

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**MODELADO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE
DEL TIPO PEM PARA USO EN LA
AUTOMOCIÓN**

Autor:

Juan Carlos Rodríguez Granadillo

Tutor:

Óscar García Afonso

Septiembre, 2020



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**MODELADO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE
DEL TIPO PEM PARA USO EN LA
AUTOMOCIÓN**

ÍNDICE GENERAL

Autor:

Juan Carlos Rodríguez Granadillo

Tutor:

Óscar García Afonso

Septiembre, 2020



Índice

Hoja de identificación.....	8
Resumen.....	9
Abstract	10
1.Introducción	11
1.1 Motivación	11
1.2 Alcance.....	14
1.3 Objetivos	14
1.4 Herramientas informáticas utilizadas	14
2. Marco teórico	15
2.1 Pilas de combustible de hidrógeno.....	15
2.2 Tipos de pilas de combustible de H ₂	16
2.2.1 PEMFC. Pila de combustible de intercambio protónico	18
2.2.1.1 Componentes de una PEMFC.....	18
2.2.1.2 Funcionamiento de una PEMFC.....	22
2.2.1.3 Rendimiento de una pila de combustible del tipo PEMFC.....	24
2.2.1.4 Voltaje reversible o voltaje ideal de una PEMFC	26
2.2.1.5 Eficiencia de una pila de combustible.	29
2.2.1.6 Calor producido en una pila de combustible.	30
2.2.1.7 Pérdidas por activación.....	34
2.2.1.8 Pérdidas por transporte de carga o pérdidas óhmicas.	36
2.2.2.9 Pérdidas por transporte de masa o pérdidas por concentración... ..	37
2.2.2.10 Balance de flujos en una PEMFC	40
2.2.2.11 Modelos matemáticos de pilas de combustible	41
2.3 Dimensionamiento de intercambiadores de calor compactos.....	41
2.4 Vehículos de pilas de combustible.....	43
2.4.1 Comparativa entre vehículos de pila de combustible.	43
2.4.2 Estructura de vehículos de pila de combustible.....	47
3.Metodología.	49
3.1 Modelo utilizado para simular una PEMFC.	49
3.2 Pila de combustible a utilizar. Módulo FCvelocity HD-6 de Ballard.....	52
3.3 Validación del modelo	54
3.4 Área superficial de un radiador para el sistema de refrigeración.....	54

4.Verificación y validación del modelo	56
5.Operación de la PEMFC y cálculos térmicos.....	58
5.1 Consumo de reactantes de la pila en su rango de operación.....	58
5.2 Calor producido por la pila bajo diferentes cargas.	60
5.3 Área superficial necesaria para el radiador de la PEMFC.	63
6.Conclusiones.....	66
6.1 Conclusiones generales	66
6.2 Trabajos futuros	67
6.3 Conclusions	67
7.Referencias	69

Índice

I.0 Introducción	7
I.1 Modelo de la pila de combustible	7
I.1.1 Control del flujo de combustible.....	7
I.1.2 Bloque de la pila de combustible (Fuel cell stack)	8
I.1.2.1 Funcionamiento del bloque de la pila de combustible.	10
I.1.3 Convertidor DC/DC (DC/DC Boost converter).....	11
I.1.4 Carga eléctrica (Load).....	12
I.1.5 Sección de procesado y preparación de resultados	13
I.1.6 Sección de cálculo de flujos entálpicos y calor producido	14
I.2 Operación de la pila de combustible.....	22
I.2.1 Parámetros de funcionamiento eléctricos	22
I.2.2 Flujos entrantes y consumo de reactantes	23
I.2.3 Datos térmicos de la operación de la pila.	24
I.3 Cálculo de área superficial necesaria para el radiador de la PEMFC	25
I.4 Tablas termodinámicas utilizadas	28
I.5 Fichas técnicas	34

Lista de abreviaturas y símbolos

Lista de abreviaturas:

Abreviatura	Descripción
AFC	Pila de combustible alcalina (Alkaline fuel cell)
ASR	Resistencia específica por área (Area specific resistance)
E.E.U.U	Estados Unidos de América
HHV	Poder calorífico superior (Higher heating value)
LHV	Poder calorífico inferior (Lower heating value)
MCFC	Pila de combustible de carbonato fundido (Molten carbonate fuel cell)
MCI	Motor de combustión interna
MCIA	Motor de combustión interna alternativo
MEA	Ensamble membrana electrodo. (Membrane Electrode Assembly)
NAFION	Membrana polimérica de intercambio protónico. Nombre comercial.
PAFC	Pila de combustible de ácido fosfórico (Phosphoric acid fuel cell)
PEM	Membrana de intercambio protónico (Polymer electrolyte membrane)
PEMFC	Pila de combustible de membrana de intercambio protónico (Polymer electrolyte membrane fuel cell)
SOFC	Pila de combustible de óxido sólido (Solid oxide fuel cell)
UE	Unión europea

Lista de símbolos:

Símbolo	Descripción
$\Delta \hat{g}_{rxn}$	Variación de la energía libre de Gibbs de reacción.
$\Delta \hat{h}_{rxn}^0$	Variación de la entalpía de reacción en condiciones estándares.
$\Delta \hat{s}_{rxn}^0$	Variación de la entropía de reacción en condiciones estándares.
$\hat{h}_f^0(X)$	Entalpía de formación de la especie "X".
$\hat{s}^0(X)$	Entropía estándar de la especie "X".
W_e	Trabajo eléctrico.
E	Diferencia de potencial.
Q_e	Carga eléctrica.

n	Número de electrones.
F	Constante de Faraday (96485 C/mol). Factor de corrección para el cálculo de la diferencia media logarítmica de temperatura en un intercambiador de calor a flujo cruzado.
E^0	Voltaje ideal de una pila de combustible a condiciones estándares.
$\Delta\hat{g}_{rxn}^0$	Variación de la energía libre de Gibbs de reacción en condiciones estándares.
$\Delta\hat{s}_{rxn}$	Variación de la entropía de reacción.
T_0	Temperatura estándar (298,15 K)
T	Temperatura.
R	Constante universal de los gases. (8,314 J/molK)
$a_{productos}^{vi}$	Actividad de los productos en una reacción electroquímica.
$a_{reactantes}^{vi}$	Actividad de los reactantes en una reacción electroquímica.
p_x	Presión parcial de la especie “x”
p^0	Presión estándar (1 atm).
ε_{Termo}	Eficiencia ideal de una pila de combustible.
V	Voltaje real producido por la pila, después de pérdidas.
ε_{Volt}	Eficiencia del voltaje de la pila.
ε_{Comb}	Eficiencia del uso de combustible.
i	Corriente eléctrica.
u_x	Flujo molar de la especie “X”
λ	Factor estequiométrico.
\dot{Q}	Flujo de calor. Razón de transferencia de calor.
\dot{H}	Flujo entálpico.
\dot{H}_{ent}	Flujo entálpico de las especies entrantes a la PEMFC.
$\Delta\hat{h}$	Variación de entalpía en la reacción electroquímica.
$\Delta\hat{h}_{HHV}$	Poder calorífico superior.
$\Delta\hat{h}_{LHV}$	Poder calorífico inferior.
\dot{m}	Flujo másico.
C_p	Calor específico a presión constante.
h_{HHV}^0	Poder calorífico superior a 0°C.
h_{fg}^0	Entalpía específica de vaporización del agua a 0°C.
η_{act}	Pérdidas de voltaje por activación.
j	Densidad de corriente.
j_0	Densidad de corriente de intercambio.

α	Coefficiente de transferencia en barreras de activación.
η_{ohm}	Perdidas de voltaje óhmicas.
R_{ohm}	Resistencia óhmica de una pila de combustible.
R_{elec}	Resistencia al transporte de electrones.
$R_{iónica}$	Resistencia al transporte de iones.
L	Longitud del conductor de carga.
A	Área del conductor.
σ	Conductividad del conductor.
ASR_{ohm}	Resistencia óhmica específica por unidad de área.
$\eta_{conc,Nerst}$	Pérdidas por concentración basadas en la ecuación de Nernst.
c_R^0	Concentración de reactantes en la capa de catálisis.
c_R^*	Concentración de reactantes en los canales de flujos.
j_L	Densidad de corriente limitante.
D^{eff}	Difusividad efectiva de reactantes.
δ	Espesor del electrodo o capa de difusión.
$\eta_{conc,BV}$	Pérdida de voltaje por concentración relacionada a la activación (Butler-Volmer).
η_{conc}	Pérdidas de voltaje por concentración.
c	Constante de las pérdidas por concentración en la pila.
J_{H^+}	Flujo molar de iones de H^+ a través del electrolito.
$J_{H_2}^A$	Flujo molar neto de hidrógeno en el ánodo de la pila de combustible.
$J_{O_2}^C$	Flujo molar neto de oxígeno en el cátodo de la pila de combustible.
$J_{H_2O}^C$	Flujo molar de agua producida en el cátodo
U	Coefficiente de transferencia de calor total
A_s	Área superficial de transferencia de calor
ΔT_{ml}	Diferencia media logarítmica de temperatura
$\Delta T_{ml,CF}$	Diferencia media logarítmica de temperatura para intercambiadores de calor a contraflujo.
T_{ent}	Temperatura del fluido del lado de la coraza del intercambiador (Aire en el caso del radiador de un automóvil)
t_{ent}	Temperatura del fluido del lado del tubo en un intercambiador de calor. (Refrigerante en el caso del radiador de un automóvil)
n_{celdas}	Número de celdas de combustible en la pila de combustible.
\dot{W}_e	Potencia eléctrica.
P_i	Presión total de la especie "i".

ÍNDICE GENERAL
LISTA DE AVREVIATURAS Y SÍMBOLOS

\dot{V}_i	Flujo volumétrico de la especie “i”.
M_{m_i}	Masa molar de la especie “i”

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**MODELADO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE
DEL TIPO PEM PARA USO EN LA
AUTOMOCIÓN**

MEMORIA

Autor:

Juan Carlos Rodríguez Granadillo

Tutor:

Óscar García Afonso

Septiembre, 2020



Índice

Hoja de identificación.....	8
Resumen.....	9
Abstract	10
1.Introducción	11
1.1 Motivación	11
1.2 Alcance.....	14
1.3 Objetivos	14
1.4 Herramientas informáticas utilizadas.....	14
2. Marco teórico	15
2.1 Pilas de combustible de hidrógeno.....	15
2.2 Tipos de pilas de combustible de H ₂	16
2.2.1 PEMFC. Pila de combustible de intercambio protónico	18
2.2.1.1 Componentes de una PEMFC.....	18
2.2.1.2 Funcionamiento de una PEMFC.....	22
2.2.1.3 Rendimiento de una pila de combustible del tipo PEMFC.....	24
2.2.1.4 Voltaje reversible o voltaje ideal de una PEMFC	26
2.2.1.5 Eficiencia de una pila de combustible.	29
2.2.1.6 Calor producido en una pila de combustible.	30
2.2.1.7 Pérdidas por activación.....	34
2.2.1.8 Pérdidas por transporte de carga o pérdidas óhmicas.	36
2.2.2.9 Pérdidas por transporte de masa o pérdidas por concentración... ..	37
2.2.2.10 Balance de flujos en una PEMFC	40
2.2.2.11 Modelos matemáticos de pilas de combustible	41
2.3 Dimensionamiento de intercambiadores de calor compactos.....	41
2.4 Vehículos de pilas de combustible.....	43
2.4.1 Comparativa entre vehículos de pila de combustible.	43
2.4.2 Estructura de vehículos de pila de combustible.....	47
3.Metodología.	49
3.1 Modelo utilizado para simular una PEMFC.	49
3.2 Pila de combustible a utilizar. Módulo FCvelocity HD-6 de Ballard.....	52
3.3 Validación del modelo	54
3.4 Área superficial de un radiador para el sistema de refrigeración.....	54
4.Verificación y validación del modelo	56

5.Operación de la PEMFC y cálculos térmicos.....	58
5.1 Consumo de reactantes de la pila en su rango de operación.....	58
5.2 Calor producido por la pila bajo diferentes cargas.	60
5.3 Área superficial necesaria para el radiador de la PEMFC.	63
6.Conclusiones.....	66
6.1 Conclusiones generales	66
6.2 Trabajos futuros	67
6.3 Conclusions.....	67
7.Referencias	69

Índice de figuras

1. Introducción

Figura 1.1. Estructura simplificada del plan presentado por la comisión europea [13] 13

2. Marco teórico

Figura 2.1. Representación de una celda de una PEMFC simple [17]. 19

Figura 2.2. Despiece de una PEMFC simple [17]. 19

Figura 2.3. A) Un canal de serpentina. B) Dos canales de serpentina. C) Cuatro canales de serpentina. D) Cuatro canales de serpentina en simetría [21]. 21

Figura 2.4. Despiece de una pila de combustible del tipo PEM (Stack) [22]. 22

Figura 2.5. Funcionamiento de una PEMFC [17]. 23

Figura 2.6. Curva de polarización y curva de densidad de potencia de una celda de una pila de combustible [14]. 24

Figura 2.7. Curva de polarización y regiones de pérdidas [14]. 25

Figura 2.8. Diagrama del volumen de control para el balance de energía. 33

Figura 2.9. Efecto de las pérdidas por concentración en el rendimiento de una pila de combustible. [14]. 39

Figura 2.10. Esquema de un intercambiador de calor con flujos [26]. 42

Figura 2.11. Diagrama del factor F de un intercambiador de flujo cruzado no mezclado [26]. 43

Figura 2.12. Mapa mostrando las estaciones de recarga públicas de hidrógeno en los EEUU a 28 de junio de 2020 [28]. 46

Figura 2.13. Mapa mostrando las estaciones de recarga públicas de vehículos eléctricos en parte de los EEUU a 28 de junio de 2020 [29]. 46

Figura 2.14. Estructura del modelo 2020 del Toyota Mirai resaltando los componentes básicos. [3]. 47

3. Metodología

Figura 3.1. Estructura del modelo de la pila de combustible. 50

Figura 3.2. Módulo *FCvelocity HD-6* de Ballard [34] 52

Figura 3.3. Diagrama de bloque del módulo *FCvelocity HD-6* [32]. 53

Figura 3.4. Volumen de control para el cálculo del área de intercambio del radiador. 55

4. Verificación y validación del modelo

Figura 4.1. Curvas de polarización y potencia del módulo *FCvelocity HD-6* obtenida con los datos de operación nominales. 56

Figura 4.2. Comparación de las curvas de polarización del módulo *FCvelocity HD-6*. 57

5. Operación de la PEMFC y predimensionamiento del intercambiador de calor necesario

Figura 5.1. Flujos de reactantes de la pila en su rango de operación. 58

Figura 5.2. Flujo de reactantes de la pila en un estudio transitorio. 59

Figura 5.3. Potencia eléctrica y calor producido por la PEMFC. 61

Figura 5.4. Flujos entálpicos de las especies en la pila a una carga eléctrica de 150 kW. 62

Figura 5.5. Flujo de calor producido por la pila en un estudio transitorio. 63

Figura 5.6. Flujos de masa de aire y agua necesarios para transferir el calor producido por la pila en el radiador. 65

Índice de tablas

2. Marco teórico

Tabla 2.1. Comparación entre tipos de pilas de combustibles enfocadas en características generales.....	17
Tabla 2.2. Entalpías de formación y entropías de especies.	27
Tabla 2.3. Comparación entre vehículos impulsados por PEMFC.....	45

3. Metodología

Tabla 3.1. Parámetros del Módulo <i>FCvelocity HD-6</i> de Ballard [32].....	53
Tabla 3.2. Valores de coeficientes de transferencia de calor totales.	55

5. Operación de la PEMFC y predimensionamiento del intercambiador de calor necesario

Tabla 5.1. Valores de las temperaturas de los flujos del radiador	64
Tabla 5.2. Valores de las áreas de intercambio necesarias en cada caso.....	64

Hoja de identificación

- **Título del proyecto:**

Modelado de una pila de combustible del tipo PEM para uso en la automoción.

- **Peticionario:**

Encargado por: Escuela superior de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de La Laguna.

Dirección: Camino San Francisco de Paula, s/n, apartado 456, C.P. 38200.San Cristóbal de La Laguna, Tenerife.

- **Autor:**

Nombre: Juan Carlos Rodríguez Granadillo.

DNI: 54670253N

Correo: alu0101072210@ull.edu.es

- **Tutoría:**

Departamento: Departamento Ingeniería Industrial. Área de Máquinas y Motores Térmicos.

Nombre: Óscar García Afonso.

Correo: ogarciaa@ull.edu.es

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado presenta el estudio de una pila de combustible del tipo PEM para uso en la automoción, específicamente de vehículos pesados. Para ello se ha utilizado un modelo matemático implementado en SimScape Electrical, el cual permite la simulación eléctrica de una pila de combustible en diferentes condiciones de operación. Como contribución, se ha dotado al modelo la capacidad de simulación térmica, con el objetivo de calcular el calor producido por la PEMFC en su rango de operación bajo una serie de parámetros y condiciones.

El modelo desarrollado de una PEMFC de aplicación en transporte pesado ha sido verificado y validado en todo su rango de operación. Los resultados concuerdan con estudios realizados sobre la misma y los datos de este tipo de pilas de combustible expuestos en la literatura. A través de la simulación térmica se ha logrado determinar el calor producido por la pila en su rango de operación, el cual fue utilizado para el cálculo del área superficial necesaria del intercambiador de calor (radiador) necesario para el sistema de refrigeración de la PEMFC. Esta área fue comparada con el caso de que se tuviera que refrigerar un MCIA, afirmando que el área superficial del intercambiador de calor de estos últimos es inferior a el área superficial de las PEMFC. Comprobando que el sistema de refrigeración de una PEMFC es más complejo que el de un MCIA en vehículos pesados.

Abstract

This Undergraduate Thesis presents the study of a PEM fuel cell used in automotive applications, specifically on heavy duty transport. A mathematical model included in SimScape Electrical was used, which allows the electrical simulation of a fuel cell through a range of parameters and conditions. As a contribution, a thermal simulation module was implemented on the model, that allows the calculation of the heat produced by the PEMFC in different operating conditions.

The model developed of a PEMFC used for heavy duty transport applications was verified and validated on all its operating range. Obtaining matching results with studies done on the simulated fuel cell and representative data of PEM fuel cells. Through the thermal simulation the heat produced in the fuel cell was determined, which then was used for the calculus of the surface area of the necessary heat exchanger (radiator) for the cooling system of the PEMFC. A comparison of this surface area and the surface area needed for an ICE was done, proving the need for more surface area on a PEMFC system than an ICE one, making the cooling system of the former one more complex than of the later one on heavy duty vehicles.

1.Introducción

1.1 Motivación

Durante las últimas décadas la industria del transporte ha estado evolucionando constantemente. Los vehículos eléctricos que antes se pensaban imposibles han surgido y han tomado al mercado del transporte por sorpresa durante la última década, posicionándose como una alternativa a los vehículos tradicionales impulsados por motores de combustión interna.

Un vehículo eléctrico se encuentra impulsado por un motor eléctrico, el cual principalmente esta alimentado por baterías. Este método de alimentación del motor es el más común, donde las baterías se recargan conectando al vehículo a una red eléctrica a través de cargadores. Sin embargo, la velocidad de recarga de las baterías es lenta, rondando las 5 horas en promedio y en casos excepcionales como los supercargadores Tesla unos 20 minutos para unos 248 km. [1] Estos tiempos de recarga hacen el uso de baterías alimentación un inconveniente para aquellas aplicaciones donde el tiempo es de suma importancia, como el transporte comercial. Es decir, en aplicaciones donde los vehículos no puedan estar fuera de operación ya que producen pérdidas, como vehículos pesados utilizados para transportar mercancía y de transporte público.

Una alternativa para alimentar a los motores eléctricos, especialmente en vehículos pesados, tiene que brindar respuesta a los problemas del tiempo de recarga de la batería, así como de la cantidad de espacio y peso que puede llevar el vehículo que se tiene que reservar para las baterías. Es en ese contexto donde la pila de combustible toma fuerza. Este dispositivo funciona aprovechando la energía que contiene un combustible, como el hidrógeno, a través de una reacción electroquímica produciendo una corriente eléctrica. A diferencia de los vehículos eléctricos alimentados por baterías, un vehículo alimentado por una pila de combustible tiene la ventaja de pesar menos, el almacenamiento de energía ocupa menos espacio (tanques de hidrógeno en comparación a baterías), pueden encenderse en frío y el tiempo de recarga de combustible es equiparable a un vehículo diésel. Es por ello que se es más beneficioso el uso de pilas de combustible en vehículos pesados, como autobuses y camiones, en comparación a alimentados solamente por baterías [2].

Sin embargo, actualmente la infraestructura de una red de distribución de hidrógeno para el uso en vehículos es limitada. En comparación a la red de cargadores de vehículos eléctricos, las estaciones de recarga de hidrógeno son muy reducidas y se encuentran ubicadas en regiones específicas. Ejemplo de ello es la distribución de estaciones de recarga de hidrógeno en los E.E.U.U, donde solo hay estaciones de recarga de hidrógeno en a la costa oeste, específicamente en California, cuando estaciones de recarga de coches eléctricos se distribuyen por todo el país. Esto se debe en parte a que la tecnología se encuentra en desarrollo y se está estudiando la posibilidad de su aplicación en una zona de control como California, bajo fabricantes como Toyota [3], Hyundai [4] y Honda [5] en el caso de turismos. En el caso de vehículos pesados, fabricantes como Toyota [6], Hyundai [7] y Ballard [2], han desarrollado tecnologías y las han

implementado o las implementarán en el mercado, demostrando el alto interés y la importancia de dichos vehículos.

En las próximas décadas esta tecnología puede desarrollarse hasta un punto en el que sea común ver vehículos de pilas de combustible alimentadas por hidrógeno, así como lo fue para los vehículos eléctricos de baterías, pero con un enfoque hacia los vehículos pesados. Ejemplo de ello son las reducciones en el costo de la producción de hidrógeno. Desde el 2010 el coste de producción ha disminuido un 60%, de unos 10 a 15 dólares por kg de hidrógeno, a unos 4 a 6 dólares actualmente. Se predice que esta disminución de los costes de producción continuará hasta el 2030, desde 6 dólares por kilogramo producido a través de electrolisis con energía eólica marina (actualmente), hasta un costo de unos 2,5 dólares proyectados, otra reducción del 60 %. [8]. Con los costos de producción, preparación y mantenimiento de las instalaciones el precio del kg de hidrógeno para la recarga de vehículos en el 2030 puede llegar a estar cercano a los 4 dólares, que comparado con el rango de los 12 a 17 dólares actuales, permitiría recargar un vehículo como el Toyota Mirai 2020 (autonomía de 500 km) con unos 40 dólares [3]. Lo cual si se compara con un Toyota Camry LE Híbrido 2020 (autonomía de 1104 km) [9], cuyo tanque de gasolina es de 60 litros la recarga costaría, bajo precios de gasolina actuales (a 20 de julio de 2020 y en España [10]), unos 79,8 dólares. Claro está que estos precios no son equiparables a los costes de recarga de los vehículos eléctricos de batería, donde el kWh ronda los 0,12 dólares por kWh, y considerando un vehículo como el Tesla Model 3 Standard Range Plus (autonomía entre 220 y 455 km [1]), con una batería de 50 kWh y una eficiencia de carga del 85%, se tiene un coste de recarga de unos 7 dólares [11]. Aun así, el precio de recarga predicho para un vehículo de pila de combustible a 2030 es competitivo con los de gasolina y diésel. Con mayor importancia para estos últimos donde las desventajas de utilizar baterías para descarbonizar vehículos pesados, que usan mayoritariamente motores diésel, se pueden resolver con pilas de combustible por razones anteriormente mencionadas.

Asimismo, la evolución de la infraestructura de distribución de hidrógeno, las restricciones sobre los vehículos de motores de combustión interna (especialmente los motores diésel), y la transición a las tecnologías cero emisiones son varias de las razones por las cuales las pilas de combustible tendrán una mayor importancia en el futuro, de las que ya empiezan a tener ahora. Muestra de ello es la reciente estrategia divulgada por la comisión europea (European Commission) el pasado 8 de julio de 2020, donde expresan un plan para utilizar el hidrógeno en conjunto con energías renovables, como uno de los soportes para llegar al objetivo de hacer el territorio europeo neutral en carbono para el año 2050 [12], reducir las emisiones de gases invernadero para el año 2030 y recuperar la economía de la UE (luego de la crisis del COVID-19). La estrategia simplificada puede observarse en la figura 1.1. Para la aplicación de la misma se planea que se realicen inversiones para fomentar:

- La producción de hidrógeno limpio, es decir hidrógeno producido a través de electrolizadores alimentados con energías renovables (solar, eólica). Se esperan investigaciones de electrolizadores de mayor tamaño y eficiencia, que permitan reducir el costo de la producción.

- Desarrollo de la infraestructura de distribución y almacenamiento del hidrógeno. Con ello se puede reutilizar las estructuras de distribución y almacenamiento de gas natural, con sus respectivas adaptaciones.
- Desarrollo del hidrógeno en la industria, como por ejemplo la utilización del mismo para la producción de acero (reemplazando el uso de carbón para alimentar a los hornos, con hidrógeno en el proceso de reducción directa), el uso del mismo en la industria química y en la petroquímica.
- Y se impulsará al desarrollo del sector del transporte, especialmente a los vehículos pesados por carretera, el transporte aéreo (combustibles sintéticos), marítimo y ferroviario [12].

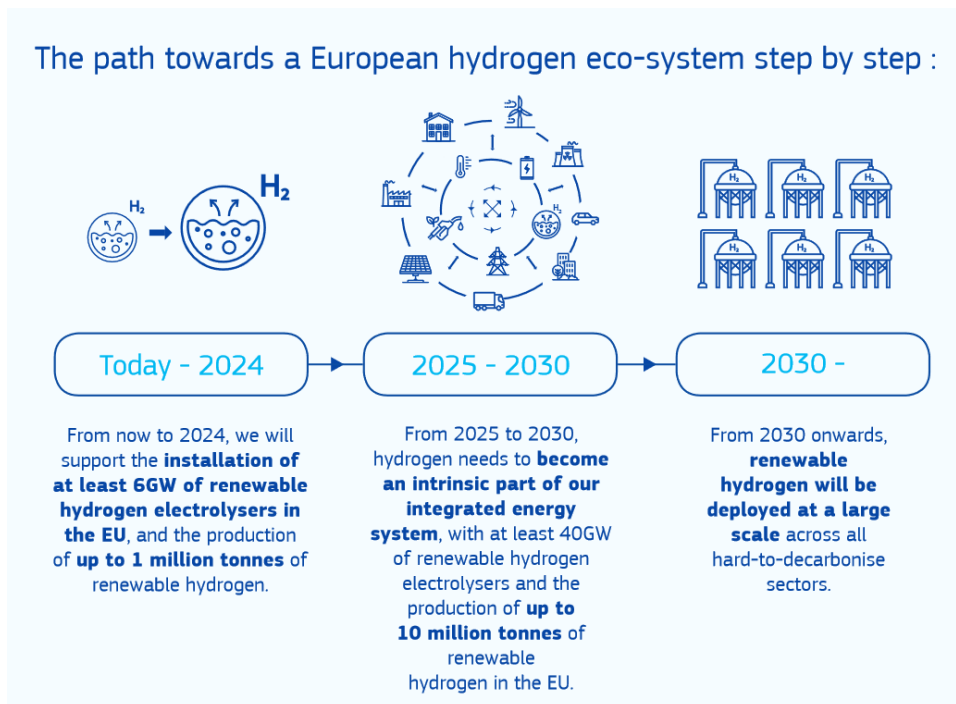


Figura 1.1. Estructura simplificada del plan presentado por la comisión europea [13].

El interés sobre el hidrógeno viene debido a que tiene una gran cantidad de usos, entre los que destacan el uso como combustible, como vector energético, como materia prima para varios procesos y su uso para almacenar energía. Esta última es relevante en sistemas eléctricos aislados como Canarias, donde hay una cantidad de potencia instalada de energías renovables, pero no hay una manera factible de almacenar tal energía a día de hoy. Esta energía puede utilizarse para producir hidrógeno a través de electrolisis, para poder ser aprovechado en la variedad de usos anteriormente mencionados.

Es por ello, que debido a un interés cada vez mayor en las tecnologías que envuelven al hidrógeno, y al futuro que tendrán estas en Europa, se establece que el motivo de este Trabajo de Fin de Grado es la investigación de las pilas de combustible, su aplicación en el mercado de transporte y la aplicación de las bases teóricas para el estudio de una pila de combustible utilizada en automoción.

1.2 Alcance

El trabajo expuesto contempla (el desarrollo de un modelo de una pila de combustible del tipo PEM, su verificación, así como el cálculo del área superficial del intercambiador de calor necesario para el sistema de refrigeración de la pila. Para ello se basará el estudio en una simulación de una pila de combustible conocida utilizando un programa informático, la determinación del calor producido y el prediseño del intercambiador de calor a través del uso de conocimientos de termodinámica y electroquímica.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio del campo de las pilas de combustible, con un enfoque hacia las pilas de combustible utilizadas en la automoción, específicamente en vehículos pesados.

Los objetivos específicos serían los siguientes:

- Estudio de las bases teóricas del funcionamiento de las pilas de combustible.
- Comparación del modelo matemático con valores experimentales provenientes de un estudio, con el fin de la validación del mismo.
- Aplicación de los conocimientos adquiridos en materia térmica para el cálculo del calor producido por la pila.
- Cálculo del área superficial del intercambiador de calor necesario para el sistema de refrigeración de la pila de combustible, y su comparación con el uno de un MCIA.

1.4 Herramientas informáticas utilizadas

- Simulink (Simscape Electrical), Matlab R2018a. Implementado con Matlab, Simulink es una herramienta gráfica basada en una estructura de diagrama de bloques, que permite el modelado y la simulación de sistemas.
- Paquete Office profesional plus 2019: Excel, Word, Powerpoint.
- Scanit 2.0.7.0. Software que permite extraer datos de gráficas.

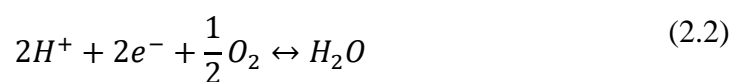
2. Marco teórico

2.1 Pilas de combustible de hidrógeno

Una pila de combustible es un dispositivo utilizado para aprovechar la energía de un combustible para producir energía eléctrica bajo una reacción electroquímica. En comparación, un MCI funciona tomando un combustible, quemándolo y convirtiendo la energía del combustible en energía mecánica y luego en energía eléctrica [14].

Dentro de las posibles clasificaciones de las pilas de combustible, la principal se basa en los reactantes utilizados, en especial el combustible, siendo comunes el hidrógeno, el metanol, el metano y el monóxido de carbono. En una pila de combustible que funciona con hidrógeno como combustible y oxígeno como comburente se puede aprovechar la energía almacenada en el hidrógeno si se lo hace reaccionar con el oxígeno. Aunque se puede aprovechar la energía a partir de la combustión del hidrógeno en un MCI, la producción directa de energía eléctrica a partir de la reacción presenta una mayor eficiencia. Esto es posible conseguirlo aprovechando la transferencia de electrones presente en la reacción para formar enlaces de hidrógeno-oxígeno y romper los enlaces H_2 y los enlaces O_2 . De manera que la función de una pila de combustible es forzar que los electrones fluyan por un circuito externo a través de una carga, y se produzca electricidad.

A continuación, se muestra la reacción de combustión del hidrógeno, presente en la gran mayoría de las pilas de combustibles comerciales utilizadas para automoción en el año 2020 [3-5, 15].



Las ecuaciones 2.1 y 2.2 representan las reacciones químicas presentes en el ánodo y el cátodo de la pila de combustible. La ecuación 2.1 muestra la oxidación del hidrógeno en el ánodo, mientras que la ecuación 2.2 muestra la reducción del oxígeno con la formación de agua en el cátodo. Los electrones liberados por la oxidación del hidrógeno se hacen pasar por un circuito externo para la producción de energía eléctrica, mientras que los iones de hidrógeno se transportan a través un electrolito que sólo dejara pasar tales iones. Finalmente, los electrones e iones de hidrógeno llegan al cátodo, donde reaccionan con el oxígeno y forman agua.

2.2 Tipos de pilas de combustible de H₂

Existen diferentes maneras por las cuales se pueden clasificar a las pilas de combustible, desde el rango de potencia que producen, los materiales usados para su fabricación, hasta el combustible que utilizan. Generalmente la clasificación utilizada se basa en el tipo de electrolito utilizado, que es el material que permite el transporte de iones desde el ánodo al cátodo de la pila. A continuación, se recogen los tipos de pilas de combustible comúnmente utilizadas que funcionan con hidrógeno como combustible (aunque algunas de ellas pueden funcionar con metanol, metano y monóxido de carbono), así como en la tabla 2.1 [16] se muestran una serie de características de cada tipo de manera más específica.

- Alcalina (AFC): este tipo de pilas utilizan una membrana alcalina para dejar pasar los protones del combustible. Capaces de producir potencias en el rango de vatios a kilovatios. Son susceptibles a envenenamiento por dióxido de carbono.
- De membrana de intercambio protónico (PEMFC): utilizada en aplicaciones donde se necesite una densidad de potencia alta. Este tipo de pilas de combustible se caracterizan por trabajar a bajas temperaturas, ser robustas y eficientes. Utilizadas en el mercado de transporte por sus características, es el tipo de pila el cual se basará este trabajo y por ello se le dedicará una sección propia para describirla.
- Ácido fosfórico (PAFC): utilizada para producción estacionaria y raramente como alimentación principal de vehículos pesados, este tipo de pila es relativamente nueva. Son más tolerantes a impurezas en el combustible que las PEMFC, pero tienen un costo mayor debido a las cantidades altas de platino que se deben utilizar en los catalizadores de la misma. Cabe destacar que son bastante pesadas en relación a su potencia gracias a la baja eficiencia que tienen.
- Carbonato fundido (MCFC): operan a altas temperaturas, lo que las hace compatibles con ciclos de cogeneración y las eximen de necesitar catalizadores de metales nobles (platino). Esta característica hace posible obtener unas eficiencias de hasta un 85%. Ya que funcionan a altas temperaturas no necesitan de tecnologías para reformar componentes de combustibles (gas natural, biogás) en hidrógeno, lo que reduce su costo y su complejidad. Por ello también pueden funcionar con metano. Se encuentran en desarrollo para aplicaciones en centrales eléctricas, militares e industriales.
- Óxido sólido (SOFC): al igual que las pilas de carbonato fundido operan a altas temperaturas, hasta unos 1000 °C. No necesitan catalizadores de metales nobles, y pueden reformar componentes de combustibles en hidrógeno como en la MCFC. Están siendo desarrolladas para uso en centrales eléctricas con gas natural y biogás. Es la más versátil en cuanto a combustibles, ya que puede funcionar con hidrógeno, metano y metanol. La mayor desventaja de este tipo de pilas es la degradación de componentes en la misma debido a las altas temperaturas de operación [17].

Tabla 2.1. Comparación entre tipos de pilas de combustible enfocada en características generales.

Tipo de pila de combustible	Electrolito comúnmente usado	Rangos de temperatura de operación	Rango de potencia de la pila.	Eficiencia eléctrica aproximada (LHV*)	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas o áreas de mejora
Membrana de intercambio protonico (PEMFC)	Membrana polimérica de ácido perfluoro sulfónico. Ej: Nafion™.	<120 °C	<1 kW-200 kW	60% con H ₂ puro. 40% <small>Reactor</small> con combustible reformado.	<ul style="list-style-type: none"> Energía de reserva. Energía portable. Producción distribuida. Transporte. Vehículos especiales. 	<ul style="list-style-type: none"> Electrolito sólido reduce corrosión y problemas de manejo del electrolito. Baja temperatura. Puesta en operación y respuesta a carga rápida. 	<ul style="list-style-type: none"> Catalizadores caros. Sensible a impurezas de combustible.
Alcalina (AFC)	Hidróxido de potasio en solución acuosa empapado en una matriz porosa, o una membrana polimérica alcalina.	60-220 °C	1-100 kW	60%	<ul style="list-style-type: none"> Militar. Espacial. Energía de reserva. Transporte. 	<ul style="list-style-type: none"> Coste de componentes bajos. Baja temperatura. Puesta en operación rápida. 	<ul style="list-style-type: none"> Sensible a CO₂ en el combustible y en el aire. Electrolito acuoso dificulta el manejo. Conductividad del electrolito. (Polimero)
Ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico empapado en una matriz porosa o imbuido en una membrana polimérica.	150-200 °C	5-400 kW	40%	<ul style="list-style-type: none"> Producción distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> Compatible con cogeneración. Tolerante a impurezas en combustibles. 	<ul style="list-style-type: none"> Catalizadores caros. Tiempo de puesta en operación largo. Sensible a azufre. Baja eficiencia.
Carbonato fundido (MCFC)	Litio fundido, sodio, y/o carbonatos de potasio empapados en una matriz porosa.	600-700 °C	300 kW-3 MW	50% 65% acoplada con una turbina. 85% si se aprovecha el calor expulsado.	<ul style="list-style-type: none"> Utilidades eléctricas. Producción distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia. Flexibilidad de combustibles. Electrolito sólido (Ver PEM) Compatible con cogeneración. Compatible con un ciclo de turbina de gas. 	<ul style="list-style-type: none"> Corrosión y degradación de componentes por altas temperaturas. Bajas densidades de potencia. Tiempo de puesta en operación largo.
Óxido sólido (SOFC)	Circona estabilizada con Itria. (Cerámico)	500-1000 °C	1-kW-2 MW	60% 85% si se aprovecha el calor expulsado.	<ul style="list-style-type: none"> Energía auxiliar. Utilidades eléctricas. Producción distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta eficiencia. Flexibilidad de combustibles. Electrolito sólido (ver PEM). Compatible con cogeneración y ciclo de TG. 	<ul style="list-style-type: none"> Corrosión y degradación de componentes por altas temperaturas. Tiempo de puesta en operación largo. Número de paradas limitado.

2.2.1 PEMFC. Pila de combustible de intercambio protónico

La pila de combustible de membrana de intercambio protónico, PEM por sus siglas en inglés (Proton Exchange Membrane) se caracteriza por ser uno de los tipos más versátiles entre los tipos de pilas de combustible. Pueden encontrarse en un rango de bajas a altas potencias, poseen altas eficiencias, altas densidades de potencia y una alta durabilidad que las hacen perfectas para una gran serie de aplicaciones [18]. Como su nombre lo indica, emplea una membrana que solo deja pasar protones a través de ella desde el ánodo hasta el cátodo. Las membranas que se suelen utilizar como electrolito se basan en un polímero sulfonado llamado politetrafluoroetileno (PTFE), y se encuentran en el mercado de las pilas de combustible con el nombre NAFION [17].

Las PEMFC trabajan a bajas temperaturas, entre un rango de 50 °C a 120 °C (en raros casos), lo que presenta una ventaja notable en términos de durabilidad y en aplicaciones donde el tiempo de puesta en operación tenga que ser rápido. Sin embargo, la razón principal por la cual trabajan a bajas temperaturas es debido al electrolito. Ya que este es de una membrana protónica, necesita de estar hidratada para que su conductividad iónica sea suficiente para dejar circular protones, haciendo que las temperaturas de operación estén por debajo de los 100 °C para evitar problemas de deshidratación de la membrana, y con ello pérdidas en la conductividad [19].

Debido a tales características, estas pilas son utilizadas en los sectores de transporte, producción estacionaria, y en el sector portátil. En el sector de transporte son utilizadas en autobuses, automóviles, camiones y vehículos pequeños. Debido a la evolución de las tecnologías verdes en los últimos años, el interés por desarrollar las mismas en el sector del transporte ha ido aumentando.

En cuanto a combustible, este tipo de pila puede funcionar con dos tipos de combustible: Hidrógeno puro (H_2) o metanol [14]. En el sector del transporte se utiliza hidrógeno puro, dejando el metanol debido a las bajas eficiencias que derivan de su uso (aunque las PEM con metanol se utilizan en el sector portátil por el fácil manejo de este combustible).

2.2.1.1 Componentes de una PEMFC

Principalmente las PEMFC se encuentran compuestas por una serie de partes que hacen posible la alimentación y expulsión de reactantes, el desarrollo de la reacción electroquímica, la expulsión de productos, y en general el buen funcionamiento de la pila de combustible. En las figuras 2.1 y 2.2 se expone una representación de una PEMFC simplificada (una celda), y un despiece de la estructura completa de una PEMFC.

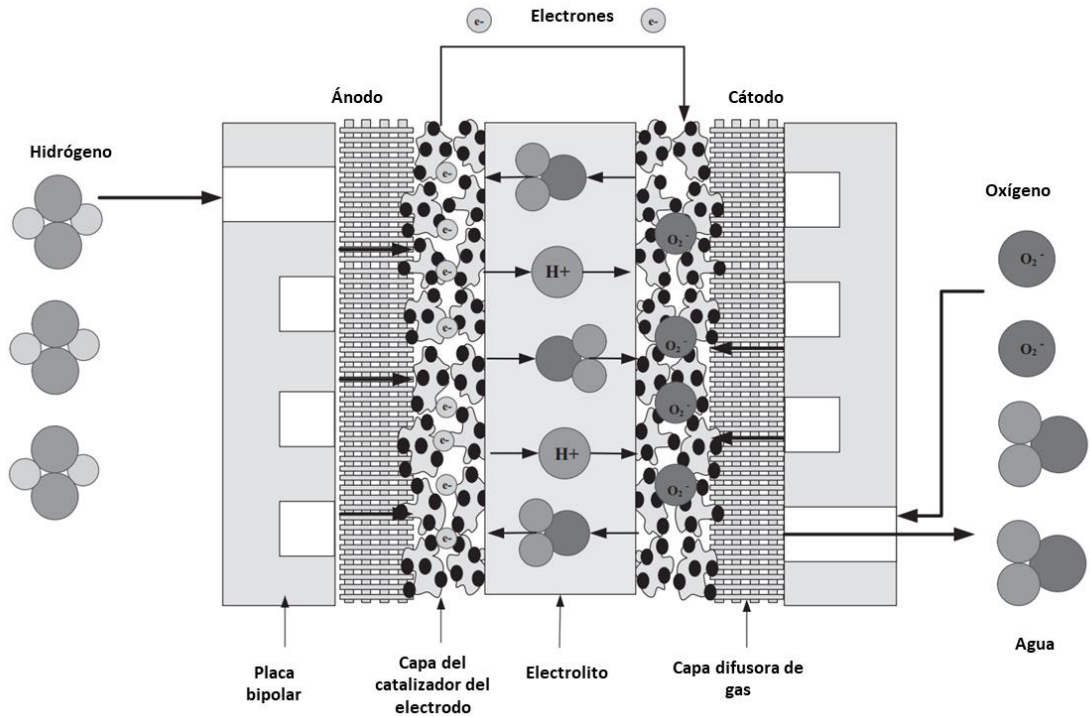


Figura 2.1. Representación de una celda de una PEMFC simple [17].

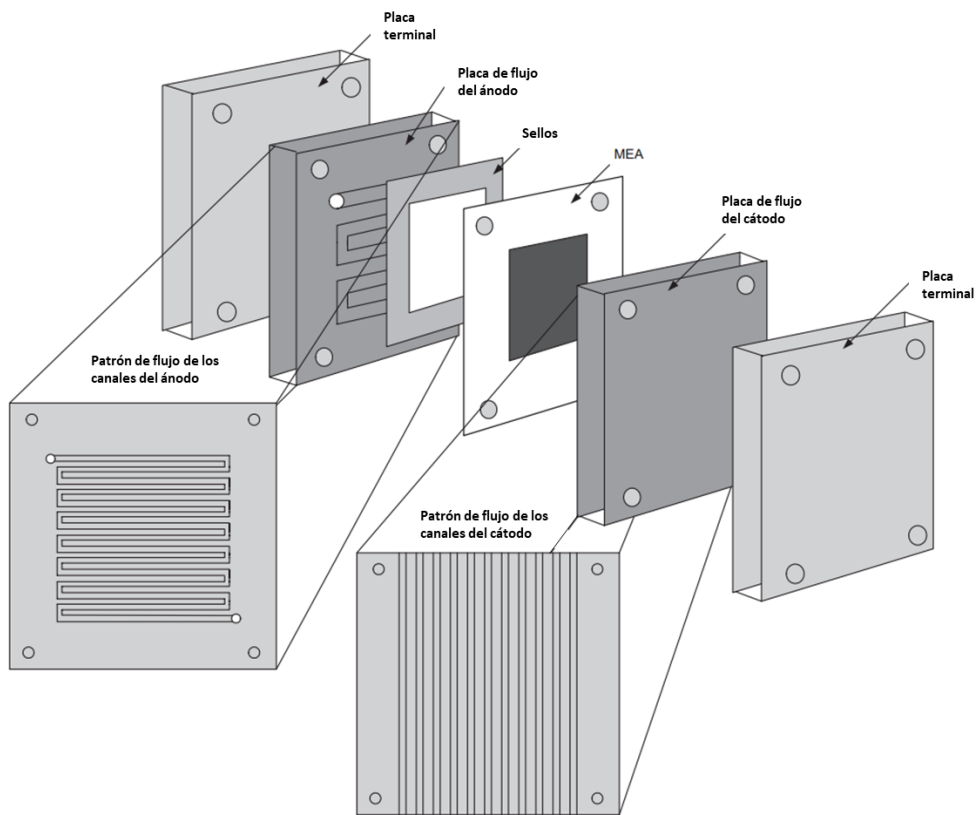


Figura 2.2. Despiece de una PEMFC simple [17].

A continuación, se ofrece una explicación de las partes principales de una PEMFC y su función:

- Capas catalíticas (Catalyst layers): Son capas que forman parte del cátodo y el ánodo, permitiendo la ejecución de las reacciones químicas de la pila. En el lado del ánodo el catalizador permite la oxidación del hidrógeno, y en el lado del cátodo permite la reacción entre los protones de hidrógeno (H^+), el oxígeno y los electrones que fluyen por el circuito externo. Estas capas están compuestas generalmente por un área de carbono muy porosa en donde se distribuye platino, los cuales se mezclan con un polímero conductor de iones. Es por ello que la fabricación de estas pilas es cara por la cantidad de platino que deben llevar los catalizadores. Una de las características de las PEMFC es la cantidad de agua que se maneja dentro de las mismas, que, si no es tratado correctamente, impedirá el funcionamiento correcto de varias partes, siendo una de ellas las capas catalíticas [14].
- Capas de difusión de gas o capas difusoras (Gas difusión layers): se encuentran a ambos lados de las capas catalíticas y forman parte de los electrodos, hechas por un material poroso y conductor eléctricamente. Su función principal es distribuir los gases de los reactantes de manera uniforme mientras se difunden para maximizar el área de contacto con la membrana del catalizador [17]. Además de alimentación, también funcionan para la expulsión de combustible excesivo en el ánodo y de agua que se ha producido en la reacción del cátodo. Estas capas se componen de una película de papel de carbono en donde las fibras de carbono están parcialmente cubiertas por politetrafluoroetileno (mejor conocido como teflón). La presión entre el ánodo y el cátodo debe estar equilibrada para evitar problemas de operación de la pila y degradaciones del electrolito, permitiendo una variación pequeña entre ambas presiones para favorecer al movimiento de reactantes y productos en las capas.
- La membrana de intercambio de protones o electrolito (PEM): membrana de polímero que solo conduce iones positivos de combustible y bloquea electrones. Tiende a ser muy pequeña, de tamaño de micrones. Estas membranas están compuestas de un material con una conductividad iónica alta para evitar pérdidas y maximizar el transporte de iones. En el caso de las PEMFC se utilizan membranas de un tipo de polímero sulfonado, que se ha mencionado anteriormente, conocido comercialmente como NAFION. Este es un polímero con alta durabilidad, alta conductividad de iones y alta resistencia mecánica, pero que debe mantenerse hidratado para mantener su conductividad. Es por ello que las PEMFC se operan a temperaturas máximas cercanas a los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ con el fin de evitar problemas de deshidratación de la membrana. El transporte de iones en el NAFION se asemeja al transporte de iones en electrolitos líquidos, resultando en altas conductividades. Básicamente los iones se mueven gracias a mecanismos provenientes de volumen libre en la estructura del electrolito polimérico. Uno de estos mecanismos es el llamado mecanismo vehicular, donde los iones se acoplan a una especie libre en movimiento dentro del electrolito. Esta especie libre en la membrana es el agua, que se mueve a través del volumen libre del

electrolito sirviendo como mecanismo de transporte principal para los iones de hidrógeno en las pilas PEMFC [14]. Con las capas difusoras, las capas catalíticas y la membrana de intercambio de protones se forma el sistema membrana-electrodo, o MEA (Membrane electrode assembly) por sus siglas en inglés.

- Canales de flujo o placas bipolares: Su función recae en la distribución del combustible y el oxidante a la MEA. A su vez recogen la corriente producida, remueven los productos, remueven calor producido, facilitan el manejo de agua en la celda y suministran soporte mecánico a la pila. En cuanto a la refrigeración de las celdas es posible tener diseños de placas con canales que permitan el flujo de refrigerante. Generalmente se usa grafito y acero inoxidable como material gracias a la resistencia a la corrosión. Otra de las funciones de los canales de flujos es servir de ensamblaje para celdas de combustible en pilas de combustible. De esta manera se puede conseguir un ensamblaje de varias celdas, multiplicando la potencia eléctrica que pueda desarrollar una sola pila. Se muestran algunos diseños de las placas en la figura 2.3.

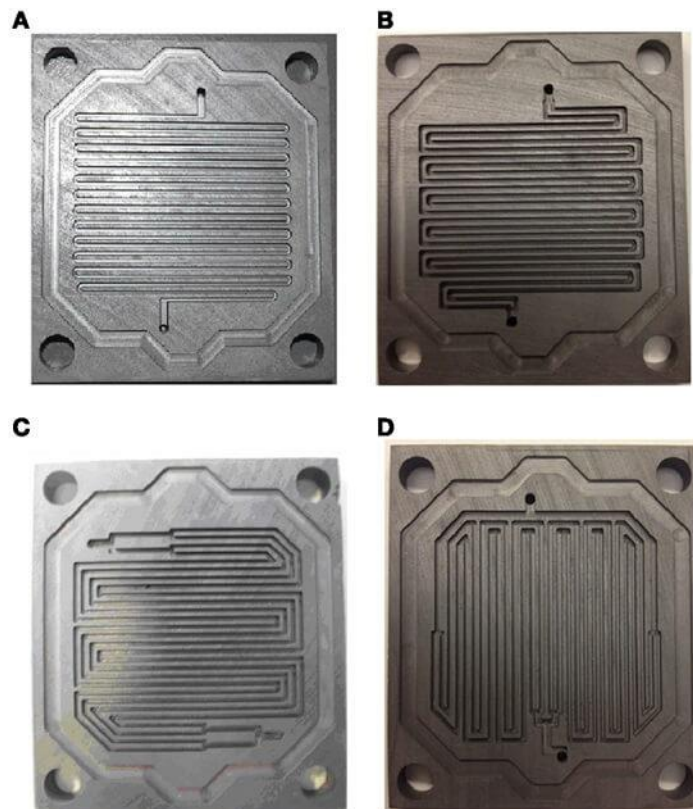


Figura 2.3. A) Un canal de serpentina. B) Dos canales de serpentina. C) Cuatro canales de serpentina. D) Cuatro canales de serpentina en simetría [21].

- Sellos: previenen fugas de combustibles, y ayudan a distribuir la presión uniformemente en la membrana. Están compuestas de silicona o teflón. Se añaden entre la MEA y los canales de flujos para crear un sello entre ellos.
- Placas de refrigeración: Algunas pilas de combustibles contienen placas por las que solo pasa refrigerante. Suelen ubicarse entre una serie de MEA y

placas bipolares para ayudar a la refrigeración de una sección. Es un sistema que se coloca para complementar la refrigeración proveniente de los flujos de refrigerante en las placas bipolares.

- **Colectores de corriente:** Se colocan antes de las placas finales que encierran a la pila y su función es la de recoger la corriente producida por la pila para dirigirla a la carga eléctrica. Están hechos de cobre o de un material conductor recubierto con una fina capa de oro.
- **Placa terminal:** se colocan en los extremos finales de la pila de combustible. Sellan la pila y sirven de punto de apoyo para la estructura de la misma. Tendrán aperturas para alimentar a la pila con los reactantes y el refrigerante, y aperturas para salidas de productos y excesos.

Finalmente, al incorporar todas estas partes, una pila de combustible del tipo PEM se verá representada en la figura 2.4.

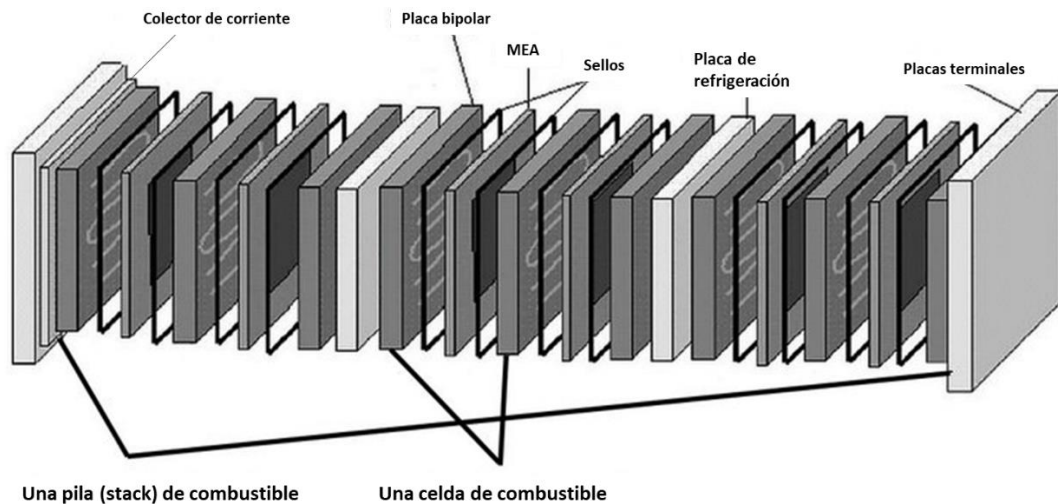


Figura 2.4. Despiece de una pila de combustible del tipo PEM (Stack) [22].

2.2.1.2 Funcionamiento de una PEMFC

Como se menciona en la sección 2.1, las pilas de combustible funcionan bajo una reacción electroquímica donde una de las especies se oxida y otra se reduce. En el caso de las PEMFC, y las que se usan en automoción, la especie que se oxida será el hidrógeno puro (H_2) y la especie que se reduce será el oxígeno proveniente del aire suministrado. La reacción de oxidación será la mostrada en la ecuación 2.1, donde se liberan electrones, y la reacción de reducción será la mostrada en la ecuación 2.2 donde se consumen los electrones y se produce agua.

En la figura 2.5 se representan los pasos básicos para la generación de electricidad a través de una reacción electroquímica en una PEMFC. La explicación de cada punto es la siguiente:

1. Transporte de reactantes hacia la pila, siendo hidrógeno y oxígeno en el caso de las PEMFC. Para una mayor alimentación de reactantes, principalmente el hidrógeno, mayor será la corriente producida.
2. Reacción electroquímica. En la sección del ánodo se produce la oxidación del hidrógeno y en la sección del cátodo la reducción del oxígeno en agua. La corriente producida por la pila dependerá en parte de la velocidad de reacción. Los catalizadores aumentan la velocidad de reacción y con ello aumenta la corriente producida.
3. Transporte de iones de H^+ y transporte de electrones a través del circuito externo. Es donde se producen la mayor cantidad de pérdidas, debido al movimiento de electrones a través de un material conductor que tendrá una resistencia, y a la resistencia que ofrece el electrolito al transporte de iones.
4. Expulsión de productos y excesos de reactantes. En este caso se está expulsando agua producida y en exceso, aire e hidrógeno en exceso. La alimentación de reactantes promueve a la expulsión de excesos y de los productos.

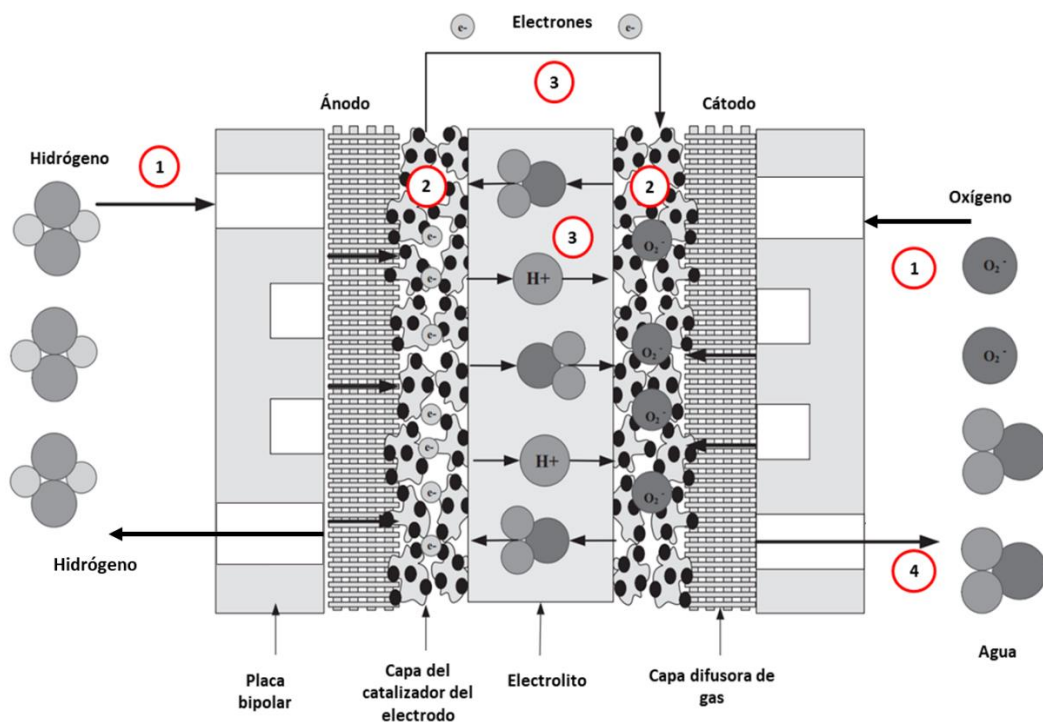


Figura 2.5. Funcionamiento de una PEMFC en la generación de electricidad [17].

2.2.1.3 Rendimiento de una pila de combustible del tipo PEMFC

Como cualquier otro equipo de conversión de energía, una pila de combustible no trabajará de manera ideal y tendrá unas pérdidas asociadas a su funcionamiento. Estas pérdidas afectan el rendimiento de la pila de combustible y se relacionan con otras magnitudes como el calor producido por la pila. En la literatura se utiliza un tipo de relación para evaluar el rendimiento de una pila de combustible y sus características bajo una variedad de situaciones de carga. Esta es la llamada curva de polarización, y en ella se representa la relación entre la corriente que produce la pila y el voltaje. Por aspectos comparativos con pilas de varios tamaños y número de celdas, las curvas se basan en la densidad de corriente (A/cm^2) frente al voltaje de la celda, aunque pueden también expresarse como corriente total producida frente a voltaje. Un ejemplo de esta curva está representado en la figura 2.6.

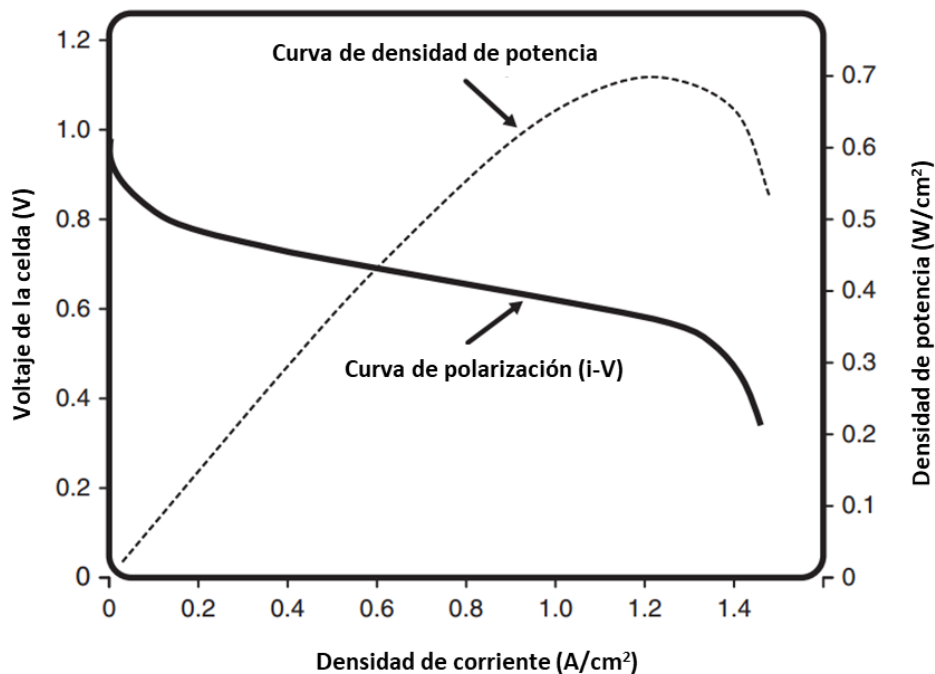


Figura 2.6. Curva de polarización y curva de densidad de potencia de una celda de una pila de combustible [14].

La curva de polarización muestra el comportamiento de la pila bajo distintas densidades de corriente, que sería equiparable a la carga que ofrece un motor eléctrico en un vehículo. A mayores necesidades de potencia eléctrica se le exige a la pila una mayor corriente. Lo que se aprecia en la curva es la pérdida de potencial mientras se aumenta la densidad de corriente. La disminución en el potencial se debe a las pérdidas asociadas a distintos mecanismos en la pila, que serán:

1. Pérdidas por activación: responden a la reacción electroquímica y el potencial que se debe sacrificar para comenzar la reacción. Representa el área izquierda de la curva y es pronunciada.

2. Pérdidas óhmicas: relacionadas al transporte de iones y electrones. Representa el área central de la curva de polarización y ocupa la mayor área.
3. Pérdidas por concentración: Representa el área final de la curva, y ocurren debido al transporte de masa en la pila. Tienden a ser muy pronunciadas en altas corrientes.

Estas secciones se pueden ver con mayor claridad en la figura 2.7.

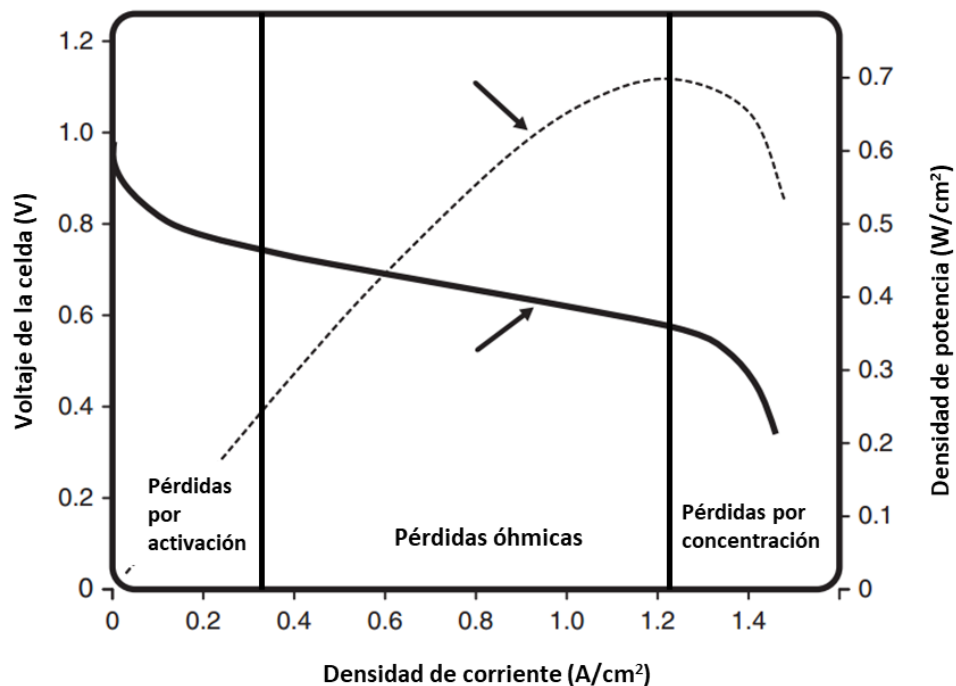


Figura 2.7. Curva de polarización y regiones de pérdidas [14].

Las pérdidas se le sustraen al voltaje ideal termodinámico de la pila, el cual se basa en el potencial de un sistema de ejercer trabajo eléctrico. En el caso de una PEMFC cuyo trabajo eléctrico vendrá de una reacción química, se hace uso de la diferencia de la energía libre de Gibbs en el proceso. La energía libre de Gibbs lo que representa es el potencial de trabajo que se puede extraer o explotar de un sistema, que en el caso de una pila de combustible será el trabajo extraíble de la reacción electroquímica [14].

Los modelos que se encuentran en la literatura basan parte de los mismos en replicar la curva de polarización de algún tipo de pila de combustible como el primer paso. Para ello se calculan los diferentes tipos de pérdidas y se las sustraen al voltaje ideal termodinámico de una celda de la pila. Este cálculo se realiza bajo una serie de suposiciones y necesita una gran cantidad de parámetros de la pila que, si no son facilitados por el fabricante, hay que determinarlas bajo experimentación [23]. Existen otros modelos que necesitan un menor número de parámetros y se basan en la determinación de una serie de constantes de ecuaciones que representan el funcionamiento de la pila bajo datos experimentales. Es decir, un modelo semi empírico [24].

Debido a que los modelos utilizados en la literatura y los modelos comerciales comienzan con la determinación de la curva de polarización, se procederá a explicar cómo se obtienen los datos más importantes de la misma para replicarla.

2.2.1.4 Voltaje reversible o voltaje ideal de una PEMFC

El voltaje reversible de una PEMFC es el voltaje ideal producido en la pila gracias a la reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno bajo un equilibrio termodinámico. Esto solo ocurre bajo condiciones de equilibrio, donde una pequeña variación en las fuerzas que conducen a la reacción revierte el sentido de la misma. Apenas se extraiga corriente de la pila se pierde la reversibilidad termodinámica.

Como se ha mencionado en la sección 2.2.1.3, el voltaje reversible es determinado bajo el cambio en la energía libre de Gibbs en la reacción que representa a la pila de combustible que se está trabajando. En el caso de una PEMFC, con hidrógeno como combustible, se tendrá la reacción expuesta en la ecuación 2.3.



Para el cálculo del cambio de la energía libre de Gibbs en esta reacción se toman las suposiciones que la reacción ocurre a una temperatura y presión constante (isotérmica e isobárica). Esta suposición no se encuentra muy alejada de la realidad ya que las pilas de combustible tienden a operar a temperatura y presión constante. El cambio en la energía libre de Gibbs vendrá dado por la ecuación 2.4.

$$\Delta \hat{g}_{rxn}(T) = \Delta \hat{h}_{rxn}^0 - T \Delta \hat{s}_{rxn}^0 \quad (2.4)$$

Donde $\Delta \hat{g}_{rxn}(T)$ es el cambio de la energía libre de Gibbs de reacción en función de la temperatura, $\Delta \hat{h}_{rxn}^0$ es el cambio de la entalpía de reacción y $\Delta \hat{s}_{rxn}^0$ es el cambio de entropía de reacción en condición estándar de presión y temperatura (298,15 K y 1 atm). En las ecuaciones 2.5 y 2.6 se representa tanto la expresión de la entalpía de reacción y la entropía de reacción para una pila de combustible de hidrógeno.

$$\Delta \hat{h}_{rxn}^0 = [c \Delta \hat{h}_f^0(H_2O)] - [a \Delta \hat{h}_f^0(H_2) + b \Delta \hat{h}_f^0(O_2)] \quad (2.5)$$

$$\Delta \hat{s}_{rxn}^0 = [c \hat{s}^0(H_2O)] - [a \hat{s}^0(H_2) + b \hat{s}^0(O_2)] \quad (2.6)$$

Donde a , b , y c son los moles de hidrógeno, oxígeno y agua respectivamente, $\Delta \hat{h}_f^0$ es la entalpía de formación estándar de la especie, y \hat{s}^0 es la entropía estándar de las especies que toman parte en la reacción. En la tabla 2.2 se muestran valores para las especies de la reacción. Bajo estos valores y reemplazando en la ecuación 2.4 se obtiene

que el valor del cambio de la energía libre de Gibbs en la reacción de una PEMF es de unos -237000 J/mol.

Tabla 2.2. Entalpías de formación y entropías de especies.

Especie	$\Delta\hat{h}_f^0$ (kJ/mol)	\hat{s}^0 (kJ/(mol*k))
H ₂	0,00	0,13068
O ₂	0,00	0,20500
H ₂ O (g)	-241,83	0,18884

La energía libre de Gibbs se puede relacionar con el voltaje debido a que este es una medida del potencial del sistema de realizar trabajo eléctrico. El trabajo eléctrico realizado al mover una carga Q_e , se define en la ecuación 2.7.

$$W_e = EQ_e \quad (2.7)$$

Donde E es la diferencia de potencial en voltios, y Q_e es la carga en coulomb. Si se asume que la carga es transferida por electrones, se puede tomar:

$$Q_e = nF \quad (2.8)$$

Donde n es el número de electrones transferidos (2 mol e- por mol de reactante en el caso de la reacción del hidrógeno y el oxígeno) y F es la constante de Faraday (96485 C/mol). Como la energía libre de Gibbs se relaciona con el trabajo eléctrico, según lo muestra la ecuación 2.9, combinando las ecuaciones 2.4, 2.7, 2.8 y 2.9 se obtiene la relación expuesta en la ecuación 2.10.

$$W_e = -\Delta\hat{g}_{rxn} \quad (2.9)$$

$$E^0 = -\frac{\Delta\hat{g}_{rxn}^0}{nF} \quad (2.10)$$

E^0 representa el voltaje ideal termodinámico de la pila en condición estándar, y $\Delta\hat{g}_{rxn}^0$ es la energía libre de Gibbs en condición estándar. Sustituyendo los valores conocidos de la ecuación 2.10 se obtiene que el voltaje reversible es de 1,23 V. Es decir, el voltaje que puede producir una sola celda de combustible bajo esta reacción es de 1,23 V. Si se quisiera obtener un voltaje mayor a este habría que agrupar celdas en serie en una pila (stack).

Como las pilas de combustible no funcionan en condición estándar, calcular el voltaje reversible bajo estas suposiciones no es de uso alguno. El voltaje variará con la temperatura, con la concentración de los reactantes en la pila y la presión. La relación que

condensa estas consideraciones es la llamada ecuación de Nernst [14]. Se expresa como la ecuación 2.11.

$$E = E^0 + \frac{\Delta\hat{s}_{rxn}}{nF}(T - T_0) - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod a_{productos}^{v_i}}{\prod a_{reactantes}^{v_i}} \quad (2.11)$$

Donde $\Delta\hat{s}_{rxn}$ es la variación de entropía de la reacción, T_0 es la temperatura estándar, R es la constante universal de los gases, T es la temperatura de la pila, $a_{productos}^{v_i}$ es la actividad de los productos, y $a_{reactantes}^{v_i}$ la actividad de los reactantes, y v_i es el coeficiente estequiométrico correspondiente a la especie. En cuanto a la actividad de los reactantes se clasifican de diferentes maneras dependiendo de la idealidad de la especie. Si la especie se considera como un gas ideal, que es una suposición común en estudios de pilas de combustible, la actividad será la siguiente:

$$a_i = \frac{p_i}{p^0} \quad (2.12)$$

En la cual p_i es la presión parcial del gas, y p^0 es la presión estándar (1 atm). Si la especie no es un gas ideal habrá que tener otras consideraciones. En el caso del agua producida en la pila operando a una temperatura menor a 100°C se producirá en fase líquida, cuya actividad se toma como 1 [14]. Combinando las ecuaciones 2.11 y 2.12, y siendo la aplicación a estudiar una pila de hidrógeno puro trabajando a temperaturas menores de 100 °C con agua líquida como producto se tendrá:

$$E = E^0 + \frac{\Delta\hat{s}}{nF}(T - T_0) - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.13)$$

La ecuación 2.13 es la ecuación de Nernst trabajada para la reacción de una PEMFC con hidrógeno como combustible, donde p_{H_2} y p_{O_2} son las presiones parciales del hidrógeno y el oxígeno. Esta ecuación tiene en cuenta la temperatura y presión de las especies en la pila de combustible, lo que refleja el comportamiento real de una celda de combustible, la cual es utilizada en muchos modelos matemáticos en la literatura y en trabajos de investigación [14, 17]. Se nota que el voltaje de la celda dependerá de la temperatura, en un sentido substractivo, ya que el cambio de entropía en las pilas de combustible tiene a ser negativo. A mayor la temperatura de la pila, menor es el voltaje de una celda. Esto podría crear la confusión de que la pila debe operarse a una temperatura lo menor posible. Sin embargo, las pérdidas por activación y óhmicas tienden a disminuir con la temperatura. En cuanto a presiones se aprecia que, a mayor presión de los reactantes, mayor será la concentración de los mismos, y por lo tanto el voltaje final aumentará. Es por ello que para una misma pila de combustible es posible obtener una serie de curvas de polarización, cambiando las condiciones de operación de la pila como la presión y la temperatura.

Reemplazando en la ecuación 2.13 con el voltaje ideal termodinámico de 1,23 V, las constantes, el número de electrones, y las presiones parciales de los gases (0,21 en el

caso del oxígeno ya que se toma que la pila trabaja con aire y el 21% del mismo es formado por oxígeno) se tiene que el voltaje reversible será de unos 1,22 V. Esto si se trabaja a condición estándar de temperatura y presión.

$$E = 1,23 - \frac{8,314 \frac{J}{molK} * 298,15 K}{(2 e^-)96485 \left(\frac{C}{mol}\right)} \ln \frac{1}{1 * 0,21^{\frac{1}{2}}} = 1,22 V \quad (2.14)$$

Exponiendo que si se quisiera llegar a unos 400 voltios con una pila de combustible se necesiten unas 333 celdas aproximadamente, sin considerar pérdidas. Con pérdidas el voltaje será menor y por lo tanto se necesitarán un mayor número de celdas. Es una de las razones por las que los componentes de las pilas son muy finos.

2.2.1.5 Eficiencia de una pila de combustible.

Una de las ventajas de las pilas de combustible es su eficiencia frente a otros dispositivos de conversión de energía, como un MCI. La eficiencia de una pila de combustible está limitada por el cambio de la energía libre de Gibbs en la reacción de la pila (ΔG), y por las pérdidas asociadas a la operación de la misma.

La eficiencia ideal de la pila relacionará el trabajo eléctrico que es capaz de realizar la reacción de la pila, que está limitado por la variación en la energía libre de Gibbs, y la energía total presente en la reacción que sería la variación de entalpía $\Delta \hat{h}$. La relación se muestra en la ecuación 2.15.

$$\varepsilon_{Termo} = \frac{\Delta \hat{g}}{\Delta \hat{h}} \quad (2.15)$$

Si se calcula la eficiencia para una pila de combustible que funciona a condiciones estándares y con hidrógeno como combustible se obtiene una eficiencia ideal térmica del 83%, la cual no está limitada por el ciclo de Carnot como en el caso de los motores térmicos [14].

La eficiencia real de una pila de combustible viene dada por la eficiencia termodinámica de la pila (ecuación 2.15), la eficiencia del voltaje de la pila, y la eficiencia de la utilización del combustible.

- Eficiencia del voltaje de la pila: considera las pérdidas de voltaje por irreversibilidades en el funcionamiento de la pila. Es decir, incorpora las pérdidas que se representan en la curva de polarización (figura 2.7). Relaciona el voltaje reversible de la pila con el voltaje real de la pila, representado como E y V respectivamente en la ecuación 2.16. Con ello se puede afirmar que, a mayor corriente, menor será el voltaje de la pila y por lo tanto menor será su eficiencia.

$$\varepsilon_{Volt} = \frac{V}{E} \quad (2.16)$$

- Eficiencia del uso del combustible: toma en cuenta si todo el combustible que entra a la pila es usado o no en la reacción. Es la relación entre el combustible utilizado para producir energía eléctrica y el ratio de combustible alimentado a la pila.

$$\varepsilon_{Comb} = \frac{\frac{i}{nF}}{v_{comb}} \quad (2.17)$$

Siendo i la corriente generada por la pila, y v_{comb} el flujo de combustible en mol/s. Las pilas de combustible tienden a operar con un factor de estequiometría constante, donde se suplen cantidades de reactantes a una razón fija determinada por el factor estequiométrico λ , y donde el flujo de combustible variará según la carga eléctrica necesaria. Al contrario, existen pilas de combustible que se operan a un flujo de combustible constante. A estas pilas se les suple un flujo de combustible constante, generalmente mayor o igual a la cantidad necesaria para el punto de operación máximo, consumiendo el combustible necesario para una carga eléctrica determinada. Su eficiencia es baja por la cantidad de combustible no utilizado y no se la utiliza para aplicaciones en transporte [14]. Si se tiene una pila que opera a estequiometría constante se puede simplificar la ecuación 2.17 como:

$$\varepsilon_{Comb} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.18)$$

Donde λ es el factor estequiométrico, que expresa que tanta cantidad de combustible se alimenta a una celda en comparación a la cantidad estequiométrica de combustible necesario para la operación a la corriente requerida. Este factor se puede calcular como la relación entre el combustible suplido y la carga eléctrica. Donde $v_{comb,ent}$ es el flujo de combustible que entra, en mol/s, y $v_{comb,oper}$ es el flujo de combustible necesario para la corriente de operación, en mol/s.

$$\lambda = \frac{v_{comb}}{\frac{i}{nF}} = \frac{v_{comb,ent}}{v_{comb,oper}} \quad (2.19)$$

2.2.1.6 Calor producido en una pila de combustible.

Uno de las magnitudes importantes al estudiar una pila de combustible es el calor producido por el funcionamiento de la misma. El cálculo del calor se realiza aplicando un balance de energía sobre la pila. Dependiendo de la complejidad del balance se diferenciará entre dos métodos en este trabajo. Donde el primero se basa en una

aproximación que toma en cuenta la diferencia entre la entalpía de reacción que se le suministra a la pila y la energía eléctrica producida por la pila, y el segundo se basa en un balance de energía donde se consideran los flujos entálpicos de las especies que entran y salen del volumen de control.

Primer método: el calor se calcula bajo una aproximación a través de un balance de energía que considera solo la energía del combustible que reacciona (el hidrógeno), la potencia eléctrica producida y el calor producido, obviando los flujos entálpicos de las especies no combustibles.

Se conoce que la energía producida por el combustible está relacionada a la entalpía del mismo y a la cantidad de combustible que se le supe a la pila. Mientras que la energía eléctrica está relacionada con el voltaje y la corriente producida por la pila. Conociendo esto, se puede expresar el balance de energía en flujos en la ecuación 2.20.

$$\dot{Q} = \dot{H}_{ent} - \dot{W}_e = |\Delta\hat{h}|v_{comb} - V * i = \left(\frac{\lambda|\Delta\hat{h}|}{nF} - V \right) * i \quad (2.20)$$

Como generalmente las pilas de combustible se estudian con un factor estequiométrico de 1, se puede simplificar la ecuación 2.21. Generalizando para una pila con un número de celdas n_{celdas} se tendrá:

$$\dot{Q} = \left(\frac{|\Delta\hat{h}|}{nF} - V \right) * i * n_{celdas} \quad (2.21)$$

Donde $\Delta\hat{h}$ puede tomar dos valores en el caso de una PEMFC. Se utilizan las entalpías definidas como el poder calorífico de un combustible, que hace referencia al calor producido por aquellas reacciones donde un combustible realiza una combustión y produce agua. Dependiendo si el agua se produce en forma líquida o en forma gaseosa se tienen distintos valores para este calor. En el caso de que sea líquida el poder calorífico será el superior ya que se puede conservar más calor si se condensa el agua de producto a líquido, y en el caso de que este en forma de vapor el poder calorífico será el inferior, ya que no se recupera el calor necesario para realizar el cambio de fase. Para las PEMFC que operan a menor de 100 °C es común utilizar el poder calorífico superior para el cálculo del calor y la eficiencia de la pila, debido a que se toma en cuenta el calor total que teóricamente se podría recuperar de la reacción de combustión del hidrógeno [14]. De manera que la eficiencia termodinámica de la pila puede ser calculada con la ecuación 2.22.

$$\varepsilon_{Termo} = \frac{\Delta\hat{g}}{\Delta\hat{h}_{HHV}} \quad (2.22)$$

Con la noción del poder calorífico superior se puede simplificar aún más las ecuaciones 2.15 y 2.21, sabiendo que para una pila de combustible de hidrógeno será de $\Delta\hat{h}_{HHV} = -286$ kJ/mol [14, 17]. Esto se puede apreciar en el desarrollo de la ecuación 2.23 en la ecuación 2.24 y 2.25.

$$\dot{Q} = \left(\frac{|\Delta \hat{h}_{HHV}|}{nF} - V \right) * i * n_{celdas} \quad (2.23)$$

$$= \left(\frac{\left| -286000 \frac{J}{mol} \right|}{(2 e^-) 96485 \left(\frac{C}{mol} \right)} - V \right) * i * n_{celdas}$$

$$\dot{Q} = (1,482 - V) * i * n_{celdas} \quad (2.24)$$

$$\dot{Q} = (1,254 - V) * i * n_{celdas} \quad (2.25)$$

La ecuación 2.24 es utilizada como una aproximación del calor producido en una PEMFC operando a menos de 100 °C. Extrapolando para el caso de que la pila opere a más de 100 °C se usará el poder calorífico inferior del hidrógeno (ecuación 2.25). Cabe destacar que se utilizan los poderes caloríficos del hidrógeno bajo condiciones estándares (25 °C y 1 atm) ya que el error al calcularlo para otras condiciones es bajo y no merece recalcularlo [25].

La producción de calor común en las pilas de combustible, específicamente las PEMFC, es cercana al mismo valor de potencia eléctrica producida por la pila, pudiendo ser mayor si la eficiencia de la pila es baja [14,17,24]. De manera que se puede tomar la potencia eléctrica producida por la pila como una aproximación del calor producido, como un punto de partida para el dimensionamiento del sistema de refrigeración de la misma.

Segundo método: Es una extensión del primer método, donde se realiza un balance de energía tomando como volumen de control a la pila de combustible, considerando los flujos entálpicos de las especies que entran y salen de la pila. Es común la suposición de que todas las especies presentes en la pila están en fase gaseosa, para hacer posible la aplicación del modelo del gas ideal. Esto es aceptable ya que tanto el hidrógeno como el aire entrante en una PEMFC están en fase gaseosa, mientras que el agua puede estar tanto en fase líquida como gaseosa. Para facilidades de cálculo se toma que el agua también está en fase gaseosa. En la figura 2.8 se puede ver un diagrama de un volumen de control para un balance de energía sobre la PEMFC.

Los flujos entálpicos de cada flujo de gas se calculan bajo las ecuaciones 2.26, 2.27 y 2.28 [17].

Para gases combustibles (H₂):

$$\dot{H} = \dot{m}(Cp * T + h_{HHV}^0) \quad (2.26)$$

Para gases no combustibles:

$$\dot{H} = \dot{m} * Cp * T \quad (2.27)$$

Agua en estado gaseoso:

$$\dot{H} = \dot{m}(Cp_{H_2O(g)} * T + h_{fg}^0) \quad (2.28)$$

Agua en estado líquido:

$$\dot{H} = \dot{m}(Cp_{H_2O(l)} * T) \quad (2.29)$$

Siendo T la temperatura del flujo de gas, Cp el calor específico a presión constante del gas (kJ/kg*K), \dot{m} es el flujo másico(kg/s), h_{HHV}^0 (kJ/kg) es el poder calorífico superior a 0°C y h_{fg}^0 es la entalpía específica de evaporación del agua a 0°C. Sin embargo, debido a que el poder calorífico superior cambia muy poco con la temperatura se puede usar el poder calorífico a 25°C, despreciando el error que esto pueda causar. En cuanto al valor de Cp se puede utilizar en el caso de gases ideales un valor promedio tomando la temperatura media de entrada-salida del gas.

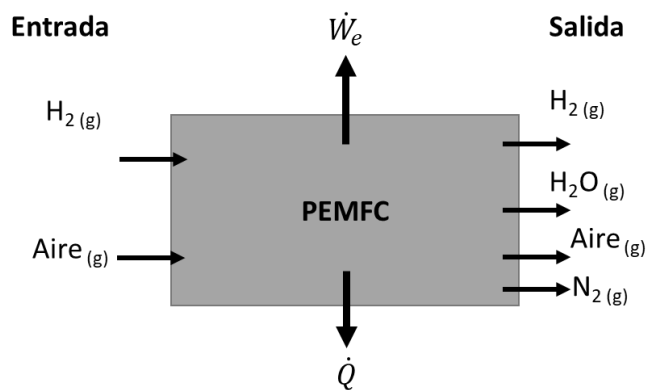


Figura 2.8. Diagrama del volumen de control para el balance de energía.

Como solo se consume oxígeno en la reacción habrá un flujo de nitrógeno correspondiente al flujo del aire que contenía tal oxígeno, el cual habrá que considerarlo como flujo saliente.

Si se conocen los datos de los flujos de entrada, los de salida y de la potencia eléctrica producida es posible obtener una aproximación del calor producido en la pila de combustible bajo el balance de energía. Para el cálculo de cuanto se consume de una especie o cuanto se produce de una especie se utiliza la relación expuesta en la ecuación 2.30, que toma en cuenta la reacción electroquímica de la pila [14].

$$v_{sal} = v_{ent} \pm \frac{i}{nF} \quad (2.30)$$

Donde v representa al flujo molar de una especie. Cuando se produce o se gasta de la especie viene dado por la relación $\frac{i}{nF}$ donde n es el número de electrones que cede o recibe la especie. En el caso de una PEMFC el hidrógeno cede 2 electrones, el oxígeno

recibe 4 electrones y el agua recibe 2 electrones. Especificando para cada flujo se obtienen las siguientes ecuaciones:

Agua producida e hidrógeno consumido:

$$v_{H_2} = v_{H_2O} = \frac{i}{nF} = \frac{i}{2F} \quad (2.31)$$

Oxígeno consumido:

$$v_{O_2} = \frac{i}{nF} = \frac{i}{4F} \quad (2.32)$$

Con las ecuaciones 2.30, 2.31 y 2.32 es posible calcular los flujos molares salientes (mol/s) de las especies de una PEMFC trabajando con hidrógeno. Este segundo método es una extensión del primero, solo que considerando los flujos entálpicos de todas las especies que entran y salen de la pila, en comparación al primer método donde solo se considera el flujo entálpico del combustible bajo el poder calorífico.

2.2.1.7 Pérdidas por activación.

Como se mencionó en la sección 2.2.1.3, una de las pérdidas de potencial en una pila de combustible es aquella por energía de activación. Esta energía de activación refleja la barrera que impide que los reactivos se conviertan a productos en una reacción química, y es el límite de la razón de reacción. A menor barrera de activación se aumenta la razón de reacción y con ello la corriente producida. De manera que la energía de activación determina la razón de reacción.

Una especie, por ejemplo, el hidrógeno, debe encontrarse en el estado de activación para pasar de reactante a producto. Este estado de activación está íntimamente relacionado a una barrera llamada la barrera de energía libre. Las especies que aumenten su energía libre de Gibbs hasta este punto se encontrarán en el estado de activación. Esta energía libre cambia variando el voltaje de la pila, y con ello cambia el tamaño de la barrera de activación.

La ecuación de Butler-Volmer describe como la corriente y el voltaje se relacionan en este tipo de sistemas, exponiendo que para obtener una mayor corriente en el sistema (aumentar el ratio de reacción) es necesario ceder un voltaje para sobrepasar la barrera de activación, siendo este la pérdida de voltaje por activación (η_{act}). En otras palabras, describe la cinética de reacción de la pila. No se mostrará la ecuación de Butler-Volmer en su forma original ni cómo se deriva porque no es motivo de este trabajo [14].

Para las pilas de combustible existen simplificaciones de la ecuación de Butler-Volmer comúnmente utilizadas. Que se derivan cuando:

- η_{act} es muy pequeño. Ocurre cuando la densidad de corriente (j) de la pila de combustible es mucho menor a la densidad de corriente de intercambio (j_0). La *densidad de corriente* es tan solo la relación entre la corriente producida

por unidad de área de una celda de la pila, que es la suma de las densidades de corriente de las reacciones directas y reversas en un sistema. Si la suma de estas reacciones resulta nula el sistema se encontrará en equilibrio termodinámico y el valor de la densidad de corriente de cada reacción será conocido como la *densidad de corriente de intercambio*. Como ejemplo la densidad de corriente de intercambio de una PEMFC que trabaje con hidrógeno, y cuyo catalizador este hecho en base de platino con un electrolito ácido (NAFION) están entre de 3×10^{-9} a 9×10^{-9} A/cm² [14].

Para $j \ll j_0$ se tiene la simplificación de la ecuación de Butler-Volmer expresada en la ecuación 2.33. Este caso representa las pérdidas de voltaje a densidades de corriente muy pequeñas.

$$j = j_0 \frac{nF\eta_{act}}{RT} \quad (2.33)$$

- η_{act} es grande: ocurre cuando la densidad de corriente es mucho mayor a la densidad de corriente de intercambio ($j \gg j_0$). La ecuación de Butler-Volmer quedaría:

$$j = j_0 e^{\frac{\alpha nF\eta_{act}}{RT}} \quad (2.34)$$

Donde α es un coeficiente de transferencia que expresa como el cambio en el potencial eléctrico afecta los tamaños de la barrera de activación de las reacciones directas contra las reacciones reversas. Este puede tomar valores de 0 a 1. Siendo los valores comunes de $\alpha=0,5$ para reacciones simétricas y $\alpha=0,2-0,5$ en la mayoría de las reacciones [14]. Este coeficiente es posible determinarlo bajo estudios empíricos.

En pilas de combustible interesa el funcionamiento a altas densidades de corriente por lo que la primera simplificación no es aplicable. Si se tiene esto en cuenta y despejando el voltaje de activación de la ecuación 2.34 se tiene la ecuación 2.35.

$$\eta_{act} = -\frac{RT}{\alpha nF} \ln j_0 + \frac{RT}{\alpha nF} \ln j = -A \ln j_0 + A \ln j \quad (2.35)$$

Tanto en la ecuación 2.33, 2.34 y 2.35 n es el número de electrones transferido en la reacción. A es considerada como la pendiente de Tafel, y debe su nombre a la pendiente de la ecuación de Tafel que expresa el comportamiento de reacciones electroquímicas, así como la ecuación de Butler-Volmer. La ecuación 2.35 es normalmente utilizada para el cálculo de las pérdidas de activación en la pila, en el lado del ánodo y en el lado del cátodo. Cabe destacar que el valor de las pérdidas de activación suele basarse en la cinética del cátodo ya que la reducción del oxígeno es un proceso más difícil que la oxidación del hidrógeno, y por lo tanto las pérdidas en este electrodo serán

mayores. Es por ello que es común obviar las pérdidas en el ánodo ya que son despreciables comparándolas a las del cátodo.

2.2.1.8 Pérdidas por transporte de carga o pérdidas óhmicas.

Este tipo de pérdidas hace referencia al transporte de especies cargadas, que en el caso de una reacción electroquímica serían electrones e iones. Los electrones son menos pesados que los iones, lo que hace que su transporte presente menor resistencia que el transporte de iones. En las pilas de combustible ocurre lo mismo, siendo el transporte de iones el más difícil entre los dos y el principal objetivo de estudio.

Para que ocurra el transporte de especies cargadas y no cargadas una fuerza debe estar actuando sobre ellas. En las pilas de combustible estas fuerzas serían las fuerzas eléctricas, las químicas y las mecánicas. Las eléctricas hacen referencia al gradiente de voltaje y concentración que se produce en la pila al haber una acumulación y agotamiento de los iones y electrones en los electrodos. Estos gradientes conducen al transporte de protones desde el ánodo de la pila al cátodo. El gradiente de voltaje es el que domina en el transporte de carga en una pila de combustible, tanto de protones como electrones, mientras que el gradiente de concentración influye sobre el transporte de especies no cargadas. También existe un gradiente de presiones en la pila el cual da lugar al transporte especies bajo el mecanismo de convección. [14]

Como la carga se moverá por materiales conductores se producirá una pérdida de voltaje debida a la resistencia intrínseca de los mismos. Esta pérdida de voltaje responde a la ley de Ohm, de manera que se llama Óhmica. Es calculable bajo la ecuación 2.36 y considera tanto las pérdidas por transporte de electrones como transporte de iones.

$$\eta_{ohm} = iR_{ohm} = i(R_{elec} + R_{iónica}) \quad (2.36)$$

Donde R_{ohm} será la resistencia óhmica de la pila, R_{elec} la resistencia al transporte de electrones y $R_{iónica}$ la resistencia al transporte de iones. Esta última resistencia domina por razones anteriormente explicadas. Las resistencias se pueden calcular a partir de la ecuación:

$$R = \frac{L}{A\sigma} \quad (2.37)$$

Donde L es la longitud del conductor o espesor en el caso de electrolitos, A es el área del conductor y σ la conductividad del mismo. Sin embargo, para las pilas de combustible es útil utilizar una expresión que represente las pérdidas de voltaje en base a expresiones de unidad de área. Es por ello que se utiliza la resistencia específica por unidad de área (ASR por sus siglas en inglés) con unidades de $\Omega \cdot \text{cm}^2$, y la densidad de corriente j en A/cm^2 . En este caso la densidad de corriente se considera como un flujo de carga por unidad de área. Valores de ASR para pilas de combustible se encuentran en el rango de los $0,05-0,10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ [14].

$$\eta_{ohm} = jASR_{ohm} = j * \frac{L}{\sigma} \quad (2.38)$$

Se puede confirmar que la resistencia es directamente proporcional al espesor e inversamente proporcional al área y a la conductividad, según la ecuación 2.38. Mientras más finas las partes de la pila menor serán las pérdidas de potencial. No obstante, esto no quiere decir que no haya un límite para el espesor de conductores como el electrolito. Las limitaciones se basan en la integridad mecánica, el cruce de reactantes indebido, no uniformidades, entre otras [14].

Conductividad del electrolito: como la mayor resistencia al transporte de carga la presenta el electrolito, es imprescindible conseguir una conductividad eléctrica alta en el mismo. Como se había mencionado, para las PEMFC se utiliza un electrolito basado en ácido sulfónico (SO_3H^+) con una estructura base de Teflón, el cual es el previamente mencionado NAFION. La característica principal de este electrolito es que debe mantenerse hidratado para conseguir una conductividad comparable a la de un electrolito líquido, siendo este un electrolito sólido. En modelos matemáticos de pilas de combustible es común tomar la suposición de que el NAFION se encuentra completamente hidratado y su conductividad será máxima para el funcionamiento de la pila. Esto simplifica los cálculos de la conductividad de esta membrana y con ello el cálculo de las pérdidas óhmicas bajo la ecuación 2.38.

2.2.2.9 Pérdidas por transporte de masa o pérdidas por concentración.

Estas últimas pérdidas hacen referencia al movimiento de reactantes y productos en la pila de combustible. Este transporte se realiza bajo dos tipos de fuerza, convección y difusión. La convección hace referencia al transporte por movimiento de fluido, como la alimentación de reactantes por los canales de flujo de la pila, y la difusión hace referencia al transporte por gradientes de concentración en las estructuras porosas de los electrodos. Un mal transporte de especies no cargadas genera una pérdida del rendimiento de la pila por agotamiento de reactantes, no uniformidad de reacciones y por ahogamiento de los componentes.

Entre los dos tipos de transporte es el transporte por difusión en los electrodos el cual se considera para el cálculo del voltaje perdido por concentración, mientras que el transporte por convección se utiliza para determinar las caídas de presión en los canales de flujo de la pila [14]. Es por ello que se explicará solo la influencia del transporte por difusión en el voltaje de la pila.

Las pérdidas por concentración tienen un mayor peso a mayores corrientes de operación ya que a tales corrientes se produce una gran cantidad de agua en la pila, como lo indica la ecuación 2.31, y se consume una gran cantidad de reactantes. Llega un punto en el cual la cantidad de producto que se acumula en las capas de catálisis es demasiada y el potencial cae rápidamente. Existen dos tipos de pérdidas por concentración:

1. Pérdidas Nernstianas:

Este tipo de pérdidas se relaciona con la densidad de corriente que puede producir la pila. La ecuación 2.39 muestra la ecuación de Nernst que relaciona el voltaje de la pila con la temperatura de operación, y la concentración de reactantes y productos. Utilizando esta ecuación, que considera la concentración de reactantes en la capa de catálisis (c_R^0) y la concentración de bulto de reactantes (la concentración en los canales de flujo) c_R^* es posible determinar el voltaje que se pierde.

$$\begin{aligned}\eta_{conc,Nernst} &= E_{Nernst}^0 - E_{Nernst}^* \\ &= \left(E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{c_R^0} \right) - \left(E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{1}{c_R^*} \right) \\ &= \left(\frac{RT}{nF} \ln \frac{c_R^0}{c_R^*} \right)\end{aligned}\quad (2.39)$$

Ahora, existe una densidad de corriente a la cual la concentración de reactantes cae a cero. Esta densidad de corriente es llamada densidad de corriente limitante, la cual expone cual es la máxima densidad de corriente que puede producir la pila y está representada como j_L . Se relaciona con la concentración bajo la ecuación 2.40.

$$j_L = nFD^{eff} \frac{c_R^0}{\delta} \quad (2.40)$$

Donde δ es el espesor del electrodo (capa de difusión) y D^{eff} es la difusividad efectiva de reactantes en la capa de catálisis. Esta difusividad efectiva es una corrección del coeficiente de difusividad nominal de la capa de catálisis, bajo la cual considera las estructuras porosas de la capa de catálisis, que tiende a tener un valor de 0,4 en electrodos de pilas de combustible [14]. Valores comunes para el espesor del electrodo rondan entre 100-300 μm mientras que para D^{eff} están cercanos a los $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$. De manera que la densidad de corriente limitante este entre 1 y 10 A/cm^2 .

La concentración de la capa de catálisis con la concentración de bulto se relaciona bajo la ecuación 2.41, en donde se expone como la concentración de la capa de catálisis será menor que la de la capa de bulto debido a efectos de agotamiento de reactantes.

$$c_R^* = c_R^0 - \frac{j\delta}{nFD^{eff}} \quad (2.41)$$

Operando sobre las ecuaciones 2.39, 2.40 y 2.41 se puede expresar las pérdidas por concentración en función de la densidad de corriente limitante como:

$$\eta_{conc,Nernst} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{j_L}{j_L - j} \quad (2.42)$$

2. Pérdidas de reacción:

Otra de las maneras a la cual afecta el transporte de masa a la pila es en el ratio de la reacción electroquímica. Se sabe que el ratio de reacción está directamente afectado por la energía de activación de la reacción, y que la ecuación de Butler-Volmer expresa la cinética de estas reacciones químicas, como se ha explicado en la sección 2.2.1.7. En resumen, operando sobre la ecuación de Butler-Volmer en su forma original considerando la concentración de reactantes, las pérdidas por activación y realizando una serie de operaciones parecidas a la de la sección anterior se obtiene la siguiente ecuación:

$$\eta_{conc,BV} = \frac{RT}{\alpha nF} \ln \frac{j_L}{j_L - j} \quad (2.43)$$

Donde $\eta_{conc,BV}$ es la pérdida de voltaje por concentración relacionada a la activación (Butler-Volmer). Véase que es muy parecida a las pérdidas de concentración Nernstianas, solo que se añade el coeficiente de transferencia α que representa la influencia de la barrera de activación.

Finalmente se pueden agrupar las ecuaciones 2.42 y 2.43 en la ecuación 2.44:

$$\eta_{conc} = \frac{RT}{nF} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \ln \frac{j_L}{j_L - j} = c \ln \frac{j_L}{j_L - j} \quad (2.44)$$

La ecuación 2.44 representa las pérdidas por concentración en la pila, donde “c” es una constante. Aunque esta constante es calculable como se expresa en la ecuación 2.44, en realidad se determina empíricamente debido a que el valor calculado teóricamente es mucho menor que el valor determinado bajo la operación real de las pilas, lo que implica un error alto en el cálculo. Además, bajo la ecuación 2.44 se puede observar que a bajas densidades de corriente ($j \ll j_L$) las pérdidas por concentración serán muy bajas y no afectarán al voltaje de la pila. Es por ello que algunos modelos en la literatura y en estudios no consideran este tipo de pérdida, ya que se supone que las pilas de combustible no operaran cercanas a su punto de densidad de corriente límite. Esto se puede apreciar en la figura 2.9. Estas curvas fueron calculadas manteniendo “c” constante y variando valores de j_L .

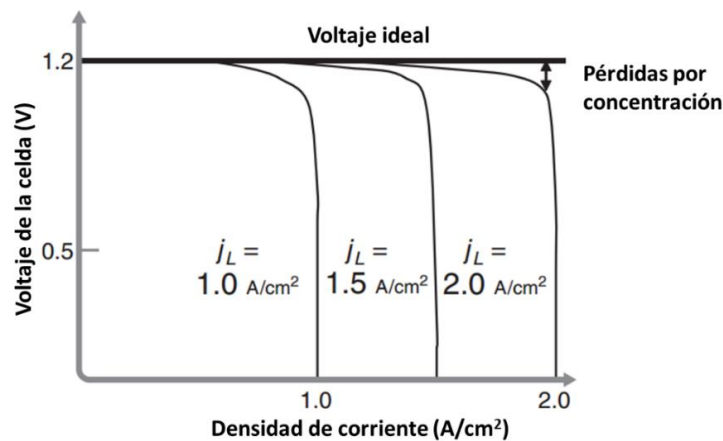


Figura 2.9. Efecto de las pérdidas por concentración en el rendimiento de una pila de combustible. [14].

2.2.2.10 Balance de flujos en una PEMFC

Para la determinación de parámetros importantes en una pila de combustible, es necesario conocer las cantidades de reactantes que se consumen, la cantidad de producto que se produce, y la cantidad de reactante que no se ha utilizado. En el caso de las PEMFC funcionando con hidrógeno como combustible y con oxígeno presente en aire como oxidante, se tendrán los siguientes flujos que conservarán la numeración a lo largo de esta sección:

1. Flujo de hidrógeno entrando a la pila.
2. Flujo de hidrógeno no utilizado saliendo de la pila.
3. Flujo de oxidante entrando a la pila.
4. Flujo de oxidante no utilizado saliendo de la pila.
5. Agua producida en el cátodo, y que sale de la pila.
6. Flujo de electrones o flujo de carga.
7. Flujo de iones.

Estos serían los flujos principales de una PEMFC. Sin embargo, existen otros flujos como el agua que entra a la pila para mantener al electrolito hidratado y los flujos de agua a través del electrolito. Por simplificación de la explicación y porque en los modelos a estudiar no se consideran estos flujos, (ya que se considera que el electrolito se encuentra completamente hidratado) no se tendrán en cuenta estos.

Todos los flujos anteriormente mencionados se pueden relacionar bajo el principio de balance de flujos, que expresa que la cantidad de los flujos que entran a un sistema debe ser igual a la cantidad que salen del mismo. En una pila de combustible todos los flujos se relacionan a uno solo, que es el flujo de carga de la pila, mejor conocido como la densidad de corriente [14]. Esto se expresa en la ecuación 2.45:

$$\text{Flujo 6} = \text{Flujo 7} = (\text{flujo 1} - \text{flujo 2}) = (\text{flujo 3} - \text{flujo 4}) = \text{flujo 5} \quad (2.45)$$

Si se desarrolla la relación con las definiciones de flujo molar y la estequiometría de la reacción se tiene:

$$\frac{j}{2F} = \frac{J_{H^+}}{2} = J_{H_2}^A = 2J_{O_2}^C = J_{H_2O}^C \quad (2.46)$$

Donde j es la densidad de corriente en A/cm^2 , F es la constante de Faraday en C/mol , J_{H^+} es el flujo de iones de H^+ a través del electrolito, $J_{H_2}^A$ y $J_{O_2}^C$ son los flujos netos de hidrógeno y oxígeno en el ánodo y el cátodo de la pila respectivamente. Estos dos últimos flujos hacen referencia a la cantidad de hidrógeno y oxígeno que han sido utilizados. $J_{H_2O}^C$ es el flujo de agua producida en el cátodo, que por estequiometría tendrá que ser el mismo que hidrógeno utilizado.

Bajo la ecuación 2.46 es posible calcular todos los flujos que actúan en la pila, o en su caso calcular la corriente producida en la pila una vez se conozca alguno de los flujos. Esto de suma importancia a la hora de realizar un modelo para relacionar

ecuaciones y obtener valores concretos. Cabe destacar que los flujos expuestos en la ecuación 2.46 son flujos consumidos y producidos por celda, por lo que habría que multiplicar estos valores por el número de celdas de la pila para obtener los flujos reales en un stack.

2.2.2.11 Modelos matemáticos de pilas de combustible

Utilizando las bases expuestas en las secciones anteriores es posible desarrollar un modelo matemático que simule el comportamiento de una pila de combustible del tipo PEM con cierto éxito. Relacionando la termodinámica, la cinética de reacciones, conservación de masa, balances de energía y las pérdidas presentes en la pila es posible realizar un modelo robusto.

Modelos de pilas de combustible en la literatura y en estudios varían desde muy simples, como los modelos 0D (cero-dimensionales), hasta modelos complejos como los modelos 3D (tridimensionales). Los modelos 0D solo se concentran en utilizar la curva de polarización de la pila y todo lo relacionado a ella, como se ha podido expresar en las secciones anteriores. Luego los modelos 1D (unidimensionales) tratan a la pila como una línea de componentes, en donde se van simulando las distintas regiones de una PEMFC. Los 2D (bidimensionales) simulan lo mismo que los 1D solo que añadiendo otra dirección, haciendo que se posible simular estructuras más complejas como los canales de flujo. Finalmente, los 3D consideran la dirección de la línea de componentes y añaden dos direcciones más para la simulación de fenómenos complejos en la pila, como la distribución de calor, distribución de reactantes, agua, entre otros [18].

El uso de un tipo de modelo y sus dimensiones dependerá del estudio que se quiera desarrollar y de la capacidad de computación. Un modelado 3D sería ideal para el estudio térmico de una PEMFC, pero el coste computacional para la realización de tales estudios es elevado y no eficiente para la realización de una gran cantidad de iteraciones. Al contrario, para el simple estudio del rendimiento y la producción de calor de una pila de combustible bastaría un modelo 0D que condense las ecuaciones antes mencionadas.

2.3 Dimensionamiento de intercambiadores de calor compactos.

Para el dimensionamiento de un intercambiador de calor compacto, es necesario conocer una serie de parámetros de operación del mismo. A través de esta operación se consigue obtener datos acerca del tamaño que tendrá que tener el intercambiador para expulsar una cantidad de calor. Este dato de tamaño hace referencia al área de intercambio que se necesita entre dos fluidos para transferir calor de un fluido a otro, bajo una serie de condiciones para cada uno.

Para la determinación del área de intercambio del intercambiador de calor de un vehículo, que es un intercambiador de calor compacto de flujo cruzado donde no se mezclan los fluidos (radiador), se considera el flujo de calor máximo que produce el motor de vehículo en las peores condiciones ambientales. Es decir, a una temperatura ambiente entre unos 35 °C a 45 °C y en la mayor condición de carga del motor.

Uno de los métodos para determinar el área superficial de intercambio es el método de la diferencia media logarítmica de temperatura. Bajo este método se utiliza la ecuación de la razón de transferencia de calor expresada como la ecuación 2.47. En dicha ecuación, \dot{Q} es la razón de transferencia de calor, U es el coeficiente de transferencia de calor total, A_s es el área superficial de transferencia de calor, y ΔT_{ml} es la diferencia media logarítmica de temperatura en el intercambiador. Para intercambiadores de flujo cruzado, como es el caso de los radiadores en automóviles, se necesita aplicar un factor de corrección, que es el factor F que se muestra en la ecuación 2.48.

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{ml} \quad (2.47)$$

$$\Delta T_{ml} = F \Delta T_{ml,CF} \quad (2.48)$$

Donde $\Delta T_{ml,CF}$ es la diferencia media logarítmica de temperatura para intercambiadores de calor de contraflujo, la cual viene expresada en la ecuación 2.49.

$$\Delta T_{ml,CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (2.49)$$

Los valores de ΔT_1 y ΔT_2 hacen referencia a la diferencia de temperatura entre los flujos caliente y frío, de salida y entrada al intercambiador. Lo mencionado se puede apreciar en el esquema mostrado en la figura 2.10.

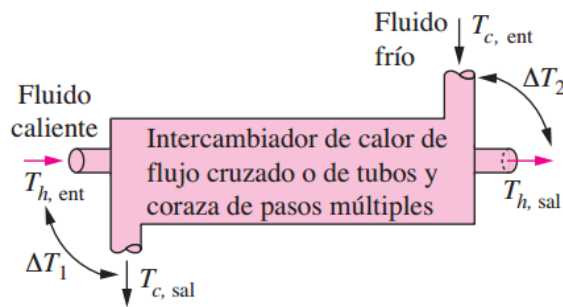


Figura 2.10. Esquema de un intercambiador de calor con flujos [26].

Para la determinación del factor F de corrección es necesario el uso de otras dos razones, P y R , las cuales se definen en las ecuaciones 2.50 y 2.51 respectivamente.

$$P = \frac{t_{sal} - t_{ent}}{T_{ent} - t_{ent}} \quad (2.50)$$

$$R = \frac{T_{ent} - T_{sal}}{t_{sal} - t_{ent}} \quad (2.51)$$

Las temperaturas T hacen referencia a las temperaturas del fluido del lado de la coraza, y la t a las temperaturas del fluido del lado del tubo. En el caso de un radiador de un automóvil el fluido en el lado del tubo será el refrigerante, mientras que el fluido del lado de la coraza será el aire. Con las razones P y R se usa el diagrama expuesto en la figura 2.11 para determinar el factor de corrección para un intercambiador de calor de flujo cruzado.

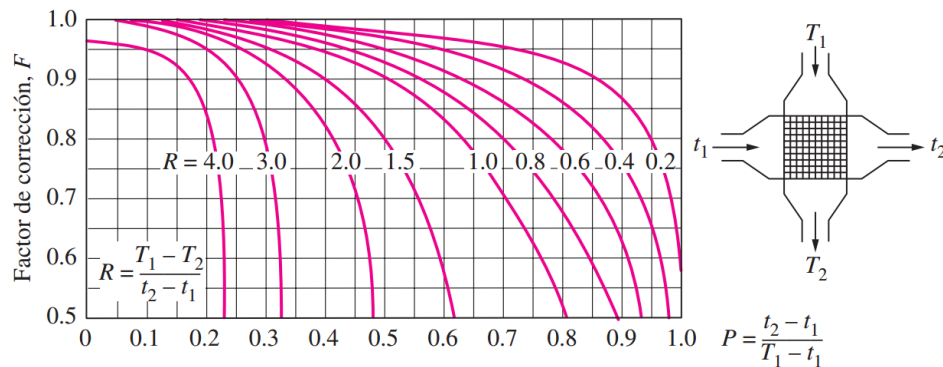


Figura 2.11. Diagrama del factor F de un intercambiador de flujo cruzado no mezclado [26].

Determinando el factor de corrección F , conociendo las temperaturas de entrada y salida de los fluidos, la razón de calor a expulsar, y el coeficiente de transferencia de calor total, se puede obtener un valor para el área de intercambio a través de la ecuación 2.47.

2.4 Vehículos de pilas de combustible.

Un vehículo impulsado por una pila de combustible es simplemente un vehículo que produce la energía que necesita a través de una pila de combustible. Así como un vehículo a gasolina aprovecha la energía de la gasolina y la convierte a energía mecánica, un vehículo de pila de combustible aprovecha la energía del hidrógeno y la convierte a energía eléctrica a través de una reacción electroquímica. Esta energía eléctrica se utilizará para alimentar los diferentes sistemas del vehículo, como baterías, bombas, compresores, y el motor eléctrico para impulsar el vehículo. En las siguientes secciones se realizará una comparativa entre vehículos actuales y se describirán las partes comunes de vehículos con una PEMFC.

2.4.1 Comparativa entre vehículos de pila de combustible.

Actualmente existen una serie de fabricantes de automóviles que se encuentran apostando por la tecnología de las pilas de combustible. Fabricantes como Toyota, Hyundai y Honda ha estado investigando y desarrollando tecnologías para hacer más accesible al mercado automovilístico el uso de pilas de combustible. En la tabla 2.3 se muestran los vehículos actuales de cada uno de estos fabricantes, impulsados por un

motor eléctrico alimentado por una pila de combustible del tipo PEM. Esta muestra una comparativa general entre distintos vehículos impulsados por pilas de combustible, añadiendo un vehículo impulsado por un MCI a gasolina híbrido y un vehículo impulsado por un motor eléctrico alimentado por baterías. Se muestran los datos que se pudieron encontrar en la red de cada uno de los vehículos, con las columnas de número de celdas y el peso de la pila de combustible haciendo referencia a los vehículos impulsados por estas. Se observa que todos los vehículos de pila de combustible tienen un valor de rendimiento del combustible, bajo el dato kilometro por litro, cercano a 28 kilómetros por litro de hidrógeno. Este es mayor que el rendimiento de por ejemplo el rendimiento de un automóvil de gasolina híbrido como el Toyota Camry, demostrando la superior eficiencia de una pila de combustible a un MCI, aun cuando se estructura como sistema híbrido.

En cuanto a autonomía de los vehículos, en la tabla 2.3 se muestra que la autonomía de un vehículo con una PEMFC del tipo turismo, en el caso del Clarity y del Mirai, ronda los 500 km. En el caso del Nexo la autonomía será un poco mayor, ya que el vehículo es del tipo SUV y al ser más grande se pueden añadir tanques de hidrógeno más grandes que en los del tipo turismo. Comparando con un coche eléctrico alimentado por batería, como lo es el Tesla Model 3, los vehículos de pilas de combustible expuestos tienen la ventaja, pero por muy poco, en el rango de unos 100 kilómetros más. Ahora si se considera que se usa el vehículo en ambientes muy fríos la autonomía del Tesla cae, porque disminuye la capacidad de descarga de la batería. Una PEMFC no se ve afectada por climas fríos ya que la reacción electroquímica de la misma produce una gran cantidad de calor que mantiene las temperaturas de la pila bajo condiciones estables. Además, este calor se puede utilizar para calentar los habitáculos del vehículo sin el uso de baterías.

El peso es una de las características más ventajosas de un vehículo eléctrico impulsado por una PEMFC ante uno de baterías. Haciendo uso de la tabla 2.3, el módulo de la pila de combustible del Mirai pesa unos 56 kg, que considerando el peso de los dos tanques de hidrógeno de 5 kg de capacidad cada uno, no supera los 100 kg. En cambio, comparando con el peso de las baterías en un vehículo como el Model 3, con un peso total solamente del pack de baterías de 478 kg, es un aumento de peso de casi cinco veces. Es una de las razones por las que las pilas de combustible son más atractivas en el caso de transporte pesado, donde el peso del vehículo es crítico.

Otra de las ventajas de una pila de combustible ante los coches eléctricos de batería es la recarga. En un coche eléctrico el tiempo de recarga promedio es de unas 5 horas, y de unos 20 minutos a través de una estación de carga rápida, en el caso del Tesla Model 3 Standard Range Plus, para un rango de 248 km [1]. En el caso de los vehículos de pila de combustible la recarga es parecida a la de un vehículo de gasolina o Diesel. A través de un punto de recarga de hidrógeno es posible recargar en unos 3 minutos [3]. Sin embargo, la red de estaciones con un punto de recarga de hidrógeno es muy limitada, mientras que la red de recarga de vehículos eléctricos está muy desarrollada hoy en día, permitiendo hasta recargar un vehículo eléctrico desde casa. Esto se demuestra si se comparan las estaciones de recarga de hidrógeno en el área total estadounidense, de unas 43 estaciones, con una cantidad de más de 25000 estaciones de recarga de vehículos eléctricos en el área estadounidense a día 28 de junio de 2020 [28, 29]. Lo cual se puede ver con mayor claridad en las figuras 2.12 y 2.13.

Tabla 2.3. Comparación entre vehículos impulsados por PEMFC.						
Pila de combustible /Vehículo.	Potencia máxima	Torque máximo	Nº de celdas	Peso de la pila	Kilometro por litro de combustible (Autopista/Ciudad /combinados) (EPA¹)	Autonomía
Toyota Mirai (2020) [3]	114 kW	334 Nm	370	56 kg	29/29/29 ²	500 km
Hyundai Nexo Blue (2020) [4]	135 kW (95 kW PEMFC + 40 kW batería)	394 Nm	440		28/25/26 ²	611 km
Honda Clarity (2020) [5]	130 kW.	300 Nm	-		29/29/29 ²	580 km
Autobuses impulsados por PEMFC Ballard [2]	85 kW-100 kW. Sólo pila.	Depende del motor eléctrico alimentado.	-	256-280 kg		450 km
Toyota Camry Hybrid LE 2020 [9]	153 kW	252 Nm	-	-	22/23/22	1104 km
Tesla Model 3 Standard Range Plus [27]	260 kW	500 Nm	-	478 kg	-	220-455 km [1]
¹ Basado en los métodos de pruebas de consumo de combustible propuesto por la EPA (United States Environmental Protection Agency). ² kilómetro por litro equivalente de gasolina.						



Figura 2.12. Mapa mostrando las estaciones de recarga públicas de hidrógeno en los EEUU a 28 de junio de 2020 [28].

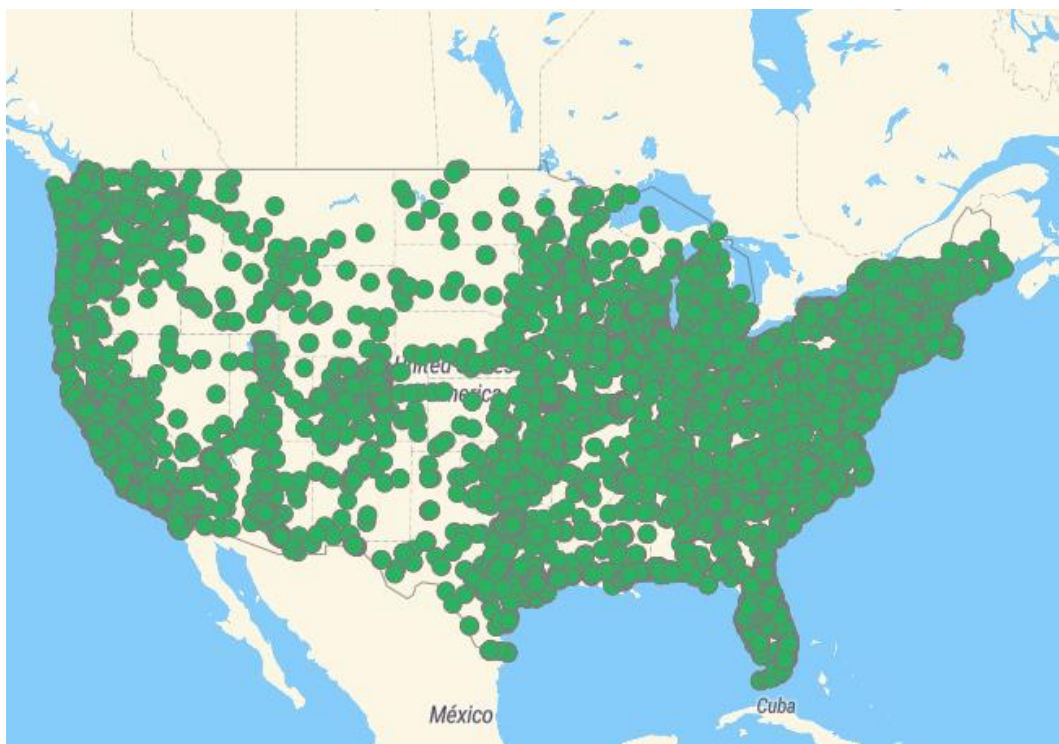


Figura 2.13. Mapa mostrando las estaciones de recarga públicas de vehículos eléctricos en parte de los EEUU a 28 de junio de 2020 [29].

Estas son varias de las comparaciones básicas que se pueden realizar entre diferentes vehículos. En la siguiente sección se hablará acerca de la estructura de los vehículos de PEMFC y los componentes comunes estos.

2.4.2 Estructura de vehículos de pila de combustible.

Se utilizará el modelo 2020 del Toyota Mirai para la explicación de los componentes básicos de un vehículo de pila de combustible. La estructura del vehículo se muestra en la figura 2.14.

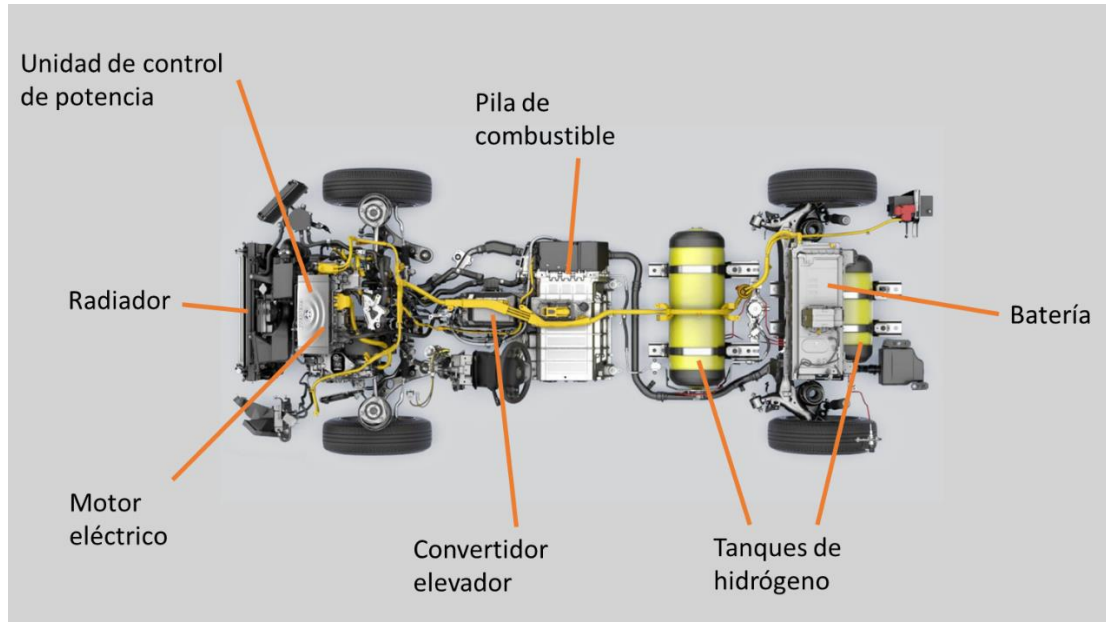


Figura 2.14. Estructura del modelo 2020 del Toyota Mirai resaltando los componentes básicos. [3].

Pila de combustible: Las secciones anteriores explicaron los aspectos más importantes de las pilas de combustible. Es el dispositivo de conversión de energía del vehículo y es del tipo PEM. Se conecta directamente a:

- Los tanques de hidrógeno a través de una válvula que le permite regular la presión del hidrógeno a la presión de operación de la pila.
- Flujo de alimentación de aire con un compresor que le provee la presión necesaria de operación.
- Convertidor DC/DC.

Tanques de hidrógeno: contienen el hidrógeno que utilizará la pila. Estos tanques se encuentran a una presión nominal de 70 MPa, común en los vehículos de pila de combustible. También existen tanques que trabajan a presiones menores, de unos 35 MPa. Se encuentran fabricados por polímeros para encerrar al hidrógeno, una capa de fibra de carbono que le proporciona resistencia al tanque y un recubrimiento exterior de un polímero basado en fibra de vidrio para protegerlo de abrasiones. En el caso del Toyota Mirai los tanques de hidrógeno pueden contener 60 litros uno, y 62,4 litros otro, ofreciendo una capacidad de 122,4 litros, lo que a 70 MPa le permite contener unos 5,1 kg de hidrógeno.

Batería: Dependiendo del vehículo, la batería dentro del mismo diferirá en sus características. Existen diferentes tipos de configuraciones, entre las que destacan:

1. La batería solo es utilizada para iniciar el vehículo, siendo de 12 V. La potencia requerida por el motor eléctrico es proporcionada solo por la pila de combustible.
2. La pila de combustible y la batería trabajan en paralelo, en un sistema híbrido. Utilizándose la PEMFC para las cargas eléctricas base (velocidad crucero), y la batería para las cargas altas donde se necesiten altos torques (aceleraciones rápidas). La batería se recargará con la pila de combustible y con sistemas de freno regenerativo, aumentando la eficiencia del vehículo. Este es el caso de los vehículos del tipo turismo como el Hyundai Nexu, Toyota Mirai y Honda Clarity.
3. Así como el segundo caso, se tiene una batería y una pila de combustible, solo que en este caso la batería alimenta directamente al motor eléctrico, mientras que la pila de combustible solo recarga a la batería [30].

Convertidor DC/DC: Presente en todos los vehículos modernos de pila de combustible, la función de este dispositivo recae en la rectificación del voltaje de salida de la pila y en la amplificación de dicho voltaje. Esto se realiza ya que a mayores voltajes el motor eléctrico del vehículo es más eficiente, produce menos calor, es más pequeño debido a las menores corrientes a las que tiene que trabajar, entre otras ventajas. El convertidor elevador del Mirai lleva el voltaje producido por la pila a unos 650 V.

Unidad de control de potencia: Es la encargada de regular como se alimentará al motor eléctrico. Decide si usar directamente la potencia producida por la pila de combustible, por ejemplo, a velocidades de crucero, o simplemente utilizar la energía almacenada en la batería del vehículo a cargas altas, como en aceleraciones repentinas.

Radiador: parte del sistema de refrigeración del vehículo, el radiador es el intercambiador de calor principal del vehículo, y el cual mantiene las temperaturas del refrigerante en los límites establecidos. En un vehículo de pila de combustible el radiador tiende a ser entre 1,5 y 2 veces más grande que un radiador de un automóvil de un MCI debido a la baja temperatura de operación de la pila, y por lo tanto al bajo salto térmico del refrigerante [25].

3. Metodología.

El objetivo principal de este proyecto es el estudio del funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM, su simulación bajo un modelo matemático y el pre dimensionamiento del radiador necesario para evacuar el calor de la pila. Este estudio se realizará basándose en propuestas previas disponibles en la literatura, aportando ideas propias que hagan al modelo más complejo y que pueda ser utilizado como punto de partida para el análisis térmico de una PEMFC.

3.1 Modelo utilizado para simular una PEMFC.

El modelo utilizado como base de este proyecto es el propuesto por S. N. M., O. Tremblay y L. Dessaint [31], el cual se caracteriza por simular el funcionamiento de una PEMFC con ciertas limitaciones, siendo una de ellas la imposibilidad del cálculo del calor producido por la pila. Se han utilizado librerías que se encuentran cargadas en Simscape Electrical, modificando y aportando módulos necesarios para la realización de este proyecto.

El modelo en su fase final, con todas las modificaciones y aportaciones para el desarrollo del proyecto, se puede apreciar en la figura 3.1. Este se encuentra dividido en seis secciones, que unidas permiten la simulación del comportamiento de una PEMFC. Las secciones con sus respectivas funciones serían las siguientes:

1. Control del flujo de combustible: contiene el bloque que simula el regulador del flujo de combustible, encargado de calcular la cantidad necesaria de combustible para la potencia exigida por una carga eléctrica a la PEMFC. A su vez contiene el bloque del selector de flujo, que permite variar el flujo de combustible a valores diferentes al calculado por el selector de flujo.
2. Bloque de la pila de combustible (Fuel cell stack): contiene todas las bases teóricas para la simulación de una pila de combustible. Es el bloque más importante y en el cual se introducen los parámetros de la pila a simular y las condiciones de funcionamiento. El bloque grafica la curva de polarización de la pila y arroja resultados como el voltaje de operación, los flujos de reactantes, los porcentajes de uso de reactantes, la eficiencia de la pila, las pérdidas por activación, las pérdidas óhmicas y otros datos relevantes.
3. Convertidor DC/DC (DC/DC Boost converter): este bloque simula el comportamiento de un convertidor DC/DC de un vehículo eléctrico alimentado por una PEMFC. Su función se simplifica a el mantenimiento de un voltaje constante para la alimentación de la carga eléctrica, que en el caso de un vehículo de pila de combustible puede ser un motor eléctrico o una batería. Los parámetros de este convertidor se modifican según la pila a simular y la carga que haya que alimentar.
4. Carga eléctrica (Load): responsable de simular la corriente eléctrica que se le exige a la PEMFC. En el caso de vehículos, simula la corriente eléctrica que requiere el motor eléctrico del vehículo para una cierta potencia.

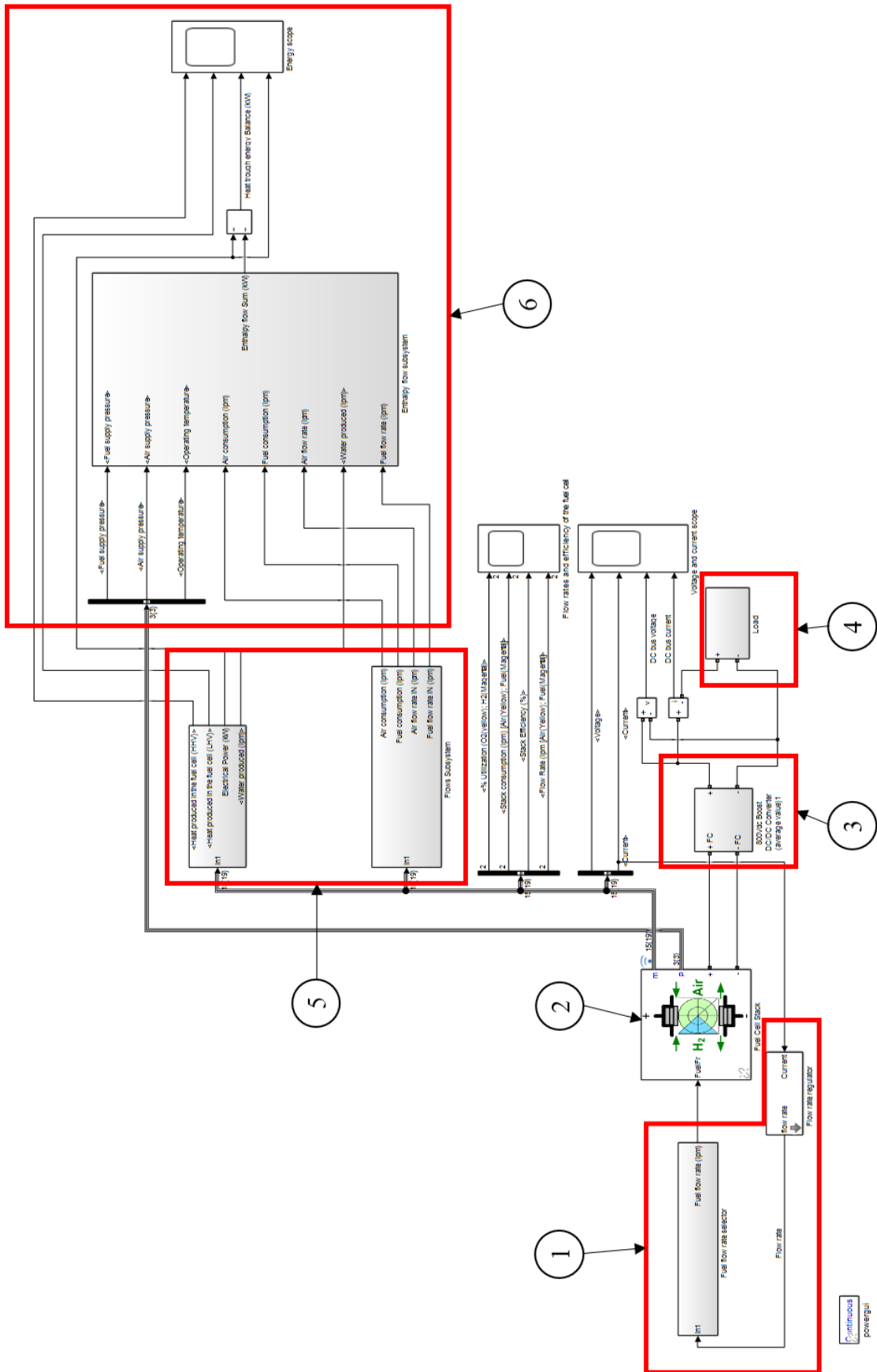


Figura 3.1. Estructura del modelo de la pila de combustible.

5. Sección de procesado y preparación de resultados: Los bloques que se encierran en esta sección se utilizan para el procesado de resultados arrojados por el bloque de la pila de combustible, con el fin de ser utilizados en otros bloques de cálculo y comprobación de resultados.
6. Sección de cálculo de flujos entálpicos y calor producido: calcula los flujos entálpicos de los reactantes de la pila, así como el calor producido por la misma mediante un balance de energía.

Las seis secciones conforman al modelo, siendo la sección del bloque de la pila de combustible la más importante ya que a partir de ella se basan las demás. El modelo basa su funcionamiento en las siguientes suposiciones [31]:

1. Los flujos de reactantes y productos de la pila se consideran como gases ideales.
2. Se alimenta a la pila con hidrógeno como combustible y aire.
3. La pila se encuentra equipada con un sistema de refrigeración el cual mantiene la temperatura de la misma constante, siendo las temperaturas de salida del ánodo y el cátodo iguales a las de operación.
4. La pila contiene un sistema de gestión de la humedad, que mantiene la humedad necesaria para que esta funcione de manera óptima. En el caso de las PEMFC, se mantiene al electrolito hidratado para que su conductividad sea máxima.
5. Se consideran las pérdidas de carga en los canales de flujo como despreciables, resultando en presiones constantes.
6. Las pérdidas de voltaje de la pila se consideran provenientes de la cinética de reacción y del transporte de especies cargadas. No se consideran pérdidas por transporte de masa ya que estas presentan valores apreciables a puntos de operación a los cuales las pilas comerciales no llegan a operar.
7. La resistencia que provee la celda es constante a cualquier condición de operación. Es decir, no se ve afectada por la temperatura o por la humedad de la pila.

Bajo estas suposiciones el modelo crea un sistema de relaciones entre las ecuaciones que representan el comportamiento electroquímico y los flujos de las especies en la pila. Estas relaciones se pueden ver con mayor claridad en el estudio [31]. Para una explicación más detallada de cada una de las secciones y el funcionamiento del modelo, véase el anexo I.1.

3.2 Pila de combustible a utilizar. Módulo FCvelocity HD-6 de Ballard.

La pila de combustible a utilizar como base de este trabajo debe tener una serie de características. Principalmente debe producir una potencia suficiente para alimentar el motor eléctrico de un vehículo. De manera que debe estar cercana a los 130 kW si se vuelve a la tabla 2.3 y se comparan los vehículos impulsados por pilas de combustible tipo PEMFC. Otra de las características, y quizás la más importante, es que se debe haber información suficiente de la pila en el mundo científico como para poder tener todos los parámetros que permitan simularla sin ningún problema. Es por ello que las pilas de combustible de los fabricantes como Toyota, Honda, y Hyundai no se han considerado, ya que no hay suficiente información acerca del funcionamiento de las mismas.

Se ha escogido el módulo *FCvelocity HD-6* de Ballard debido a que se ha trabajado previamente en un estudio de investigación [32], presenta gran cantidad de parámetros de la misma, puede producir una potencia de unos 150 kW y ha sido utilizada en vehículos pesados como autobuses [33]. Es la presentada en la figura 3.2, y su estructura en la figura 3.3. Esta pila presenta los parámetros recogidos en la tabla 3.1.



Figura 3.2. Módulo *FCvelocity HD-6* de Ballard [34]

Esta PEMFC es utilizada en tal estudio de investigación como parte de la estructura del sistema de propulsión de un tranvía híbrido, compuesto por la pila de combustible, una batería y un supercondensador [32]. El estudio provee datos importantes de la pila, como se puede ver en la tabla 3.1, además de la curva de polarización de la misma obtenida por un modelo creado por los autores del estudio y la misma curva obtenida por pruebas experimentales. Esta curva servirá de base para la validación del modelo de la pila, en la que se comparará la curva obtenida por el modelo utilizado en este proyecto y las curvas del estudio.

El módulo *FCvelocity HD-6* será operado en conjunto con un convertidor elevador de unos 800 VDC, como lo expone el estudio mencionado [32]. Bajo esta característica se modifica el módulo del convertidor elevador en el modelo, para que produzca los 800 V constantes para alimentar a un motor eléctrico que opera a tal voltaje y con una potencia de unos 150 kW.

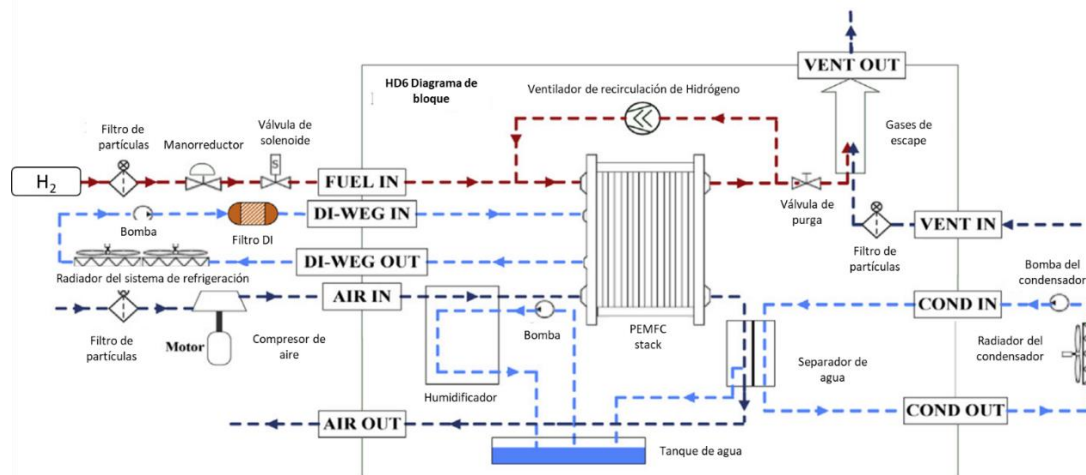


Figura 3.3. Diagrama de bloque del módulo *FCvelocity HD-6* [32].

Tabla 3.1. Parámetros del Módulo <i>FCvelocity HD-6</i> de Ballard [32].	
Potencia Neta (kW)	150
Rango de voltaje (V)	465-730 V Max: 760
Corriente máxima (A)	Max: 300
Peso (Solo pila) kg	404
Dimensiones (mm) (Solo pila de combustible)	1530 x 871 x 495
Número de celdas	762
Parámetros en el punto de operación nominal.	
Punto de operación nominal	568 V, 267 A
Presión nominal del combustible, H ₂ (Bar)	2,24
Presión nominal del aire (Bar)	2,06
Eficiencia nominal de la pila	55 %
Flujo de aire nominal de la pila (lpm)	3653
Temperatura de operación	63 °C

En la figura 3.3 se pueden observar los circuitos de alimentación y expulsión de la pila de combustible, así como los componentes de tales circuitos. El circuito de alimentación de hidrógeno contiene un manorreductor para ajustar la presión del hidrógeno a la presión de operación de la pila, con un ventilador de recirculación del hidrógeno para aprovechar completamente al combustible. En el circuito de refrigeración se tiene un radiador, una bomba y un filtro deionizador para el fluido refrigerante (50/50

Agua desionizada y etilenglicol puro). En el circuito de alimentación de aire existe un compresor para llevar al aire a la presión de operación de la pila, así como un humidificador para mantener al electrolito de la pila hidratado. En cuanto a circuitos de escape, el aire pasa por un separador de agua para drenar el agua producida por la pila a un tanque dentro del módulo y luego recircularla por el humidificador.

3.3 Validación del modelo

Para comprobar que los resultados que arroja el modelo concuerdan con la realidad, se realizará una validación del mismo tomando resultados experimentales del estudio de investigación mencionado. Este estudio de investigación cuenta con la cantidad de datos necesarios para poder modelar la pila, así como datos experimentales que permitan comprobar que el modelo matemático esté funcionando correctamente. Generalmente los modelos se validan comparando la curva de polarización de la pila generada a través de datos experimentales con la generada por el modelo, y es lo que se realizará en este trabajo.

3.4 Área superficial de un radiador para el sistema de refrigeración.

A través del modelo será posible obtener flujos de calor referentes a distintos puntos de operación de la pila, bajo los dos métodos explicados. Se tomará el flujo de calor máximo entre los dos y el cual responda al porcentaje de calor que producen las PEMFC correctamente (debe estar cercano a la potencia eléctrica producida por la pila). Proponiendo unas condiciones para los flujos de refrigerante y de aire, se aplicará el método de la diferencia media logarítmica de temperatura para determinar el área necesaria de intercambio de calor.

Se usará el volumen de control expuesto en la figura 3.4. Donde \dot{m}_{aire} es el flujo de aire y \dot{m}_{ref} es el flujo de refrigerante. El flujo de refrigerante se considera que sale a la misma temperatura de operación de la pila, y el flujo de aire se considerará que entra a temperatura ambiente al radiador. Además, se considera que la pila es adiabática, con lo que todo el calor que produce lo transfiere al refrigerante. Para el cálculo se considerará el peor de los casos de operación de la pila, a plena carga (150 kW) y a una temperatura ambiente de 45 °C. Se supondrán saltos de temperatura para los fluidos que se encuentren en el rango de lo permitido según las temperaturas con las que trabaje el radiador, a la temperatura que trabaje la pila y que concuerden con el comportamiento de PEMFC en estudios.

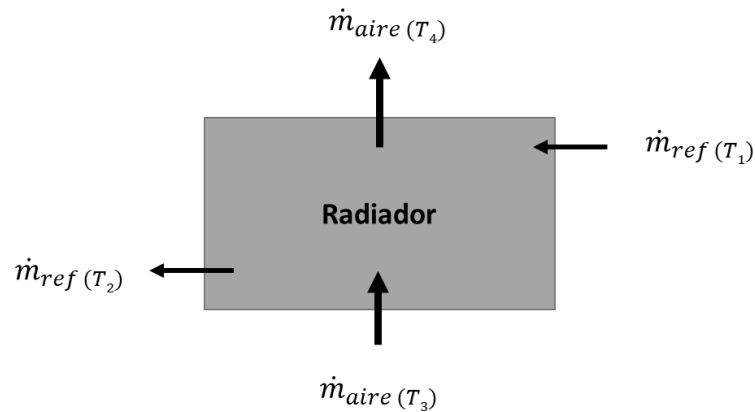


Figura 3.4. Volumen de control para el cálculo del área de intercambio del radiador.

Debido que para el cálculo del área de intercambio del radiador es necesario de coeficientes de transferencia de calor total de radiadores, se tomarán coeficientes de diferentes fuentes [35-38], los cuales se encuentran expuestos en la tabla 3.2. Las siguientes suposiciones se tendrán en cuenta:

- Los valores de estos coeficientes se mantienen constantes en todo momento, no viéndose afectados por el cambio de los coeficientes de transferencia de calor del aire y del agua.
- Los coeficientes no consideran la resistencia térmica proveniente del espesor de los tubos del radiador, debido a que tiende a ser muy baja por el bajo espesor de los tubos del radiador, así como la alta conductividad del material.

El área superficial de este radiador obtenida con los datos de temperatura de la pila de combustible se comparará con el área superficial en el caso de estar trabajando con un MCIA. El área en el caso del vehículo PEMFC debe ser cercano a 1,5 veces al área obtenida con un MCIA [25]. Para el cálculo de cada área se hará uso de un programa de hoja de cálculo, específicamente el Microsoft Excel, en el paquete Office 2019.

Tabla 3.2. Valores de coeficientes de transferencia de calor totales.	
Coefficiente de transferencia de calor total U (W/(m ² K))	Fuente
13,1	[35]
30	[36]
205,7	[37]
350	[38]

4. Verificación y validación del modelo

Antes de la obtención y comprobación de los resultados de la simulación, se procede a la verificación del mismo. Para ello se realiza una comparación entre las curvas de polarización obtenidas por el modelo, y la curva de polarización del módulo *FCvelocity HD-6* obtenida en el estudio de aplicación de esta pila en un tranvía [32]. A continuación, se presenta la curva de polarización y potencia obtenida por el modelo utilizado en la figura 4.1 (véase anexo I.2 para mayor detalle en los datos), las cuales representan el rango de operación de la PEMFC estudiada. Se aprecia como la forma de la curva de polarización concuerda con la forma de aquellas mostradas en la literatura. Un rápido descenso del voltaje a bajas corrientes representando el dominio de las pérdidas por activación y luego un descenso lineal que representa las pérdidas óhmicas. Como el modelo no considera las pérdidas por concentración, debido a que las PEMFC no tienden a operar en la región cercana a la densidad de corriente limitante, estas no se reflejan en la gráfica como el descenso pronunciado a altas corrientes.

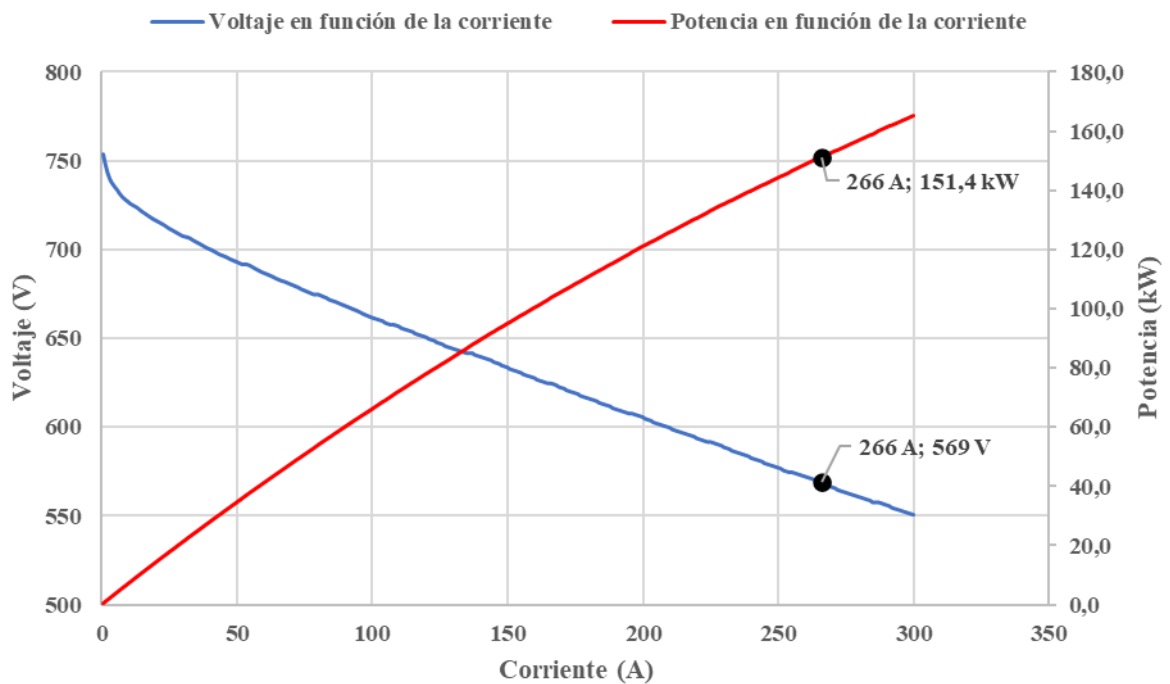


Figura 4.1.Curvas de polarización y potencia del módulo *FCvelocity HD-6* obtenida con los datos de operación nominales.

Para la determinación de esta curva de polarización en un ambiente experimental se realizan pruebas en puntos de operación singulares. Se toma una carga eléctrica dentro del rango que puede alimentar la pila, y se exige la corriente eléctrica asociada a ella a la pila. De ahí se espera a que las condiciones de operación establecidas como la temperatura, la presión, la humedad y los ratios de flujos se estabilicen (lo cual puede llevar unos minutos) para realizar la toma de datos. De esta manera se extraen los datos de corriente y voltaje correctos para unas condiciones de operación específicas [17].

Tomando los datos del estudio mencionado anteriormente [32], se comparan las curvas de polarización obtenidas por el modelo utilizado, el modelo utilizado en el estudio y los datos reales de operación. Se puede apreciar en la figura 4.2 como la curva del modelo utilizado para la realización de este proyecto se acerca a la curva del modelo utilizado en el estudio del tranvía, con un porcentaje de error aproximado en la zona de mayor diferencia en la curva de 1,7 % (Para una corriente de 117 A). Asimismo, se observa la cercanía con los datos reales de la pila, presentando mayor error en los puntos difíciles de modelar como en la zona de baja corriente (de 0 a 50 A). Nótese que tanto el modelo utilizado como el modelo del estudio no consideran las pérdidas por concentración, por las razones mencionadas anteriormente.

Es de suma importancia entender que estas curvas fueron obtenidas bajo la suposición de condiciones de operación estables, es decir a temperatura, presión y humedad constante en la pila. Para el caso del módulo *FCvelocity HD-6* se obtiene la curva manteniendo una temperatura de operación de unos 63 °C, una presión de alimentación de 2,24 bar para el combustible y 2,06 bar para el aire. Modificando la carga que se le exige a la pila a través de la variación de corriente se consiguen los datos de potencial en una serie de puntos de operación.

Debido al comportamiento del modelo en comparación a los datos reales, y en comparación de los datos del estudio mencionado, se considera que el modelo utilizado replica el funcionamiento de la pila de combustible de manera correcta.

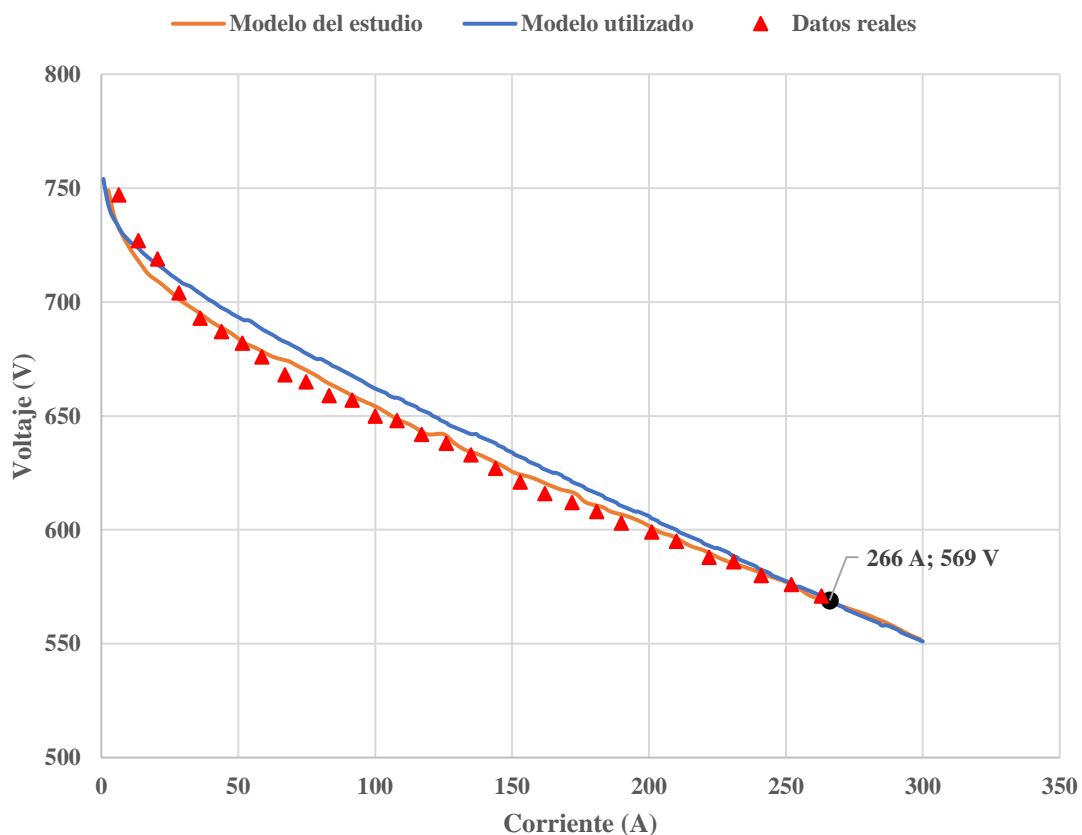


Figura 4.2. Comparación de las curvas de polarización del módulo *FCvelocity HD-6*.

5. Operación de la PEMFC y cálculos térmicos

A lo largo de esta sección se procederá al análisis de la operación de la PEMFC estudiada, a través de los resultados obtenidos por el modelo, y la determinación del área de intercambio necesaria para la expulsión del calor producido por la PEMFC.

5.1 Consumo de reactantes de la pila en su rango de operación.

Como primera sección se hará un análisis del consumo de reactantes de la pila. Con esto se pretende demostrar que el control de combustible y la estequiometría de la reacción es correcta en un rango importante de operación de la pila. Esto es vital como primer paso previo a trabajos futuros de explotación del modelo en condiciones transitorias.

La figura 5.1 muestra los flujos máxicos de combustible (99,9% de hidrógeno), el flujo de oxígeno alimentados a la pila y los consumidos por la reacción electroquímica (los datos de cada punto de operación se encuentran tabulados en el anexo I.2).

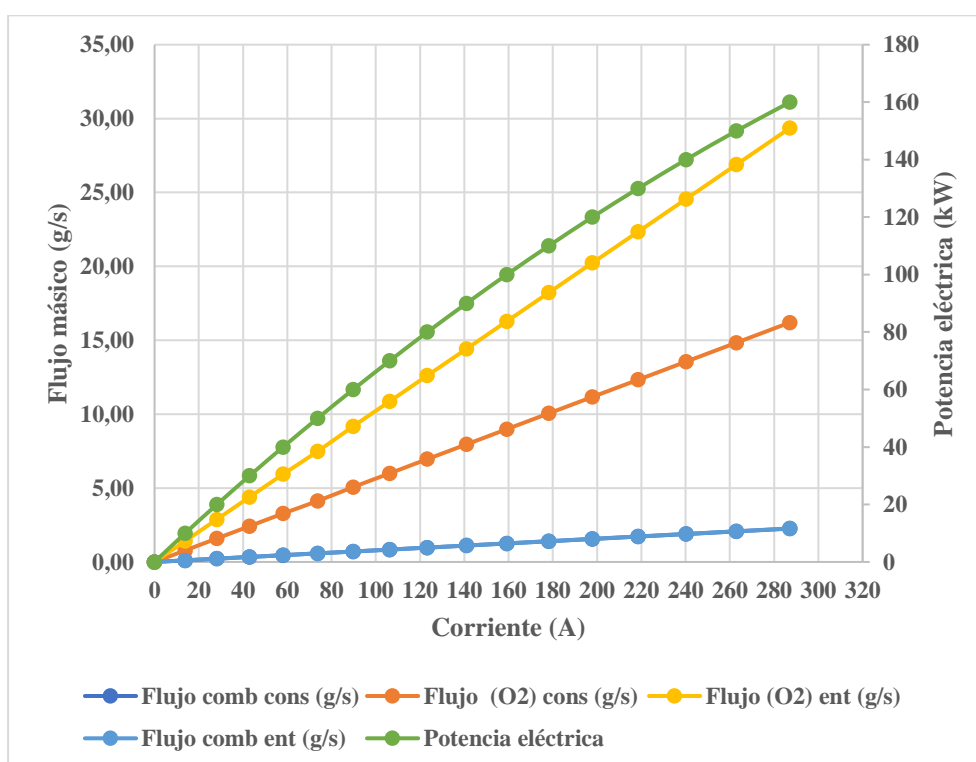


Figura 5.1. Flujos de reactantes de la pila en su rango de operación.

Se aprecia como el flujo de hidrógeno consumido será igual al alimentado debido al regulador del flujo de combustible (de manera que una curva solapa a la otra), que determina la cantidad exacta de combustible para producir la corriente eléctrica exigida por la carga. En el caso del flujo de oxígeno, siempre se alimentará una mayor cantidad de aire de la que necesita la reacción para favorecer la expulsión del agua producida en la

pila con el fin de evitar ahogamientos en ella y para evitar faltas de oxígeno. De manera que se observa como el oxígeno no llega a consumirse en su totalidad.

Tomando el punto de operación en el que la pila se encuentra produciendo unos 151,4 kW, con una corriente de 266 A y un potencial de 569 V, los flujos consumidos de hidrógeno y oxígeno son respectivamente de unos 2,08 g/s y 14,84 g/s. Considerando este como el punto de operación nominal de la pila y suponiendo que se tiene un tanque de hidrógeno de unos 5 kg, se obtiene un tiempo para el vaciado del tanque de unos 40 minutos. De manera que un vehículo del tipo turismo (Toyota Mirai) con una pila de combustible operando a plena carga, con dos tanques de hidrógeno de 5 kg cada uno, podrá funcionar unos 80 minutos. En el caso de autobuses, la cantidad de hidrógeno que almacenan esta entre unos 30 kg a 50 kg actualmente [39], con dos pilas de combustible del tipo *HD-6*, pudiendo funcionar unos 200 minutos considerando 50 kg de hidrógeno almacenados. Realísticamente los vehículos funcionarán bajo un ciclo de conducción variable, con la potencia requerida por el motor eléctrico variando y raramente llegando a los 151,4 kW. Lo cual hace que el dato de tiempo de funcionamiento de la pila no sea representativo de la operación real, pero útil a la hora de predecir el rango que pueda tener el vehículo en el peor de los casos y del tiempo mínimo entre recargas según la cantidad de hidrógeno que se pueda almacenar en él. El uso de tecnologías como supercapacitores, frenos regenerativos y sistemas híbridos con baterías hacen que se reduzca el consumo de combustible, y por lo tanto aumenten el tiempo de funcionamiento de la pila.

Como estudio preliminar de la respuesta de operación de la pila bajo condiciones transitorias, se propone un caso donde se varía la potencia requerida por la pila en todo su rango de operación. Los resultados se pueden apreciar en la figura 5.2, donde se observa que al variar la potencia eléctrica requerida cada 10 segundos, se obtiene una disminución en el consumo de reactantes.

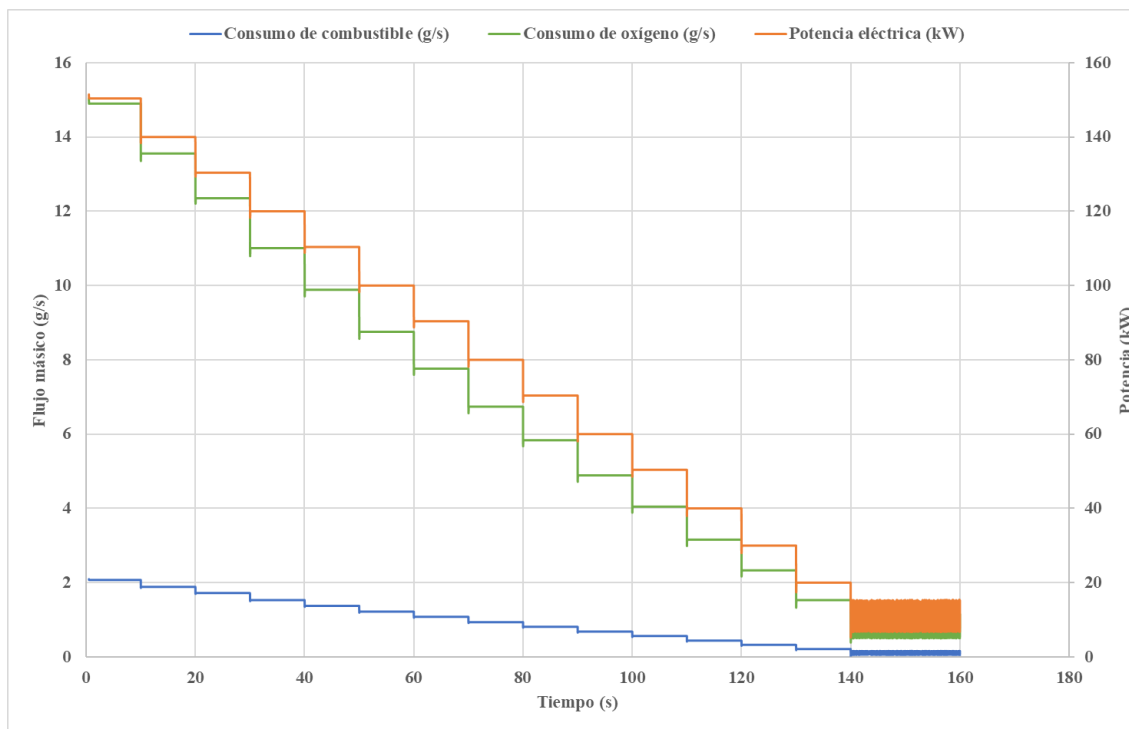


Figura 5.2. Flujo de reactantes de la pila en un estudio transitorio.

Se aprecia la respuesta del modelo ante el cambio de potencia requerida en la forma de las señales. Cada 10 segundos el módulo de la carga eléctrica varía la señal de la corriente requerida, resultando en perturbaciones en la respuesta del modelo por el controlador PID presente en el módulo del convertidor DC/DC. Asimismo estas señales muestran la inestabilidad del modelo en rangos de baja potencia, nuevamente debido a limitaciones en el PID anteriormente mencionado.

Los resultados se encuentran dentro de lo esperado, y concuerdan con los flujos de consumo obtenidos en las simulaciones de puntos de operación aislados, comparándolos con los resultados expuestos en la figura 5.1. Por ejemplo, en el punto de operación de 110 kW, los resultados del consumo de reactantes muestran según la figura 5.1 un consumo de oxígeno de 10,05 g/s y un consumo de hidrógeno de 1,41 g/s, mientras que en el estudio transitorio el consumo de oxígeno a 110 kW es de 9,88 g/s y 1,37 g/s. Lo cual es un error del 1,7 % en cuanto al consumo de oxígeno y un error del 2,8 % en cuanto al consumo de combustible, considerándolo como aceptable para un estudio básico de la pila en condiciones transitorias.

5.2 Calor producido por la pila bajo diferentes cargas.

Para esta sección hay que considerar que se han utilizado dos métodos para calcular el flujo de calor que se produce por la operación de la pila. Los dos métodos se han explicado con anterioridad en la sección 2.2.1.6 y su implementación en la sección 3.1 (Ver anexo I.1 para una explicación más detallada). En la figura 5.3 se aprecian las curvas del calor producido (potencia térmica) por cada método, calculadas bajo la suposición de que el flujo de combustible entrante a la pila es justo el necesario para producir la corriente requerida por la carga. En otras palabras, solo se supe el combustible que se utilizará, sin excesos. Las curvas de calor tendrán una forma polinómica, donde al aumentar la carga aumenta el calor producido. Según la literatura y estudios, la cantidad de calor producido por una pila de combustible del tipo PEMFC es similar a la cantidad de potencia eléctrica producida por la pila [14,17,25], por lo que la curva de calor producido que más se asemeje a la curva de la potencia eléctrica producida se considerará para el predimensionamiento del radiador del sistema de refrigeración.

Para el cálculo del calor producido por la pila se aplicaron los balances de energía propuestos en la sección de metodología. Para el caso del segundo balance de energía en donde se consideran los flujos entálpicos de los reactantes y sus respectivas temperaturas, se tomaron temperaturas de entrada de los flujos de unos 60 °C. Se ha tomado esta temperatura ya que se supone que tanto el flujo de entrada de aire como de hidrógeno se humidifican con el agua producida por la pila, la cual está a la temperatura de operación de la misma a unos 63 °C, con el objetivo de mantener a la membrana polimérica hidratada.

Como se opera con una pila de combustible del tipo PEMFC, donde la temperatura de operación es menor a los 100 °C, el agua producida en la pila estará en fase líquida. Es por ello que utilizando el poder calorífico inferior de la reacción hidrógeno-oxígeno para el cálculo del calor producido resulta en valores no equiparables con la potencia eléctrica que produce la pila (curva “Potencia térmica. Método 1: LHV). Utilizando el poder

calorífico superior de la reacción de combustión del hidrógeno se considera el calor desprendido por la condensación de agua, y por lo tanto todo el calor recuperable de la reacción. De esta manera si la PEMFC produce agua líquida se estará considerando que el calor latente del vapor de agua es cedido, produciendo más calor en la pila, lo cual se aprecia en la curva “Potencia térmica. Método 1: HHV” en la figura 5.3 (Véase anexo I.2 para datos tabulados de cada punto de operación).

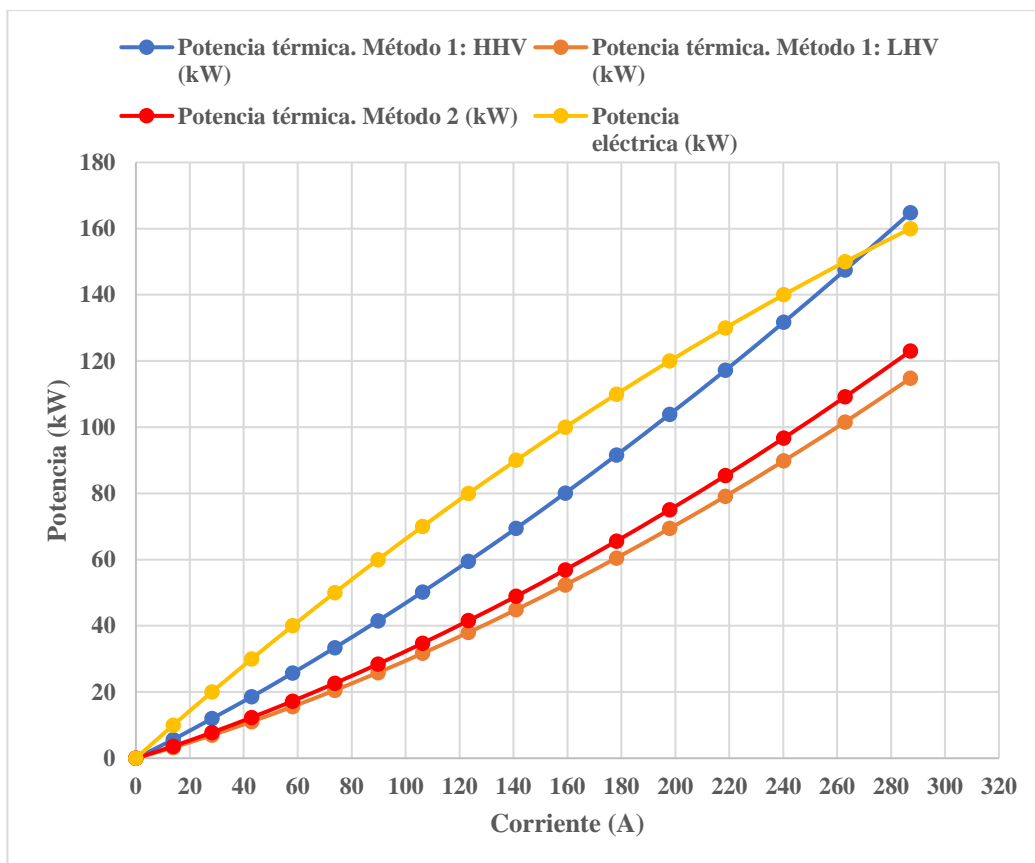


Figura 5.3. Potencia eléctrica y calor producido por la PEMFC.

El calor calculado por el balance de energía de la pila tomando en cuenta los flujos entálpicos de los reactantes que entran y salen de la misma posee valores inferiores de calor que la curva del método 1 que utiliza el HHV del hidrógeno. Los valores de calor inferiores corresponden al efecto que el flujo de agua producida tiene sobre el balance de energía. Debido a que el agua de la pila se ha considerado que sale de la misma en forma gaseosa, se está tomando en cuenta la entalpía de vaporización en el cálculo del flujo entálpico del agua. Lo cual indica que parte de la energía que entra a la pila la absorbe el agua para cambiar a fase vapor, resultando en una reducción del calor. Si se hubiera considerado que el agua sale en fase líquida, el valor del flujo de calor sería mayor ya que no considera esa entalpía de vaporización del agua en el flujo entálpico de la misma, como se puede apreciar en la ecuación 2.29. Es por ello que la curva del método 2 se puede comparar con la curva LHV del método 1, donde se utiliza el poder calorífico inferior de la reacción, cuyo valor está basado en la producción de agua en estado gas. A su vez los flujos entálpicos de las especies que entran y salen de la pila modifican el valor total del calor producido. La figura 5.4 muestra los flujos entálpicos de cada una de las especies

del volumen de control de la pila para un punto de operación de 150 kW, donde se aprecia que el agua saliente posee el flujo entálpico mayor por lo anteriormente mencionado, con un valor negativo de 58 kW. La suma de los flujos entálpicos de aire entrante, aire saliente y del nitrógeno resultan en un valor positivo de 14 kW. Se observa que el flujo de agua tiene una mayor importancia en el balance de energía que los otros flujos que actúan en la pila, sin considerar el del hidrógeno, en este caso. Para el caso de producción de agua líquida, el flujo entálpico de la misma será menor, y por lo tanto la influencia de los flujos entálpicos de otras especies presentes en el volumen de control aumentan en importancia.

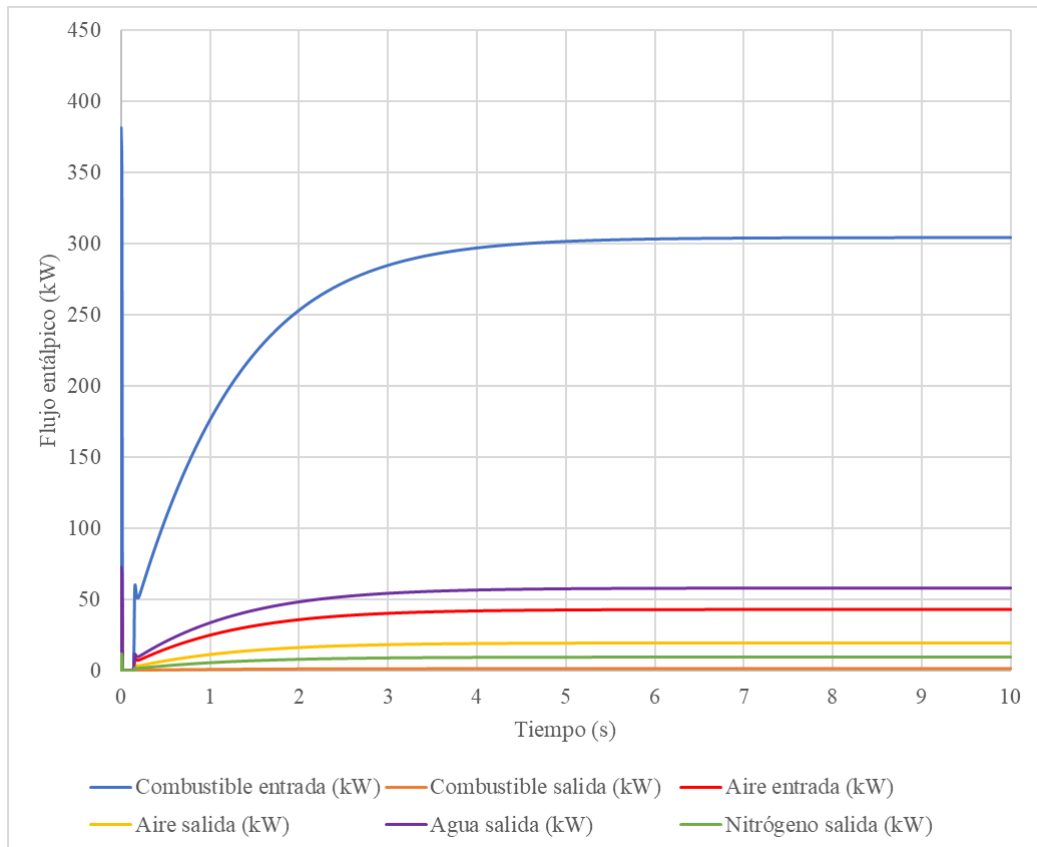


Figura 5.4. Flujos entálpicos de las especies en la pila a una carga eléctrica de 150 kW.

Con estos resultados se aprecia que para el punto de operación de unos 150 kW se tendrá una potencia térmica de unos 147,5 kW utilizando el balance de energía del método 1 y considerando la producción de agua líquida (HHV del hidrógeno), un valor de 101,6 kW con producción de agua gaseosa (LHV del hidrógeno), y un valor de 109,2 kW con producción de agua gaseosa, pero utilizando el balance de energía del método 2. Para el cálculo del área superficial del radiador se ha utilizado el calor calculado para el caso de producción de agua líquida (método 1: HHV), que es el caso de la PEMFC.

En la figura 5.5 se exponen los resultados del calor producido por la pila bajo el estudio transitorio, en el caso de que se utilizar el poder calorífico superior de la reacción en el balance de energía. Estos resultados concuerdan con los expuestos en la figura 5.3, con un porcentaje de error que no supera el 10 %. Así como en la figura 5.2, se puede ver

la respuesta del controlador PID en el módulo del convertidor DC/DC ante los cambios de potencia, como las perturbaciones en las señales cada 10 segundos.

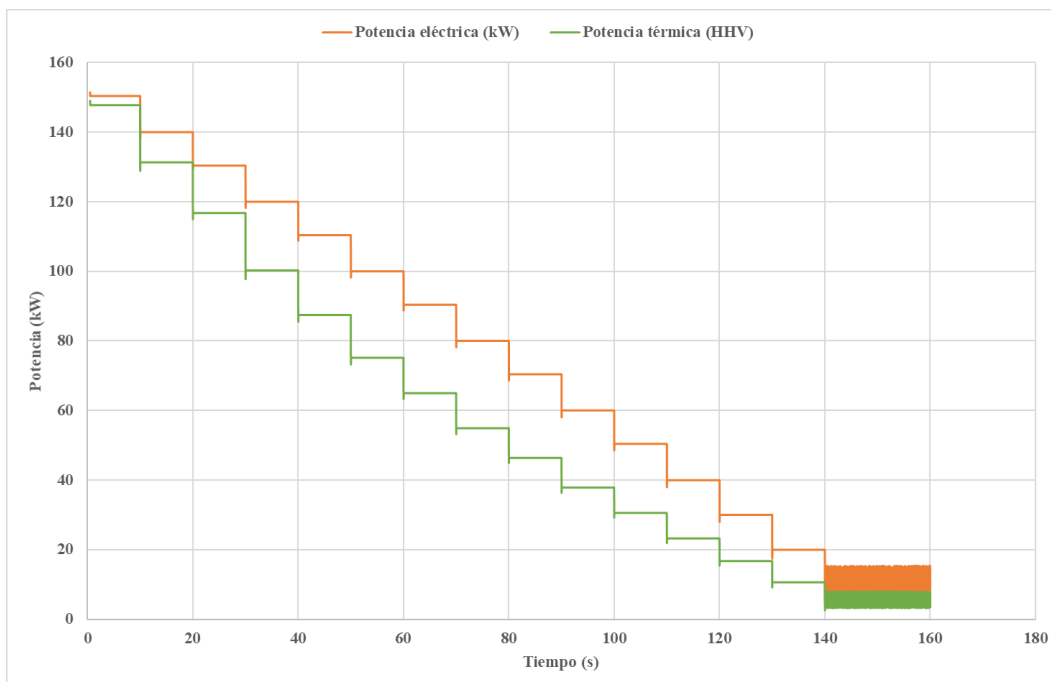


Figura 5.5. Flujo de calor producido por la pila en un estudio transitorio.

5.3 Área superficial necesaria para el radiador de la PEMFC.

El área superficial del radiador necesaria se ha calculado tomando el punto de operación nominal de la pila, el cual produce unos 150 kW de potencia eléctrica y un calor de 147,5 kW utilizando el poder calorífico superior del combustible. Se toma este calor debido a que es el mayor de entre todos los calculados por los varios métodos, es el que concuerda con el funcionamiento de las PEMFC (donde el calor producido por la pila es similar a la potencia eléctrica producida [14]) y porque es el cual toma en cuenta que la PEMFC produce agua líquida. Los datos utilizados para aplicar el método de la diferencia media logarítmica de temperatura se encuentran expuestos en la tabla 5.1, así como los resultados para el caso de un MCIA y una PEMFC. Las temperaturas de salida supuestas para cada uno de los flujos se han tomado de datos representativos en la literatura. Para el caso de las PEMFC, el salto de temperatura en los radiadores es relativamente bajo y no tiende a superar los 10°C en el caso del refrigerante [29][40]. En el caso de los MCIA los saltos de temperatura del refrigerante son mayores, debido a las altas temperaturas de operación del motor, pudiendo conseguirse una variación de 20 °C entre la entrada y salida del refrigerante en el radiador.

Se consideran dos casos para un MCIA. Uno donde los saltos de temperatura del refrigerante y el aire son altos, y otro donde los saltos de temperatura son iguales a los de la PEMFC. Las áreas de intercambio necesarias para cada caso se calculan, utilizando los coeficientes de transferencia de calor total expuestos en la tabla 3.2, y cuyos valores se exponen en la tabla 5.2.

Los resultados expuestos en la tabla 5.2 confirman que el área superficial de un radiador de un sistema de refrigeración de una PEMFC es mayor que en el caso de un MCIA. En el caso de la PEMFC y tomando un coeficiente de transferencia de calor total de unos 350 W/m²K se obtiene un área de unos 2,2 m². En el caso de un MCIA con el mismo salto de temperatura que se supone para la PEMFC, se tiene un área de unos 1,4 m². El área del radiador de la PEMFC es un 1,57 veces mayor que en el caso del MCIA, lo cual concuerda con los datos presentes en estudios donde los radiadores de las PEMFC presentan un área 1,5 veces mayor que los de los MCIA.

Tabla 5.1. Valores de las temperaturas de los flujos del radiador en cada caso.

\dot{Q} (kW)		147,5		
		PEMFC	MCIA	MCIA*
Aire	T_{ent} (°C)	45	45	45
	T_{sal} (°C)	60	80	60
Refrigerante	t_{ent} (°C)	63	102	102
	t_{sal} (°C)	53	82	92

*Considerando el mismo salto de temperatura que en el caso de la PEMFC.

Tabla 5.2. Valores de las áreas de intercambio necesarias en cada caso.

Área de intercambio necesaria (m ²)			
	PEMFC	MCIA	MCIA*
U (W/(m²K))			
13,1	59,5	41,0	36,5
30	26	17,9	16
205,7	3,8	2,6	2,3
350	2,2	1,5	1,4

*Considerando el mismo salto de temperatura que en el caso de la PEMFC.

Las áreas superficiales calculadas con los coeficientes U de mayor valor son las que habrá que considerar para elegir un radiador que pueda manejar los 147,5 kW de calor, por lo que hay que elegir un radiador que tenga tales características. Por ejemplo, un radiador con un área superficial de 2,2 m² y con un U de 350 W/m²K o uno de 2,8 m² y un U de 205,7 W/m²K.

Es importante considerar que las áreas superficiales calculadas son para el peor de los casos a un punto de carga de unos 150 kW y en condiciones ambientales extremas, lo

cual ocurrirá en pocas ocasiones en el uso de la pila. Además, se ha considerado a la pila como adiabática, de manera que el calor que pierde la pila a través de radiación al ambiente, por convección natural y por la refrigeración proveniente de los flujos que entran y salen de la misma tampoco es considerado. Es por ello que las características reales del radiador necesario serán menos restrictivas, pero aun así es de utilidad tener estos valores para comenzar con el dimensionamiento del sistema de refrigeración de la misma, como por ejemplo la cantidad de tubos que necesitará el radiador, la elección de la bomba de refrigerante, la potencia de los ventiladores del sistema, etc...

A su vez, se han calculado los flujos de refrigerante y de aire requeridos en el radiador para la disipación del calor en el rango de operación de la pila, considerado que el refrigerante utilizado es una mezcla en proporción 50/50 agua-etilenglicol. Fijándose en la figura 5.5 se observa cómo tanto el flujo de aire, como del refrigerante aumentan con el calor a disipar. Estos flujos se encuentran en el rango de lo esperado, según los datos expuestos en un estudio de la disipación de calor en un vehículo de pila de combustible [41], donde el flujo másico de refrigerante a 1,34 kg/s, un flujo másico de aire de unos 2,5 kg/s y a una temperatura ambiente de unos 47 °C, el radiador del vehículo estudiado disipa unos 51 kW de calor aproximadamente. En el caso de los datos expuestos en la figura 5.6, a 45 °C de ambiente, con un flujo másico de aire de unos 3,32 kg/s y un flujo másico de refrigerante de 1,39 kg/s, la transferencia de calor es de 50,22 kW (véase anexo I.2 para datos tabulados de cada punto de operación). De manera que se puede comprobar, con una discrepancia del 33% en el flujo másico de aire y de menos de 4% en refrigerante, que los datos calculados se encuentran en el rango de lo esperado en comparación a los resultados del estudio mencionado [41]. No se compara en el punto de diseño de 147,5 kW de calor a disipar debido a que la PEMFC tratada en el estudio no produce esa cantidad de calor.

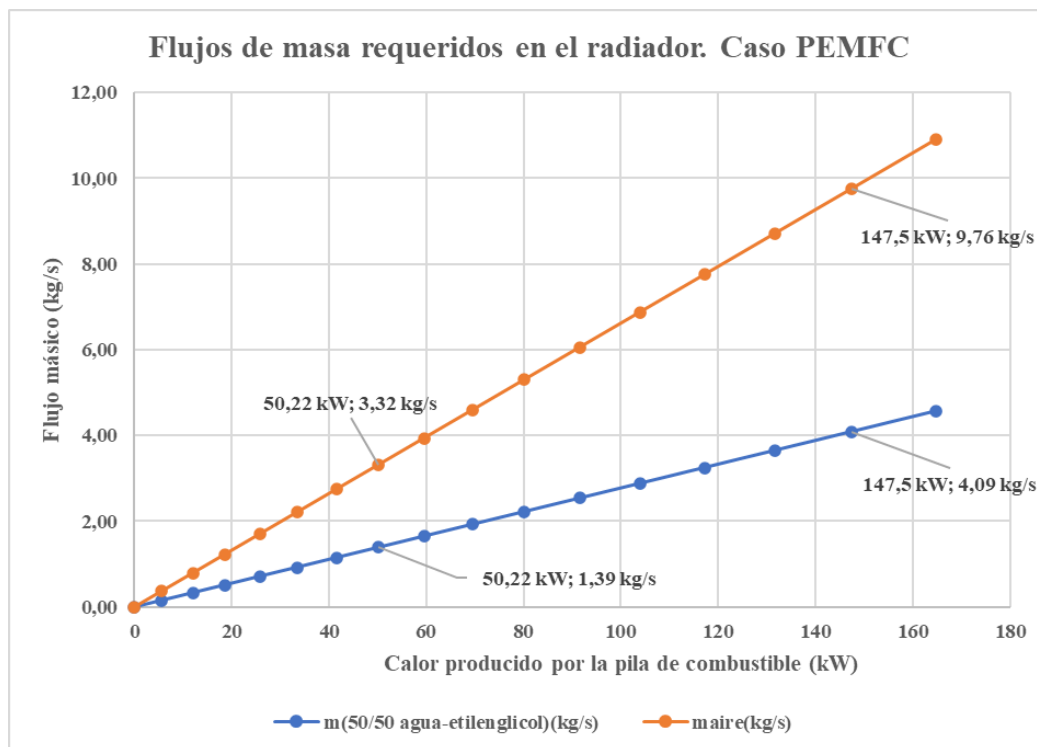


Figura 5.6. Flujos de masa de aire y agua necesarios para transferir el calor producido por la pila en el radiador.

6. Conclusiones

6.1 Conclusiones generales

En el presente trabajo de fin de grado, se ha abordado el modelado de una pila de combustible de uso en la automoción, enfocado al estudio térmico. Esto se ha realizado a través del uso de herramientas informáticas, de conocimientos adquiridos a lo largo de la realización de este proyecto y de conocimientos adquiridos a lo largo del grado. Para el uso del modelo y la implementación de la pila estudiada en este trabajo, se realizó una revisión bibliográfica extensa acerca de las bases teóricas del funcionamiento de las mismas y su implementación en sistemas de transporte. Esto permitió su correcta utilización, la identificación de limitaciones en el modelo, así como la modificación y aportaciones propias al modelo.

El estudio de la pila de combustible del tipo PEM permitió la comprobación del funcionamiento teórico y experimental de la misma, a través de las comparaciones realizadas con datos obtenidos en la literatura como en una serie de estudios, principalmente el estudio térmico, el cual se concentró en la obtención del calor producido por la pila para predimensionar el radiador del sistema de refrigeración necesario. Lo cual se realizó a través de aportaciones de submodelos que permiten el cálculo del calor producido en diferentes condiciones y el estudio de la operación de la pila bajo situaciones de carga eléctrica estáticas y variables.

Con las aportaciones y el uso del modelo, se obtuvo que el calor producido por la pila es cercano a la potencia eléctrica producida por ella, y que el área superficial del radiador necesario para disipar tal calor será un cincuenta por ciento mayor que el área de un radiador utilizado en vehículos con MCIA. Además, se comprobó el correcto funcionamiento del modelo en operación de carga eléctrica variable, con un grado de error aceptable en comparación al estudio de una carga eléctrica estática.

La fortaleza de este modelo recae en que se puede utilizar como un punto de partida para el estudio térmico preliminar de una pila de combustible y para la simulación de la misma en puntos de operación específicos bajo una serie de condiciones ambientales, de una manera rápida, sencilla y económica, en comparación a trabajar con la pila en un ambiente experimental o con modelos más complejos y de mayor coste computacional.

Finalmente, este trabajo ha permitido adentrarse en el mundo de las pilas de combustible, así como en el del hidrógeno y su potencial importancia en el futuro de la industria energética y del transporte. Donde, aunque tenga un futuro incierto en vehículos de bajo peso, es ciertamente una alternativa para la impulsión de vehículos pesados donde la problemática del peso, el espacio ocupado por el sistema de impulsión y el tiempo de recarga no se puede resolver con baterías a día de hoy.

6.2 Trabajos futuros

Este trabajo ha sido presentado como un primer paso en el campo de la simulación de las pilas de combustible de hidrógeno. El modelo tratado presenta una serie de características que lo hacen idóneo como punto de partida para el desarrollo de un rango amplio de estudios, basándose en un tipo de pila de combustible en concreto. A continuación, se presentan una serie de propuestas que se pueden llegar a desarrollar como continuaciones a este trabajo:

- Completo diseño del sistema de refrigeración de un vehículo impulsado por una pila de combustible, como el dimensionamiento del radiador, bombas de refrigerante, ventiladores.
- Uso del modelo para la simulación de una pila de combustible para producción de energía estacionaria, que pueda servir como base para un estudio de implementación de un sistema de aprovechamiento de hidrógeno producido por energías renovables.
- Uso del modelo para el estudio del aprovechamiento del calor producido en una pila de combustible estacionaria en un ciclo de cogeneración.
- Modificación del modelo para que pueda replicar más características de un vehículo de pila de combustible, como por ejemplo acoplamiento de una batería que actúe en conjunto con la pila para alimentar al motor eléctrico.

6.3 Conclusions

Through the development of this undergraduate thesis, a study focused on the simulation of a fuel cell used in road transportation was worked on, with special focus on the thermal study of the fuel cell. This was done through the use of software tools, knowledge obtained through the development of this thesis and with the knowledge learned in the degree. To be able to use the model effectively for the fuel cell studied, an extensive research on the theoretical basis of the operation of them, as well the implementation of fuel cells on transport systems was carried. The research allowed the correct use of the model, the identification of limitations and the adjustment and own contributions to it.

The study of the PEM fuel cell allowed the validation and examination of the theoretical and experimental operation of it, through assessments done with data obtained in the literature and a range of scientific studies. Mainly the thermal study, which was focused on determining the heat produced by the fuel cell. This was possible through the contribution of modules to the model that calculate the heat produced in the fuel cell in an array of conditions, as well modules that allow the study of the fuel cell on a variable electric load situation.

With the contributions, it was possible to calculate the heat produced by the fuel cell, which was then used for the calculus of the surface area of the heat exchanger necessary for the cooling system of the fuel cell. The calculated heat was close to the electric power produced by the fuel cell, and the surface area necessary for the cooling

system was fifty percent greater than the one on a similarly power size ICE powered vehicle. Also, the functioning of the model in a variable electric load was proven to be correct, with an acceptable margin of error in contrast to a static electric load.

The strength of this model derives on the characteristic that it can be used as a starting point for an initial thermal study of a fuel cell, and for the simulation of it on specific operation points through a range of environmental conditions, as a fast, easy and economical way, than to work on the fuel cell experimentally or with more complex and cost expensive models.

Finally, this project made possible the appreciation of the importance of fuel cells and hydrogen on the future of the energy and transportation industry, that, even if it doesn't has a certain future on low weight vehicles, it surely is and alternative in the heavy duty road transportation, where the weight of the vehicle, space occupied by the drive train and recharge times cannot be solved with batteries in the foreseeable future.

7. Referencias

- [1] Electric Vehicle Database [en línea]. [Consulta: 26-06-2020] Disponible en: <https://ev-database.org/car/1177/Tesla-Model-3-Standard-RangePlus>
- [2] Ballard. *Ballard Transit Bus* [en línea]. [Consulta: 26-06-2020] Disponible en: <https://www.ballard.com/markets/transit-bus>
- [3] Toyota. *2020 Toyota Mirai fuel cell electric vehicle* [en línea]. [Consulta: 25-06-2020] Disponible en: <https://www.toyota.com/mirai/fcv.html>
- [4] Hyundai. *2020 NEXO Fuel Cell* [en línea]. [Consulta: 25-06-2020] Disponible en: <https://www.hyundaiusa.com/us/en/vehicles/nexo>
- [5] Honda. *2020 Clarity Fuel Cell* [en línea]. [Consulta: 25-06-2020] Disponible en: <https://automobiles.honda.com/clarity-fuel-cell#technology>
- [6] *Toyota and Hino to Jointly Develop Heavy-Duty Fuel Cell Truck* [en línea]. [Consulta: 22-07-2020] Disponible en: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/32024083.html>
- [7] *Hyundai ships world's first fuel cell heavy duty trucks for commercial use* [en línea]. [Consulta: 22-07-2020] Disponible en: <https://auto.hindustantimes.com/auto/news/hyundai-ships-world-s-first-fuel-cell-heavy-duty-trucks-for-commercial-use-41594005618098.html>
- [8] Hydrogen council. *Path to hydrogen competitiveness, a cost perspective*. [en línea], 22-01-2020. [Consulta: 22-07-2020]. Disponible en: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf
- [9] Toyota. *2020 Camry* [en línea]. [Consulta: 26-06-2020]. Disponible en: <https://www.toyota.com/camry/features/mpg/2559/2561/2560>
- [10] Europe fuel prices [en línea]. [Consulta: 20-07-2020] Disponible en: <https://www.cargopedia.net/europe-fuel-prices>
- [11] Precio de la luz por horas [en línea]. [Consulta: 22-07-2020] Disponible en: <https://tarifaluzhora.es/>
- [12] European commission. *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe* [en línea], 8-07-2020. [Consulta: 15-08-2020]. Disponible en: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf
- [13] European commission. *EU Hydrogen strategy factsheet*. [en línea], 8-07-2020. [Consulta: 15-08-2020]. Disponible en: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1296
- [14] Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney G. Colella, Fritz B. Prinz, *Fuel cell fundamentals*. Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 2016. ISBN: 9781119114208.
- [15] Ballard. *Ballard's heavy-duty fuel cell modules* [en línea]. [Consulta: 25-06-2020]. Disponible en: <https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/motive-modules>
- [16] U.S Department of Energy. *Fuel cells* [en línea]. [Consulta: 25-06-2020]. Disponible en: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/fcto_fuel_cells_fact_sheet.pdf
- [17] Collen Spiegel. *PEM Fuel Cell modeling and simulation in MATLAB*. Academic Press Elsevier. 2008. ISBN: 9780123742599.

- [18] *Advances in chemical engineering. Volume 41. Fuel cell engineering.* Academic Press Elsevier. 2012. ISBN: 978012-3868749.
- [19] Elisabete I. Santiago *et al*, *Performance of Nafion-TiO₂ Hybrids Produced by Sol-Gel Process as Electrolyte for PEMFC Operating at High Temperatures.* 2007 Meet. Abstr.MA2007-02 477. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/MA2007-02/9/477>
- [20] Energy Sage. *Tesla Model S and Model X charging: everything you need to know* [en línea]. [Consulta: 26-06-2020]. Disponible en: <https://www.energysage.com/electric-vehicles/charging-your-ev/charging-a-tesla/>
- [21] Fuel cell store. *Plates.* [en línea]. [Consulta: 26-06-2020]. Disponible en: <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-components/plates>
- [22] Xiao Zi Yuana, Haijiang Wanga, Jiujun Zhanga, David P. Wilkinsona. *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells – From Materials to Processing.* Journal of New Materials for Electrochemical Systems 8, 257-267 (2005).
- [23] D.S. Falcão, P.J. Gomes, V.B. Oliveira, C. Pinho, A.M.F.R. Pinto. *1D and 3D numerical simulations in PEM fuel cells.* International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier. 2011.
- [24] Ollero Loranca, Blanca, *Thermal modeling and analysis of polymer electrolyte membrane open cathode fuel cells.* Masters Theses. 6903. (2012).
- [25] Mohamed H.S. Bargal, Mohamed A.A. Abdelkareem, Qi Tao, Jing Li, Jianpeng Shi, Yiping Wang. *Liquid cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks: A detailed survey.* Alexandria Engineering Journal. Elsevier. (2020).
- [26] Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar. *Transferencia de calor y masa.* Cuarta Edición. McGraw-Hill. Mexico, D.F. 2011. ISBN: 9786071505408.
- [27] Tesla Model 3 [en línea]. [Consulta: 26 de junio de 2020]. Disponible en: <https://www.tesla.com/model3>
- [28] U.S Department of energy. *Hydrogen Fueling Station Locations* [en línea]. [Consulta: 26-06-2020] Disponible en: https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen_locations.html#/find/nearest?fuel=HY&country=US
- [29] U.S Department of energy. *Electric Vehicle Charging Station Locations* [en línea]. [Consulta: 26-06-2020] Disponible en: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity_locations.html#/analyze?fuel=ELEC&country=US&show_map=true
- [30] Barbir, Frano. *PEM Fuel Cells, theory and practice.* Academic Press Elsevier. 2008. ISBN: 9780123877109. p 329.
- [31] S. N. M., O. Tremblay y L. Dessaint, *A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles.* 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, 2009, pp. 1722-1729, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289692.
- [32] Qi Li a, Weirong Chen a, Zhixiang Liu a, Ming Li b, Lei Ma a. *Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway.* Journal of Power Sources 279 (2015) 267-280.
- [33] Zlatimir Živanović. *Perspectives of application of fuel cell electric buses – some experiences from their operation.* 2017. DOI: 0.24874/mvm.2017.43.02.05

- [34] Direct Industry. *All Ballard catalogues and technical brochures* [en línea]. [Consulta: 27-06-2020]. Disponible en: <https://pdf.directindustry.com/pdf/ballard-22779.html>
- [35] Engineering ToolBox. *Overall Heat Transfer Coefficients for Fluids - Heat Exchanger Surface Combinations* [en línea]. [Consulta: 27-06-2020]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html
- [36] James Klett, Ron Ott, & McMillan, April. *Heat Exchangers for Heavy Vehicles Utilizing High Thermal Conductivity Graphite Foams*. United States. 2000.
- [37] Romero Piedrahita, C.A, Carranza Sánchez, Y.A. *Evaluación de la capacidad térmica de un radiador de calor*. Scientia et Technica Año XIII, N° 35, agosto de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701
- [38] Ram Jatan Yadav, Kashish Singh Pilyal, Devansh Gupta, Shivam Sharma. *Design and material selection of an automobile radiator*. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 14, Number 10, 2019 (Special Issue) Research India Publications.
- [39] Hydrogen europe. *Hydrogen buses* [en línea]. [Consulta: 28-07-2020] Disponible en: <https://hydrogeneurope.eu/node/453>
- [40] Ma T, Lin W, Yang Y, Cong M, Yu Z, Zhou Q. *Research on Control Algorithm of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Cooling System*. Energies. 2019; 12(19):3692.
- [41] Chengyuan Gong, Jun Shen, Yi Yu, Kaiqiang Wang & Zhengkai Tu. *Heat dissipation characteristic in the intake grille and radiator of a fuel cell vehicle*. International Journal of Green Energy, 17:10, 591-601. 2020. DOI: 10.1080/15435075.2020.1779078.
- [42] Engineering Toolbox. *Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid* [en línea]. [Consulta: 28 de julio de 2020]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html
- [43] Moran, M. J., & Shapiro, H. N. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. 7th edition. Chichester: John Wiley. 2011. ISBN: 139780470495902.

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Grado en Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**MODELADO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE
DEL TIPO PEM PARA USO EN LA
AUTOMOCIÓN**

ANEXOS

Autor:

Juan Carlos Rodríguez Granadillo

Tutor:

Óscar García Afonso

Septiembre, 2020



Índice

I.0 Introducción	7
I.1 Modelo de la pila de combustible	7
I.1.1 Control del flujo de combustible.....	7
I.1.2 Bloque de la pila de combustible (Fuel cell stack)	8
I.1.2.1 Funcionamiento del bloque de la pila de combustible.	10
I.1.3 Convertidor DC/DC (DC/DC Boost converter).....	11
I.1.4 Carga eléctrica (Load).....	12
I.1.5 Sección de procesado y preparación de resultados	13
I.1.6 Sección de cálculo de flujos entálpicos y calor producido	14
I.2 Operación de la pila de combustible.....	22
I.2.1 Parámetros de funcionamiento eléctricos	22
I.2.2 Flujos entrantes y consumo de reactantes	23
I.2.3 Datos térmicos de la operación de la pila.	24
I.3 Cálculo de área superficial necesaria para el radiador de la PEMFC.....	25
I.4 Tablas termodinámicas utilizadas.....	28
I.5 Fichas técnicas	34

Índice de figuras

Figura I.1. Sección del cálculo y control del flujo de combustible.....	7
Figura I.2. Bloque del modelo de la pila de combustible.....	8
Figura I.3. Señales de entrada disponibles en el bloque.....	10
Figura I.4. Estructura en bloques del modelo de la pila de combustible [31]...	11
Figura I.5. Bloque del convertidor DC/DC.	11
Figura I.6 Bloque del convertidor DC/DC en su forma expandida.....	12
Figura I.7 Bloque de la carga eléctrica.	12
Figura I.8 Bloque de la carga eléctrica en su forma expandida.....	13
Figura I.9 Sección de manejo y preparación de resultados.	13
Figura I.10. Bloque de cálculo del calor producido por la pila según el primer método.	14
Figura I.11 Bloque de cálculo del calor producido en la pila de combustible utilizando el poder calorífico superior e inferior del hidrógeno.	15
Figura I.12 Sección del cálculo de los flujos entálpicos de reactantes, y del calor producido por la pila según el segundo método.	15
Figura I.13 Diagrama del volumen de control para el balance de energía del segundo método.	16
Figura I.14. Subsistema para el cálculo de flujos entálpicos.....	19
Figura I.15. Estructura de los módulos de conversión de flujo volumétrico a másico.	20
Figura I.16. Estructura de los módulos de cálculo de los flujos entálpicos del combustible.....	20
Figura I.17. Estructura de los módulos de cálculo de los flujos entálpicos de aire y agua producida.....	21
Figura I.18. Estructura del módulo de suma de flujos entálpicos.	21
Figura I.19. Cálculo del calor producido en la pila a través del balance de energía y comparación final entre los flujos de energía salientes de la pila.....	22
Figura I.20. Diagrama del factor F de un intercambiador de flujo cruzado no mezclado, para la PEMFC.	25
Figura I.21. Diagrama del factor F de un intercambiador de flujo cruzado no mezclado, para el caso del MCIA.....	26
Figura I.22. Diagrama del factor F de un intercambiador de flujo cruzado no mezclado, para el caso del MCIA con el mismo salto de temperatura que la PEMFC.	27
Figura I.23. Propiedades termodinámicas de ciertas sustancias [26].	28

Figura I.24. Propiedades termodinámicas del agua saturada [26].....	29
Figura I.25. Propiedades termodinámicas de gases a 1 atm de presión [26].....	30
Figura I.26. Propiedades termodinámicas de gases a 1 atm de presión [26].....	31
Figura I.27. Propiedades termodinámicas del aire a 1 atm de presión [26].	32
Figura I.28. Propiedades termodinámicas de ciertas sustancias a condiciones estándares [43].	33
Figura I.29. Ficha técnica del módulo <i>FCvelocity HD-6</i> de Ballard [34].	34

Índice de tablas

Tabla I.1. Parámetros de entrada necesarios en el modelo.	9
Tabla I.2. Parámetros de funcionamiento eléctricos de la PEMFC.....	22
Tabla I.3. Flujos y consumos de reactantes	23
Tabla I.4. Calor producido por la pila y eficiencia de la misma.....	24
Tabla I.5. Propiedades de las especies que actúan en la PEMFC.....	25
Tabla I.6. Datos de cálculo del área superficial requerida para el radiador del sistema de refrigeración de un vehículo.	26
Tabla I.7. Flujos de refrigerante y aire necesarios en el rango de operación de la PEMFC estudiada.	27

I.0 Introducción

En el siguiente apartado de anexos se presenta una explicación detallada del modelo trabajado para la simulación de la PEMFC, resultados tabulados de la operación de la misma, del área superficial del radiador necesario, así como tablas termodinámicas y fichas técnicas utilizadas.

I.1 Modelo de la pila de combustible

En la presente sección se tratará el modelo utilizado para simular la PEMFC considerada para este proyecto. Recapitulando lo tratado en el apartado de metodología, el modelo se compone de seis secciones principales (figura 3.1), las cuales se procederán a tratar de manera detallada a continuación.

I.1.1 Control del flujo de combustible

Identificada con el número 1 en la figura 3.1, está compuesta por dos bloques de cálculo. El principal, el bloque selector de flujo, calcula la cantidad de combustible requerido para que la pila a simular produzca la corriente necesaria para alimentar a la carga eléctrica. Esto lo realiza utilizando las relaciones expuestas en la sección 2.2.2.10 de balance de flujos, y aplicando una conversión de flujo molar a volumétrico haciendo uso de la ley del gas ideal, para calcular el flujo de combustible necesario en *lpm*. Para ello es necesario de la temperatura y la presión de operación de la pila, el número de celdas y la composición del combustible. Como las PEMFC de vehículos funcionan con hidrógeno puro la composición del combustible es de un 99,9%.

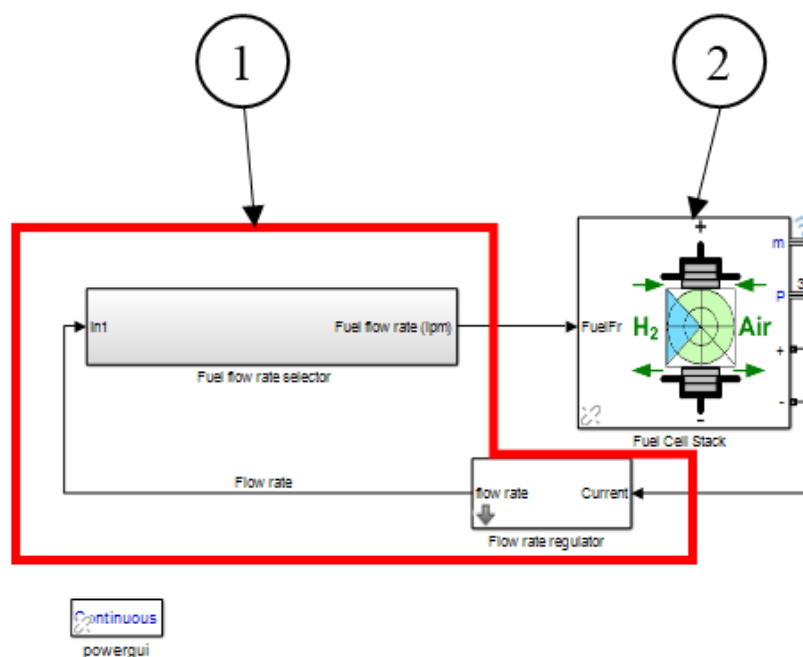


Figura I.1. Sección del cálculo y control del flujo de combustible.

El flujo de combustible será utilizado para el cálculo de la utilización de los reactantes, la cantidad de aire necesaria en la pila, la eficiencia y resultados generales.

I.1.2 Bloque de la pila de combustible (Fuel cell stack)

Este bloque del modelo es el más importante y el que concentra todos los cálculos relacionados a la operación de la pila de combustible. Identificado con el número 2 en la figura 3.1, y de forma específica en la figura I.2, el bloque posee unas ciertas condiciones para su uso. En la tabla I.1 se exponen la serie de parámetros necesarios por el modelo, los cuales se pueden obtener de la ficha técnica de la pila del fabricante o de un estudio de investigación, con una pequeña explicación de a que parte de la teoría de las PEMFC hacen referencia.

Además de estos parámetros de entrada, el modelo cuenta con una serie de opciones para imponer unas condiciones de operación. La condición de operación necesaria por el modelo es la corriente que se le exige a la pila, la cual viene dada por la potencia necesaria por el motor eléctrico y el voltaje del mismo. Se le pueden exigir otras condiciones de operación a la pila, como variaciones en la composición del combustible, oxidante, flujos de reactantes, temperatura, entre otros, lo cual se puede apreciar en la figura I.3. Este proyecto se trabajó con las señales de entrada del flujo de combustible y la corriente necesaria por el motor eléctrico que viene de la sección de la carga eléctrica.

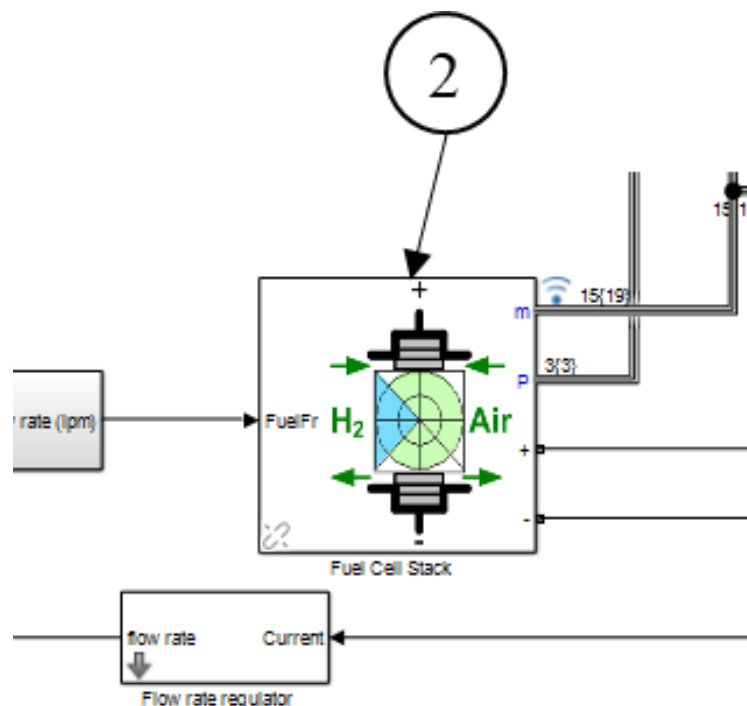


Figura I.2. Bloque del modelo de la pila de combustible.

Tabla I.1. Parámetros de entrada necesarios en el modelo de la pila de combustible.	
Parámetro	Explicación
Voltaje a 0 A (Voltaje a circuito abierto) y a 1 A.	Voltajes necesarios para aproximar el comportamiento de la pila a muy baja corriente, cuyas pérdidas de voltaje vienen dadas por las pérdidas por activación.
Punto de operación nominal. Corriente (A) y Voltaje (V).	Punto de operación nominal de la pila. Necesario para representar la curva de polarización, de manera que contenga tal punto.
Punto de operación máximo. Corriente (A) y Voltaje (V).	Punto de operación donde las pérdidas por concentración empiezan a ser apreciables. Se supone que la pila no opera en esa región, por lo que se coloca este punto de operación como el máximo.
Número de celdas de la pila.	El número de celdas de combustible que tiene la pila. Necesario para los cálculos de potencial total de la pila, cálculos de flujos de reactantes necesarios, entre otros parámetros.
Eficiencia nominal de la pila. (%)	La eficiencia de la pila en su punto de operación nominal.
Temperatura de operación (°C)	La temperatura constante a la cual se encuentra operando la pila. Se puede tomar como la temperatura a la cual sale el refrigerante de la misma. Útil para el cálculo del voltaje reversible de la pila, para los flujos volumétricos de gases, flujos entálpicos de gases, entre otros.
Flujo de aire nominal de la pila (lpm)	Imprescindible para que el modelo calcule el los flujos de aire necesario en puntos de operación diferente al nominal, ya que la cantidad de aire que se alimenta es mayor de lo que necesitaría la reacción de la pila.
Presión de alimentación nominal a la pila. Combustible y aire (bar).	Ambas presiones se utilizan para el cálculo de los flujos molares de los gases que actúan en la pila, el voltaje reversible, las pérdidas por activación, entre otros parámetros.
Composición nominal de los reactantes. % de hidrógeno, oxígeno y agua en el aire.	Obligatoria para el cálculo del uso de reactantes en la pila.

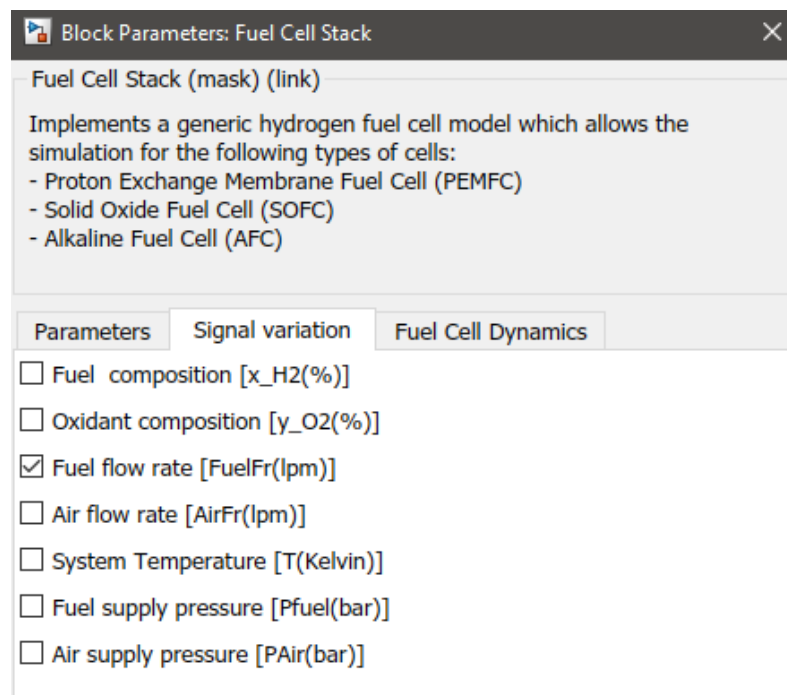


Figura I.3. Señales de entrada disponibles en el bloque.

I.1.2.1 Funcionamiento del bloque de la pila de combustible.

En la figura I.4 se puede ver el diagrama de bloques del modelo del bloque detallado. Básicamente toma los datos de entrada de flujos, presiones, temperatura, composición del combustible y composición del oxidante. Con estos datos es capaz de calcular la utilización del hidrógeno y del oxígeno en un punto de operación concreto. Con ello se calcula el voltaje ideal o reversible bajo la ecuación de Nernst (véase sección 2.2.1.4) determinando las presiones parciales de los gases presentes en la reacción con los ratios de utilización de los mismos. De ahí las pérdidas por activación a través de la ecuación de Butler-Volmer (sección 2.2.1.7) utilizando ecuaciones para aproximar los valores de la pendiente de Tafel y la corriente de intercambio (i_0 , que es la densidad de corriente de intercambio solo que, multiplicada por el área de la celda). En cuanto a las pérdidas óhmicas se refiere, se aproxima el valor de la resistencia óhmica total de la pila con una relación entre el punto de operación de la pila en condiciones nominales con el punto de operación a una corriente de 1 A. Por último, se procede a calcular el voltaje real de la pila sustrayendo del voltaje de Nernst las respectivas pérdidas.

Con los ratios de utilización de los reactantes se calculan los flujos de las especies en la pila bajo la relación de flujos de una pila de combustible, presentada en la sección 2.2.2.10. Las ecuaciones utilizadas para aproximar cada parámetro se encuentran desarrolladas en el trabajo de investigación de S. N. M., O. Tremblay y L. Dessaint [31], las cuales se basan en la teoría expuesta en el marco teórico de este trabajo.

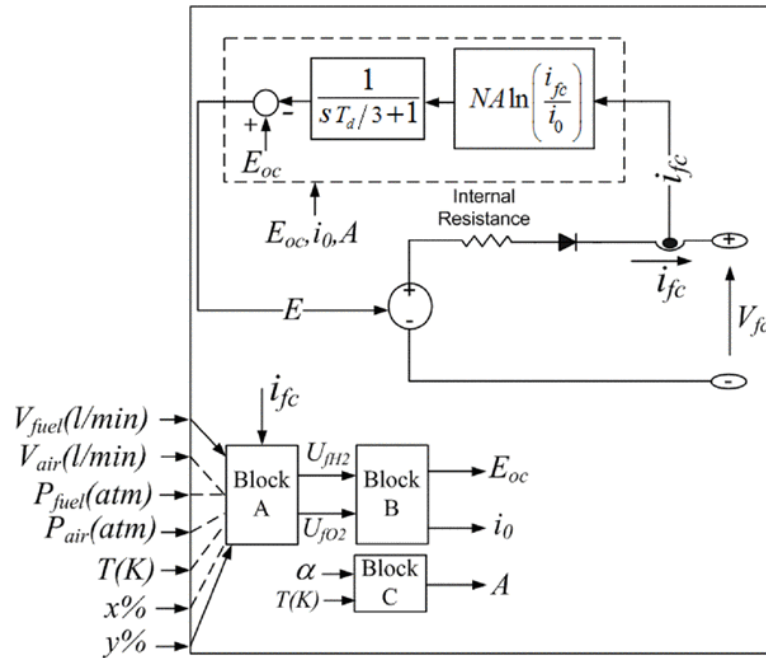


Figura I.4. Estructura en bloques del modelo de la pila de combustible [31].

I.1.3 Convertidor DC/DC (DC/DC Boost converter)

Básicamente dentro del bloque se simula el comportamiento de un convertidor DC/DC, para llevar el voltaje producido por la pila, el cual varía según la corriente requerida por la carga eléctrica, al valor de operación de voltaje constante de la carga eléctrica. Su forma comprimida se expone en la figura I.5.

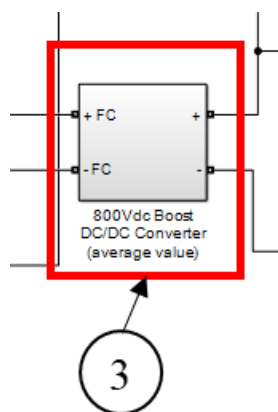


Figura I.5. Bloque del convertidor DC/DC.

El convertidor en su expandida se puede apreciar en la figura I.6, donde los componentes del mismo se observan. Dependiendo de los valores de voltaje y corriente que se manejen, se tendrán que identificar los valores de los componentes a utilizar en el mismo. Un inductor de cierta inductancia, un cierto tipo de transistor y un capacitor con

una cierta capacitancia son las características más importantes a determinar. Para la determinación de las características de los componentes se tomaron convertidores DC/DC conocidos que trabajan en el rango de operación de la pila estudiada, reemplazando los datos en el bloque.

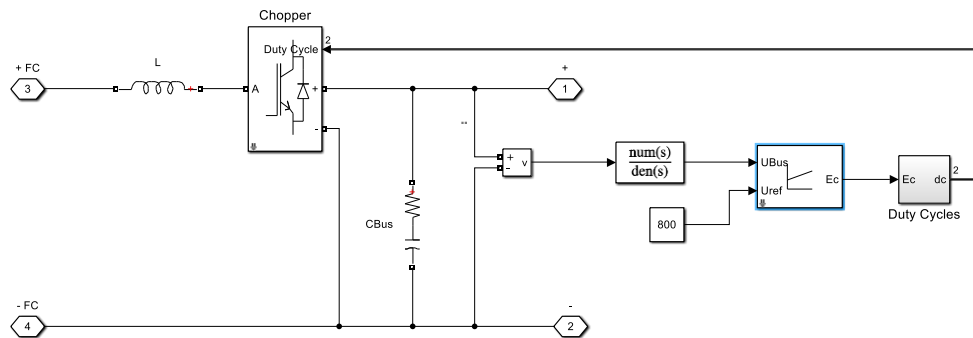


Figura I.6 Bloque del convertidor DC/DC en su forma expandida.

I.1.4 Carga eléctrica (Load)

Esta sección es la responsable de exigir a la pila la corriente eléctrica necesaria para satisfacer la potencia eléctrica requerida por la carga, identificada con el número 4 en la figura 3.1. Se aprecia en las figuras I.7 y I.8, en su forma comprimida y en su forma expandida.

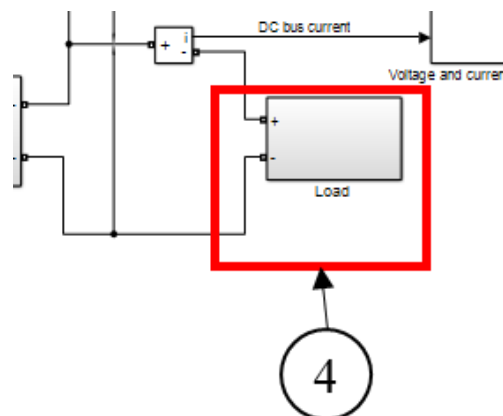


Figura I.7 Bloque de la carga eléctrica.

El bloque puede funcionar bajo dos circuitos, según el diagrama de la figura I.8. La rama “A”, donde se simula la potencia requerida por la carga eléctrica bajo una resistencia y una inductancia, y la rama “B” donde se exige la corriente asociada a la potencia eléctrica requerida con una fuente de corriente controlada. La rama “A” permite la rápida comprobación de resultados en un punto de operación, cambiando solo la resistencia y la inductancia. Debido a la limitación del entorno de programación de Simulink, este no permite la variación de valores de resistencia con el tiempo. La rama

“B” responde a tal problemática, permitiendo variar la corriente requerida a través de señales creadas por el usuario.

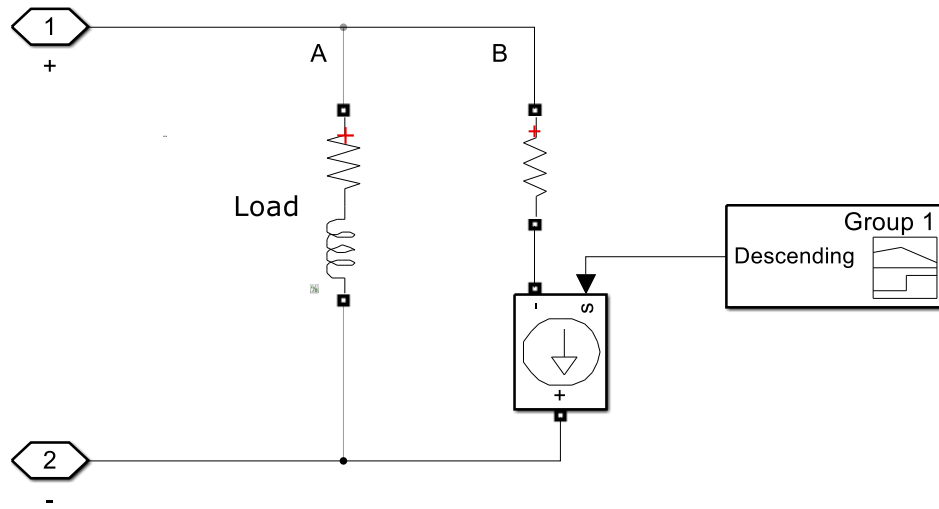


Figura I.8 Bloque de la carga eléctrica en su forma expandida.

Es importante recalcar que si la rama “A” esta activada no lo puede estar la rama “B” y viceversa.

I.1.5 Sección de procesado y preparación de resultados

El uso de esta sección es el del manejo de resultados arrojados por el bloque de la pila de combustible, para permitir su utilización en otras secciones. Esta sección es la identificada con el número 5 en la figura 3.1, que contiene dos subsistemas. Uno para el manejo de los valores de los flujos de reactantes, y otro más general para el manejo de resultados más generales, como la potencia eléctrica y el calor producido por la pila según el primer método mencionado en la sección 2.2.1.6.

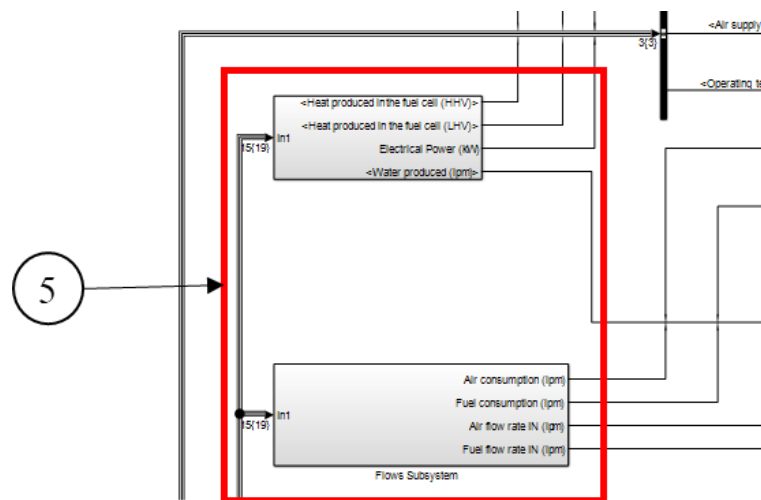


Figura I.9 Sección de manejo y preparación de resultados.

I.1.6 Sección de cálculo de flujos entálpicos y calor producido

Con el fin de obtener datos de la cantidad del calor producido por la pila se han añadido dos subsistemas que calculan, de diferentes maneras, el calor producido por la pila. El calor es calculado bajo los métodos expuestos en la sección 2.2.1.6 del marco teórico. El subsistema que hace referencia al balance de energía simplificado, es decir el primer método, se puede ver añadido a la librería del modelo detallado de la pila en Simulink (sección del bloque de la pila), en la figura I.10.

El funcionamiento de tal bloque es el siguiente. Si se retoma la ecuación 2.21, se tiene la ecuación I.1. El modelo arroja como resultados la corriente y el voltaje total de la pila, los cuales se usan para el cálculo del calor a través del primer método. De manera que se puede reescribir la ecuación I.1 en la ecuación I.2. Para la variación de entalpía se puede usar el poder calorífico superior o el inferior del hidrógeno, dependiendo si se supone que el agua se produce en estado líquido (aunque se supone que está en forma de gas para la utilización del gas ideal) o en estado gaseoso. Además, se deja el coeficiente estequiométrico para considerar la razón de alimentación y consumo de combustible en la pila. Este coeficiente se calcula relacionando el flujo de combustible que entra a la pila con el flujo de combustible consumido.

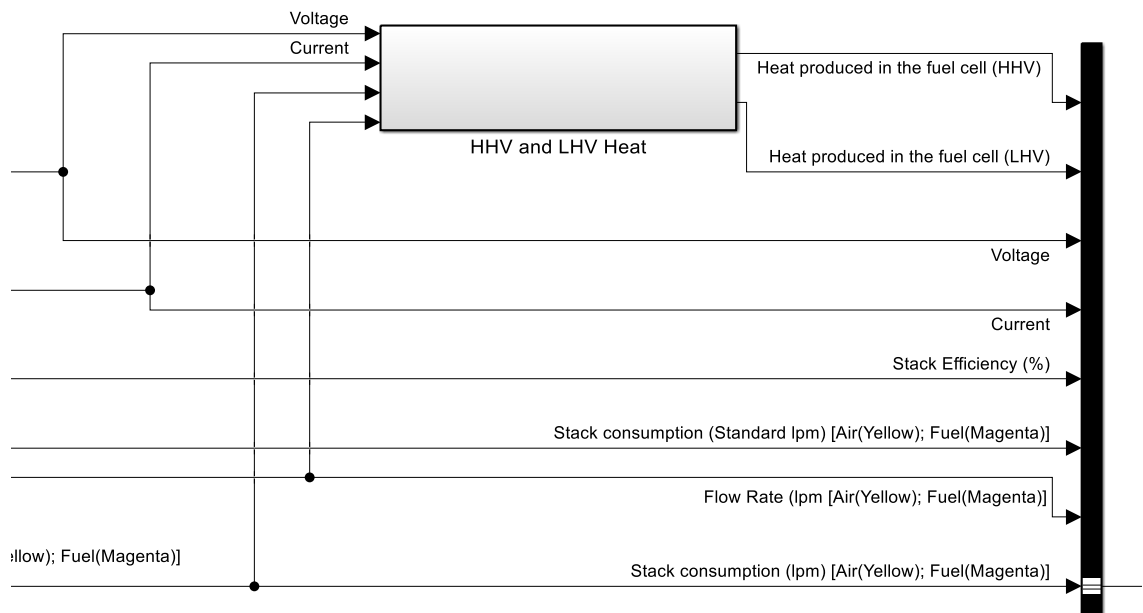


Figura I.10. Bloque de cálculo del calor producido por la pila según el primer método.

$$\dot{Q} = \left(\lambda \frac{|\Delta \hat{h}|}{nF} - V \right) * i * n_{celdas} \quad (I.1)$$

$$\dot{Q} = \left(\lambda \frac{|\Delta \hat{h}|}{nF} n_{celdas} - V_{FC} \right) * i_{FC} \quad (I.2)$$

El subsistema toma como datos de entrada el voltaje real de la pila (V), la corriente (A) y el porcentaje de utilización del flujo de hidrógeno, como se puede apreciar en la figura I.11. Se calculará el calor producido en la pila considerando el poder calorífico superior e inferior del hidrógeno como motivo de comparación. La ecuación I.2 es añadida como una función, tomando el poder calorífico en unidades de J/mol. Las variables FC.z y FC.F hacen referencia a el número de electrones que se transfieren en la reacción y la constante de Faraday (96485 C/mol) respectivamente. Estas se encuentran cargadas previamente en el modelo.

Para el segundo método se añade un subsistema de mayor complejidad, el cual es representado como la “sección de cálculo de flujos entálpicos y calor producido”, identificado con el número 6 en la figura 3.1, retomándolo en la figura I.12. Hace referencia a el método 2 del cálculo del calor producido.

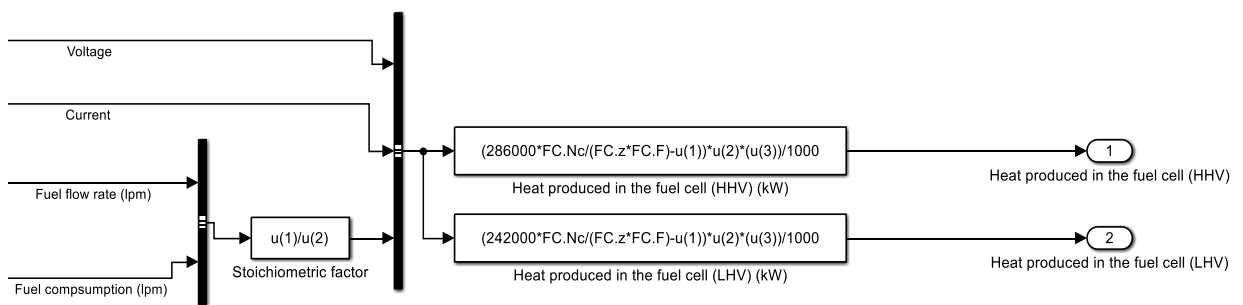


Figura I.11 Bloque de cálculo del calor producido en la pila de combustible utilizando el poder calorífico superior e inferior del hidrógeno.

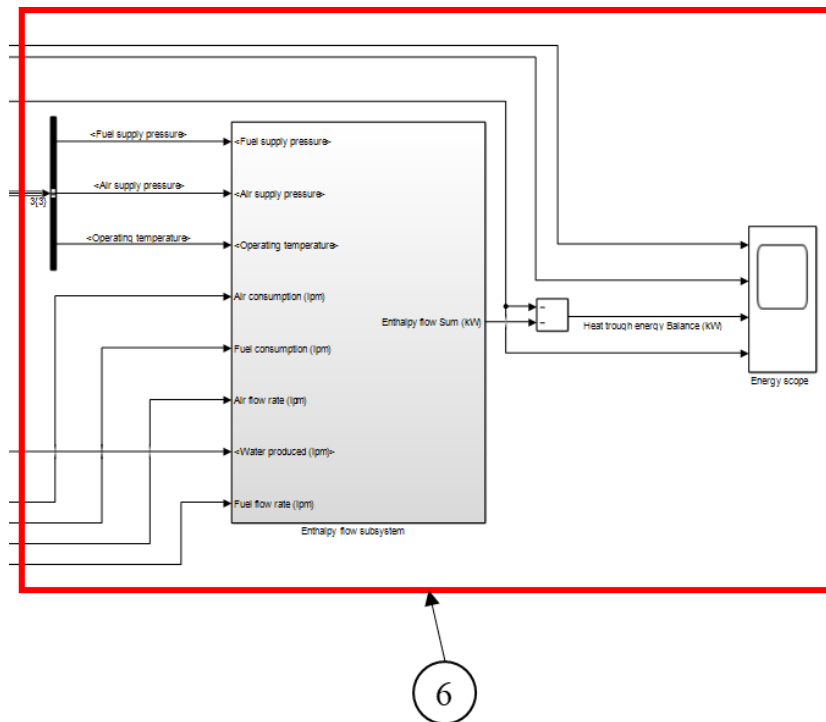


Figura I.12 Sección del cálculo de los flujos entálpicos de reactantes, y del calor producido por la pila según el segundo método.

Se realiza un balance de energía sobre el volumen de control de la pila de combustible, considerando los flujos entálpicos de las especies que entran y salen de ella. Retomando la figura 2.8, se tiene el volumen de control para el balance de energía utilizado para el cálculo del calor producido por la pila. Véase que no se consideran flujos de agua entrante a la pila, es decir se considera que los flujos de combustible y de aire no contienen agua. Dicho balance tiene las siguientes suposiciones:

- Flujo másico unidimensional.
- Análisis en régimen estacionario. Con variaciones de energía cinética y potencial despreciables.
- Cambios en energía cinética y potencial despreciables frente a los cambios de flujos entálpicos de las especies.

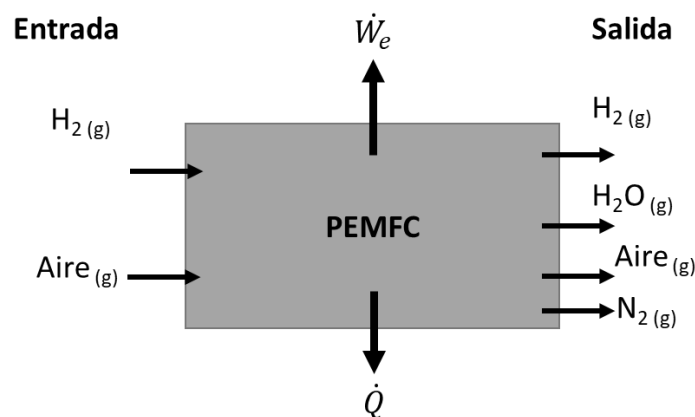


Figura I.13 Diagrama del volumen de control para el balance de energía del segundo método.

De manera que el balance de energía del volumen de control sería el expuesto en la ecuación I.3, donde se consideran los flujos entálpicos de todas las especies que entran y salen de la pila.

$$\sum (\dot{H})_e = \dot{W}_e + \sum (\dot{H})_s + \dot{Q} \quad (\text{I.3})$$

Donde \dot{H} es el flujo entálpico de las especies de la pila, \dot{W}_e la potencia eléctrica producida por la pila y \dot{Q} la potencia térmica (calor) producida. Los subíndices “e” y “s” en los flujos entálpicos hacen referencia a los flujos reactantes de entrada y salida respectivamente. Desarrollando el balance de energía para el volumen de control de la PEMFC se tendrá la ecuación I.4. Incorporando las ecuaciones de gas ideal expresadas en la sección 2.2.1.6, para cada uno de los gases presentes en la pila, se tiene la ecuación I.5.

$$\begin{aligned} & [(\dot{H})_{H_2,e} - (\dot{H})_{H_2,s}] + [(\dot{H})_{Aire,e} - (\dot{H})_{Aire,s}] + [-(\dot{H})_{H_2O,s}] \\ & = \dot{W}_e + \dot{Q} \end{aligned} \quad (I.4)$$

$$\begin{aligned} & [\dot{m}_{H_2,e}(Cp_{H_2}T_{e,H_2} + h_{HHV,H_2}^0) - \dot{m}_{H_2,s}(Cp_{H_2}T_{s,H_2} + h_{HHV,H_2}^0)] \\ & + [\dot{m}_{Aire,e}T_{e,Aire} - \dot{m}_{Aire,s}T_{s,Aire}] * (Cp_{Aire}) \\ & + [-\dot{m}_{H_2O,s}(Cp_{H_2O} * T_{s,H_2O} + h_{fg,H_2O}^0)] = \dot{W}_e + \dot{Q} \end{aligned} \quad (I.5)$$

En la ecuación I.5 \dot{m} es el flujo másico de la especie, Cp el calor específico a presión constante de la especie, evaluado en la temperatura media entrada-salida de la especie, T la temperatura de la especie, h_{HHV,H_2}^0 el poder calorífico del hidrógeno a 0°C y h_{fg,H_2O}^0 la entalpía de vaporización del agua a 0°C. Esta ecuación se implementó al modelo de manera que los únicos datos a introducir en el subsistema son los Cp , h_{HHV,H_2}^0 , h_{fg,H_2O}^0 y las temperaturas de entrada de los gases. La temperatura de salida de los gases se ha supuesto como la misma que la temperatura de operación de la pila. La potencia eléctrica de la pila la arroja el modelo, permitiendo calcular el calor producido por la pila bajo esta ecuación.

Sin embargo, como todos los flujos que maneja el modelo son flujos volumétricos, litros por minuto (lpm), habrá que realizar una conversión hacia unidades másicas de kg/s o g/s. Debido a que todos los flujos se consideran como gases ideales, se les puede aplicar la ley del gas ideal, resultando en la relación expuesta en la ecuación I.6.

$$\dot{m}_i = \frac{P_i * \dot{V}_i * M_{m_i}}{R T_i} \quad (I.6)$$

P_i es la presión de la especie, V_i el flujo volumétrico, M_{m_i} la masa molar de la especie, R la constante universal de los gases ideales (8,314 J/molK) y T_i la temperatura del flujo de la especie. Se utilizó en el subsistema la ecuación I.6 con las unidades expuestas en la ecuación I.7, el coeficiente de 60000 dividiendo al flujo volumétrico para pasarlo a m³/s y el coeficiente de 10⁵ para convertir de bar a Pa. El resultado del flujo másico vendrá expresado en g/s.

$$\dot{m}_i \left(\frac{g}{s} \right) = \frac{P_i(bar) * 10^5 * \left(\frac{\dot{V}_i \left(\frac{l}{min} \right)}{60000} \right) * M_{m_i} \left(\frac{g}{mol} \right)}{R \left(\frac{J}{molK} \right) T_i(K)} \quad (I.7)$$

Hay que considerar que el modelo tiene una limitación en su estado básico. Los resultados de los flujos volumétricos de los reactantes de la pila son calculados con la temperatura de operación de la misma, lo cual se toma en cuenta para el cálculo de flujos másicos. En el caso del balance de energía expresado en el segundo método para el

cálculo de calor se utilizará la temperatura de operación de la pila para convertir los flujos volumétricos en flujos másicos. Luego para el cálculo de los flujos entálpicos se usará la temperatura de los flujos entrante impuesta. De esta forma se asegura que se están considerando las cantidades correctas de cada flujo.

En la figura I.14, se presenta el subsistema completo para el cálculo los flujos entálpicos de las especies presentes en el volumen de control. El resultado final de este subsistema sería la parte izquierda de la ecuación I.5. Del lado izquierdo se representan los datos de entrada provenientes de los resultados del modelo de la pila. Se realizan todas las operaciones necesarias para poder obtener los parámetros de cálculo de cada uno de los módulos de conversión de flujo volumétrico a flujo másico.

Se aplica la ecuación I.7 a cada uno de los flujos. De ahí se procede al cálculo de los flujos entálpicos de cada una de las especies presentes en la pila basándose en la ecuación I.5, para así finalizar con el cálculo del calor producido. Se puede apreciar en el subsistema los cuadros en los que habrá que cambiar las temperaturas de los flujos entrantes, la masa molar de las especies de los flujos, y el C_p . Para verlo con mayor claridad se muestran los módulos en las figuras I.15, I.16, I.17 y I.18.

Al finalizar los cálculos de cada uno de los flujos entálpicos, se aplica el balance de energía para el cálculo del calor producido por la pila. Esto se realiza en el módulo expuesto en la figura I.19. Como se puede observar se acoplan los resultados de calor y potencia eléctrica producida a un bloque de examinación de datos para la fácil comparación de los mismos.

Otras modificaciones que se les añadieron al modelo fueron más simples y hacen referencia a la simplificación de la obtención y extracción de datos del mismo, referentes a resultados de temperatura, presión, flujos, etc...

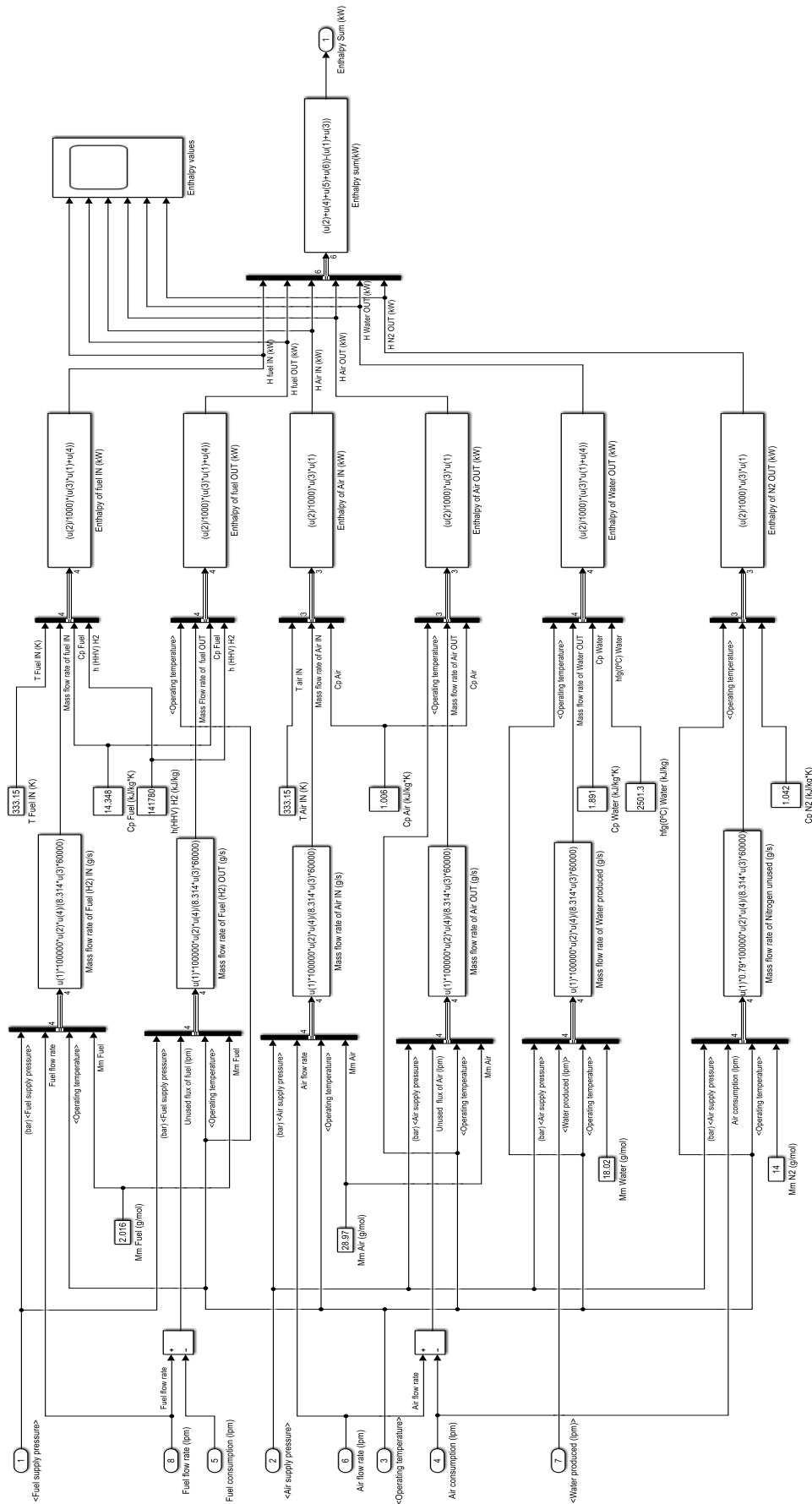


Figura I.14. Subsistema para el cálculo de flujos entálpicos.

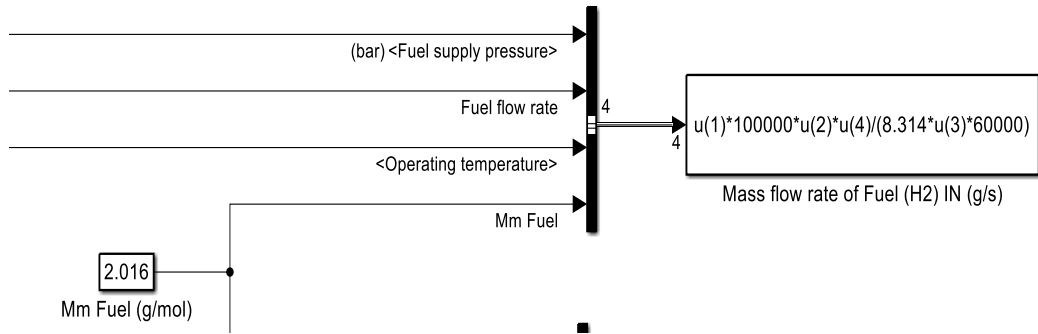


Figura I.15. Estructura de los módulos de conversión de flujo volumétrico a másico.

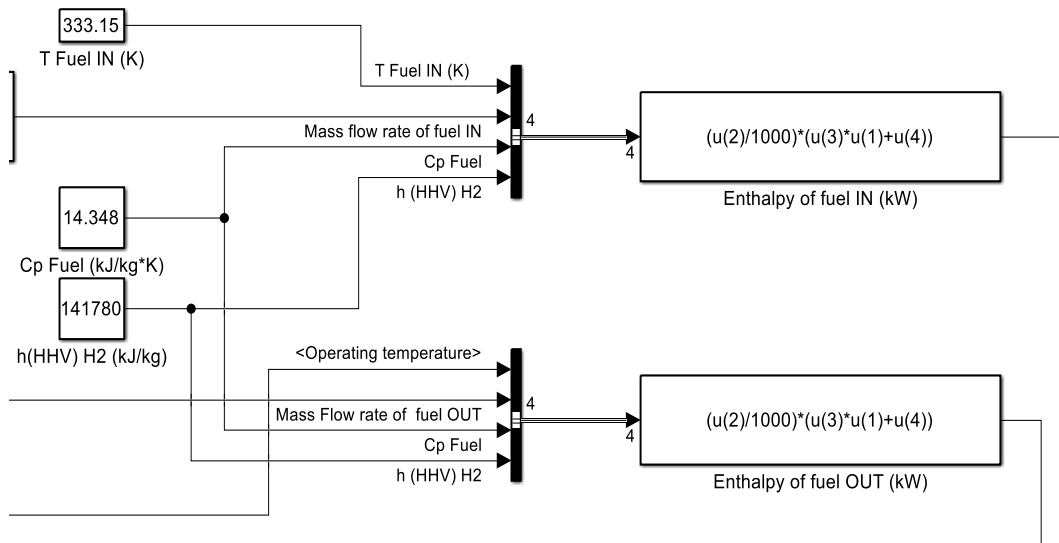


Figura I.16. Estructura de los módulos de cálculo de los flujos entálpicos del combustible.

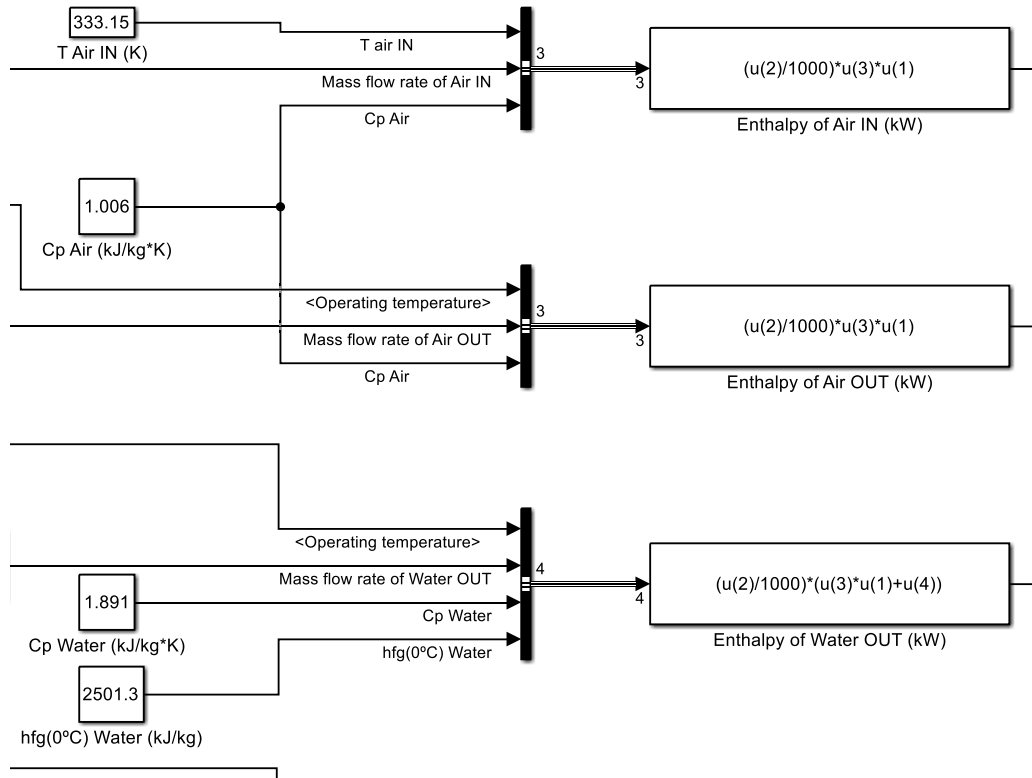


Figura I.17. Estructura de los módulos de cálculo de los flujos entálpicos de aire y agua producida.

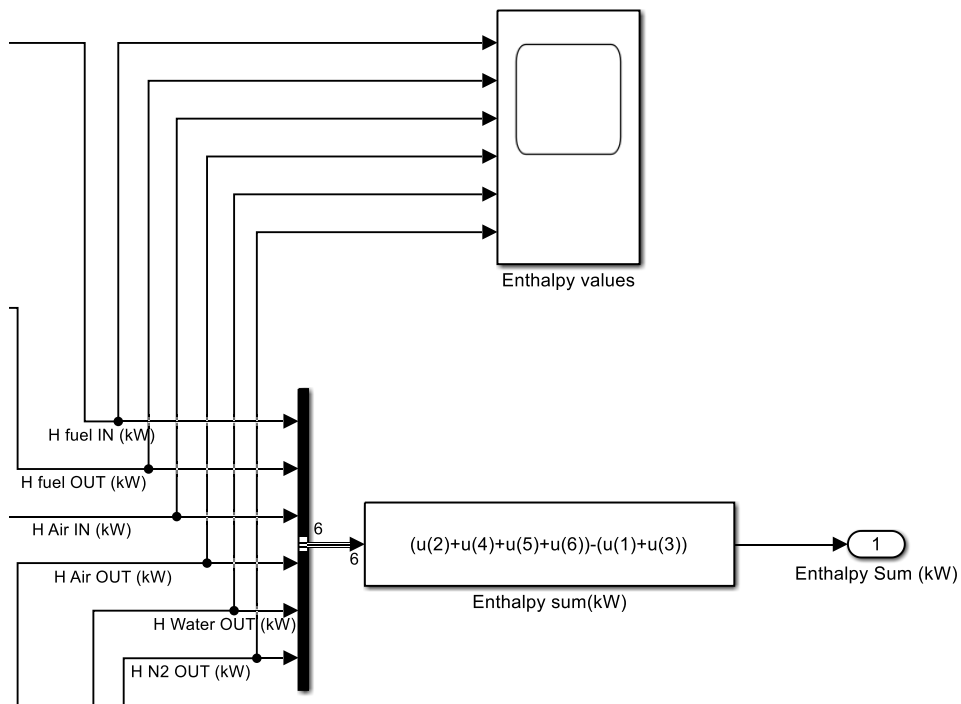


Figura I.18. Estructura del módulo de suma de flujos entálpicos.

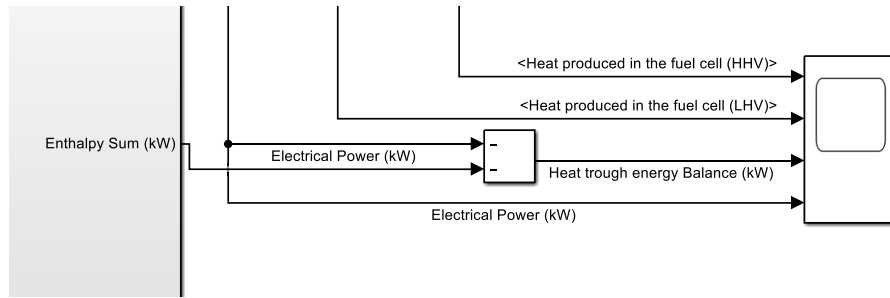


Figura I.19. Cálculo del calor producido en la pila a través del balance de energía y comparación final entre los flujos de energía salientes de la pila.

I.2 Operación de la pila de combustible

Esta sección se utilizará para plasmar las tablas de resultados principales obtenidas a lo largo del estudio, así como los valores de los parámetros de los reactantes utilizados para los cálculos.

I.2.1 Parámetros de funcionamiento eléctricos

Tabla I.2. Parámetros de funcionamiento eléctricos de la PEMFC

Carga eléctrica (kW)	Voltaje (V) Pila	Voltaje (V) DC/DC	Corriente (A) Pila	Corriente (A) DC/DC
0	0	0	0	0
10	722	800	13,84	12,5
20	709,4	800	28,19	25
30	698,4	800	42,95	37,5
40	688,2	800	58,11	50
50	678,2	800	73,71	62,5
60	668,4	800	89,75	75
70	658,5	800	106,3	87,5
80	648,5	800	123,3	100
90	638,3	800	141	112,5
100	627,9	800	159,2	125
110	617,2	800	178,2	137,5
120	606,1	800	197,9	150
130	594,6	800	218,6	162,5
140	582,7	800	240,2	175
150	570,2	800	263	187,5
160	557	800	287,2	200

La tabla I.2 muestra los parámetros de operación eléctricos de la pila y el convertidor DC/DC. Los resultados fueron obtenidos realizando varias simulaciones en el rango de operación de la pila, desde 0 kW a 160 kW.

I.2.2 Flujos entrantes y consumo de reactantes

Los datos de flujos de reactantes que entran a la pila en su rango de operación, así como lo que se consume de tales flujos se encuentran plasmados en la tabla I.3.

Tabla I.3. Flujos y consumos de reactantes

Carga eléctrica (kW)	Flujo comb ent (lpm)	Flujo aire ent (lpm)	% Uso comb	% Uso O ₂ (21% Aire)	Flujo comb cons (g/s) *	Flujo (O ₂) cons (g/s) *	Flujo aire ent (g/s) *	Flujo (O ₂) ent (g/s) *	Flujo comb ent (g/s) *
0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	40,5	189,3	99,56	55,18	0,11	0,78	6,74	1,41	0,11
20	82,61	385,7	99,56	55,18	0,22	1,59	13,73	2,88	0,22
30	125,9	587,6	99,56	55,18	0,34	2,42	20,91	4,39	0,34
40	170,3	795,1	99,56	55,18	0,46	3,28	28,30	5,94	0,46
50	216	1000,8	99,56	55,18	0,58	4,13	35,62	7,48	0,58
60	263	1228	99,56	55,18	0,71	5,06	43,70	9,18	0,71
70	311,5	1454	99,56	55,18	0,84	6,00	51,75	10,87	0,84
80	361,5	1688	99,56	55,18	0,97	6,96	60,07	12,62	0,97
90	413,2	1929	99,56	55,18	1,11	7,96	68,65	14,42	1,11
100	466,7	2179	99,56	55,18	1,25	8,99	77,55	16,29	1,26
110	522,2	2438	99,56	55,18	1,40	10,05	86,77	18,22	1,41
120	580,1	2708	99,56	55,18	1,56	11,17	96,38	20,24	1,56
130	640,5	2990	99,56	55,18	1,72	12,33	106,41	22,35	1,72
140	703,9	3286	99,56	55,18	1,89	13,55	116,95	24,56	1,90
150	770,8	3598	99,56	55,18	2,07	14,84	128,05	26,89	2,08
160	841,7	3929	99,56	55,18	2,26	16,20	139,83	29,36	2,27

*Calculados con las presiones de entrada de ambos reactantes (2,24 bar para el combustible y 2,06 bar para el aire) y una temperatura de operación de 63 °C.

I.2.3 Datos térmicos de la operación de la pila.

El calor producido por la pila calculado mediante los distintos métodos, así como la eficiencia de la misma basada en el poder calorífico inferior del hidrógeno, se aprecian en la tabla I.4. Las propiedades de las especies que actúan en la pila de combustible, utilizadas a lo largo de los cálculos del calor, se encuentran en la tabla I.5.

Tabla I.3. Calor producido por la pila y eficiencia de la misma.				
Potencia eléctrica (kW)	Potencia térmica. Método 1: HHV (kW)	Potencia térmica. Método 1: LHV (kW)	Potencia térmica. Método 2. (kW)	Eficiencia del stack LHV (%)
0	0	0	0	0
10	5,65	3,23	3,63	75,33
20	11,98	6,96	7,78	73,96
30	18,57	11,08	12,32	72,82
40	25,73	15,59	17,26	71,75
50	33,37	20,52	22,63	70,71
60	41,52	25,87	28,44	69,68
70	50,22	31,69	34,74	68,65
80	59,52	38,01	41,55	67,61
90	69,46	44,88	48,92	66,55
100	80,12	52,36	56,92	65,46
110	91,57	60,5	65,6	64,34
120	103,9	69,4	75,06	63,19
130	117,2	79,14	85,38	62
140	131,7	89,83	96,71	60,75
150	147,5	101,6	109,2	59,45
160	164,8	114,8	123	58,07

Tabla I.4. Propiedades de las especies que actúan en la PEMFC					
Especie	T (°C)	Cp (kJ/kg*K)¹	h_{HHV} (kJ/kg)	Masa molar (g/mol)	h_{fg} (0°C) (kJ/kg)
H2 entrante (g)	60	14,377	141780	2,016	-
H2 saliente (g)	63	14,377	141780	2,016	-
Aire entrante (g)	60	1,007	-	28,97	-
Aire saliente (g)	63	1,007	-	28,97	-
Agua saliente (g)	63	1,877	-	18,02	2501
N2 saliente (g)	63	1,042	-	28,01	-

¹Calculado como el calor específico a presión constante de 1 atm y a una temperatura media de 61,5 °C, exceptuando el agua saliente que se calcula a 63 °C. (Ver Anexo I.4)

I.3 Cálculo de área superficial necesaria para el radiador de la PEMFC

A continuación, se presentan los datos del cálculo del área superficial necesaria para el radiador necesario para refrigerar el sistema de propulsión del vehículo a estudiar, en la tabla I.6. Se muestran los tres casos tratados, el de la PEMFC, el del MCIA y el del MCIA con el mismo salto de temperatura que la pila de combustible. Asimismo, se presentan los diagramas del factor F de corrección utilizado en cada caso en las figuras I.20, I.21 y I.22.

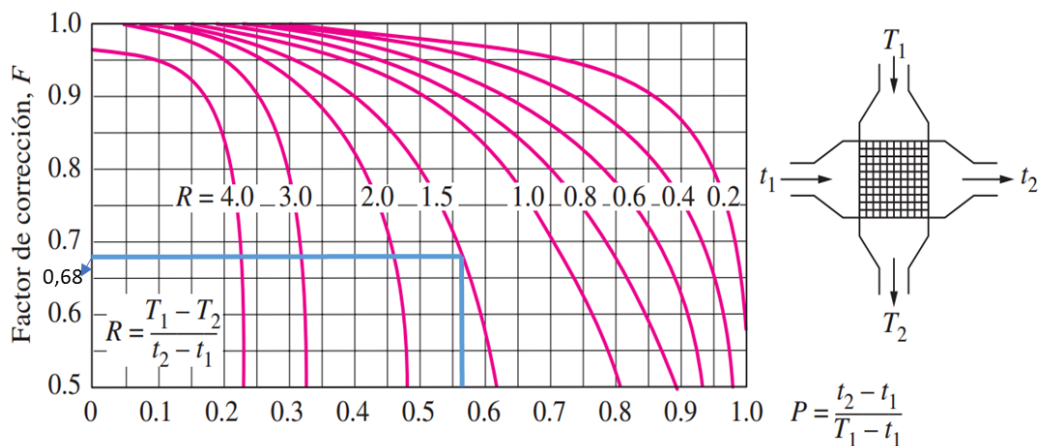


Figura I.20. Diagrama del factor F de un intercambiador de flujo cruzado no mezclado, para la PEMFC.

Tabla I.5. Datos de cálculo del área superficial requerida para el radiador del sistema de refrigeración de un vehículo.

\dot{W}_e (kW)	150		
\dot{Q} (kW)	147,50		
Caso	PEMFC	MCIA	MCIA*
Tent H (°C)	63,00	102,00	102,00
Tent C (°C)	45,00	45,00	45,00
ΔT_{max} (K)	18,00	57,00	57,00
ΔT_h (K)	10,00	20,00	10,00
ΔT_c (K)	15,00	35,00	15,00
Tsal H (°C)	53,00	82,00	92,00
Tsal C (°C)	60,00	80,00	60,00
ΔT_1 (K)	3,00	22,00	42,00
ΔT_2 (K)	8,00	37,00	47,00
ΔT_{ml} (°C)	5,10	28,85	44,45
P	0,56	0,35	0,18
R	1,50	1,75	1,50
F	0,68	0,91	0,97
Área superficial (m²)			
U (W/m² K)	PEMFC	MCIA	MCIA*
13,1	59,5	41,0	36,5
30	26,0	17,9	16,0
205,7	3,8	2,6	2,3
350	2,2	1,5	1,4

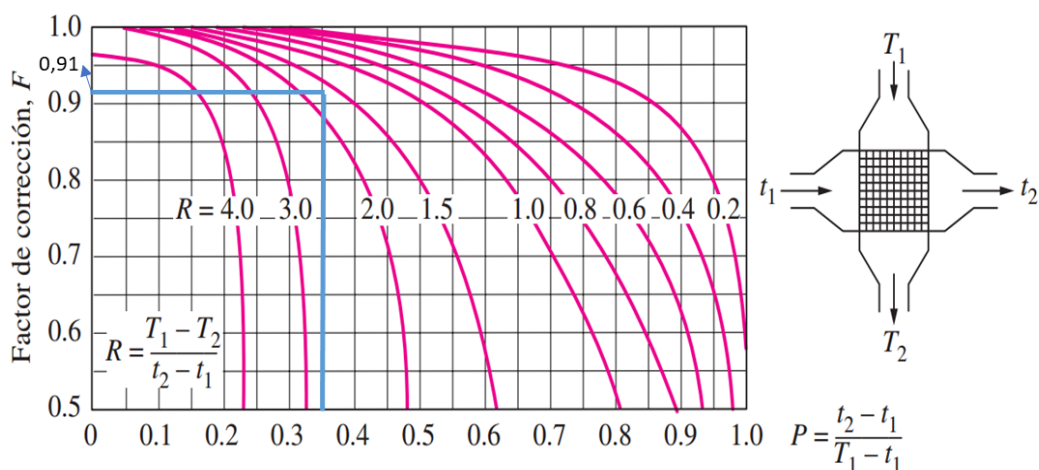


Figura I.21. Diagrama del factor F de un intercambiador de flujo cruzado no mezclado, para el caso del MCIA.

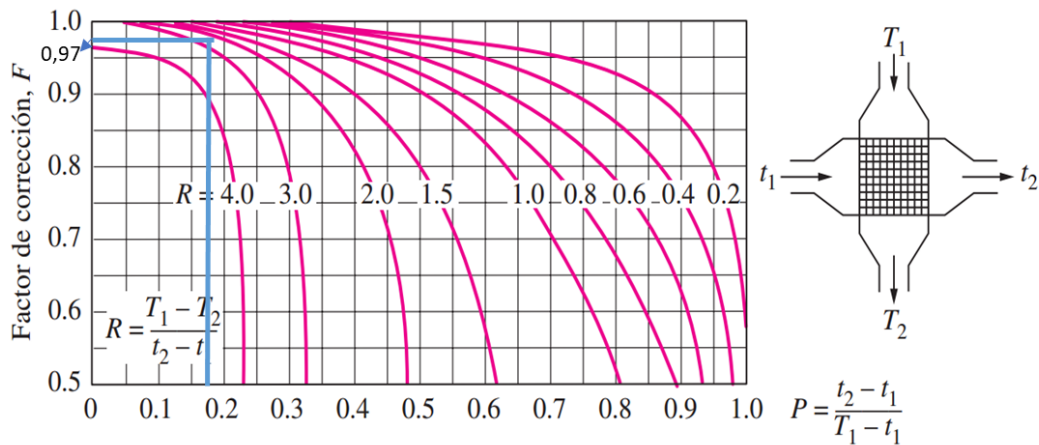


Figura I.22. Diagrama del factor F de un intercambiador de flujo cruzado no mezclado, para el caso del MCIA con el mismo salto de temperatura que la PEMFC.

Los resultados de los flujos de refrigerante y el aire que necesitaría el radiador para expedir el calor producido por la PEMFC se muestran en la tabla I.7.

Tabla I.6. Flujos de refrigerante y aire necesarios en el rango de operación de la PEMFC estudiada.

$Cp_{50/50}$ (kJ/kgK) * [42]	3,605		
Cp_{aire} (kJ/kgK) *	1,007		
\dot{Q} (kW)	$\dot{m}_{50/50}$ (kg/s)	\dot{m}_{aire} (kg/s)	$\dot{m}_{50/50}$ (l/min)
0,00	0,00	0,00	0,00
5,65	0,16	0,37	8,91
11,98	0,33	0,79	18,90
18,57	0,52	1,23	29,30
25,73	0,71	1,70	40,59
33,37	0,93	2,21	52,64
41,52	1,15	2,75	65,50
50,22	1,39	3,32	79,23
59,52	1,65	3,94	93,90
69,46	1,93	4,60	109,58
80,12	2,22	5,30	126,40
91,57	2,54	6,06	144,46
103,90	2,88	6,88	163,91
117,20	3,25	7,76	184,89
131,70	3,65	8,72	207,77
147,50	4,09	9,76	232,69
164,80	4,57	10,91	259,99

*El calor específico del aire y del refrigerante (Mezcla 50/50 agua-etilenglicol) se han calculado para una temperatura de 63°C y una presión de 1 atm.

I.4 Tablas termodinámicas utilizadas

Las siguientes tablas han sido utilizadas para la determinación de los parámetros necesarios para la aplicación de los balances de energía en el modelo. Específicamente:

1. Figura I.23. Extracción de las masas molares de las especies presentes en la PEMFC.
2. Figura I.24. Entalpía de vaporización del agua a 0°C.
3. Figura I.25 y I.26. Calor específico a presión constante del nitrógeno, oxígeno e hidrógeno.
4. Figura I.27. Calor específico a presión constante del aire.
5. Figura I.28. Poder calorífico superior e inferior del hidrógeno en kJ/kg.

TABLA A-1
Masa molar, constante de gas y calores específicos de ciertas sustancias

Sustancia	Masa molar <i>M</i> , kg/kmol	Constante de gas <i>R</i> , kJ/kg · K*	Calores específicos a 25°C		
			<i>c_p</i> , kJ/kg · K	<i>c_v</i> , kJ/kg · K	<i>k</i> = <i>c_p</i> / <i>c_v</i>
Aire	28.97	0.2870	1.005	0.7180	1.400
Amoniaco, NH ₃	17.03	0.4882	2.093	1.605	1.304
Argón, Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Bromo, Br ₂	159.81	0.05202	0.2253	0.1732	1.300
Isobutano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.663	1.520	1.094
<i>n</i> -Butano, C ₄ H ₁₀	58.12	0.1430	1.694	1.551	1.092
Carbono, bióxido de, CO ₂	44.01	0.1889	0.8439	0.6550	1.288
Carbono, monóxido de, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.400
Cloro, Cl ₂	70.905	0.1173	0.4781	0.3608	1.325
Clorodifluorometano (R-22), CHClF ₂	86.47	0.09615	0.6496	0.5535	1.174
Etano, C ₂ H ₆	30.070	0.2765	1.744	1.468	1.188
Etileno, C ₂ H ₄	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Fluoruro, F ₂	38.00	0.2187	0.8237	0.6050	1.362
Helio, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
<i>n</i> -Heptano, C ₇ H ₁₆	100.20	0.08297	1.649	1.566	1.053
<i>n</i> -Hexano, C ₆ H ₁₄	86.18	0.09647	1.654	1.558	1.062
Hidrógeno, H ₂	2.016	4.124	14.30	10.18	1.405
Kriptón, Kr	83.80	0.09921	0.2480	0.1488	1.667
Metano, CH ₄	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Neón, Ne	20.183	0.4119	1.030	0.6180	1.667
Nitrógeno, N ₂	28.01	0.2968	1.040	0.7429	1.400
Óxido nítrico, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Nitrógeno, bióxido de, NO ₂	46.006	0.1889	0.8060	0.6171	1.306
Oxígeno, O ₂	32.00	0.2598	0.9180	0.6582	1.395
<i>n</i> -Pentano, C ₅ H ₁₂	72.15	0.1152	1.664	1.549	1.074
Propano, C ₃ H ₈	44.097	0.1885	1.669	1.480	1.127
Propileno, C ₃ H ₆	42.08	0.1976	1.531	1.333	1.148
Agua, H ₂ O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Sulfuro, bióxido de, SO ₂	64.06	0.1298	0.6228	0.4930	1.263
Tetraclorometano, CCl ₄	153.82	0.05405	0.5415	0.4875	1.111
Tetrafluoroetano (R-134a), C ₂ H ₂ F ₄	102.03	0.08149	0.8334	0.7519	1.108
Trifluoroetano (R-143a), C ₂ H ₃ F ₃	84.04	0.09893	0.9291	0.8302	1.119
Xenón, Xe	131.30	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

*La unidad kJ/kg · K es equivalente a kPa · m³/kg · K. La constante de gas se calcula de $R = R_u/M$, donde $R_u = 8.31447$ kJ/kmol · K es la constante de gas universal y M la masa molar.

Fuente: Valores de calores específicos se obtuvieron principalmente de rutinas de propiedad preparadas por The National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.

Figura I.23. Propiedades termodinámicas de ciertas sustancias [26].

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpía de vaporización, h _{fg} , kJ/kg	Calor específico, c _p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 185	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

Nota 1: La viscosidad cinemática ν y la difusividad térmica α se pueden calcular a partir de sus definiciones, $\nu = \mu/\rho$ y $\alpha = k/\rho c_p = \nu/Pr$. Las temperaturas de 0.01°C, 100°C y 374.14°C son las temperaturas de los puntos triple, de ebullición y crítico del agua, respectivamente. Las propiedades cuya lista se da arriba (excepto la densidad del vapor) se pueden usar a cualquier presión con error despreciable, excepto a temperaturas cercanas al valor del punto crítico.

Nota 2: La unidad kJ/kg · °C, para el calor específico, es equivalente a kJ/kg · K y la unidad W/m · °C, para la conductividad térmica es equivalente a W/m · K.

Fuente: Los datos de la viscosidad y la conductividad térmica se tomaron de J. V. Sengers y J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291-1322. Los otros datos se obtuvieron de diversas fuentes o se calcularon.

Figura I.24. Propiedades termodinámicas del agua saturada [26].

TABLA A-16

Propiedades de gases a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
<i>Bióxido de carbono, CO₂</i>							
-50	2.4035	746	0.01051	5.860×10^{-6}	1.129×10^{-5}	4.699×10^{-6}	0.8019
0	1.9635	811	0.01456	9.141×10^{-6}	1.375×10^{-5}	7.003×10^{-6}	0.7661
50	1.6597	866.6	0.01858	1.291×10^{-5}	1.612×10^{-5}	9.714×10^{-6}	0.7520
100	1.4373	914.8	0.02257	1.716×10^{-5}	1.841×10^{-5}	1.281×10^{-5}	0.7464
150	1.2675	957.4	0.02652	2.186×10^{-5}	2.063×10^{-5}	1.627×10^{-5}	0.7445
200	1.1336	995.2	0.03044	2.698×10^{-5}	2.276×10^{-5}	2.008×10^{-5}	0.7442
300	0.9358	1 060	0.03814	3.847×10^{-5}	2.682×10^{-5}	2.866×10^{-5}	0.7450
400	0.7968	1 112	0.04565	5.151×10^{-5}	3.061×10^{-5}	3.842×10^{-5}	0.7458
500	0.6937	1 156	0.05293	6.600×10^{-5}	3.416×10^{-5}	4.924×10^{-5}	0.7460
1 000	0.4213	1 292	0.08491	1.560×10^{-4}	4.898×10^{-5}	1.162×10^{-4}	0.7455
1 500	0.3025	1 356	0.10688	2.606×10^{-4}	6.106×10^{-5}	2.019×10^{-4}	0.7745
2 000	0.2359	1 387	0.11522	3.521×10^{-4}	7.322×10^{-5}	3.103×10^{-4}	0.8815
<i>Monóxido de carbono, CO</i>							
-50	1.5297	1 081	0.01901	1.149×10^{-5}	1.378×10^{-5}	9.012×10^{-6}	0.7840
0	1.2497	1 048	0.02278	1.739×10^{-5}	1.629×10^{-5}	1.303×10^{-5}	0.7499
50	1.0563	1 039	0.02641	2.407×10^{-5}	1.863×10^{-5}	1.764×10^{-5}	0.7328
100	0.9148	1 041	0.02992	3.142×10^{-5}	2.080×10^{-5}	2.274×10^{-5}	0.7239
150	0.8067	1 049	0.03330	3.936×10^{-5}	2.283×10^{-5}	2.830×10^{-5}	0.7191
200	0.7214	1 060	0.03656	4.782×10^{-5}	2.472×10^{-5}	3.426×10^{-5}	0.7164
300	0.5956	1 085	0.04277	6.619×10^{-5}	2.812×10^{-5}	4.722×10^{-5}	0.7134
400	0.5071	1 111	0.04860	8.628×10^{-5}	3.111×10^{-5}	6.136×10^{-5}	0.7111
500	0.4415	1 135	0.05412	1.079×10^{-4}	3.379×10^{-5}	7.653×10^{-5}	0.7087
1 000	0.2681	1 226	0.07894	2.401×10^{-4}	4.557×10^{-5}	1.700×10^{-4}	0.7080
1 500	0.1925	1 279	0.10458	4.246×10^{-4}	6.321×10^{-5}	3.284×10^{-4}	0.7733
2 000	0.1502	1 309	0.13833	7.034×10^{-4}	9.826×10^{-5}	6.543×10^{-4}	0.9302
<i>Metano, CH₄</i>							
-50	0.8761	2 243	0.02367	1.204×10^{-5}	8.564×10^{-6}	9.774×10^{-6}	0.8116
0	0.7158	2 217	0.03042	1.917×10^{-5}	1.028×10^{-5}	1.436×10^{-5}	0.7494
50	0.6050	2 302	0.03766	2.704×10^{-5}	1.191×10^{-5}	1.969×10^{-5}	0.7282
100	0.5240	2 443	0.04534	3.543×10^{-5}	1.345×10^{-5}	2.567×10^{-5}	0.7247
150	0.4620	2 611	0.05344	4.431×10^{-5}	1.491×10^{-5}	3.227×10^{-5}	0.7284
200	0.4132	2 791	0.06194	5.370×10^{-5}	1.630×10^{-5}	3.944×10^{-5}	0.7344
300	0.3411	3 158	0.07996	7.422×10^{-5}	1.886×10^{-5}	5.529×10^{-5}	0.7450
400	0.2904	3 510	0.09918	9.727×10^{-5}	2.119×10^{-5}	7.297×10^{-5}	0.7501
500	0.2529	3 836	0.11933	1.230×10^{-4}	2.334×10^{-5}	9.228×10^{-5}	0.7502
1 000	0.1536	5 042	0.22562	2.914×10^{-4}	3.281×10^{-5}	2.136×10^{-4}	0.7331
1 500	0.1103	5 701	0.31857	5.068×10^{-4}	4.434×10^{-5}	4.022×10^{-4}	0.7936
2 000	0.0860	6 001	0.36750	7.120×10^{-4}	6.360×10^{-5}	7.395×10^{-4}	1.0386
<i>Hidrógeno, H₂</i>							
-50	0.11010	12 635	0.1404	1.009×10^{-4}	7.293×10^{-6}	6.624×10^{-5}	0.6562
0	0.08995	13 920	0.1652	1.319×10^{-4}	8.391×10^{-6}	9.329×10^{-5}	0.7071
50	0.07603	14 349	0.1881	1.724×10^{-4}	9.427×10^{-6}	1.240×10^{-4}	0.7191
100	0.06584	14 473	0.2095	2.199×10^{-4}	1.041×10^{-5}	1.582×10^{-4}	0.7196
150	0.05806	14 492	0.2296	2.729×10^{-4}	1.136×10^{-5}	1.957×10^{-4}	0.7174
200	0.05193	14 482	0.2486	3.306×10^{-4}	1.228×10^{-5}	2.365×10^{-4}	0.7155
300	0.04287	14 481	0.2843	4.580×10^{-4}	1.403×10^{-5}	3.274×10^{-4}	0.7149
400	0.03650	14 540	0.3180	5.992×10^{-4}	1.570×10^{-5}	4.302×10^{-4}	0.7179
500	0.03178	14 653	0.3509	7.535×10^{-4}	1.730×10^{-5}	5.443×10^{-4}	0.7224
1 000	0.01930	15 577	0.5206	1.732×10^{-3}	2.455×10^{-5}	1.272×10^{-3}	0.7345
1 500	0.01386	16 553	0.6581	2.869×10^{-3}	3.099×10^{-5}	2.237×10^{-3}	0.7795
2 000	0.01081	17 400	0.5480	2.914×10^{-3}	3.690×10^{-5}	3.414×10^{-3}	1.1717

(continúa)

Figura I.25. Propiedades termodinámicas de gases a 1 atm de presión [26].

TABLA A-16

Propiedades de gases a la presión de 1 atm

Temp., T, °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
<i>Bióxido de carbono, CO₂</i>							
-50	2.4035	746	0.01051	5.860×10^{-6}	1.129×10^{-5}	4.699×10^{-6}	0.8019
0	1.9635	811	0.01456	9.141×10^{-6}	1.375×10^{-5}	7.003×10^{-6}	0.7661
50	1.6597	866.6	0.01858	1.291×10^{-5}	1.612×10^{-5}	9.714×10^{-6}	0.7520
100	1.4373	914.8	0.02257	1.716×10^{-5}	1.841×10^{-5}	1.281×10^{-5}	0.7464
150	1.2675	957.4	0.02652	2.186×10^{-5}	2.063×10^{-5}	1.627×10^{-5}	0.7445
200	1.1336	995.2	0.03044	2.698×10^{-5}	2.276×10^{-5}	2.008×10^{-5}	0.7442
300	0.9358	1 060	0.03814	3.847×10^{-5}	2.682×10^{-5}	2.866×10^{-5}	0.7450
400	0.7968	1 112	0.04565	5.151×10^{-5}	3.061×10^{-5}	3.842×10^{-5}	0.7458
500	0.6937	1 156	0.05293	6.600×10^{-5}	3.416×10^{-5}	4.924×10^{-5}	0.7460
1 000	0.4213	1 292	0.08491	1.560×10^{-4}	4.898×10^{-5}	1.162×10^{-4}	0.7455
1 500	0.3025	1 356	0.10688	2.606×10^{-4}	6.106×10^{-5}	2.019×10^{-4}	0.7745
2 000	0.2359	1 387	0.11522	3.521×10^{-4}	7.322×10^{-5}	3.103×10^{-4}	0.8815
<i>Monóxido de carbono, CO</i>							
-50	1.5297	1 081	0.01901	1.149×10^{-5}	1.378×10^{-5}	9.012×10^{-6}	0.7840
0	1.2497	1 048	0.02278	1.739×10^{-5}	1.629×10^{-5}	1.303×10^{-5}	0.7499
50	1.0563	1 039	0.02641	2.407×10^{-5}	1.863×10^{-5}	1.764×10^{-5}	0.7328
100	0.9148	1 041	0.02992	3.142×10^{-5}	2.080×10^{-5}	2.274×10^{-5}	0.7239
150	0.8067	1 049	0.03330	3.936×10^{-5}	2.283×10^{-5}	2.830×10^{-5}	0.7191
200	0.7214	1 060	0.03656	4.782×10^{-5}	2.472×10^{-5}	3.426×10^{-5}	0.7164
300	0.5956	1 085	0.04277	6.619×10^{-5}	2.812×10^{-5}	4.722×10^{-5}	0.7134
400	0.5071	1 111	0.04860	8.628×10^{-5}	3.111×10^{-5}	6.136×10^{-5}	0.7111
500	0.4415	1 135	0.05412	1.079×10^{-4}	3.379×10^{-5}	7.653×10^{-5}	0.7087
1 000	0.2681	1 226	0.07894	2.401×10^{-4}	4.557×10^{-5}	1.700×10^{-4}	0.7080
1 500	0.1925	1 279	0.10458	4.246×10^{-4}	6.321×10^{-5}	3.284×10^{-4}	0.7733
2 000	0.1502	1 309	0.13833	7.034×10^{-4}	9.826×10^{-5}	6.543×10^{-4}	0.9302
<i>Metano, CH₄</i>							
-50	0.8761	2 243	0.02367	1.204×10^{-5}	8.564×10^{-6}	9.774×10^{-6}	0.8116
0	0.7158	2 217	0.03042	1.917×10^{-5}	1.028×10^{-5}	1.436×10^{-5}	0.7494
50	0.6050	2 302	0.03766	2.704×10^{-5}	1.191×10^{-5}	1.969×10^{-5}	0.7282
100	0.5240	2 443	0.04534	3.543×10^{-5}	1.345×10^{-5}	2.567×10^{-5}	0.7247
150	0.4620	2 611	0.05344	4.431×10^{-5}	1.491×10^{-5}	3.227×10^{-5}	0.7284
200	0.4132	2 791	0.06194	5.370×10^{-5}	1.630×10^{-5}	3.944×10^{-5}	0.7344
300	0.3411	3 158	0.07996	7.422×10^{-5}	1.886×10^{-5}	5.529×10^{-5}	0.7450
400	0.2904	3 510	0.09918	9.727×10^{-5}	2.119×10^{-5}	7.297×10^{-5}	0.7501
500	0.2529	3 836	0.11933	1.230×10^{-4}	2.334×10^{-5}	9.228×10^{-5}	0.7502
1 000	0.1536	5 042	0.22562	2.914×10^{-4}	3.281×10^{-5}	2.136×10^{-4}	0.7331
1 500	0.1103	5 701	0.31857	5.068×10^{-4}	4.434×10^{-5}	4.022×10^{-4}	0.7936
2 000	0.0860	6 001	0.36750	7.120×10^{-4}	6.360×10^{-5}	7.395×10^{-4}	1.0386
<i>Hidrógeno, H₂</i>							
-50	0.11010	12 635	0.1404	1.009×10^{-4}	7.293×10^{-6}	6.624×10^{-5}	0.6562
0	0.08995	13 920	0.1652	1.319×10^{-4}	8.391×10^{-6}	9.329×10^{-5}	0.7071
50	0.07603	14 349	0.1881	1.724×10^{-4}	9.427×10^{-6}	1.240×10^{-4}	0.7191
100	0.06584	14 473	0.2095	2.199×10^{-4}	1.041×10^{-5}	1.582×10^{-4}	0.7196
150	0.05806	14 492	0.2296	2.729×10^{-4}	1.136×10^{-5}	1.957×10^{-4}	0.7174
200	0.05193	14 482	0.2486	3.306×10^{-4}	1.228×10^{-5}	2.365×10^{-4}	0.7155
300	0.04287	14 481	0.2843	4.580×10^{-4}	1.403×10^{-5}	3.274×10^{-4}	0.7149
400	0.03650	14 540	0.3180	5.992×10^{-4}	1.570×10^{-5}	4.302×10^{-4}	0.7179
500	0.03178	14 653	0.3509	7.535×10^{-4}	1.730×10^{-5}	5.443×10^{-4}	0.7224
1 000	0.01930	15 577	0.5206	1.732×10^{-3}	2.455×10^{-5}	1.272×10^{-3}	0.7345
1 500	0.01386	16 553	0.6581	2.869×10^{-3}	3.099×10^{-5}	2.237×10^{-3}	0.7795
2 000	0.01081	17 400	0.5480	2.914×10^{-3}	3.690×10^{-5}	3.414×10^{-3}	1.1717

(continúa)

Figura I.26. Propiedades termodinámicas de gases a 1 atm de presión [26].

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , ν y α a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Figura I.27. Propiedades termodinámicas del aire a 1 atm de presión [26].

TABLE A-25

Thermochemical Properties of Selected Substances at 298K and 1 atm

Substance	Formula	Molar Mass, <i>M</i> (kg/kmol)	Enthalpy of Formation, \bar{h}_f° (kJ/kmol)	Gibbs Function of Formation, \bar{g}_f° (kJ/kmol)	Absolute Entropy, \bar{s}° (kJ/kmol · K)	Heating Values	
						Higher, HHV (kJ/kg)	Lower, LHV (kJ/kg)
Carbon	C(s)	12.01	0	0	5.74	32,770	32,770
Hydrogen	H ₂ (g)	2.016	0	0	130.57	141,780	119,950
Nitrogen	N ₂ (g)	28.01	0	0	191.50	—	—
Oxygen	O ₂ (g)	32.00	0	0	205.03	—	—
Carbon monoxide	CO(g)	28.01	-110,530	-137,150	197.54	—	—
Carbon dioxide	CO ₂ (g)	44.01	-393,520	-394,380	213.69	—	—
Water	H ₂ O(g)	18.02	-241,820	-228,590	188.72	—	—
Water	H ₂ O(l)	18.02	-285,830	-237,180	69.95	—	—
Hydrogen peroxide	H ₂ O ₂ (g)	34.02	-136,310	-105,600	232.63	—	—
Ammonia	NH ₃ (g)	17.03	-46,190	-16,590	192.33	—	—
Oxygen	O(g)	16.00	249,170	231,770	160.95	—	—
Hydrogen	H(g)	1.008	218,000	203,290	114.61	—	—
Nitrogen	N(g)	14.01	472,680	455,510	153.19	—	—
Hydroxyl	OH(g)	17.01	39,460	34,280	183.75	—	—
Methane	CH ₄ (g)	16.04	-74,850	-50,790	186.16	55,510	50,020
Acetylene	C ₂ H ₂ (g)	26.04	226,730	209,170	200.85	49,910	48,220
Ethylene	C ₂ H ₄ (g)	28.05	52,280	68,120	219.83	50,300	47,160
Ethane	C ₂ H ₆ (g)	30.07	-84,680	-32,890	229.49	51,870	47,480
Propylene	C ₃ H ₆ (g)	42.08	20,410	62,720	266.94	48,920	45,780
Propane	C ₃ H ₈ (g)	44.09	-103,850	-23,490	269.91	50,350	46,360
Butane	C ₄ H ₁₀ (g)	58.12	-126,150	-15,710	310.03	49,500	45,720
Pentane	C ₅ H ₁₂ (g)	72.15	-146,440	-8,200	348.40	49,010	45,350
Octane	C ₈ H ₁₈ (g)	114.22	-208,450	17,320	463.67	48,260	44,790
Octane	C ₈ H ₁₈ (l)	114.22	-249,910	6,610	360.79	47,900	44,430
Benzene	C ₆ H ₆ (g)	78.11	82,930	129,660	269.20	42,270	40,580
Methanol	CH ₃ OH(g)	32.04	-200,890	-162,140	239.70	23,850	21,110
Methanol	CH ₃ OH(l)	32.04	-238,810	-166,290	126.80	22,670	19,920
Ethanol	C ₂ H ₅ OH(g)	46.07	-235,310	-168,570	282.59	30,590	27,720
Ethanol	C ₂ H ₅ OH(l)	46.07	-277,690	-174,890	160.70	29,670	26,800

Source: Based on JANAF Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37, 1971; Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties, NBS Tech. Note 270-3, 1968; and API Research Project 44, Carnegie Press, 1953. Heating values calculated.

Figura I.28. Propiedades termodinámicas de ciertas sustancias a condiciones estándares [43].

I.5 Fichas técnicas

- Módulo *FCvelocity HD-6* de Ballard.



BALLARD[®]

SMARTER SOLUTIONS FOR A CLEAN ENERGY FUTURE





▶ **PRODUCT SPECIFICATIONS**

Gross Power:		75 kW	150 kW
Performance:	DC voltage	230 – 365V	465 – 730V
	Maximum current	300A	300A
Physical:	Weight (dry)	350 kg (772 lbs)	404 kg (891 lbs)
	Length x width x height (including controller box)	1530 x 871 x 495 mm (60 x 34 x 19 in)	
Fuel:	Gaseous hydrogen	Commercial grade (per SAE J2719)	
Oxidant:	Air		
Coolant:	50/50 Pure Ethylene Glycol and Water		
Operating Conditions:	Coolant Temperature (nominal)	63°C (149°F)	
	Fuel pressure (minimum)	16 barg	
	Air pressure (nominal)	1.2 barg	
Additional Features:	Control interface	CANbus	
	Enclosure	IP53	

▶ **FCvelocity-HD6**

Ballard Experience
 Since 1992, Ballard Power Systems has developed and demonstrated five generations of heavy duty fuel cell modules for bus applications. Demonstration programs and field trials have been held in the US, Canada, Western Europe, Iceland, Australia and China. Ballard powered buses have accumulated more than 200,000 hours of operation, covering more than three million kilometers and transporting more than seven million passengers.

6th Generation Module
 Based on the state of the art automotive fuel cell stack, Ballard's FCvelocity-HD6 fuel cell module offers a design ideal for integration into bus applications.

With the next-generation Ballard fuel cell at its core, the FCvelocity-HD6 establishes a new standard for cost, through design for volume manufacturing, and compatibility with customer system requirements. The heavy duty power-module features a control unit that can interface with a system controller, making it a plug and play product for any fuel cell or hybrid fuel cell bus platform.

This next-generation module also offers significant advances in durability, power density and fuel efficiency.

Availability
 Please contact any of the following Ballard representatives for discussions regarding Ballard's next-generation heavy duty fuel cell module.

- Daljit Bawa (daljit.bawa@ballard.com)
- Jeff Grant (jeff.grant@ballard.com)

Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems, Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time (04/2011)

BALLARD, Ballard[®], Powered by Ballard[®], FCgen[®] and FCvelocity[®] are trademarks of Ballard Power Systems Inc. SPCS101744-0H

Ballard Power Systems, Inc.
 9000 Glenlyon Parkway
 Burnaby, British Columbia
 Canada, V5J 5J8

TEL: (+1) 604.454.0900
FAX: (+1) 604.412.4700
www.ballard.com

Figura I.29. Ficha técnica del módulo *FCvelocity HD-6* de Ballard [34].