuatro. En contraste a este aumento, la aplicación portátil no ha sufrido muchas variaciones a lo largo de los últimos años. Por otro lado, el sector del transporte, aún siendo de los primeros en ser desarrollados, ha mantenido una tendencia más variable en los últimos años.

Por último, antes de analizar un poco más en profundidad las distintas aplicaciones con sus ventajas y desventajas, se muestra en la siguiente tabla como la tecnología de la pila PEM es la que mayor desarrollo ha tenido en los últimos años. Esto se debe a su amplio rango de aplicación. [20]

Producción de pilas de combustible						
[10000 unidades]	2009	2010	2011	2012	2013	2014
PEMFC	8,5	10,9	20,4	40,4	58,7	65,3
DMFC	5,8	6,7	3,6	3,0	2,6	3,1
PAFC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SOFC	0,1	0,1	0,6	2,3	5,5	1,8
MCFC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AFC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	14,4	17,7	24,6	45,7	66,8	70,2

Tabla 12. Producción de pilas de combustible. [20]

7.1 Aplicaciones portátiles

La característica fundamental de los equipos que forman parte de este grupo de aplicación, es que generalmente no están conectados a la red y además deben cumplir, como ya se ha mencionado, el requerimiento de ser dispositivos móviles. El rango de potencia de estas aplicaciones se encuentra entre 1W y 20 kW. Aunque también se concibe el uso de pilas de combustible para juguetes o pequeños dispositivos con uso educativo, englobaremos las distintas posibilidades que existen de aplicaciones portátiles en tres subgrupos: [20]

- Pilas de combustible para la recarga de dispositivos electrónicos, como pueden ser teléfonos móviles.
- Dispositivos de suministro de energía auxiliar en el ámbito del ocio, como son el uso de pilas de combustible en autocaravanas.
- Uso militar, sobre todo en vehículos aéreos no tripulados.

En el ámbito de la telefonía, las baterías suponen en la actualidad un gran reto. Todas las empresas del sector se encuentran en la actualidad investigando para conseguir una batería que, cumpliendo con las especificaciones específicas de un teléfono móvil, el peso por ejemplo, dure más tiempo sin necesidad de que el usuario cargue su móvil tan a menudo. Es por esto, que se empieza a contemplar a las pilas de combustible tipo PEM como una posible alternativa. Sin embargo, se trata aún de una industria difícil. Se han desarrollado en los últimos años cargadores portátiles para móviles con diferentes estéticas y tamaños, que han tenido gran acogida entre los usuarios.

En este ámbito se necesita llegar a pilas capaces de cargar el dispositivo portátil en un período de tiempo pequeño. Además, son muy importantes los aspectos de tamaño y peso. Se busca

siempre que sea un dispositivo ligero y pequeño. Y esto es uno de los aspectos que limita la aplicación de las pilas tipo PEM. Estas pilas necesitan un almacenamiento que es grande y pesado, incluso para pequeñas potencias.

En el sector del ocio, como son por ejemplo, las autocaravanas, se podría usar pilas de combustible para recargar las baterías que en ellas se usan. En la actualidad, la empresa australiana Horizon, ha creado un sistema, el Aquigen-180, a base de pilas de combustible que se usa para recargar la batería de la autocaravana así como para generar electricidad en caso de emergencia para los equipos del interior del hogar.

En cuanto al sector militar, éste ha sido siempre el que más se ha prestado a usar estas tecnologías. Desde el inicio de su invención, han sido muchas las aplicaciones militares que han usado las pilas de combustible para la generación de electricidad. Esto se debe fundamentalmente al alto nivel de financiación que se dispone para proyectos militares. El empleo de estos dispositivos en este sector se debe en gran medida a que se trata de un sistema limpio, que no deja residuos, solamente agua, y que es silencioso. Las fuerzas militares de Estados Unidos y Alemania son los más interesados en la actualidad. [39] En relación a los vehículos no tripulados, las pilas PEM presentan numerosas ventajas de incremento de autonomía frente a las tecnologías más convencionales. Sin embargo, debido a su actual alto coste, su uso con esta finalidad es aún escasa y requiere de muchas mejoras. El proyecto PILCONAER, financiado por la Comunidad de Madrid, investiga sobre el desarrollo de pilas de combustible de hidrógeno para este tipo de aplicación.

7.2 Aplicación estacionaria

El atractivo de las pilas de combustible tipo PEM en este ámbito son su alta eficiencia y bajas emisiones. El factor quizás más limitante en estos sistemas es la vida de estos dispositivos: deben operar entre unas 40 u 80 mil horas.

Las pilas de combustible se pueden emplear en este ámbito con diferentes finalidades:

- Como única fuente de electricidad, reemplazando por tanto el suministro de red eléctrica.
- Como un apoyo de suministro de energía eléctrica, trabajando en paralelo con la red. La potencia generada por la pila de combustible se podría emplear para cubrir la demanda de potencia base, empleándose la red cuando existan picos de demanda.

- En sistemas combinados con otras fuentes limpias de energía, como puede ser la fotovoltaica o la eólica, suministrando potencia cuando estos sistemas no sean capaces de generar electricidad.
- Como sistemas auxiliares de energía en momentos de emergencia, por ejemplo, cuando la red eléctrica no funcione. En este caso se diseñan las pilas de manera que el tiempo de arranque sea mínimo, para así cubrir la demanda en el instante necesario.

Según su potencia, se podrían aplicar en el suministro de electricidad en viviendas pequeñas, que demanden entre 1-10 kW, en urbanizaciones o centros comerciales de dimensiones más grandes en los que se necesiten entre 10-50 kW, o incluso en hospitales, hoteles o bases militares en los que se generen entre 50-250 kW.

La cogeneración es para las industrias, en este aspecto, algo bastante interesante. El empleo del hidrógeno como combustible limpio y el aprovechamiento del calor residual, ayuda a los sistemas de producción de potencia a aumentar su eficiencia. Generalmente, la eficiencia global (suma de la eficiencia eléctrica de la pila más la térmica) que alcanzan estos sistemas está en torno al 90%. [11]

En España, son muchas las empresas incentivadas al desarrollo de las pilas de combustible para estos usos. En particular, la empresa albaceteña AJUSA, ha diseñado una vivienda unifamiliar, conocida con el nombre de Proyecto Don Qhyxote Home, que en combinación con otras fuentes de energía renovable, proporciona todo el suministro de energía eléctrica necesario para ser habitada. [41]

7.3 Aplicación en el sector del transporte

Las principales ventajas que aportan el uso de pilas PEM en el sector del transporte son su bajo tiempo de arranque, puesto que no trabaja a temperaturas excesivamente altas, a su alta eficiencia y al ahorro de combustible. Obviamente también en este sector, tiene gran importancia las nulas emisiones de contaminantes así como que el único residuo es agua.

En cuanto al diseño de una pila de combustible para aplicaciones de propulsión de vehículos se necesita que las características en cuanto al peso, volumen, densidad de energía y arranque sean lo más parecido posibles a las de un motor de combustión interna actual. De esta forma podrá competir con este amplio sector ya desarrollado.

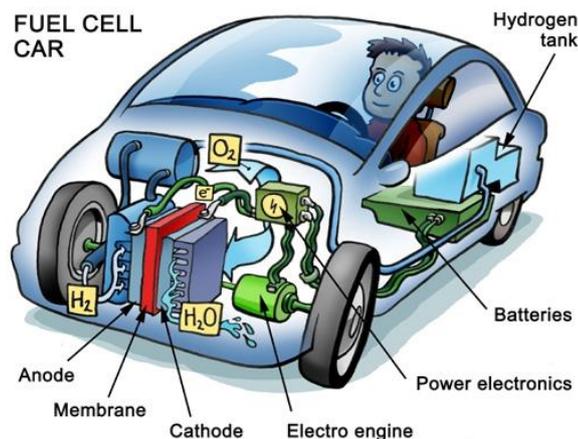


Figura 27. Esquema de un vehículo con pila de combustible. Fuente: Google Imágenes.

Los factores que más limitan a este sector son los elevados costes y la disponibilidad del hidrógeno. Al igual que en las aplicaciones portátiles, el peso es un factor muy importante en este sector. Y en este caso, sí es muy importante el tiempo de arranque.

Los coches propulsados por hidrógeno suelen ser híbridos: llevan también un sistema de baterías en su interior. Las pilas de combustible se pueden usar entonces para generar potencia durante el viaje, aunque en los momentos de aceleraciones, en los que la demanda es más elevada, se emplean las baterías. Otro posible uso de las pilas de combustible en un automóvil es para recargar las baterías, de manera que estén constantemente cargadas y así evitar ciclos de carga y descarga. Especialmente en camiones, el uso de las pilas como sistema auxiliar de potencia es muy interesante. En estos casos, la pila solamente suministraría electricidad para una parte del sistema eléctrico del vehículo como puede ser el aire acondicionado.

Son tres las empresas del sector automovilístico más destacadas en la actualidad: Honda, Hyundai y Toyota. Cada una de ellas cuenta en la actualidad con un modelo de coche que emplea hidrógeno como combustible. Sin embargo, estos modelos aún no tienen mucho éxito en el mercado debido a su elevado coste.

También existe la posibilidad del empleo de pilas de combustible para vehículos de transporte de mercancías, como por ejemplo carretillas. Incluso en el sector del ocio, en carros de golf, se ha estudiado la posibilidad del uso de pilas de combustible.

8 Aplicación al suministro de energía eléctrica a una vivienda

En primer lugar, como ya se ha ido viendo a lo largo de este trabajo, las pilas de combustible son una alternativa a los sistemas de obtención de energía eléctrica que existen en la actualidad. Sus numerosas ventajas como por ejemplo, su alta eficiencia, su modularidad, sus bajas emisiones contaminantes y su bajo mantenimiento, entre otras, hacen que cada vez sea mayor el desarrollo y avance de esta tecnología. Tomando como base que en un futuro puede ser considerada como una gran opción para la generación de energía limpia, el estudio de casos como éste tiene mucho sentido y muchas posibilidades de que pueda llevarse a cabo, si no en la actualidad, en un futuro no muy lejano.

En este capítulo se llevará a cabo el análisis de la aplicación de una pila de combustible para el suministro de electricidad en una vivienda que, como ya se ha comentado, es una de las posibles aplicaciones de esta tecnología.

Existen en la actualidad modelos de pilas de combustible que grandes compañías del sector han fabricado exclusivamente para su uso en viviendas. A continuación se muestran algunos ejemplos de modelos de pilas para el hogar así como de algunos proyectos pilotos llevados a cabo en el mundo:

- En 2010 se instalaron pilas de combustible para la cogeneración en 5000 viviendas de Japón. Estas pilas están desarrolladas por grandes multinacionales japonesas como Panasonic y Toshiba. Estas pilas están subvencionadas en un 50% de su precio por el gobierno japonés debido a sus positivos efectos medioambientales: ahorran energía además de que emiten menos contaminantes. Se ha demostrado que dichos equipos poseen más de 40000 horas de funcionamiento y una vida útil de unos 10 años.

- Panasonic comercializa en Japón un modelo de pila de combustible denominado: “Residential Fuel Cell”. Se trata de un modelo de pila de combustible capaz de suministrar energía eléctrica y también agua caliente, aprovechando la energía térmica de estos sistemas, a partir de hidrógeno. Estos equipos tienen una eficiencia del 39% en cuanto a la generación de electricidad, y del 56% en la recuperación de calor. Existen dos posibilidades: un modelo integrado, en el que se incluye la celda de combustible y el almacenamiento de agua caliente, y un modelo separado en el que además de los dos anteriores, se instala una caldera de apoyo. Presentan una potencia de salida de 700 W y son capaces de seguir generando hasta 500 W durante 96 horas cuando haya cortes de suministro de combustible. Aunque este producto aún no se vende en Europa, Panasonic cuenta con dos centros de I+D ubicados en Alemania y Reino Unido que trabajan conjuntamente con las compañías de servicios públicos relacionados con la energía para en un futuro empezar su comercialización en Europa. [42]
- En España existe un proyecto llevado a cabo por una empresa de Albacete, AJUSA, llamado “Don Qhyxote Home 07” en el que se proporciona energía eléctrica a una vivienda unifamiliar a partir de la tecnología de las pilas de combustible entre otras fuentes de energías limpias. Esta vivienda fue construida en un polígono industrial de Albacete, único en Europa en fijar como compromiso medioambiental que el 100% de la energía allí consumida fuera producida mediante fuentes renovables. Esta vivienda de 75 m² consta de una pila PEM de 5 kW eléctricos y 7 kW térmicos. [19]
- El proyecto “Stuart Island Energy Initiative” se basa en el empleo de un sistema de generación de hidrógeno in-situ a través de energía solar que se almacena y se emplea para alimentar una pila de combustible. Uno de los objetivos de este proyecto fue, debido a que no se trata de una tecnología que tenga un uso muy extendido, encontrar los puntos débiles para poder así seguir con las mejoras. [19]

Para llevar a cabo el análisis de aplicación de esta tecnología para este uso concreto necesitamos conocer el consumo de energía que tiene una vivienda, es decir, en qué se consume energía en un hogar, además de su curva de demanda, para de esta manera conocer en qué momentos del día el consumo de energía es mayor y por el contrario, cuándo es menor.

Ya se ha analizado a grandes rasgos al principio de este proyecto el consumo de energía final en España y en particular el del sector residencial. Generalmente el consumo eléctrico total de un país engloba el consumo por parte de distintos sectores. Concretamente en España, el sector residencial supone un 25% del consumo total de electricidad. Los otros dos sectores más importantes en consumo de energía eléctrica son la industria, ocupando prácticamente la mitad del consumo total (45%) y el sector de servicios (30%), en el que se incluyen los comercios y empresas. [32]

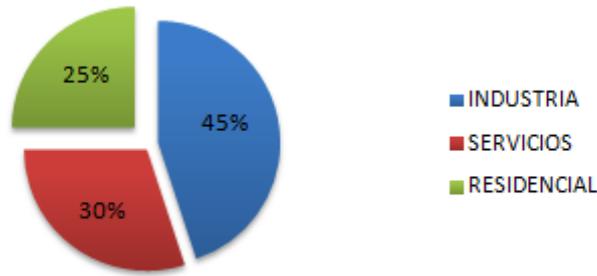


Figura 28. Gráfico distribución consumo de energía eléctrica en España.

Es importante recordar en este punto que la principal fuente de suministro de energía para un hogar en España es la electricidad. Los datos que nos aporta la Red Eléctrica Española sobre la estructura de generación de energía eléctrica de los años 2014 y 2015 son los que podemos ver en la siguiente figura:

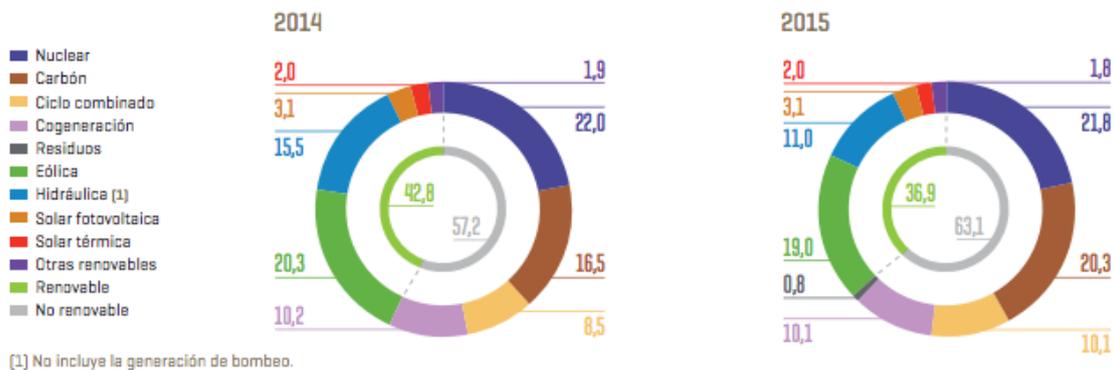


Figura 29. Estructura de generación anual de energía eléctrica peninsular 2014/15. [32]

Como se puede ver, la tecnología con mayor participación en estos años en cuanto a la generación peninsular de energía eléctrica es la nuclear. Aunque comparando estos dos años, las fuentes renovables han sufrido un leve descenso, su participación en términos generales en España es cada vez más elevada. Esto contribuye positivamente a un panorama futuro más sostenible y amigable con el medio ambiente. Se debe por tanto buscar alternativas a los métodos más tradicionales de generación de electricidad. Es por este motivo por el que se proponen las pilas de combustible como una alternativa.

Por otro lado, necesitamos conocer la curva de demanda. Esta curva nos proporciona información sobre la cantidad de potencia demandada a cada hora del día. En términos generales, si analizamos la curva de demanda de estos tres sectores encontramos ciertas diferencias. En el sector de la industria, al estar constantemente en funcionamiento, la demanda durante un día es prácticamente constante. Las industrias mantienen sus instalaciones en funcionamiento durante las noches para aprovechar los precios más económicos de la

electricidad. Esto difiere mucho con lo que le ocurre a la curva de demanda en el sector residencial y de servicios. Ambos sectores presentan una demanda más variable. Las oficinas y comercios no tienen apenas actividad durante la noche, por lo que su demanda es baja. En cambio, en las horas punta del día, sobre todo durante el horario laboral, esta curva alcanza sus valores máximos. Lo mismo ocurre para el sector residencial. Las viviendas por la noche apenas tienen consumo de energía eléctrica. Empieza a aumentar cuando empieza la jornada laboral y alcanza sus valores máximos entorno al mediodía.

Es por eso que este sistema de suministro de electricidad a una vivienda estará formado por un sistema híbrido: constará de una pila de combustible tipo PEM y de un banco de baterías. Las baterías estarán conectadas en serie de manera que se recargarán en los momentos en los que la potencia suministrada por la pila sea superior a la potencia demandada en el hogar. La energía almacenada se usará en los momentos en los que la demanda sea máxima puesto que en esos momentos la pila no será capaz de suministrar toda la potencia requerida. En el apartado de elección del tamaño de la pila y de la batería se explica el criterio elegido en este proyecto.

Estos sistemas híbridos se emplean porque las pilas de combustible funcionan durante todo el tiempo relativamente cerca de su punto de máxima potencia. Cuando los requisitos de demanda de energía son pequeños, el exceso de energía se aprovecha para ser almacenado en baterías. Si no fuera así, estaríamos desechando parte de la energía generada por la pila. Estos sistemas son realmente ventajosos en aplicaciones en las que la demanda es variable, como es el caso de una vivienda. Cuando la demanda es constante, estos sistemas no ofrecen demasiadas ventajas.

8.1 Curva de demanda

La demanda en una vivienda es bastante variable y depende de muchos factores. Los principales factores que influyen son los siguientes: [43]

1. Tipo de vivienda: puede tratarse de un piso o de una vivienda unifamiliar. Un hogar unifamiliar, como su nombre indica, es aquel en el que solo vive una familia ocupando el edificio en su totalidad. Estas viviendas pueden ser aisladas, pareadas o adosadas. Por otro lado, un piso forma parte del grupo de viviendas colectivas. Es decir, varias viviendas construidas en un mismo edificio. Estos dos tipos de hogares presentan consumos diferentes. Según el estudio realizado por IDAE acerca del consumo del sector residencial en España, el consumo medio por hogar es de 0,852 tep. Una vivienda unifamiliar presenta un consumo por encima de dicha media: 1,334 tep. En cambio, el piso tiene un consumo inferior al medio: 0,649 tep. Sin embargo, hay que destacar que el 22% de las viviendas unifamiliares dispone de algún tipo de energía renovable. Este porcentaje es menor en el caso de los pisos, apenas un 6%.

- Localización de la vivienda: ya se ha comentado este aspecto en el apartado sobre la situación energética actual. A modo de resumen, para que sepamos que este factor también tiene su influencia, el consumo en las zonas frías continentales es mayor que en las zonas atlánticas y mediterráneas de nuestro país.
- Estación del año: no es igual el consumo en verano que en invierno. La Red Eléctrica Española nos proporciona en su página web dos gráficas sobre el consumo de los tres sectores definidos en verano y en invierno.



Figura 30. Curvas de demanda de electricidad en verano y en invierno en España.[32]

Si analizamos la curva referida al sector residencial, vemos como en verano existe un único momento del día con pico de demanda. Esta demanda es prácticamente constante desde las 14:00h hasta las 20:00h que se trata de las horas centrales del día. Además, como es de esperar, estas horas coinciden en verano con las de mayor temperatura. En cambio, en invierno podemos ver dos momentos de máxima demanda: sobre las 12:00h de la mañana y otro cerca de las 22:00h. Sin embargo, es cierto que el consumo en calefacción es más elevado que el consumo en aire acondicionado. El resto de equipos se usan casi por igual en todo el año. La calefacción supone un consumo anual medio de 5172 kWh. En contraste, el aire acondicionado unos 170 kWh. El bajo consumo del aire acondicionado se debe a que dada su estacionalidad, no representa en la actualidad un porcentaje de consumo alto en comparación con el resto de servicios. Sin embargo, se trata de los equipos que mayores picos de demanda de energía presenta.

Con el objetivo de simplificar la dependencia de todos estos factores, analizaremos la demanda de potencia de una vivienda tipo a partir de la curva típica de demanda como la que se muestra a continuación. Los datos con los que se ha realizado esta curva tipo, se han tomado de la información que ofrece la Red Eléctrica Española acerca del consumo de electricidad en nuestro país.

Se han analizado los consumos de los principales electrodomésticos y dispositivos eléctricos que se usan en una vivienda para así adecuar la curva. Estos consumos son los siguientes:

EQUIPO	CONSUMO	DISPONIBILIDAD EN EL HOGAR
Iluminación	410 kWh/hogar	100%
Frigorífico	655 kWh	99,6%
Congelador	563 kWh	23,3%
Televisión	119 kWh	99,9%
Lavadora	254 kWh	92,9%
Secadora	255 kWh	28,3%
Lavavajillas	245 kWh	53%
Ordenador	145 kWh	-

Tabla 13. Consumo y disponibilidad de cada equipo en un hogar. [43]

Una vez conocidos todos estos valores, la curva que obtenemos como resultado es la que se muestra a continuación. En ella podemos ver en el eje vertical la potencia demandada en kW a lo largo de las 24 horas del día.

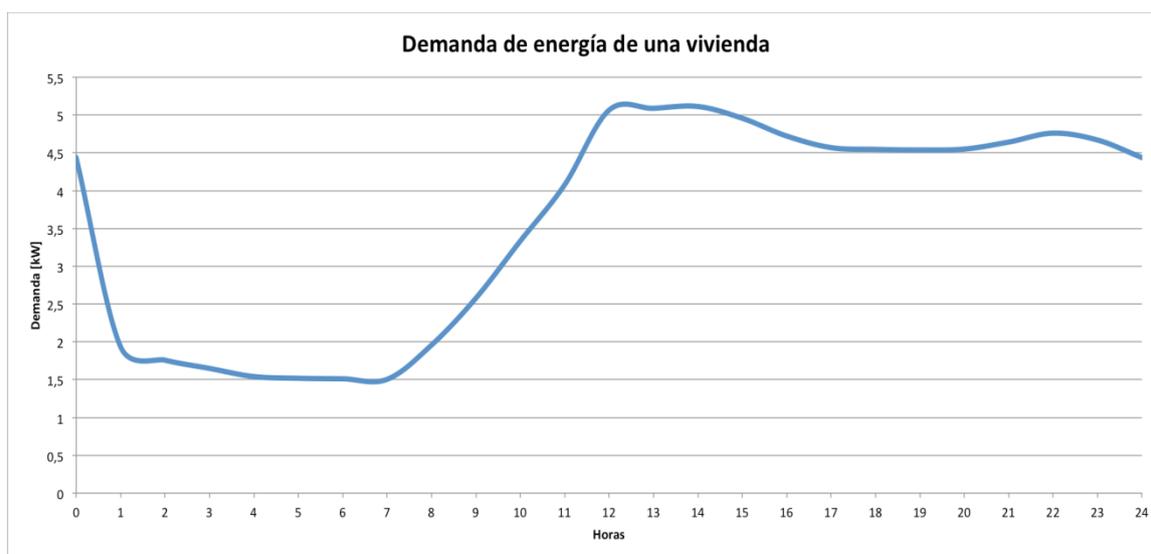


Figura 31. Curva de demanda de energía de una vivienda.

En esta curva tipo podemos ver horas en las que se produce el menor consumo de electricidad. Estas horas son conocidas como horas valle. En cambio, se denominan horas punta aquellas en las que tiene lugar el máximo de la demanda de energía eléctrica de una vivienda.

Valor mínimo	1,5045 kW
Valor máximo	5,1131 kW

Tabla 14. Valor máximo y mínimo de la curva de demanda.

Como es razonable, el consumo en una vivienda es mucho menor por la noche que durante el día. El mínimo de esta curva se alcanza alrededor de las 7 de la mañana, en el que se demanda unos 1,5 kW aproximadamente. Es en esta hora del día además en la que empieza a crecer esta demanda. Esto se debe fundamentalmente a que el inicio de la jornada laboral tiene lugar sobre las 8 de la mañana. Las familias entonces se levantan con cierta antelación y realizan las tareas necesarias, como ducha o preparación del desayuno, antes de abandonar su hogar. La demanda máxima se produce sobre las 14:00h, con una demanda máxima de unos 5 kW. En este momento, muchos trabajadores regresan a casa para almorzar. Por otro lado, en aquellos hogares en los que hay niños, es a esta hora cuando éstos regresan del colegio. El mayor consumo se produce entonces por la puesta en marcha de todos los electrodomésticos necesarios para cocinar. Además, cuando es verano, se activan los equipos de aire acondicionado, y en invierno, los de calefacción.

8.2 Elección del tamaño de la pila y de la batería

La pila de combustible y la batería de la instalación se han elegido siguiendo un criterio desde el punto de vista energético. La batería es necesaria puesto que no tendría sentido alimentar la vivienda con una pila de combustible que suministrara toda la potencia de demanda máxima que se alcanza en un día. No tiene sentido porque en la mayoría de horas del día la pila de combustible estaría suministrando potencia que no se estaría usando.

En cambio, para llegar a un punto energéticamente más favorable, se ha decidido analizar qué tamaño debe de tener la pila para que, en aquellos momentos en los que la demanda de potencia del hogar es inferior a la potencia entregada por la pila, la batería se cargue. De esta forma, cuando la demanda sea superior al valor de la potencia de la pila de combustible, que no será capaz de dar toda la potencia requerida, la diferencia hasta alcanzar el valor exacto de la demanda se tomará de la batería.

Luego, se ha llegado al tamaño óptimo tanto de la pila como de la batería, analizando las distintas opciones posibles. En cada uno de estos casos, se ha ido calculando, a cada hora del día, la energía que se acumula en la batería en aquellos momentos en los que la pila suministra más potencia que la necesaria, y la energía que se tomaba de la batería cuando la situación era al contrario. Se ha llegado a aquella solución en la que ambas energías son iguales. Es decir, hemos buscado un tamaño de la pila y de la batería de manera que toda la energía que se almacena en la batería es después empleada. Cabe señalar en este punto, que para evitar la descarga completa de la batería, se ha elegido un tamaño de la misma tal que cuando se descarga, en ella queda alrededor de un 20% de la energía anteriormente almacenada.

La primera opción que se ha barajado es el uso de una pila de combustible cuya potencia fuera del 90% del valor de la demanda máxima necesaria. Se ha visto que en este caso, la energía almacenada es mucho mayor que la que se necesitaría tomar de la batería. Esto se ve reflejado en la siguiente gráfica, ya que el área que queda por debajo de la línea de potencia de la pila es mucho mayor que la que queda por encima.

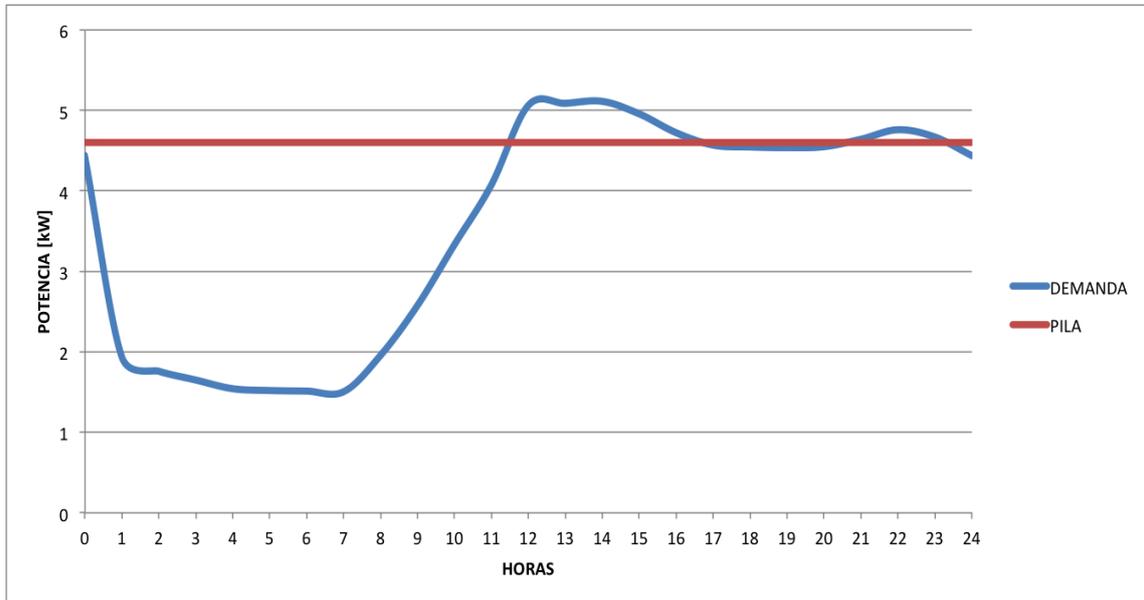


Figura 32. Curva de demanda de una vivienda con una pila de combustible del 90% de la demanda máxima.

Se ha continuado entonces realizando los mismos cálculos disminuyendo la potencia de la pila hasta llegar a un equilibrio entre la energía almacenada y la suministrada por la batería. El valor óptimo al que se ha llegado, teniendo en cuenta las consideraciones que se han citado ya antes, es de una pila de combustible tipo PEM cuya potencia es del 70% al valor de la demanda máxima de la vivienda. Es decir:

$$Pot_{PILA} = 0,70 * D_{m\acute{a}x} = 0,70 * 5,1131 = 3,5792 \text{ kW}$$

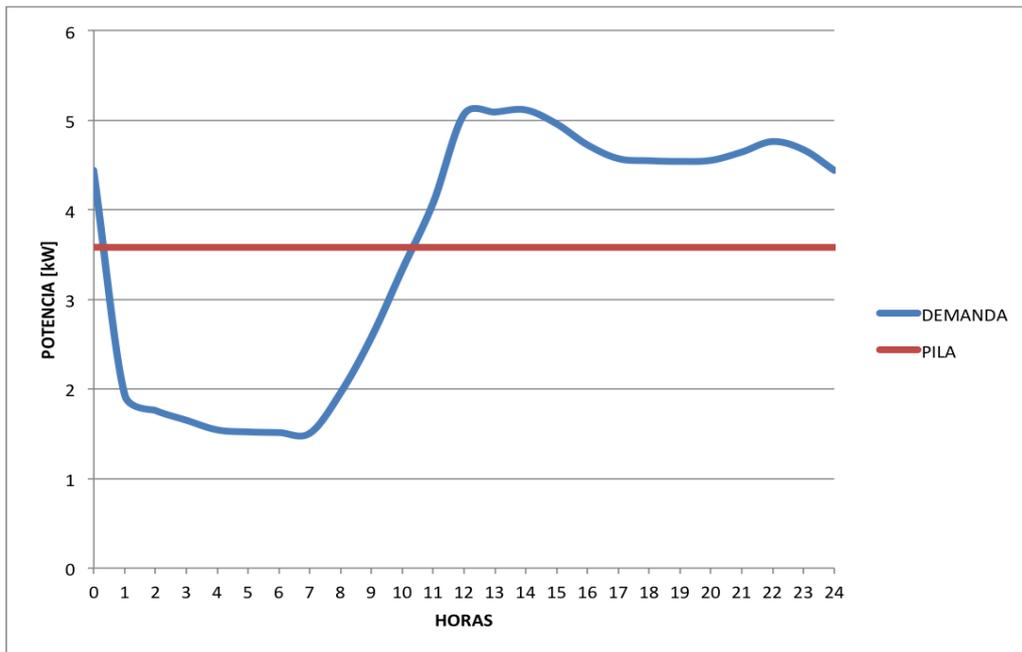


Figura 33. Curva de demanda de una vivienda con una pila de combustible del 70% de la demanda máxima

Como se observa en la gráfica, para este tamaño de la pila de combustible existen dos ciclos para la batería: uno de carga, que se produce durante la noche, y otro de descarga a lo largo del resto de día. Desde las 00:00h hasta aproximadamente las 10:00h de la mañana, la batería estaría cargándose, puesto que la demanda es inferior a la potencia de la pila. El ciclo de descarga empieza a las 11:00h de la mañana y acaba al finalizar el día. Durante este período la demanda de electricidad se cubre con el total de la potencia que da la pila, y lo que falta, con energía procedente de la batería.

La energía de la batería en cada instante de tiempo es la potencia que entrega por dicho intervalo, que en este caso será una hora. Al instante siguiente, la energía de la batería será la que en ella haya más la que esté almacenando o menos la que se esté consumiendo en ese instante. Si representamos este proceso a lo largo de las 24 horas del día, tenemos la siguiente gráfica. El valor de la batería que nuestro sistema necesita es el valor máximo que se alcanza en esta gráfica.

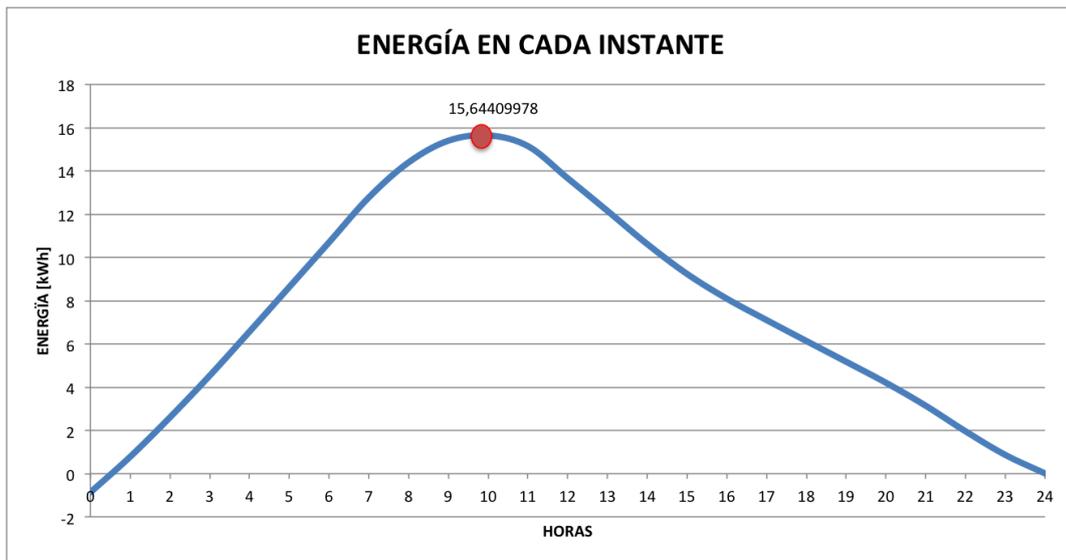


Figura 34. Energía en cada instante.

Sin embargo, para que la batería no se llegue a descargar nunca completamente, sino que en ella quede un 20% de energía, necesitamos una batería del siguiente tamaño:

$$Energía_{PILA} = 15,6441 * 1,2 = 18,7729 \text{ kWh}$$

En conclusión, nos queda que para la instalación de suministro de energía eléctrica de una vivienda atendiendo a la demanda de una curva de típica de consumo, la pila de combustible PEM y la batería que se necesitarían son del siguiente tamaño:

Tamaño pila PEM necesaria	3,5792 kW
Tamaño batería necesaria	18,7729 kWh

Tabla 15. Tamaño pila y batería necesarias para la instalación.

8.3 Equipos comerciales seleccionados

En este apartado se presenta la búsqueda de los equipos requeridos para esta instalación. Lo principal, como ya se ha dicho, es la pila de combustible PEM y el banco de baterías. Sin

embargo, se necesita de dos equipos más para el posible uso de dicha energía. Se necesita de un controlador de carga y de un inversor.

El esquema de la instalación es a grandes rasgos como el siguiente:

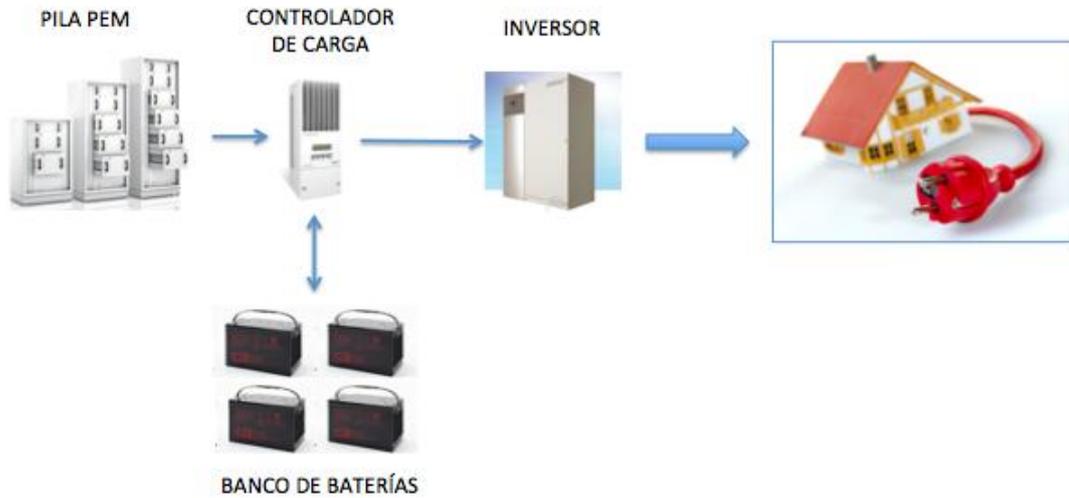


Figura 35. Esquema de la instalación.

8.3.1 Pila de combustible PEM

Primeramente se debe destacar el motivo de la elección de este tipo de pila para esta aplicación. Se ha elegido fundamentalmente por los siguientes motivos:

- Se trata de uno de los tipos de pilas de combustible más desarrollados en la actualidad y en consecuencia, más cercano a su comercialización generalizada.
- Pertenece al grupo de pilas de baja temperatura de operación. La energía térmica saliente de este tipo se encuentra en el rango de temperatura entre los 60-90°C. Esto facilita su uso en el ambiente doméstico.

La búsqueda de la una pila de combustible tipo PEM que satisficiera estas necesidades ha sido un tanto complicada. Puesto que se trata de un mercado aún en desarrollo, no se dispone de mucho acceso a los catálogos de los fabricantes.

Sin embargo, existen muchas empresas que trabajan con esta tecnología. Ballard es la empresa líder mundial en este sector, cuya sede se encuentra en Canadá. Se dedica al desarrollo de pilas de combustible tipo PEM para diferentes aplicaciones: desde dispositivos portátiles hasta pilas para el transporte de camiones y autobuses. No obstante, existen otras empresas como Acta, Accagen, Quintech, etc., que también presentan diferentes modelos de pilas de combustible.

Para la solución de esta aplicación se ha optado por una pila de combustible tipo PEM de la compañía “Heliocentris”. Esta empresa dispone de una línea específica, denominada “Jupiter Future E Fuel Cell Solutions”, para soluciones de generación de energía a través de pilas de combustible. Estos equipos son diseñados y fabricados en Alemania. Se trata de equipos compactos diseñados cuidadosamente con diferentes potencias. Presenta la gran ventaja de ser modular, lo que permite que se puedan añadir módulos en caso de que se necesite en un futuro más potencia. Otra de las ventajas de esta línea es que dispone de un modelo diseñado para su instalación en el interior de la vivienda. La pila de combustible se instalaría al lado del sistema formado por las botellas para el almacenamiento de hidrógeno y de los equipos necesarios para el empleo de la energía generada por los equipos de la vivienda, es decir, inversor y controlador de carga.

Analizando el catálogo disponible en la web de Heliocentris, buscamos el modelo que más se adapte a la potencia calculada para suministrar la electricidad a la vivienda. Puesto que no existe una que cumpla con la potencia exacta, se elige la primera que sea superior al valor necesario. En este caso, como la potencia que se necesita es de 3.57 kW, tomaremos el modelo de la familia Jupiter cuya potencia nominal es de 4 kW. En el siguiente cuadro, tomado directamente del catálogo, podemos ver las distintas opciones que existen con sus propiedades más importantes:

INDOOR CONFIGURATIONS INCLUDING ENCLOSURE									
Maximum Power * (kW)	0.6	1.2	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	25.0	50.0
Nominal Power (kW)	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	20.0	40.0
Nominal Current (A)	12.5	25	50	100	150	200	250	500	1000
Height (mm)	1200	1200	1200	1200	1800	1800	2200	2200	2200
Width (mm)	800	800	800	800	800	800	800	800	800
Depth (mm)	600	600	600	600	600	600	600	600	600
Weight (kg)	220	225	230	270	330	370	420	840	1720
Optional Space (U)	13	13	13	6	11	4	6	12	24

* Beginning of Life; ambient temperature <40°C

Figura 36. Catálogo de la pila de combustible Jupiter Future E Fuel Cell Solutions. Fuente: Heliocentris.

Como la potencia nominal de la pila es mayor que la que se requiere, haremos que la pila no funcione a un nivel de carga completo. Para determinar el nivel de carga al que operará calculamos:

$$\text{Nivel de carga} = \frac{\text{Potencia}_{\text{necesaria}}}{\text{Potencia}_{\text{pila comercial}}} \cdot 100 = \frac{3,5792}{4} \cdot 100 = 89,48\%$$

Por último, si observamos en la tabla anterior las dimensiones de la pila de combustible, necesitaremos un espacio total para su ubicación de unos 0,576 m³, lo que podría ocupar un armario en cualquier casa.

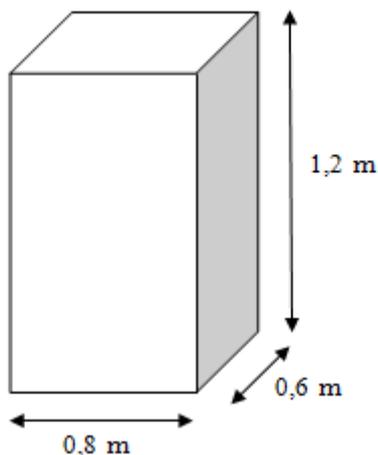


Figura 37. Dimensiones de la pila PEM.

8.3.2 Banco de baterías

Como ya se ha explicado, la potencia extra que es capaz de generar la pila en aquellos momentos del día en los que la demanda es inferior a la potencia de la pila se almacenará en baterías. Puesto que se trata de una cantidad de energía significativa, se necesitará de un banco de baterías conectadas en serie/paralelo para así cubrir las necesidades de la vivienda.

En este caso, al contrario de lo que ocurre con las pilas de combustible, existe un amplio mercado para las baterías. En este caso, se ha optado por la empresa CSB. Las baterías elegidas son de la serie GPL. Esta serie de baterías presentan una vida útil de más de diez años, bajo un funcionamiento normal. Son baterías recargables, altamente eficientes y con mantenimiento sencillo. Dentro de esta gran serie de baterías, se ha optado por el modelo GPL 121000. Estas baterías presentan las siguientes características más destacables:

Voltaje	12 V
Capacidad	100 Ah
Peso	33,5 kg

Tabla 16. Propiedades más importantes del modelo de batería seleccionado.

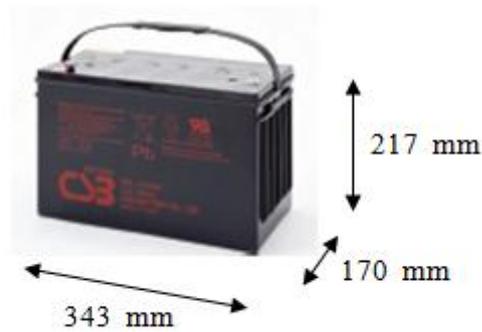


Figura 38. Dimensiones de la batería.

Con una conexión en paralelo de dos baterías iguales se consigue obtener una salida de dos veces la capacidad de las pilas individuales, manteniendo el mismo voltaje nominal. En cambio, con la conexión en serie de dos baterías de las mismas características se consigue obtener una salida doble de la tensión nominal de cada una de las baterías, manteniendo la misma capacidad.

Necesitamos determinar el número de baterías que necesitará nuestro banco. Para ello, del catálogo de la pila de combustible que se ha seleccionado obtenemos que dicha pila trabaja a una tensión nominal de 48 V. Esta será por tanto la tensión a la que trabaje el sistema de baterías. Para alcanzar esta tensión, con el modelo de batería elegido, necesitaremos conectar en serie, ya que:

$$12\text{ V} \cdot 4\text{ baterías en serie} = 48\text{ V}$$

Por otro lado, en cuanto a la capacidad, necesitamos calcular cuántas baterías conectadas en paralelo necesita nuestro sistema. Para ello calculamos:

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Energía [kWh]}}{\text{Tensión [V]}} = \frac{18,7729}{48} = 391\text{ Ah} \cong 400\text{ Ah}$$

Luego, si cada una de las baterías tiene una capacidad de 100 Ah, necesitaremos un total de 4 baterías conectadas en paralelo para así alcanzar la capacidad total requerida. Es decir:

$$100 \text{ Ah} \cdot 4 \text{ baterías en paralelo} = 400 \text{ Ah}$$

Para cubrir entonces nuestras necesidades necesitaremos un total de 16 baterías. Estas baterías se conectarán: en 4 filas y 4 columnas. De esta forma, tendremos a la salida 48 V y 400 Ah.

Un esquema simplificado del banco de baterías es el siguiente:

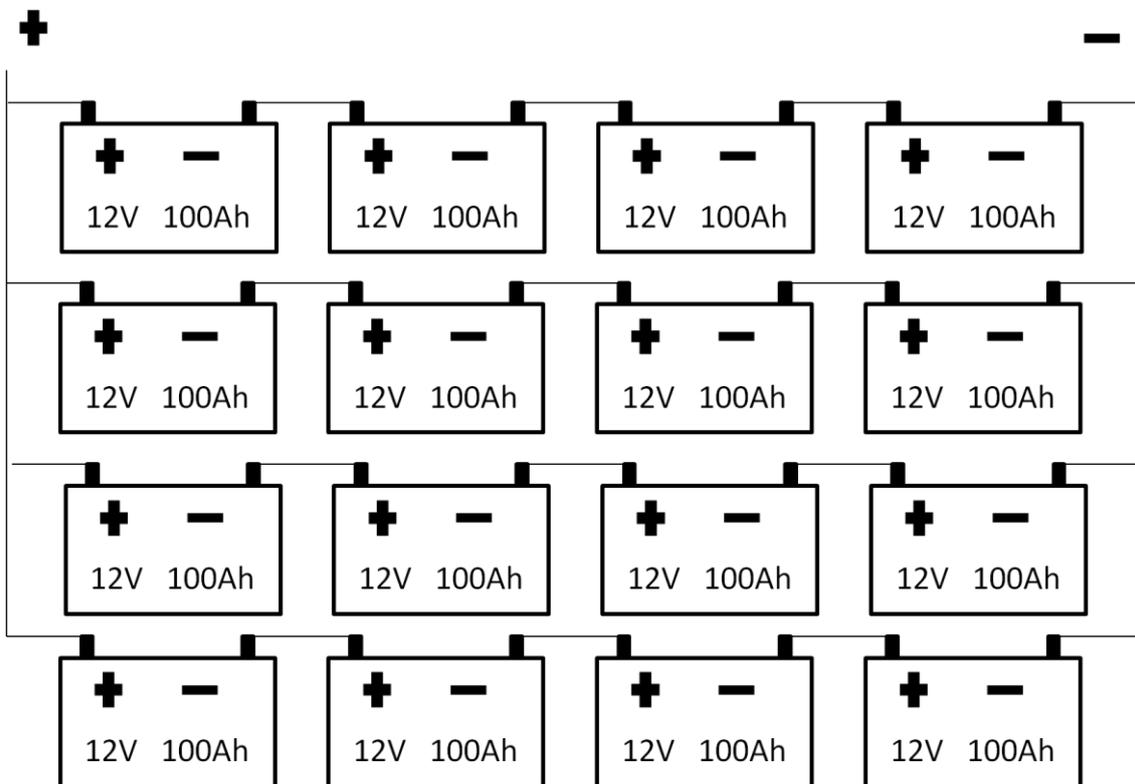


Figura 39. Esquema simplificado del banco de baterías.

Para el caso del banco de baterías, si nos fijamos en las dimensiones de cada una de ellas, y teniendo en cuenta la disposición que se ha establecido para alcanzar los requerimientos deseados, se necesitará de un espacio total aproximado de: 1,4 m x 1 m.

8.3.3 Inversor y controlador de carga

Cada uno de estos equipos cumple con una función diferente. El inversor es un equipo que se encarga de modificar el voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje a la salida de corriente alterna. Este equipo es necesario porque los equipos que se encuentran en la vivienda consumen en corriente alterna.

Por otro lado, el controlador de carga tiene como objetivo controlar constantemente el estado de carga de las baterías así como regular la intensidad de carga. Este equipo ayuda a alargar la vida útil de las baterías, evitando que se produzcan sobrecargas y sobredescargas profundas de las baterías.

Puesto que las empresas distribuidoras tanto de la pila de combustible como de las baterías son conscientes de la necesidad de estos equipos, ofrecen a sus consumidores la posibilidad de comprar junto con los productos que venden los equipos auxiliares necesarios. Es decir, la empresa a la que le compramos la pila de combustible, nos ofrece en su catálogo, la posibilidad de incluir al sistema el inversor adecuado para transformar la corriente continua en corriente alterna. Por otra parte, la empresa que nos vende el banco de baterías, nos proporciona, junto con las baterías que se han elegido, el regulador de carga adecuado. Luego, se ha tomado la decisión de adquirir estos dos equipos con las dos empresas elegidas para la pila de combustible y las baterías.

8.4 Análisis de viabilidad económica

En este apartado se llevará a cabo un pequeño análisis económico de los gastos que supondría llevar a cabo este proyecto. Las hipótesis que se han tomado son las siguientes:

- Se han tomado 15 años de amortización de la instalación.
- Inflación nula.
- Mantenimiento no necesario.
- Vida útil de los equipos: 15 años.
- Precio del hidrógeno constante en todo el período.
- Amortización lineal con un valor residual de los equipos nulo.

Se ha tomado un año 0, en el que se lleva a cabo la instalación de todos los equipos. Estos equipos son los que se enumeran a continuación con sus respectivos costes:

EQUIPO	PRECIO UNIDAD	UNIDADES	TOTAL
Pila PEM	23.000,00 €	1	23.000,00 €
Baterías	325,38 €	16	325,38 €
Instalación H ₂	3.700,00 €	1	3.700,00 €
Botellas H ₂	265,00 €	20	5.300,00 €

Tabla 17. Coste de la inversión inicial por equipos.

El resto de los años, el único consumo que existirá será reponer el combustible necesario para que la pila funcione. Para el cálculo de este coste se han tomado los siguientes datos:

- Precio del hidrógeno: 3 €/kg
- Caudal necesario para generar 1 kW de potencia en la pila: 0,03 kg/h

Según estos datos, para nuestra pila de 4 kW necesitamos un caudal de alimentación de la pila de 0,12 kg/h. A continuación se calcula:

$$0,12 \frac{\text{kg H}_2}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{día}} \cdot 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \cdot 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} \cdot 3 \frac{\text{€}}{\text{kg H}_2} = 3.110,40 \text{ €/año}$$

Una vez conocidos todos estos gastos, completamos la siguiente tabla:

		AÑO	AÑO	AÑO	AÑO	AÑO	AÑO
		0	1	2	3	4	5
Ingresos		- €	- €	- €	- €	- €	- €
Gastos	Materiales	37.206,1 €	- €	- €	- €	- €	- €
	Pila PEM	23.000,0 €	- €	- €	- €	- €	- €
	Baterías	5.206,1 €	- €	- €	- €	- €	- €
	Instalación H ₂	3.700,0 €	- €	- €	- €	- €	- €
	Botellas H ₂	5.300,0 €	- €	- €	- €	- €	- €
	Combustible	- €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €
	Repuesto botellas	- €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €
TOTAL GASTOS		37.206,1 €	3.110,40 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €
Amortización		- €	2.480,4 €	2.480,4 €	2.480,4 €	2.480,4 €	2.480,4 €
GASTOS TOTALES		37.206,1 €	5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €

Figura 40. Tabla de análisis de inversión (I).

AÑO	AÑO	AÑO	AÑO	AÑO
6	7	8	9	10
- €	- €	- €	- €	- €
- €	- €	- €	- €	- €
- €	- €	- €	- €	- €
- €	- €	- €	- €	- €
- €	- €	- €	- €	- €
3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €
3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €
3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €
2.480,4 €	2.480,4 €	2.480,4 €	2.480,4 €	2.480,4 €
5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €

Figura 41. Tabla de análisis de inversión (II).

AÑO	AÑO	AÑO	AÑO	AÑO
11	12	13	14	15
- €	- €	- €	- €	- €
- €	- €	- €	- €	- €
- €	- €	- €	- €	- €
- €	- €	- €	- €	- €
- €	- €	- €	- €	- €
3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €
3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110,4 €	3.110 €
3.110,4 €	3.110,4 €	3.110 €	3.110,4 €	3.110,40 €
2.480,4 €	2.480,4 €	2.480,41 €	2.480,4 €	2.480,4 €
5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €	5.590,8 €

Figura 42. Tabla de análisis de inversión (III).

Para poder saber si en la actualidad este sistema de generación de energía eléctrica tiene sentido que se instale en una vivienda, debemos comparar su coste con el coste que supondría contratar durante los 15 años el suministro de energía a una compañía eléctrica.

Para ello calcularemos la cantidad de energía que nuestra instalación genera en los 15 años de análisis. Cuando conozcamos este valor, calcularemos su coste multiplicándolo por el precio actual de la energía eléctrica en España. Cuando tengamos ese dato podremos entonces analizar si nuestra instalación será rentable o no.

Calculamos primero la cantidad total de energía producida en los 15 años:

$$3,5792 \text{ kWh} \cdot \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} \cdot \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} \cdot \frac{12 \text{ meses}}{\text{año}} \cdot 15 \text{ años} = 463864,3 \text{ kWh}$$

A continuación calculamos el coste que supondría contratar este consumo de energía a una empresa eléctrica en España:

$$\text{Precio electricidad} = 0,2 \text{ €/kWh}$$

$$\text{Coste Total} = 463864,3 \text{ kWh} \cdot 0,2 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 92772,9 \text{ €}$$

Por otro lado calculamos el coste total de la instalación en los 15 años según los datos que se muestran en las tablas anteriores:

$$\text{Coste Anual} = 5590,8 \text{ €/año}$$

$$\text{Coste Total} = 5590,8 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot 15 \text{ años} = 83862 \text{ €}$$

9 Consideraciones finales y conclusiones

Existen cada vez más países desarrollados cuyo consumo de energía empieza a ser considerable. Toda esta demanda debe satisfacerse. La población va aumentando y el ser humano, al vivir en un mundo cada vez más tecnológico, es también cada vez más exigente y necesita estar conectado a la red. No obstante, es necesario reducir la cantidad de energía necesaria por unidad de crecimiento, para lograr así alcanzar un futuro sostenible.

De acuerdo con esto y con lo analizado al principio de este proyecto, existe una clara necesidad de desarrollar la tecnología de las pilas de combustible y otras asociadas al uso del hidrógeno como fuente de energía alternativa a los combustibles empleados en la actualidad. En algunos países como Estados Unidos y Japón, el hidrógeno y las pilas de combustible son ya tecnologías esenciales para el siglo XIX. En estos países se llevan a cabo fuertes inversiones y una importante actividad industrial en todo esta área, impulsando así la transición a la economía del hidrógeno. Sin embargo, esto no ocurre en Europa. Nuestro continente posee la capacidad, recursos y potencial para el desarrollo de estas nuevas tecnologías. No obstante, se necesitarían ciertas acciones que permitiesen un futuro en Europa basado en la energía del hidrógeno, como por ejemplo:

- Un marco político basado en futuras estrategias y políticas sobre transporte y energía que permitiera a las nuevas tecnologías del hidrógeno entrar en el mercado.
- Un plan estratégico de investigación a nivel europeo que oriente a los programas nacionales y comunitarios de forma concertada.
- Una estrategia de despliegue que permita pasar a esta tecnología de la fase de prototipo a la de demostración para finalmente llegar a la de comercialización.
- Una hoja de ruta que establezca objetivos y puntos de tomas de decisiones en materia de investigación, demostración, inversión y comercialización.

En este sentido, según un informe publicado por la Comisión Europea, [17] una propuesta esquemática de hoja de ruta europea para el hidrógeno y las pilas de combustible podría ser así:

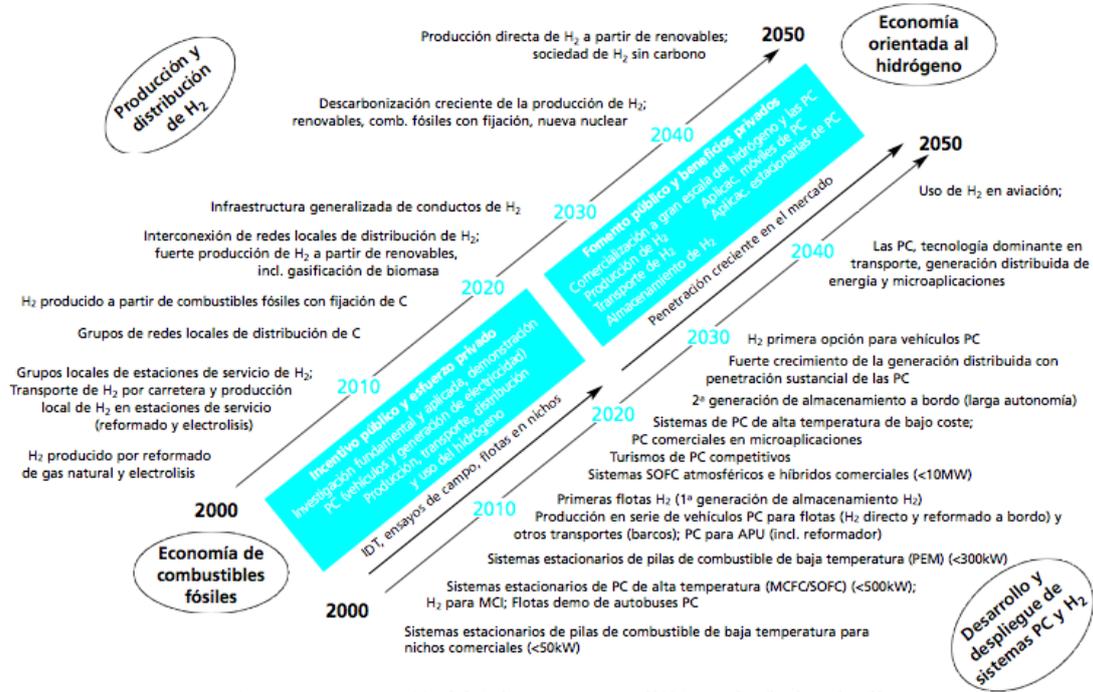


Figura 43. Visión futura del hidrógeno en Europa.

De cualquier forma, es cierto que existen en la actualidad varias barreras tecnológicas de desarrollo de estas pilas que se deben superar antes de que puedan ser introducidas plenamente en el sistema energético. Es por esto que existen en la actualidad varios frentes de investigación tratando de superar todos estos factores limitantes. A grandes rasgos se debe actuar en cuanto a:

- Reducción de costes: el coste actual de una pila de combustible se encuentra por encima de otras tecnologías equivalentes de producción de potencia. Por este motivo las pilas de combustible no son hoy en día una tecnología competitiva desde el punto de vista de la economía. El precio de una pila de combustible se encuentra dentro del rango de los 2000-6000 €/kW. Los mayores costes que tiene esta tecnología son los relacionados con:
 - Materiales como el platino en las pilas PEM que se emplean como catalizador.
 - Almacenamiento de hidrógeno.
 - Producción de hidrógeno.
- Aumento de la durabilidad: ésta dependerá del campo de aplicación de la pila de combustible. Por ejemplo, en el caso de la automoción, que es uno de los campos de aplicación con más futuro a corto plazo, se necesita una autonomía de 5000 horas para

automóviles y entre 20000-40000 para autobuses y camiones. Estos rangos son los mismos que para los motores de combustión interna. Para aplicaciones estacionarias, se exigen unas 40000 horas de funcionamiento estable. En la actualidad, las pilas de combustible no son capaces de alcanzar estos valores. Para aumentar la durabilidad de las pilas se trabaja en diferentes campos: el estudio de la contaminación de los catalizadores, composición de algunos de los componentes de las pilas (fundamentalmente de las placas bipolares), etc.

- Aspectos físicos: tamaño y peso. El sistema completo de generación de energía a partir del hidrógeno en una pila de combustible, incluyendo los equipos auxiliares necesarios, debe ser mejorado en cuanto a su peso y dimensiones. En aplicaciones móviles o en el sector del transporte, este aspecto es crucial. Se debe por tanto trabajar con fuerzas en este sentido.

En cuanto a lo que se refiere a este proyecto en el que se propone el empleo de la pila de combustible para el abastecimiento de energía eléctrica a una vivienda podemos concluir lo siguiente:

1. Se necesita aún un mercado más amplio en Europa que comercialice con diferentes modelos de pilas de combustible para poder ofrecer así a los ciudadanos mayores posibilidades. De esta forma, esta tecnología se podría adaptar perfectamente a las necesidades de cada hogar, simplificando así el esfuerzo de los ciudadanos.
2. La reducción de los costes es en este aspecto fundamental. Cuando el hidrógeno se convierta en un combustible comercializado a grandes escalas, su precio podrá disminuir de manera que alimentar la pila no suponga un coste tan elevado. Por otro lado, el precio total de la pila disminuirá cuando se consiga abaratar los materiales de los componentes de la misma, así como cuando se logre sistemas de almacenamiento de hidrógeno más económicos.
3. Según el análisis que se ha llevado a cabo en este trabajo, tomando la curva de demanda de energía típica de un hogar, esta instalación es rentable para un período de tiempo de 15 años de amortización. Tal y como se ha calculado en el capítulo anterior, el coste total de esta instalación es de 83.862,0 €. Mientras que contratar dicha cantidad de energía a una compañía eléctrica supondría en total unos 92772,9 €. Como podemos ver el coste en el caso de la pila de combustible es menor.

Referencias

- [1] Abay Analistas Económicos y Sociales (2014) *El impacto de las energías renovables en los hogares*. Disponible en <http://www.greenpeace.es>
- [2] Aguer Hortal M., Miranda Barreras A.L. (2007) *El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- [3] Air Products. (2012) *Air Products`U.S. Gulf Coast Hydrogen network*.
- [4] Amara, Grupo Iberdrola (2012) *Estudio sobre el consumo energético del sector residencial en España*. Disponible en <http://www.amara.es>
- [5] Américo H., Visintin A. (2010). *Hidrógeno, combustible del futuro: ¿por qué, cómo y dónde?* Pg. 1-9. Disponible en <http://www.inifta.unlp.edu.ar/extension/Hidrogeno.pdf>
- [6] Argumosa M. (2016) *Uso de pilas de combustible en UAVs*. Madrid, España.
- [7] Asensio J.A., Peña J., Pérez-Coll D., Ruiz-Morales J.C., Marrero-Lopez D., Nuñez P., Ballesteros B., Canales-Vazquez J., Borrós S., Gómez-Romero P. (2011) *Pilas de combustible de membrana polimérica*. Pg. 246-258. Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología, Barcelona.
- [8] Barbir, F. (2005). *PEM fuel cells Theory and Practice*. Amsterdam: Elsevier Academic.
- [9] Barreras F., Lozano A. (2012) *Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM*. Zaragoza, España.
- [10] BESEL S.A., IDAE. (2007) *Biomasa: gasificación*. Madrid, España.
- [11] Borgogno, Fabio Germán. (2010) *Compendio de propiedades: tabla de entalpía de formación, energía libre de Gibbs y entropía de formación de compuestos inorgánicos*. Argentina.
- [12] British Petroleum (2015). *BP Statistical Review of World Energy 2015 Full Report*. British Petroleum. Pg 48. Disponible en <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- [13] Castells, X. and Jurado, L. (2012). *El hidrógeno y las pilas de combustible*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.

- [14] Comisión Europea. *La energía del hidrógeno y las pilas de combustible: una visión para nuestro futuro*.
- [15] Chinarro E., Colomer M.T., Jurado J.R. (2002) *Red de pilas de combustible del CSIC*. Madrid, España.
- [16] Departamento de Integración en red de energías renovables (CENER). *Definición y análisis de un edificio de viviendas plurifamiliar con aportación de hidrógeno*.
- [17] E4tech (2014) *The Fuel Cell Industry Review 2014*. Disponible en <http://www.fuelcellindustryreview.com>
- [18] García-Conde A. (2004). *Hacia la economía del hidrógeno*. Pg. 1-10. Disponible en https://www.iberdrola.es/fundiber/PDF/eyds_150404-garciaconde.pdf
- [19] Guervós Sánchez M.E. (2003) *Principales técnicas de almacenamiento de hidrógeno*. Pg 56-68
- [20] Guervós Sánchez M.E. (2003) *Tecnología para el hidrógeno: pila de combustible*. Pg 29-40.
- [21] Gutiérrez Jodra, L. (2005). *El hidrógeno, combustible del futuro*. Rev.R.Acad. Cienc.Exact.Fís.Nat. Vol.99, pg 49-67.
- [22] Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). *Hacia las fuentes de energía "más limpias"*. Zaragoza, España.
- [23] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011) *Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-2020*. Madrid.
- [24] Iranzo J.A. (2010) *Desarrollo y validación experimental de un modelo computacional de pilas de combustible tipo PEM y su aplicación al análisis de monoceldas*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- [25] Larminie, J. and Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained*. Chichester, West Sussex: J. Wiley.
- [26] Mehta V., Joyce S. (2002) *Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing*. Journal of Power Sources. Vol. 114 (1) Pg. 32-53
- [27] Montes M^a José, Abánades A., Martínez-Val J.M. *Producción de hidrógeno a partir de energía solar*.
- [28] Pino Priego, A. (2009) *Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de hidrógeno*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- [29] Plataforma Tecnológica Española del Hidrógeno y de las pilas de combustible. (2013) *Expectativas de creación de empleo en hidrógeno y pilas de combustible en España*. Madrid, España.

[30] Salva Aguirre, J.A. (2012) *Modelo Unidimensional de una pila de combustible tipo PEM y validación experimental*. Proyecto Fin de Máster. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.

[31] Vielstich, W., Lamm, A., Gasteiger, H. and Yokokawa, H. (2003). *Handbook of fuel cells*. Chichester, England: Wiley.

Páginas web consultadas:

[32] <http://www.ree.es>

[33] <http://www.fuelcelltoday.com>

[34] <http://www.fuelcell.org>

[35] <https://pilasdecombustible.wordpress.com>

[36] <http://www.appice.es>

[37] <http://www.ec.europa.eu>

[38] <http://www.euribor.com.es>

[39] <http://www.pilasde.com>

[40] <http://www.energiasostenible.net>

[41] <http://www.ajusath.com>

[42] <http://www.panasonic.co.jp>

[43] <http://www.ocu.org>