



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**

**Tesis para obtener el grado de
MAESTRA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

“EMULACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM”

Presenta:

Nayeli Itzel Hernández Zárate*

Asesores:

Dr. Gerardo Mino Aguilar

Dra. Beatriz Eugenia Graniel García

*Becario CONACYT

Puebla, Pue., Enero 2018

EMULACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

Nayeli Itzel Hernández Zárate

Maestría en Ingeniería Electrónica, Opción Instrumentación Electrónica

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Noviembre 2017

Resumen

En el presente documento de Tesis se abordarán el desarrollo de la emulación de un stack de celdas de combustible tipo PEM basándose en sus características genéricas mediante una fuente de corriente programable.

Para cumplir con el objetivo de este trabajo se obtuvo un modelo de la celda de combustible que permite la reproducción de su comportamiento eléctrico, sin necesidad de conocer de forma detallada sus características. Para validar los modelos propuestos, se realizaron simulaciones y la respuesta obtenida se comparó con la respuesta del bloque fuel cell stack de Simulink de Matlab. Una vez que se obtuvo el modelo y se validó su comportamiento, este se describió en el entorno de programación de Labview para generar la emulación de la celda de combustible con la fuente de corriente directa programable, finalmente se obtienen los resultados de la emulación. Todo esto se encuentra detallado y organizada en 5 capítulos, los cuales se describen de forma general a continuación. En el capítulo 1 se presenta la teoría sobre comportamiento y los fenómenos involucrados en el funcionamiento de la celda de combustible así como el sistema necesario para su funcionamiento, también se presentan algunos modelos de la celda de combustible propuestos hasta ahora.

En el capítulo 2 se lleva a cabo la adaptación del modelo de la celda de combustible a las necesidades de este trabajo, generando un modelo por aproximación polinomial y un variación del modelo electroquímico.

El capítulo 3 describe el proceso de simulación, la adaptación de los datos del stack, esto se realiza tanto en Simulink como en Matlab y los resultados de dichas simula-

ciones.

En el capítulo 4 se presenta el proceso de emulación, en el que se describe la programación y los requerimientos de esta, se muestra y explica la interfaz gráfica utilizada para la emulación así como los datos necesarios y el sistema de prueba. En el capítulo 5 se encuentran los resultados obtenidos después de realizar la emulación y el análisis de estos resultados.

Índice general

Resumen	II
Introducción	1
Objetivos	3
Justificación	4
Descripción General del Sistema	7
1. Estado del arte	11
1.1. Celda de Combustible	11
1.1.1. Voltaje de circuito abierto y eficiencia de energía eléctrica de la celda de combustible	14
1.1.2. Curva de polarización	16
1.1.3. Estructura física y requerimientos para el uso de las celdas de combustibles	20
1.2. Modelo de la celda de combustible tipo PEM	25
1.2.1. Modelo de circuito equivalente de una celda de combustible . .	25
1.2.2. Modelo genérico de la celda de combustible PEM	29
1.2.3. Modelo electroquímico de la celda de combustible	35
1.3. Emulador de celdas de combustible	43
1.3.1. Emulación de la celda de combustible basada en una FPGA .	43

1.3.2. Emulación de la celda de combustible basada en dSPACE . . .	48
2. Modelado de la celda de combustible	53
2.1. Modelo por aproximación polinomial	54
2.2. Modelo electroquímico	60
3. Simulación del modelo electroquímico modificado y polinomial de la celda de combustible	65
3.1. Simulación de una celda de combustible con el bloque fuel cell stack .	65
3.1.1. Resultados de simulación de la celda de combustible genérica .	67
3.2. Simulación del stack de celadas de combustible de 20 W	70
3.2.1. Resultados de simulación de un stack específico	73
3.3. Simulación del modelo electroquímico de la celda de combustible PEM	76
3.3.1. Resultados de la simulación del modelo electroquímico de la celda de combustible PEM	78
4. Desarrollo del sistema de emulación de la celda de combustible	85
4.1. Emulación del stack de 20 W a partir de su curva I-V	85
4.1.1. Prueba de la emulación del stack de 20 W a partir de su curva I-V	91
4.2. Emulación del stack de 20 W basada en el modelo electroquímico . .	92
4.2.1. Prueba de la emulación del stack de 20 W basada en el modelo electroquímico	95
5. Resultados de la emulación de la celda de combustible	97
5.1. Resultados de la emulación del stack de 20 W a partir de su curva I-V	97
5.2. Resultados de la emulación del stack de 20 W basada en su modelo electroquímico	99
Conclusiones	101

Índice de figuras

1.	Curva de polarización y densidad de potencia de una celda de combustible PEM $H_2/aire$ a $80^\circ C$ y $3 atm$ con $100\% RH$	8
2.	Diagrama a bloques del sistema de emulación de la celda de combustible tipo PEM de $H_2/aire$	9
1.1.	Esquema de la celda de combustible.	12
1.2.	Estructura física de la celda de combustible	13
1.3.	Curva de polarización de la celda de combustible	18
1.4.	Diagrama de reacción exotérmica	19
1.5.	Ejemplo de plato bipolar.	21
1.6.	Diferentes diseños de platos bipolares	22
1.7.	Banco de celdas de combustible de tuberías externas	23
1.8.	Esquema de un banco de celdas de combustible con tubería interna	24
1.9.	Modelo de circuito equivalente en CC	26
1.10.	Modelo de circuito equivalente	28
1.11.	Circuito equivalente simplificado de la celda de combustible	29
1.12.	Circuito equivalente detallado de la celda de combustible.	31
1.13.	Curvas de respuesta a la prueba de interrupción	34
1.14.	Diagrama de bloques del emulador basado en FPGA.	44
1.15.	Etapa de ganancia para el sistema de emulación basado en una FPGA.	45
1.16.	Modelado del voltaje de Nernst y las pérdidas de voltaje de la celda de combustible en Simulink.	51

2.1. Proceso de obtención del voltaje a 0 y 1 A, la corriente y el voltaje en PON y la corriente y el voltaje en POM.	56
2.2. Diagrama de simulación en simulink/Matlab de la pila de celdas de combustible de 20 W	57
2.3. Curva I-V separad en sus tres principales regiones.	58
3.1. Diagrama de simulación	66
3.2. Gráfica de la razón de flujo de combustible de la pila.	68
3.3. Gráfica del consumo de reactivos de la pila.	68
3.4. Gráfica de la eficiencia de la pila.	69
3.5. Gráfica de voltaje de la pila.	69
3.6. Gráfica de corriente de la pila.	69
3.7. Gráficas de I-V de la pila de celdas de combustible de 20 W	72
3.8. Diagrama de simulación en simulink/Matlab de la pila de celdas de combustible de 20 W	73
3.9. Gráfica del voltaje en la carga.	73
3.10. Gráfica del voltaje en la pila de celdas de combustible.	74
3.11. Gráfica de la corriente en la pila de celdas de combustible.	75
3.12. Curva de I-V de la pila de combustible de 20 W.	75
3.13. Gráfica de la eficiencia de la pila de celdas de combustible de 20 W.	76
3.14. Curva de polarización del stack de 20 W obtenida a partir del modelo electroquímico.	79
3.15. Comparación entre la curva I-V obtenida por el modelo electroquímico y la proporcionada por el fabricante.	80
3.16. Porcentaje de error del modelo electroquímico con respecto a la curva I-V del fabricante.	80
3.17. Respuesta del modelo electroquímico ante diferentes valores de temperatura de operación.	82

3.18. Respuesta del modelo electroquímico ante diferentes valores de presión de alimentación de hidrógeno.	83
3.19. Respuesta del modelo electroquímico ante diferentes valores de presión de alimentación de aire.	83
3.20. Respuesta del modelo electroquímico ante diferentes valores de presión de alimentación de hidrógeno y aire.	84
4.1. Gráfica de la simulación por partes y la curva I-V de la pila de 20 W obtenida en Simulink.	87
4.2. Gráfica de error de la simulación por partes con respecto a la curva I-V obtenida en Simulink.	87
4.3. Programa de emulación en Labview.	89
4.4. Panel frontal.	90
4.5. Sistema de prueba para la fuente GEN400-37.	91
4.6. Descripción del modelo electroquímico en Labview	92
4.7. Descripción del programa de emulación en Labview.	93
4.8. Interfaz gráfica del programa de emulación.	94
4.9. Sistema de prueba para la fuente GEN400-37.	95
5.1. Gráfica de I-V obtenidos de la fuente y del programa realizado en LabVIEW de la emulación del stack de 20 W a partir de su curva I-V.	98
5.2. Porcentaje de error a la salida de la fuente CC con respecto al valor calculado.	99
5.3. Gráfica de I-V obtenidos de la fuente y del programa realizado en LabVIEW del stack de 20 W a partir del modelo electroquímico.	100

Índice de tablas

1.1. Definiciones básicas de cantidades por unidad para los stacks de PEMFC sometidas a prueba	26
1.2. Parámetros del circuito equivalente eléctrico para los PEMFC sometidos a prueba	28
3.1. Parámetros de la pila de celdas de combustible de 6 kW	67
3.2. Parámetros de la pila de celdas de combustible de 20 W	70
3.3. Datos requeridos para la simulación del stack de celdas de combustible de 20 W	71

Introducción

La creciente necesidad por disminuir los niveles de contaminación ambiental, así como la escasez y encarecimiento de los combustibles fósiles, han generado en los últimos años la búsqueda de fuentes alternas de generación de energía más limpias y rentables.

La mayoría de las fuentes alternas de energía tienen ventajas y desventajas, por lo que, en la mayoría de los casos, se realizan investigaciones con el fin de menguar las desventajas e impulsar las ventajas de éstas, el uso de nuevos materiales, técnicas de aprovechamiento, control, entre otras propuestas, podrían ser un camino para lograr este propósito.

Recientemente, las celdas de combustible ha llamado la atención de los investigadores, ya que son una fuente alterna de generación de energía libre de emisiones contaminantes, sin embargo, también tienen desventajas que se buscan superar, entre las que destaca su alto costo comercial, por lo que en la mayoría de las investigaciones se busca reducir costos y aumentar la eficiencia energética. Generalmente el camino para lograr ésto es proponiendo nuevos materiales, nuevos diseños de platos colectores, así como también nuevos sistemas auxiliares para celdas de combustible (unidad de control de temperatura y humedad, unidad de suministro de gases, unidad de depuración de canales, etc). Todos estos trabajos de investigación son muy importantes para impulsar el uso masivo de las celdas de combustible como fuente de energía. Pese a todas las investigaciones recientes, en la actualidad la celdas de combustible siguen siendo dispositivos costosos que además pueden dañarse muy rá-

pidamente si no se trabaja bajo sus condiciones ideales de operación. Para superar los costos elevados, la complejidad del sistema auxiliar de la celda y los riesgos de daño o pérdida durante pruebas experimentales del sistema de aplicación, se propone el uso de un emulador de celdas de combustible. Un sistema de emulación puede tener una respuesta idéntica o muy cercana a la de la celda de combustible permitiendo al investigador observar el comportamiento que tendrá la celda bajo ciertos estímulos y de este modo adaptar su sistema o modificar las condiciones de operación de la celda de combustible sin pérdidas de recursos.

Objetivos

Objetivo General

Obtener un emulador de celda de combustible de membrana de intercambio protónico, mediante la adaptación de su modelo descriptivo en una fuente programable, para reproducir el comportamiento eléctrico de la celda.

Objetivos Específicos

1. Analizar el funcionamiento de las celdas de combustible.
2. Obtener un modelo de la celda de combustible que permita la reproducción de su comportamiento eléctrico a partir de la información genérica que el fabricante proporciona.
3. Simular el modelo obtenido de la celda de combustible.
4. Validar la respuesta del modelo obtenido.
5. Implementar la emulación de la celda de combustible.

Justificación

Las celdas de combustible son una gran opción como sistemas de generación de energía alterna ya que tiene un gran rendimiento energético y no generan sustancias contaminantes. Las celdas de combustible se pueden usar en cualquier tipo de aplicación que requiera ser alimentada eléctricamente, tales como vehículos eléctricos, dispositivos portátiles, etc.

Para lograr que una celda de combustible trabaje correctamente y alcance las características adecuadas que la aplicación necesite, es necesario conocer su comportamiento ante las condiciones en las que operará, ya que la celda de combustible puede llegar a ser muy sensible a ciertas variaciones como son el cambio en la presión de los reactivos, el cambio de temperatura, el nivel de humedad, la concentración y pureza de los reactivos e incluso las variaciones de carga a la que es sometida [3], por lo que es muy importante predecir su comportamiento ante todos estos estímulos.

Las celdas de combustible son afectadas por diferentes parámetros de su diseño físico y estado de operación [4], por lo que, para validar el buen funcionamiento de la celda de combustible es necesario observar su respuesta ante diferentes estímulos, que en ocasiones por ser poco favorables para la celda de combustible, podrían dañarla o inutilizarla por lo que resulta sumamente útil contar con un sistema que emule el comportamiento de la celda. La emulación de una celda de combustible o stack es necesaria en el ámbito de investigación y desarrollo tecnológico ya que permite al investigador realizar pruebas de diferentes sistemas de aplicación, sin la necesidad de contar con una celda de combustible, esto le permitirá obtener resul-

tados más rápidamente además de poder dimensionar adecuadamente el stack de celdas de combustible que realmente necesita su sistema, así como observar cuales son las condiciones de operación en la que la celda de combustible tiene una mejor respuesta.

Para llevar a cabo la emulación es necesario contar con un modelo de celda de combustible, ya que el emulador responderá a dicho modelo, en general los modelos de las celdas de combustible son muy complejos o se requieren de diferentes pruebas para obtener los parámetros necesarios para que el modelo funcione. La simplicidad del modelo y la facilidad para requerir los datos necesarios para aplicar dicho modelo es un requisito necesario cuando no se cuenta con la celda de combustible o el equipo adecuado para realizar pruebas que nos permitan conocer todos los parámetros de la celda. Aunque en la literatura existen varios trabajos de emulación de la celda de combustible, en la mayoría se requieren de pruebas y caracterización a la celda real para poder reproducir su comportamiento, como resultado de este trabajo se obtuvo un método simple para realizar la emulación de la celda, sin necesidad de contar con ella y sin tener que descifrar un modelo complejo, lo anterior se convirtió en dos artículos, uno ya publicado y otro en revisión.

Descripción General del Sistema

Las celdas de combustible son fuentes alternas de energía que han ganado popularidad en los últimos años, esto se debe a su baja o nula generación de desechos contaminantes y a su buena eficiencia (62 % – 83 %) [5]. Existen diferentes tipos de celdas de combustible, entre las cuales se encuentran las alcalinas (AFC), de metanol directo (DMFC), de ácido fosfórico (PAFC), de carbonato fundido (MCFC), de óxido sólido (SOFC) y de membrana de intercambio protónico (PEMFC) [6] y [7], sin embargo, esta última es la más popular ya que se puede utilizar en aplicaciones de baja a mediana potencia (0.5 W - 1 MW) y usa como combustible hidrógeno y oxígeno (aire) .

La PEMFC es un dispositivo electroquímico que convierte energía química en eléctrica de forma directa, mediante una reacción conocida como óxido-reducción (redox). En general una celda de combustible tipo PEM, consta de un ensamble membrana electrodo (MEA), el cual contiene el ánodo y el cátodo separados por la membrana de intercambio protónico (PEM), esta membrana sirve como electrólito y ayuda a conducir los protones del ánodo al cátodo. Durante la operación de la PEMFC, el combustible, en este caso hidrógeno, es oxidado electroquímicamente dentro de la capa catalizadora (CL) del ánodo produciendo tanto protones como electrones. Los protones son transportados al cátodo a través de la membrana, mientras que los electrones pasan a través del circuito externo conectado entre el ánodo y cátodo de la PEMFC. Los electrones y protones se combinan con el oxidante, en este caso el oxígeno del aire, dentro de la capa catalizadora del cátodo, produciendo tanto agua

como calor (reacción exotérmica) [5].

En general el comportamiento de la celda de combustible se puede observar con claridad en su curva de densidad de corriente contra voltaje i - V , como la que se muestra en la figura 1, en dicha curva se pueden observar las cuatro regiones de pérdida de voltaje; (i) pérdida de voltaje de circuito abierto (OCV) causada por el cruce de hidrógeno que pasa por la membrana del ánodo al cátodo y el potencial mixto que se genera en el cátodo, (ii) pérdida de activación que es la pérdida causada por la lenta cinética de la reacción, (ii) pérdida Óhmica que es la pérdida causada por la resistencia de la membrana, y (iv) pérdida por transferencia de masa que es la pérdida causada por el cambio en la concentración de los reactivos conforme el combustible es utilizado y a la dificultad de mover los productos fuera de los sitios de reacción, en la figura 1 también se observa la curva de densidad de corriente contra densidad de potencia i - P , esta curva es útil para determinar el punto de operación de la celda de combustible.

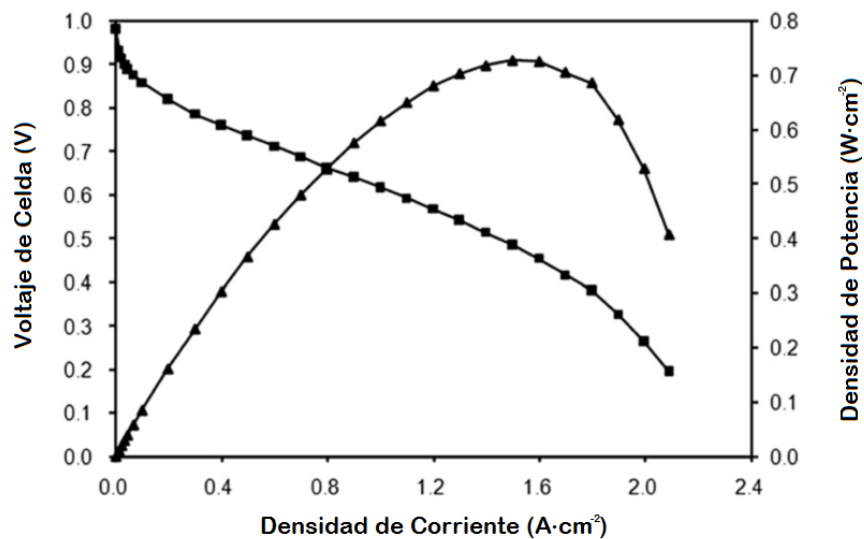


Figura 1. Curva de polarización y densidad de potencia de una celda de combustible PEM H_2 /aire a $80^\circ C$ y $3 atm$ con $100\% RH$.

Las celdas de combustible son afectadas por diferentes parámetros de su diseño

físico y para poder validar el buen funcionamiento de la celda de combustible es necesario observar su respuesta ante diferentes estímulos por lo que en ocasiones se deben someter a condiciones de trabajo poco favorables para la celda de combustible, que podrían dañar o inutilizar la celda [8]. Por lo anterior, resulta sumamente útil contar con un sistema que emule el comportamiento de la celda. El sistema de emulación propuesto consta de un modelo de la celda de combustible en el cual se puedan variar las condiciones de operación de la celda, este modelo será programado en una fuente de corriente directa programable la cual reflejará el comportamiento eléctrico de la celda como se muestra en la figura 2.

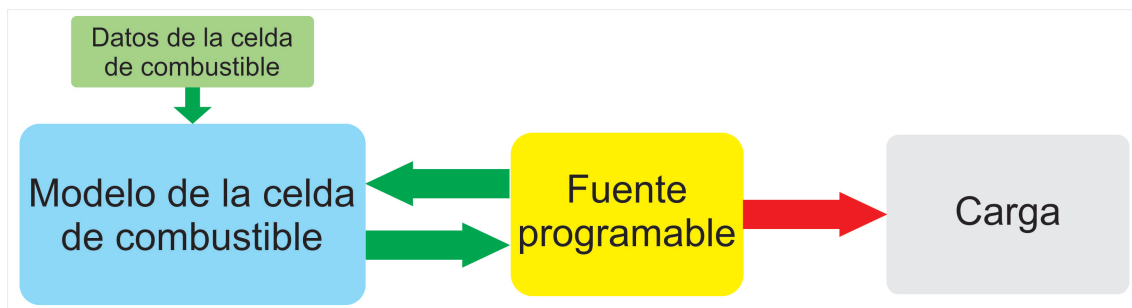


Figura 2. Diagrama a bloques del sistema de emulación de la celda de combustible tipo PEM de $H_2/aire$.

Capítulo 1

Estado del arte

Las celdas de combustible son dispositivos de conversión de energía muy complejos que involucran varias reacciones químicas, por lo que en las siguientes secciones se explicará de forma general su funcionamiento y los métodos de prueba y medición que permiten caracterizar este dispositivo.

1.1. Celda de Combustible

La celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) es un dispositivo electroquímico capaz de convertir energía química en eléctrica de forma directa, mediante una reacción conocida como óxido-reducción (redox). Una celda de combustible tipo PEM, consta de un ensamble membrana electrodo (MEA), el cual contiene el ánodo y el cátodo separados por la membrana de intercambio protónico (PEM), esta membrana sirve como electrólito y ayuda a conducir los protones del ánodo al cátodo como se muestra en la figura 1.1. Durante la operación de la PEMFC, el combustible, en este caso hidrógeno, es oxidado electroquímicamente dentro de la capa catalizadora (CL) del ánodo produciendo tanto protones como electrones. Los protones son transportados al cátodo a través de la membrana, mientras que los electrones pasan a través del circuito externo conectado entre el ánodo y cátodo de la PEMFC. Los electrones y protones se combinan con el oxidante, en este caso el

oxígeno del aire, dentro de la capa catalizadora del cátodo, produciendo tanto agua como calor (reacción exotérmica) [6].

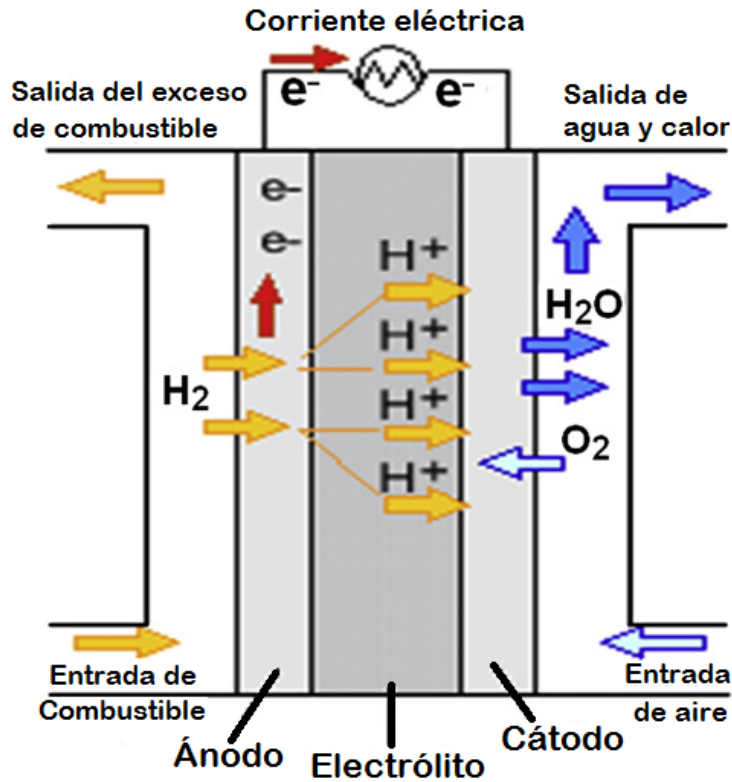


Figura 1.1. Esquemático de la Celda de combustible PEM H_2 /aire [6].

La velocidad con la que ocurre esta reacción será proporcional al área del electrodo, ésto es tan importante que en la mayoría de los casos, el rendimiento de una celda de combustible es citada en términos de la corriente por el área efectiva del electrodo (cm^2) [5].

Existen muchas limitantes que hacen que la construcción y diseño de la celda de combustible sea complicada, ya que se debe de tener en cuenta diferentes fenómenos que ocurren durante las reacciones químicas de la celda que permiten generar energía eléctrica, así como la simplificación del sistema [9]. Entre las consideraciones que se tienen en el diseño de las celdas de combustible se encuentran: Los puntos de contacto de los electrodos deben ser tan grandes como sea posible, sin embargo

ésto mitigaría el flujo de gas en los electrodos, los platos colectores deben ser tan delgados como sea posible con el fin de minimizar la resistencia eléctrica y hacer pequeño el stack de celdas de combustible, sin embargo ésto hace que los canales de flujo de gas sean estrechos provocando que sea difícil bombear el gas a la FC y el bombeo de gas debe hacerse a altas velocidades especialmente cuando se usa aire en vez de oxígeno en el cátodo, para tener un balance entre los requerimientos eléctricos, químicos e hidráulicos generalmente los electrodos de una celda de combustible se construyen con un material altamente poroso permitiendo que el área efectiva de la superficie de los electrodos sea incrementada de forma significativa. Además de las consideraciones del área superficial de los electrodos, éstos también deben tener incorporado un catalizador y soportar altas temperaturas en un ambiente corrosivo por lo que los platos colectores son construidos con un buen material conductor, tal como el grafito o acero inoxidable [5]. Los elementos que conforman una celda de combustible se ilustran en la figura 1.2.

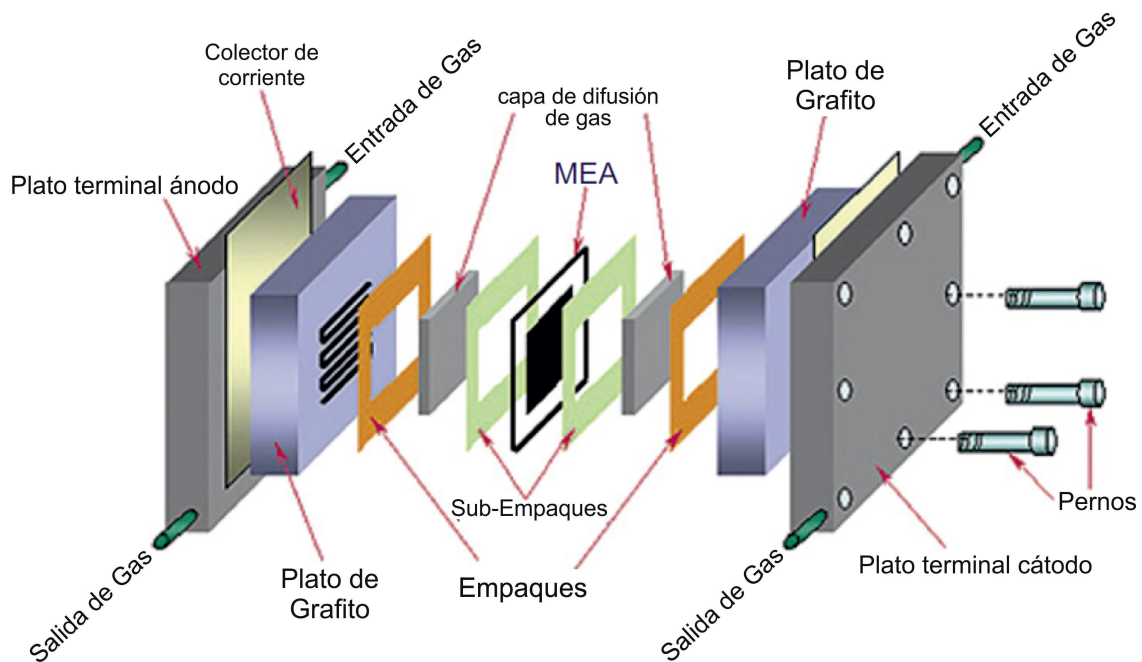


Figura 1.2. Elementos que conforman la estructura física de una celda de combustible [6].

1.1.1. Voltaje de circuito abierto y eficiencia de energía eléctrica de la celda de combustible

La forma en la que las celdas de combustible (FC) convierten la energía química a eléctrica no es tan obvia, y para poder calcular el potencial generado por la celda de combustible y su eficiencia eléctrica se debe tener en cuenta varios fenómenos ocurridos durante la reacción, tal como la Entalpía y la energía libre de Gibbs [5].

La PEMFC convierte la energía química almacenada en el combustible (H_2) en energía eléctrica a través de las reacciones químicas entre el hidrógeno y el oxígeno, éstas se expresan de las siguiente forma:

Reacción en el ánodo:



Reacción en el cátodo:



En general



Las ecuaciones (1.1), (1.2) y (1.3) son tanto químicas como electroquímicamente reversibles, ésto se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones de Nernst:

$$E_{H_2/H^+}^r = E_{H_2/H^+}^o + 2.303 \frac{RT}{n_H F} \log \left(\frac{a_{H^+}^2}{a_{H_2}} \right) \quad (1.4)$$

$$E_{O_2/H_2O}^r = E_{O_2/H_2O}^o + 2.303 \frac{RT}{n_O F} \log \left(\frac{a_{O_2} a_{H^+}^4}{a_{H_2O}^2} \right) \quad (1.5)$$

En la ecuación (1.4), E_{H_2/H^+}^r es el potencial reversible del ánodo (V) a una temperatura T ; a_{H_2} y a_{H^+} son las respectivas actividades de H_2 y H^+ ; E_{H_2/H^+}^o es el potencial del electrodo de la pareja redox H_2/H^+ en condiciones estándares (1.0 atm, 25°C), el cual está definido como el voltaje cero; n_H es el número de electrones transferidos (igual a 2 por la pareja redox H_2/H^+); R es la constante universal de los gases

($8.314 JK^{-1}mol^{-1}$); y F es la constante de Faraday ($96.487 Cmol^{-1}$). En la ecuación (1.5), E_{O_2/H_2O}^r es el potencial reversible del cátodo en Volts a una temperatura T ; a_{O_2} y a_{H^+} son las respectivas actividades de O_2 y H^+ ; E_{O_2/H_2O}^o es el potencial del electrodo de la pareja redox O_2/H_2O en condiciones estándares ($1.0 atm, 25^\circ C$), igual a $1.229 V$ (vs el electrodo de hidrógeno estándar); n_O es el número de transferencia de electrones (igual a 4 para la pareja redox O_2/H_2O) y a_{H_2O} es la actividad del H_2O . Combinando la ecuación (1.4) y (1.5) se obtiene el voltaje termodinámico (V_{cell}^{OCV}) o teórico de la celda de combustible también conocido como voltaje a circuito abierto (OCV por sus siglas en inglés), que puede ser expresado como sigue:

$$\begin{aligned} V_{cell}^{OCV} &= E_{O_2/H_2O}^r - E_{H_2/H^+}^r \\ &= E_{O_2/H_2O}^o - E_{H_2/H^+}^o + 2.303 \frac{RT}{2F} \log \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Donde $E_{O_2/H_2O}^o - E_{H_2/H^+}^o$ es igual a $1.229 V$, por lo tanto, si se conocen T , a_{O_2} , a_{H_2} y a_{H_2O} se puede calcular el voltaje teórico de la celda bajo diferentes condiciones mediante la ecuación (1.6). Los valores de a_{O_2} , a_{H_2} y a_{H_2O} pueden ser reemplazados por su presión parcial: P_{O_2} , P_{H_2} y P_{H_2O} .

El voltaje teórico de la celda (V_{cell}^{OCV}) es el voltaje de circuito abierto de la celda de combustible, en la práctica el valor calculado siempre sera menor que el OCV medido. El OCV es calculado a partir de un concepto termodinámico llamado cambio en la energía libre de Gibbs (ΔG), para un sistema electroquímico la ΔG es la medida del potencial termodinámico del trabajo eléctrico “útil” que puede ser obtenida de una reacción electroquímica e isobárica. Entonces la energía libre de Gibbs para la reacción de la celda de combustible (1.3) está relacionada con el voltaje de la celda de combustible mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta G_{cell} = -2FV_{cell}^{OCV} \quad (1.7)$$

Donde 2 es el número de electrones cuando el H_2 es oxidado, F es la constante de Faraday ($96.487 C mol^{-1}$) y V_{cell}^{OCV} es el voltaje de circuito abierto o voltaje teórico de la FC.

Como se mencionó anteriormente la FC genera tanto calor como energía eléctrica, estas dos partes de energía de la reacción pueden ser medidas: (a) la salida de energía eléctrica a través de la resistencia de carga de la FC y (b) el calor liberado de la reacción de la celda de combustible. Por lo tanto, la suma de estas dos porciones de energía debe ser igual a la energía de calor total de la reacción (ΔH) liberada por la reacción directa del O_2 y el H_2 a la misma temperatura y presión, si la energía usada para calentar la FC no es considerada. Si el valor de la resistencia de carga de la FC es infinitamente grande, estas dos porciones de energía pueden ser relacionadas con la energía de calor total de la reacción ΔH (cambio de Entalpía) como sigue:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (1.8)$$

Donde ΔH es la energía de calor total de la reacción de la celda de combustible, ΔG es el trabajo eléctrico máximo que la celda de combustible puede generar y $T\Delta S$ es el calor máximo que la celda puede liberar; donde T es la temperatura y ΔS es el cambio en la entropía de la reacción.

Finalmente, podemos expresar la eficiencia de la energía eléctrica teórica (η_e^0) de las FC como sigue [6]:

$$\eta_e^0 = \frac{\Delta G}{\Delta H} 100\% \quad (1.9)$$

1.1.2. Curva de polarización

El comportamiento de la celda de combustible es caracterizada por su curva de polarización, la cual no es otra cosa más que una gráfica del potencial contra la densidad de corriente de la celda. Cuatro diferentes regiones son observadas en la curva de polarización, correspondiendo a diferentes fenómenos que limitan el potencial de

la celda [6].

Cuando una densidad de corriente atraviesa la celda de combustible, el voltaje de celda (V_{cell}) puede ser expresado por la ecuación (1.10)

$$V_{cell} = E_c - E_a - I_{cell}R_m \quad (1.10)$$

Donde R_m es la resistencia de la membrana, I_{cell} es la densidad de corriente de la celda, E_a es el potencial del ánodo y E_c es el potencial del cátodo. Combinando las ecuaciones (1.11) y (1.12) se tiene la siguiente expresión.

$$E_a = E_{H_2/H^+}^r - \frac{2.303RT}{\alpha_H n_{\alpha H} F} \log(i_{H_2/H^+}^0) + \frac{2.303RT}{\alpha_H n_{\alpha H} F} \log(i_{H_2/H^+}) \quad (1.11)$$

$$E_c = E_{O_2/H_2O}^r + \frac{2.303RT}{(1 - \alpha_{2O})n_{\alpha 2O}F} \log(i_{O_2/H_2O}^0) - \frac{2.303RT}{(1 - \alpha_{2O})n_{\alpha 2O}F} \log(i_{O_2/H_2O}) \quad (1.12)$$

Considerando que tanto la densidad de corriente del ánodo como del cátodo sean iguales a la densidad de corriente de la celda ($I_{cel} = i_{H_2/H^+} = i_{O_2/H_2O}$), entonces el voltaje de la celda de combustible puede obtenerse de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} V_{cell} = & E_{O_2/H_2O}^r - E_{H_2/H^+}^r + \frac{2.303RT}{(1 - \alpha_{2O})n_{\alpha 2O}F} \log(i_{O_2/H_2O}^0) \\ & + \frac{2.303RT}{\alpha_H n_{\alpha H} F} \log(i_{H_2/H^+}^0) - \frac{2.303RT}{(1 - \alpha_{2O})n_{\alpha 2O}F} \log\left(\frac{i_{O_2/H_2O} \vec{I}_{O_2/H_2O}^l}{\vec{I}_{O_2/H_2O}^l - i_{O_2/H_2O}}\right) \\ & - \frac{2.303RT}{\alpha_H n_{\alpha H} F} \log\left(\frac{i_{H_2/H^+} \vec{I}_{H_2/H^+}^l}{\vec{I}_{H_2/H^+}^l - i_{H_2/H^+}}\right) - I_{cell}R_m \quad (1.13) \end{aligned}$$

Donde el término $E_{O_2/H_2O}^r - E_{H_2/H^+}^r$ es el OCV teórico (V_{cell}^{OCV}). La ecuación (1.13) es sólo válida cuando el sobrepotencial tanto del ánodo como del cátodo son mayores a 60 mV; de lo contrario, dará como resultado un gran error. Los datos experimentales se pueden utilizar para simular los parámetros cinéticos mostrados en la ecuación (1.13), cabe señalar que cuando se utiliza esta ecuación, se deben conside-

rar los efectos de la estructura de la capa catalizadora y la morfología del catalizador.

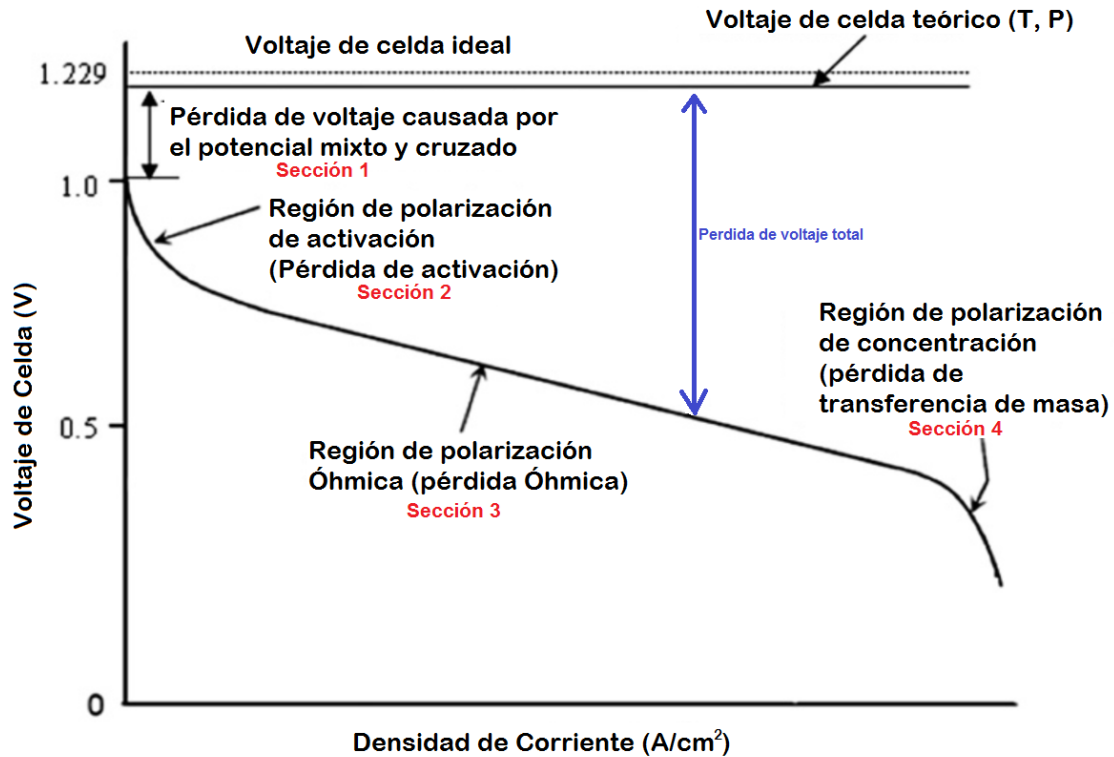


Figura 1.3. Curva de polarización típica de una celda de combustible PEM [6].

Un esquema de la curva típica de polarización se muestra en la figura 1.3. Se puede ver que hay cuatro pérdidas en todo el rango de densidad de corriente: (1) la pérdida de OCV causada por el cruce de H_2 que pasa por la membrana del ánodo al cátodo y el potencial mixto que se genera en el cátodo, (2) Pérdida de activación que es la pérdida causada por la lenta cinética de la reacción, (3) Pérdida Óhmica que es la pérdida causada por la resistencia de la membrana, y (4) Pérdida por transferencia de masa que es la pérdida causada por el cambio en la concentración de los reactivos conforme el combustible es utilizado y a la dificultad de mover los productos fuera de los sitios de reacción [6]. Estas cuatro pérdidas también pueden ser reflejadas por la ecuación (1.13).

En el caso de la sección 2 de la curva de polarización, se debe suministrar la energía de activación para superar la “colina energética” como se muestran en la figura 1.4. Si la probabilidad de que una molécula tenga suficiente energía es baja, entonces la reacción sólo puede proceder lentamente. Excepto a temperaturas muy altas. Ésto ocurre en las reacciones de la celda de combustible y existen tres formas para elevar la velocidad de reacción lenta; i) El uso de catalizadores, ii) Elevar la temperatura y iii) Incrementar el área del electrodo [5].

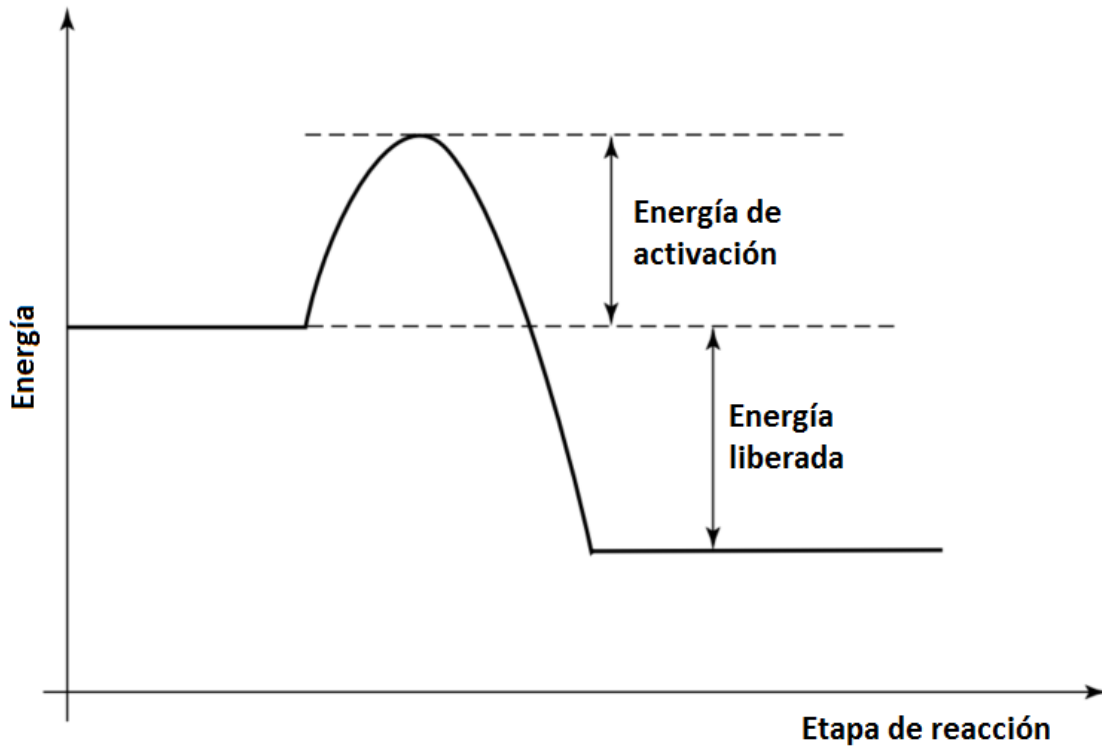


Figura 1.4. Diagrama de energía para una simple reacción exotérmica [5].

El OCV de la celda de combustible (V_{cell}^{OCV}) en la ecuación (1.13) puede ser expresado como sigue:

$$V_{cell}^{OCV} = E_{O_2/H_2O}^r - E_{H_2/H^+}^r \quad (1.14)$$

En condiciones normales ($1,0 \text{ atm}$ y $25^\circ C$), si utilizamos tanto $E_{O_2/H_2O}^r = 1.229V$ contra el electrodo estándar de hidrógeno (SHE) y $E_{H_2/H^+}^r = 0.000V$ (vs. SHE), el

OCV de la celda de combustible debe ser 1.229 V. Sin embargo, el OCV medido a temperatura ambiente es de alrededor de 1.0 V, que es menor que el valor calculado a partir de los potenciales de electrodo termodinámicos. Esta diferencia se puede explicar por las pérdidas causadas por el cruce de H_2 y el potencial del cátodo mixto, que resultan de la oxidación de la superficie de Pt en el lado del cátodo. Por lo tanto, el OCV medido de la celda de combustible puede ser expresado mediante el uso de la ecuación (1.15):

$$V_{measured}^{OCV} = V_{cell}^{OCV} - \Delta V_{H_2-xover} - \Delta V_{PtO-mixed} \quad (1.15)$$

Donde $V_{measured}^{OCV}$ es el OCV medido, $\Delta V_{H_2-xover}$ es la pérdida de tensión causada por el cruce de hidrógeno desde el ánodo al cátodo, y $\Delta V_{PtO-mixed}$ es la pérdida de tensión causada por el potencial mixto de superficie de Pt del cátodo [6].

1.1.3. Estructura física y requerimientos para el uso de las celdas de combustibles

Como ya se mencionó anteriormente la celda de combustible es una gran opción como sistema de generación de energía alterna, sin embargo, el voltaje de una celda de combustible es muy pequeño, cerca de 0.7 V cuando se genera una corriente útil [5], por lo que se requiere de la conexión en serie de varias celdas de combustible para poder obtener un voltaje útil para una determinada aplicación, a la conexión en serie de celdas de combustible se le conoce como banco de celdas de combustible o “stack”.

Para realizar la conexión en serie de las celdas de combustible es natural pensar en conectar el cátodo de una mono-celda con el ánodo de otra mediante un cable o conector y así sucesivamente hasta obtener el valor de energía requerido por la aplicación, sin embargo los electrones deben fluir a través de la cara del electrodo hasta

la extremidad donde se colecta la corriente, estas conexiones provocarían pérdidas y dado que una celda de combustible genera un valor de voltaje tan pequeño, estas pérdidas serían sumamente significativas, sin mencionar la complejidad, tamaño y número de las tuberías externas por donde se suministran los gases a las celdas de combustible [5].

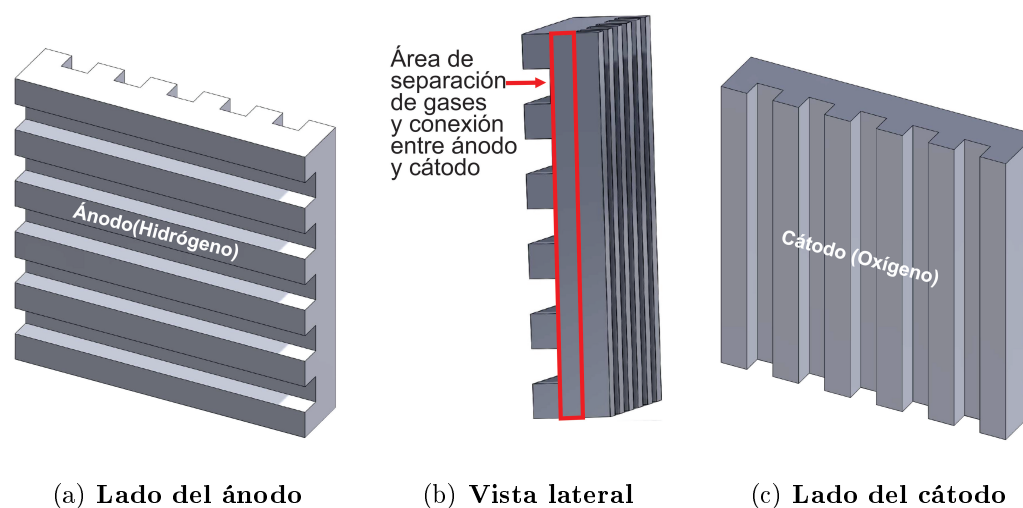


Figura 1.5. Plato bipolar estriados. El plato bipolar actúa como el ánodo de una de celda de combustible y como el cátodo de la siguiente en el stack.

Entonces, el mejor método para conectar las celdas de combustible en serie, es usando *platos bipolares*, éstos permiten que toda la superficie del ánodo esté conectado con toda la superficie del cátodo de la siguiente celda de combustible y al mismo tiempo sirve como medio para suministrar el oxígeno al cátodo e hidrógeno al ánodo, aunque debe existir una buena conexión eléctrica entre los electrodos, los canales de flujo de suministro de los gases (oxígeno/aire) deben estar estrictamente separados como se muestra en la figura 1.5.

Existen diferentes diseños de platos bipolares, en los que principalmente varía la forma de los canales de flujo de suministro de gases (figura 1.6), el diseño de los platos bipolares no es simple, ya que los puntos de contacto deben ser lo más grandes

posible, pero esto minimizaría el buen flujo de gas sobre los electrodos, por lo que se busca un equilibrio entre la alimentación de gases y la superficie de contacto, entre otras propiedades y fenómenos que se consideran.

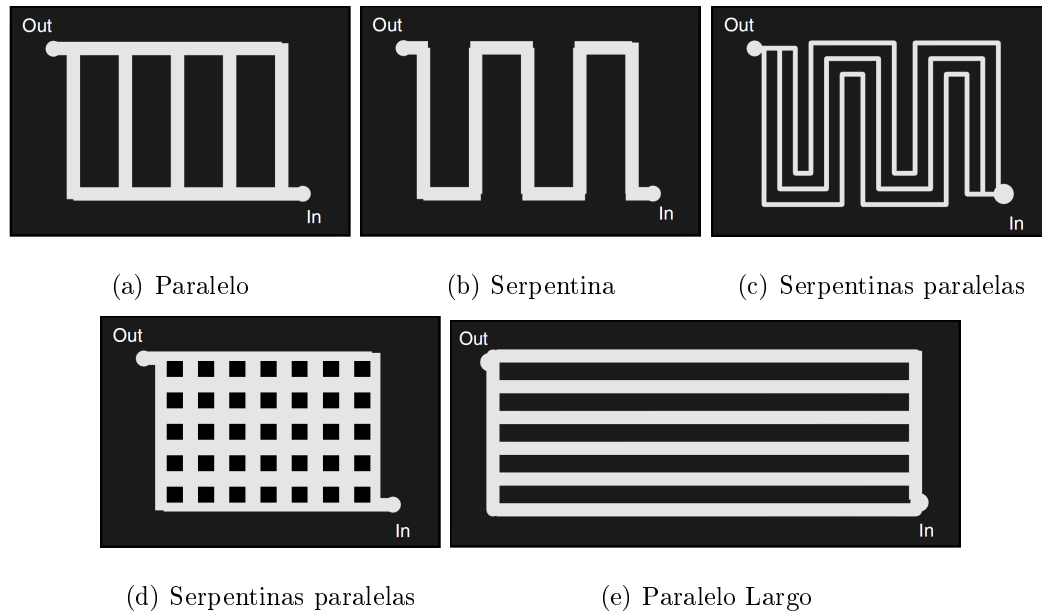


Figura 1.6. Algunos diseños de platos bipolares [5].

Entre los aspectos que se consideran en el diseño de los platos bipolares está: la alimentación de gases, en algunos casos el diseño de los canales de los platos colectores podrían ser simples, sin embargo, la alimentación de gases podría complicar el diseño del banco de celdas de combustible, ya que se requeriría de un sistema más complejo de inyección de gases que aumentaría el tamaño del sistema. Por ejemplo, para el diseño mostrado en la figura 1.5, se requeriría de *tuberías externas* como se muestra en la figura 1.7, la cual podría ser difícil de conseguir, ya que debe ser del tamaño justo del stack y el material debe soportar cambios de temperatura y debe sellar perfectamente para evitar la fuga de gases, la eficiencia del banco de celdas de combustible con este tipo de diseño no es muy buena y además genera demasiado calor.

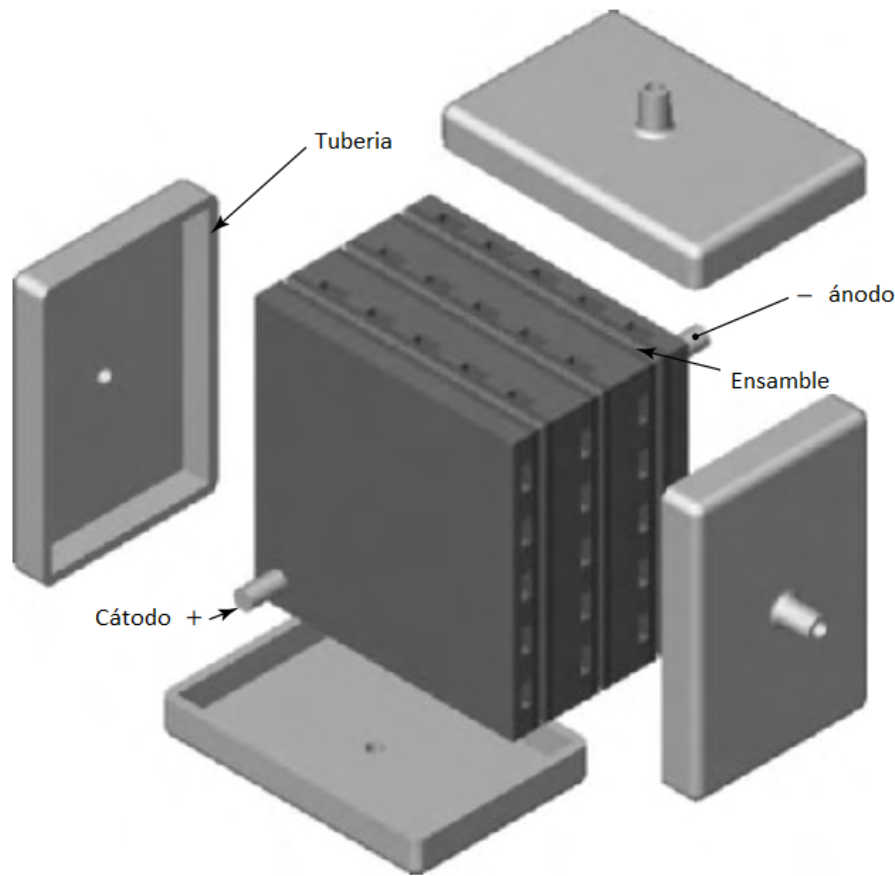


Figura 1.7. Banco de celdas de combustible con tuberías externas [5].

Otro tipo de diseño es el stack con *tuberías internas* los cuales pueden variar con respecto a la forma de los canales, pero la forma en la que los gases ingresan al stack no difiere, el diseño de los platos bipolares de este tipo de celdas es más complejo, ya que cuentan con canales adicionales para la inyección de gases, estos canales son pequeños agujeros que se distribuyen a lo largo del stack, éstos pequeños orificios permiten que el stack quede como un bloque sólido que se alimenta y depura sólo a los extremos, un ejemplo de este tipo de banco de celdas de combustible se muestra en la figura 1.8. En general, el stack quedan como un gran bloque perfectamente sellado en el que no se puede tener acceso más que por los canales de alimentación de los gases.

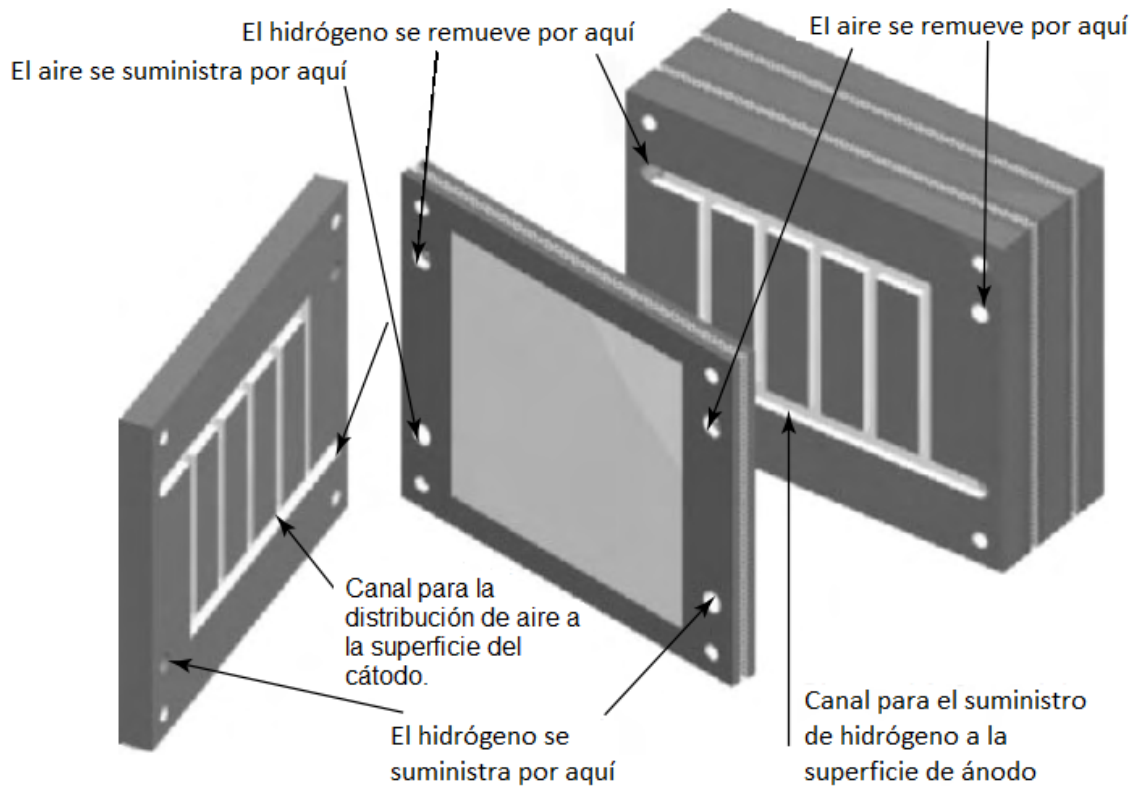


Figura 1.8. Esquema de un banco de celdas de combustible con tubería interna [5].

Además del diseño de los platos bipolares, el stack requiere de otros subsistemas para garantizar su buen funcionamiento, estos son: sistema de control de temperatura, sistema de inyección de gases y sistema de humidificación [10], en algunos casos el control de temperatura y humedad del stack se encuentran en un mismo sistema [11], ya que para controlar estos parámetros del stack se modifica la temperatura y humedad del aire que ingresa a la celda, en el caso del sistema de inyección de gases se cuenta con un compresor que mantienen un flujo y presión constante del hidrógeno y el oxígeno.

1.2. Modelo de la celda de combustible tipo PEM

En la literatura existen muchos modelos de celdas de combustible que permiten observar su comportamiento bajo ciertas condiciones de trabajo, sin embargo la mayoría de ellos son descripciones provenientes de las reacciones químicas llevadas a cabo en la celda de combustible y su alto nivel de complejidad y especificidad no permite su utilización o la integración directa con elementos eléctricos.

A continuación se describirán algunos de estos modelos de la celda de combustible con la finalidad de observar sus ventajas y desventaja.

1.2.1. Modelo de circuito equivalente de una celda de combustible

En la literatura existen diferentes modelos de circuito equivalente como el utilizado por Mohamed A. et al [12] el cual solo consta de 2 ramas RC y una resistencia conectada en serie, sin embargo este circuito no permite observar el comportamiento completo de la celda, en el trabajo propuesto por Caisheng Wang et al [13] propone un modelo de circuito equivalente de la celda de combustible en el que realiza una serie de cálculos para obtener los valores de los componentes del circuito, los cuales parten modelo electroquímico de la celda de combustible. También existen modelos de circuito equivalente basados en una descripción matemática de la celda de combustible que llegan a describir hasta la dinámica con la que fluyen los gases por los canales de los platos colectores de la celda de combustible [14] y [15]. Woojin Choi et al [16] proponen un modelos de circuito eléctricos de la celda de combustible derivado de técnicas de análisis de la respuesta en frecuencia de dos stacks de celdas de combustible comerciales (Avista Lab SR-12 y Ballard Nexa), este modelo proporciona una relación entre el comportamiento del stack y el rizo de corriente generados por unidades de acondicionamiento de potencia (UAP). Para obtener este modelo de circuito equivalente los autores describen una prueba que consiste en llevar ambos

stacks de celdas de combustible de cero a carga completa, de esta prueba se obtienen las curvas de polarización I-V de ambos stacks y al exhibir un comportamiento casi lineal proponen el circuito equivalente en CC mostrado en la figura 1.9.

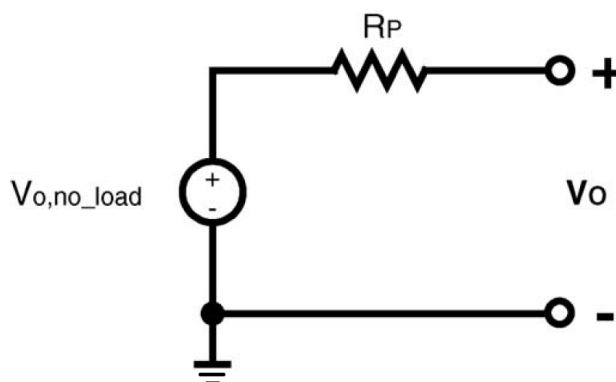


Figura 1.9. Modelo de circuito equivalente en un CC [16].

Para facilitar la comparación entre los diferentes valores de los stacks de celdas de combustible con diferentes rangos de corriente y voltaje de salida, los autores proponen un sistema por unidad. La tabla 1.1 muestra la definición de base de las cantidades por unidad de los stacks sometidos a prueba.

Tabla 1.1. Definiciones básicas de cantidades por unidad para los stacks de PEMFC sometidas a prueba

Modelo del Stack	$V_{o,no-load}$ [V]	V_{base} [V]	I_{base} [A]	P_{base} [W]	Z_{base} [Ω]
SR-12	40.6	28.9	17.3	500	1.67
Nexa	42.2	26.6	45	1200	0.59

Donde $V_{o,no-load}$ es el voltaje del stack de PEMFC sin carga, V_{base} es el voltaje del stack de PEMFC a carga completa, I_{base} es la corriente nominal a carga completa (rms), P_{base} es la potencia nominal de salida, $Z_{base} = V_{base}/I_{base}$ es la impedancia base.

La resistencia R_P mostrada en la figura 1.9 puede ser calculada como sigue:

$$R_P = \frac{V_{o,no-load} - V_{o,full-load}}{I_{full-load}} \quad (1.16)$$

Esto se puede representar por unidad como

$$R_{P,per-unit} = \frac{R_p}{Z_{base}} \quad (1.17)$$

Como la curva I-V de la celda de combustible muestra una gran variación en la tensión de salida (V_o) desde la carga cero hasta la carga completa, se define un factor de regulación de voltaje (VRF):

$$VRF = \frac{V_{o,no-load} - V_{o,full-load}}{V_{o,full-load}} \quad (1.18)$$

De (1.16) y (1.18) tenemos que

$$VRF = R_{p,per-unit} \quad (1.19)$$

Para el modelo de circuito equivalente de CA para el cual se realizaron pruebas con ambos stacks operando a cierto punto de operación de CC y con una pequeña señal sinusoidal de CA, la corriente y el voltaje en las terminales de los stacks son grabados con el fin de calcular la impedancia en AC de los stacks, esta prueba se repite de 0 - 10 kHz de frecuencia de la señal AC. De esta forma se obtuvo un diagrama de impedancia de Nyquist por cada stack probado, de estos diagramas se puede deducir el circuito equivalente en CA mostrado en la figura 1.10.

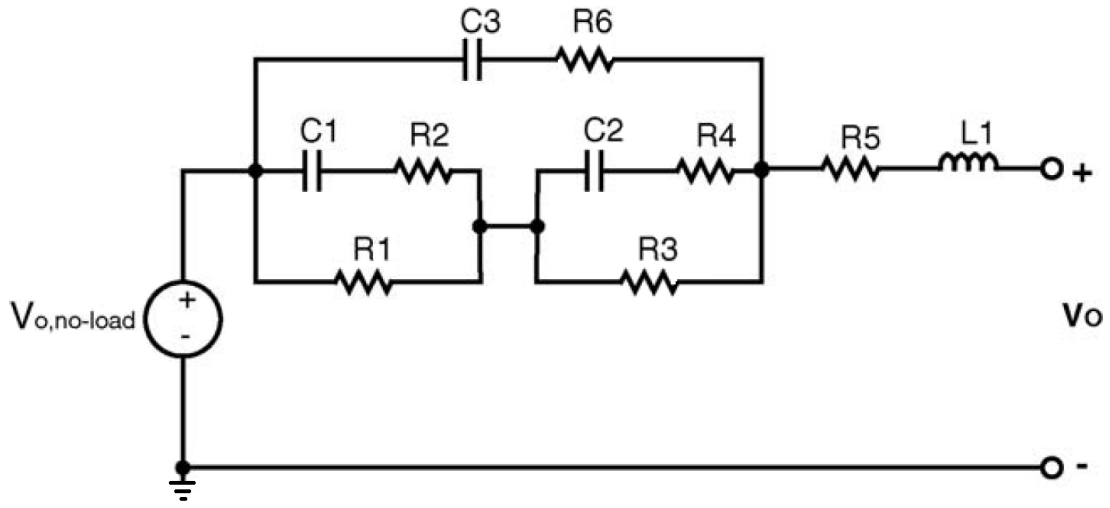


Figura 1.10. Modelo de circuito equivalente en un cierto punto de operación [16].

En este caso los valores de las ramas R-C y L son deducidas a partir de las mediciones realizadas para la obtención del modelo, dichos valores se muestran en la Table 1.2.

Tabla 1.2. Parámetros del circuito equivalente eléctrico para los PEMFC sometidos a prueba

Modelo del Stack	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	R_3 [Ω]	R_4 [Ω]	R_5 [Ω]
SR-12	0.41	0.0115	0.17	0.15	0.085
Nexa	0.15	0.0115	0.15	0.15	0.065

Modelo del Stack	R_6 [Ω]	C_1 [mF]	C_2 [mF]	C_3 [mF]	L_1 [μH]
SR-12	0.07	80	9	2.5	2
Nexa	0.07	70	7.5	5.5	4.8

1.2.2. Modelo genérico de la celda de combustible PEM

Souleman Njoya M. et al [17] proponen un modelo de celda de combustible genérico que es simple y detallado.

El modelo simplificado de la celda de combustible está basado en el circuito equivalente que se muestra en la figura 1.11, este modelo representa un stack que trabaja bajo condiciones constantes de presión y temperatura y para modificar su comportamiento basta con ingresar en el cuadro de diálogo de los parámetros del bloque de Simulink, que representa al banco de celdas de combustible, el voltaje en el que se encuentra la celda que se trata de representar a una corriente de 0 A y a 1 A, estos valores se encuentran fácilmente en la curva de polarización de la celdas de combustible proporcionada por el fabricante.

El modelo detallado del banco de celdas de combustible permite que el valor de los parámetros como presión, temperatura, composición y razón de flujo del hidrógeno y el aire varíen, estas variaciones en los parámetros antes mencionados afectan el voltaje de circuito abierto (E_{OC}), la corriente de intercambio (i_0) y la pendiente de Tafel (A), y se modifican según las ecuaciones de (1.20) - (1.22).

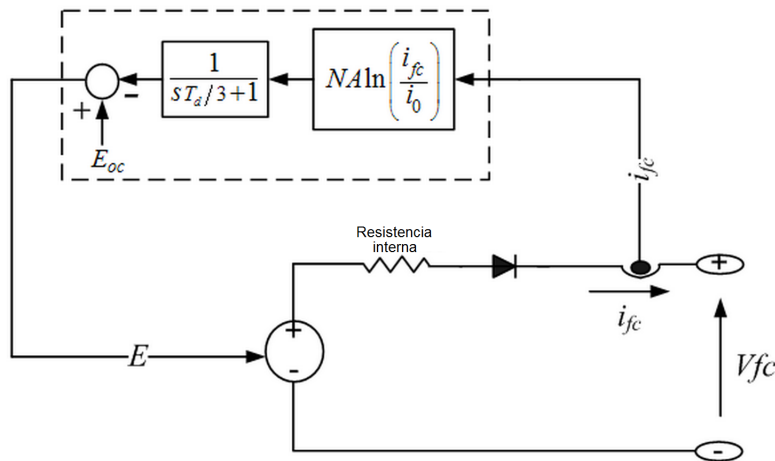


Figura 1.11. Circuito equivalente del banco de celdas de combustible en el que se basa el modelo simplificado usado por Simulink [17].

$$E_{OC} = K_c E_n \quad (1.20)$$

Donde K_c es el voltaje constante a condiciones nominales de operación y E_n es el voltaje de Nernst, que es el voltaje termodinámico de la celda de combustible y depende de la temperatura y de la presión parcial que depende de los reactivos y productos dentro de la celda.

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} e^{\frac{-\Delta G}{RT}} \quad (1.21)$$

Donde z representa el número de electrones móviles, F es la constante de Faraday igual a 96485 As/mol , R es la constante universal de los gases igual a 8.3145 J/(molK) , P_{H_2} es la presión parcial del hidrógeno dentro de la celda en atmósferas (atm), P_{O_2} es la presión parcial del oxígeno dentro de la celda en atmósferas (atm), k es la constante de Boltzmann que es igual a $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, h es la constante de Planck igual a $6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$, t es la temperatura de operación en Kelvin (K) y ΔG es el cambio de la energía libre de Gibbs.

$$A = \frac{RT}{z\alpha F} \quad (1.22)$$

Donde R es la constante universal de los gases y es igual a 8.3145 J/molK , F es la constante de Faraday igual a 96485 As/mol , T temperatura de operación en Kelvin (K), α coeficiente de transferencia de carga que depende del tipo de electrodo y catalizador utilizado y z es el número de electrones móviles.

Como se puede observar en la figura 1.12, el circuito es el mismo que en el caso del modelo simplificado, sin embargo en el caso del modelo detallado los parámetros E_{OC} , i_0 y A deben actualizarse.

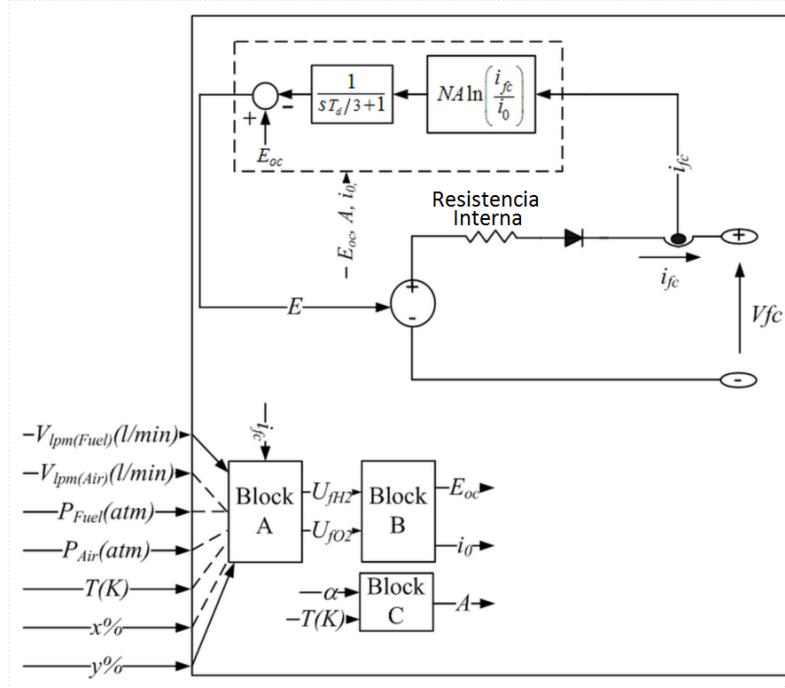


Figura 1.12. Circuito equivalente del stack en el que se basa el modelo detallado usado por Simulink [17].

En el bloque A ilustrado en la figura 1.12 se determina la razón de conversión del hidrógeno (U_{fH_2}) y el oxígeno (U_{fO_2}) como sigue:

$$U_{fH_2} = \frac{n_{H_2}^r}{n_{H_2}^{in}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{fuel}V_{lpm}(fuel)x\%} \quad (1.23)$$

$$U_{fO_2} = \frac{n_{O_2}^r}{n_{O_2}^{in}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{air}V_{lpm}(air)y\%} \quad (1.24)$$

Donde P_{fuel} es la presión absoluta a la que se suministra el combustible en atmósferas, P_{air} es presión a la que se suministra el aire en atmósferas, $V_{lpm}(fuel)$ razón de flujo del combustible en litros sobre minuto (L/min), $V_{lpm}(air)$ razón de flujo del aire en litros sobre minuto (L/min), x es el porcentaje de hidrógeno en el combustible (%), y es el porcentaje de oxígeno en el oxidante (%) y la constante 60000 viene de la conversión de la razón de flujo en litros sobre minuto (L/min) usado por el modelo a metros cúbicos sobre segundo (m^3/s), en cuyo caso $1 L/min = 1/60000 m^3/s$.

El bloque B determina el voltaje de Nernst y la presión parcial del hidrógeno, oxígeno y agua como se muestra a continuación:

$$P_{H_2} = (1 - U_{fH_2})x \%P \quad (1.25)$$

$$P_{O_2} = (1 - U_{fO_2})y \%P_{air} \quad (1.26)$$

$$P_{H_2O} = (w + 2y \%U_{fO_2})P_{air} \quad (1.27)$$

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}) & \text{cuando } T \leq 100^\circ \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right) & \text{cuando } T > 100^\circ \end{cases} \quad (1.28)$$

Donde P_{H_2O} es la presión parcial del vapor de agua dentro del stack en atmósferas (*atm*), w es el porcentaje de vapor de agua en el oxidante (%).

Los nuevos valores para el voltaje de circuito abierto (E_{OC}) y la corriente de intercambio (i_0) pueden ser calculados a partir de la presión parcial de los gases y del voltaje de Nernst.

El bloque C se encarga de calcular los nuevos valores para la pendiente de Tafel (A). Los parámetros α , ΔG y K_c se pueden calcular a partir de la curva de polarización en condiciones normales de funcionamiento junto con algunos parámetros adicionales, tales como la eficiencia del stack a valores de calor bajo (LHV), composición del combustible y el aire, presión de alimentación y temperatura. Estos datos se pueden obtener fácilmente a partir de la hoja de especificaciones del fabricante.

La razón nominal de conversión de gases es calculada como sigue:

$$U_{fH_2} = \frac{\eta_{mom} \Delta h^0(H_2O(gas)) N}{zFV_{nom}} \quad (1.29)$$

$$U_{fO_2} = \frac{60000RT_{nom}NI_{nom}}{0.42zFP_{air_{nom}}V_{lpm(air)_{nom}}} \quad (1.30)$$

Donde η_{nom} es la eficiencia del stack (%) con el valor de calor bajo nominal, $\Delta h^0(H_2O(gas))$ es una constante igual a $241.83 \times 10^3 J/mol$, V_{nom} es el voltaje nominal, I_{nom} es la corriente nominal, $V_{lpm(air)_{nom}}$ es la razón nominal del flujo de aire (L/min), $P_{air_{nom}}$ es la presión absoluta nominal de suministro de aire en Pascales (Pa), T_{nom} es la temperatura nominal de operación. De estas tasas de conversión se puede obtener la presión parcial nominal de los gases y el voltaje de Nernst. Conociendo E_{OC} , i_0 y A y asumiendo que el stack opera a razones de conversión constante o utilizándolas a condiciones nominales se pueden determinar α , ΔG y K_c .

Si no existiera combustible o aire en las entradas del stack, el bloque del stack de celdas de combustible está diseñado para asumir que está funcionando a una tasa fija de conversión de gases (tasa nominal de conversión), ésto significa, que la alimentación de gases será ajustada de acuerdo a la corriente de modo que siempre se suministre un poco más de lo que necesita el stack con cualquier carga.

La corriente máxima que el stack puede proporcionar está limitada por la razón de flujo máximo del combustible y el aire que pueden ser alcanzados. Más allá de la corriente máxima, la salida del voltaje del stack decrece abruptamente a medida que se demanda más corriente.

El tiempo de respuesta (T_d) a 95% se utiliza para modelar el fenómeno de “la doble capa de carga” debido a la acumulación de cargas en la interfaz electrodo / electrolito. Esto afecta solamente a la tensión de activación ($NAln(i_{fc}/i_0)$) como se muestra en los circuitos equivalentes mostrado en la figura 1.12.

La utilización de voltaje pico ($U_{fO_2(pico)}$) y la subtensión de voltaje correspondiente (V_u) se utilizan para modelar el efecto del agotamiento de oxígeno (debido al retardo del compresor de aire) en la tensión de salida de la celda. El voltaje de Nernst se

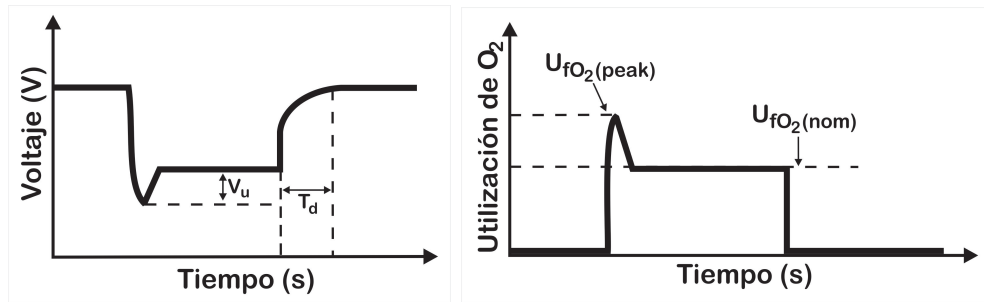
modifica debido a este efecto de la siguiente manera:

$$E_n = \begin{cases} E_n - K(U_{fO_2} - U_{fO_2(nom)}) & U_{fO_2} > U_{fO_2(nom)} \\ E_n & U_{fO_2} \leq U_{fO_2(nom)} \end{cases} \quad (1.31)$$

Donde $U_{fO_2(pico)}$ es la utilización nominal del oxígeno y K es la constante de sub-tensión de voltaje y se determina por:

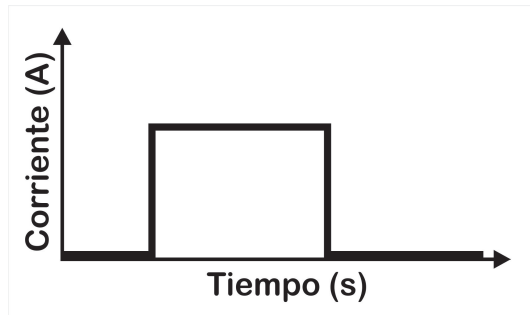
$$K = \frac{V_u}{K_c(U_{fO_2(peak)} - U_{fO_2(nom)})} \quad (1.32)$$

La prueba de interrupción debe ser realizada en un stack real para representar con exactitud su dinámica. en la figura 1.13 se muestra la respuesta del stack a esta prueba y los parámetros requeridos (T_d , $U_{fO_2(peak)}$ y V_u).



(a) Curva de Voltaje contra tiempo.

(b) Curva de consumo de combustible.



(c) Corriente de prueba.

Figura 1.13. Respuesta a la prueba de interrupción a un stack real [17].

El tiempo de respuesta (T_d) del stack usualmente está dada en la hoja de especificaciones. Los parámetros de la dinámica de flujo ($U_{fO_2(peak)}$ y V_u) dependen de la dinámica del circuito externo (compresor, regulador y carga).

1.2.3. Modelo electroquímico de la celda de combustible

Entre los modelos más utilizados está el modelo electroquímico, que es el más utilizado ya que es con el que se describe el comportamiento de la celda de combustible de forma más natural y apropiada [18], [19]. Este modelo se puede representar como sigue:

$$V = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{trans} \quad (1.33)$$

Donde

E es el voltaje de circuito abierto reversible (OCV).

ΔV_{act} es la caída de voltaje de activación o pérdida por activación.

ΔV_{ohm} es la caída de voltaje óhmico o pérdidas óhmicas.

ΔV_{trans} es la caída de voltaje de transferencia de masa o pérdida de transferencia de masa.

A. Voltaje de circuito abierto reversible.

El voltaje de circuito abierto reversible o sin pérdidas (E), está dado como sigue:

$$E = \frac{-\Delta \hat{g}}{2F} \quad (1.34)$$

Donde

$\Delta \hat{g}$ es el cambio en la energía libre de Gibbs específica por mol. La energía libre de Gibbs puede ser definida como la energía disponible para hacer trabajo externo, despreciando cualquier trabajo hecho por el cambio de presión o volumen. En la

celda de combustible el trabajo externo involucra movimiento de electrones alrededor de un circuito externo [5]. F es la constante de Faraday y equivale a 96485 C y el número 2 representa el número de electrones transferidos por cada molécula de combustible (H_2).

En el caso de la celda de combustible de hidrógeno-oxígeno, el voltaje reversible generado bajo condiciones estándar (298.15 K, 1bar) esta dado por

$$E^0 = \frac{-\Delta\hat{g}^0}{2F} \quad (1.35)$$

$\Delta\hat{g}^0 = -237 \text{ kJ/mol}$ y es el cambio en la energía libre de Gibbs bajo condiciones estándar, por lo que

$$E^0 = \frac{-237000 \text{ J/mol}}{2(96485 \text{ C/mol})} = 1.229 \text{ V} \quad (1.36)$$

E^0 es el voltaje máximo que se puede llegar a obtener de la celda, por lo que es normal que en la practica el valor de voltaje de circuito abierto sea menor, ya que el voltaje de la celda se ve afectada por la presión y la temperatura en la que opera. Para poder observar la influencia de la temperatura sobre el voltaje reversible se debe considerar la siguiente ecuación

$$V_T = E^0 + \frac{\Delta\hat{s}}{2F}(T - T_0) \quad (1.37)$$

Donde

E^0 es el voltaje de circuito abierto reversible en estado estándar [V].

$\Delta\hat{s}$ es el cambio en la entropía de la formación.

F es la constante de Faraday.

T es la temperatura de operación [K].

T_0 temperatura estándar [298.15 K].

El cambio en la entropía de la formación $\Delta\hat{s}$ es la diferencia entre la entropía de los

productos \hat{s} y \hat{s} de los reactantes [5]. En este caso tenemos

$$\Delta\hat{s} = (\hat{s})_{H_2O} - (\hat{s})_{H_2} - \frac{1}{2}(\hat{s})_{O_2} \quad (1.38)$$

La entropía \hat{s} de la formación a temperatura T esta dada por

$$\hat{s} = \hat{s}^0 + \int_{T_0}^T \frac{C_p(T)}{T} dT \quad (1.39)$$

En 1.39, \hat{s}^0 es la entropía de la formación a temperatura estándar, en este caso la entropía a temperatura estándar del agua es $\hat{s}_{H_2O}^0 = 188.83 \text{ J/mol K}$, para el hidrógeno $\hat{s}_{H_2}^0 = 130.59 \text{ J/mol K}$ y para el oxígeno $\hat{s}_{O_2}^0 = 205.14 \text{ J/mol K}$, $C_p(T)$ es la capacitancia de calor molar a presión constante que esta en función de la temperatura y es diferente para cada sustancia y estado de agregación de la misma. En el caso de la celda de combustible PEM, debemos conocer la capacitancia de calor molar del agua en estado gaseoso ($C_{p,H_2O_{gas}}$), del hidrógeno (C_{p,H_2}) y del oxígeno (C_{p,O_2}), los cuales están dados por

$$C_{p,H_2O_{gas}} = 143.05 - 58.040 T^{0.25} + 8.2751 T^{0.5} - 0.036989 T \quad (1.40)$$

$$C_{p,H_2} = 56.505 - 22222.6 T^{-0.75} + 116500 T^{-1} - 560700 T^{-1.5} \quad (1.41)$$

$$C_{p,O_2} = 37.432 + 2.0102 \times 10^{-5} T^{1.5} - 178570 T^{-1.5} + 2368800 T^{-2} \quad (1.42)$$

Es importante mencionar que las ecuaciones 1.40, 1.41 y 1.42 son validas en el rango de los 300 a 3500 K, también es importante considerar que cuando $T < 373.15 \text{ K}$ el agua se presenta en estado liquido por lo que $C_{p,H_2O_{liq}} = 75.4 \text{ J/mol K}$.

Con los datos anteriores es posible calcular $\Delta\hat{s}$ y por tanto poder observar a el efecto de la temperatura en el voltaje reversible de la celda de combustible PEM. En general $\Delta\hat{s}$ es negativa para la reacción de la celda de combustible, esto quiere decir que V_T es inversamente proporcional a la temperatura.

Como se mencionó anteriormente el voltaje reversible también es afectado por la

presión, y para poder observar como el voltaje reversible es afectado por la presión en el sistema se debe considerar la siguiente ecuación

$$V_P = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad (1.43)$$

La ecuación 1.43 también es conocida como la ecuación de Nernst y p_{H_2} , p_{O_2} y p_{H_2O} son la presión parcial en bar del hidrógeno, oxígeno y agua respectivamente.

Finalmente podemos expresar el voltaje reversible E de la celda de combustible en función de la temperatura y presión como sigue

$$E = E^0 + \frac{\Delta \hat{s}}{2F} (T - T_0) - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad (1.44)$$

B. Pérdida por activación.

Las pérdida por activación (ΔV_{act}) se definen como sigue

$$\Delta V_{act} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (1.45)$$

Donde

i_0 es la densidad de corriente de intercambio [$mA \text{ cm}^{-2n}$].

i es la densidad de corriente [$mA \text{ cm}^{-2n}$].

A es la constante de tafel y está dada por

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (1.46)$$

Donde

R es la constante universal de los gases que equivale a 8.314472 J/mol K .

T es la temperatura en Kelvin [K]

α es el coeficiente de transferencia de carga y es proporcional a la energía eléctrica

aplicada que se aprovecha en el cambio de la razón de reacción electroquímica. Este valor depende del material del que está hecho el del electrodo y la reacción involucrada, sin embargo, para el electrodo del hidrógeno el valor es de 0.5 para diferentes materiales de electrodo. En el electrodo del oxígeno α 0.1 - 0.5 en la mayoría de los casos [5].

La corriente de intercambio i_0 representa la razón de intercambio entre los reactivos y los productos en estado de equilibrio y se define como sigue [20]

$$i_0 = \frac{2Fk(p_{H_2} + p_{O_2})}{Rh} e^{-\Delta G/RT} \quad (1.47)$$

Donde

h es la constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$).

k es la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$).

c_R^* es la concentración superficial del reactivo.

ΔG_{act} es el tamaño de la barrera energética entre el reactivo y el estado de activación.

C. Pérdida óhmica.

La pérdida óhmica (ΔV_{ohm}) está dada por

$$\Delta V_{ohm} = ir \quad (1.48)$$

Donde

i es la densidad de corriente de la celda [mA cm^{-2}].

r es la resistencia del área específica de la celda [$\text{k}\Omega \text{ cm}^2$].

D. Pérdida de transferencia de masa.

Si una celda de combustible PEM es alimentada del lado del cátodo por el oxígeno contenido en el aire del ambiente, es evidente que por este hecho, durante la operación de la la celda de combustible habrá una pequeña reducción en la concentración

del oxígeno en la región del electrodo, conforme el oxígeno es extraído. El grado de este cambio en la concentración dependerá de la corriente que se tome de la celda de combustible, así como, de factores físicos relacionados con qué tan bien el aire en torno al cátodo puede circular y que tan rápido el oxígeno puede ser reabastecido, estos cambios en la concentración causarán una reducción en la presión parcial de el oxígeno. Similarmente ocurre en el ánodo que es alimentado con hidrógeno. En ambos casos la reducción en la presión del gas resultará en una reducción en el voltaje de la celda [5].

El cambio del voltaje causado por el cambio en la presión del hidrógeno es

$$\Delta V = \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (1.49)$$

Ahora, el cambio en la presión causado por el uso del gas puede ser estimado como sigue. Postulamos una densidad de corriente límite i_1 en el que el combustible se consume a un ritmo igual a su velocidad de alimentación máxima. La densidad de corriente no puede subir más allá de este valor ya que el gas no puede ser suministrado a una razón mayor. A esta densidad de corriente, la presión habría llegado a cero. Si P_1 es la presión a la que la densidad de corriente es cero, y asumimos que la presión cae linealmente hasta cero para la densidad de corriente i_1 , entonces la presión P_2 para cualquier densidad de corriente i esta dada por la siguiente formula

$$P_2 = P_1 \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (1.50)$$

Si sustituimos (1.50) en (1.49), obtenemos

$$\Delta V = \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (1.51)$$

Esto nos da el cambio de voltaje debido a la pérdida de transferencia de masa, sin embargo (1.49) y (1.51) son escritas en términos de ganancia de voltaje por lo que

si se quiere expresar para la caída de voltaje se tiene que escribir como sigue

$$\Delta V_{trans} = -\frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (1.52)$$

En este caso el termino $RT/2F$ es correcto en el caso del hidrógeno, si se hiciera referencia la oxígeno el termino sería $RT/4F$, por lo que de forma general se expresará las pérdidas de transferencia de masa como

$$\Delta V_{trans} = -B \ln \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (1.53)$$

Donde B es una constante que depende de la celda de combustible y su estado de operación e i_1 es la densidad de corriente de intercambio, generalmente i_1 es desconocida y medirla resulta muy complicado [21]. (1.53) puede proporcionarnos una descripción del comportamiento de la celda de combustible en la región de pérdidas por transferencia de masa, sin embargo esta aproximación teórica tiene muchas debilidades especialmente cuando la celda es alimentada con aire en vez de oxígeno puro (como se hace en la mayoría de los casos)[5]. Por lo que se recomienda utilizar otra aproximación que no proviene de base teórica pero es completamente empírica, y produce una ecuación que se ajusta muy bien al resultado, y se muestra a continuación

$$\Delta V_{trans} = m e^{ni} \quad (1.54)$$

Los valores de m típicamente se aproximan a $3 \times 10^{-5} V$ y n cerca de $8 \times 10^{-3} cm^2 mA^{-1}$ para una sola celda de combustible.

Finalmente (1.33) se puede escribir como

$$V = E - A \ln \left(\frac{i + i_n}{i_0} \right) - ir - me^{ni} \quad (1.55)$$

Esta ecuación puede reducirse aún más si consideramos que la corriente de cruce i_n es muy pequeña y aunque es útil para explicar la caída inicial de voltaje, tiene poco

impacto en las pérdidas de operación de la celda de combustible a la corriente de trabajo. Generalmente es muy difícil de medir y podemos explicar en gran parte el término que resulta de i_0 si suponemos que la corriente es siempre mayor que esta corriente de intercambio.

$$\Delta V_{act} = A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) = A \ln(i) - A \ln(i_0) \quad (1.56)$$

Ya que la segunda mitad de (1.56) es una constante podemos proponer un voltaje de circuito abierto real (obtenido en la práctica) E_{oc} está dado por

$$E_{oc} = E + A \ln(i_0) \quad (1.57)$$

E es el voltaje de circuito abierto reversible (teórico), recuerde que E_{oc} siempre será menor a E y por tanto

$$E = E_{oc} - A \ln(i_0) \quad (1.58)$$

Si sustituimos (1.56) y (1.58) en (1.55) tenemos que

$$V = E_{oc} - A \ln(i_0) - A \ln(i) + A \ln(i_0) - ir - me^{ni} \quad (1.59)$$

Por lo que, finalmente tenemos que

$$V = E_{oc} - A \ln(i) - ir - me^{ni} \quad (1.60)$$

Esta ecuación describe de forma simple y reducida el comportamiento de la celda de combustible PEM, sin embargo, si se quieren observar los efectos de la presión y temperatura en el voltaje de la celda, entonces se debe considerar la siguiente ecuación

$$V = E^0 + \frac{\Delta \widehat{s}}{2F}(T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) - A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) - ir - B \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (1.61)$$

1.3. Emulador de celdas de combustible

En la literatura hay reportados algunos sistemas de emulación de la celda de combustible, generalmente estos sistemas están basados en convertidores CC-CC como en [22] en el que se usa un convertidor Buck y en [23] en el que se aplica una emulación de celda de combustible para un vehículo eléctrico, los emuladores suelen ser controlados por DSPs o FPGAs, en cuyo caso el diseño del modelo de la celda de combustible debe ser orientado al dispositivo en cuestión. En el caso en el que se utiliza un convertidor CC-CC, la complejidad del sistema de emulación aumenta ya que no solo se debe modelar la celda, además también se debe diseñar el convertidor y considerar la respuesta eléctrica de este.

En este caso solo se abordará a detalle dos de los sistemas de emulación propuestos en la literatura.

1.3.1. Emulación de la celda de combustible basada en una FPGA

Un sistema de emulación basado en una FPGA es propuesto por V. Boscaino et al [24]. En este trabajo los autores realizan la descripción del modelo de la celda de combustible en VHDL para implementarlo en una FPGA, usando como estado de potencia transistores bipolares y componentes pasivos.

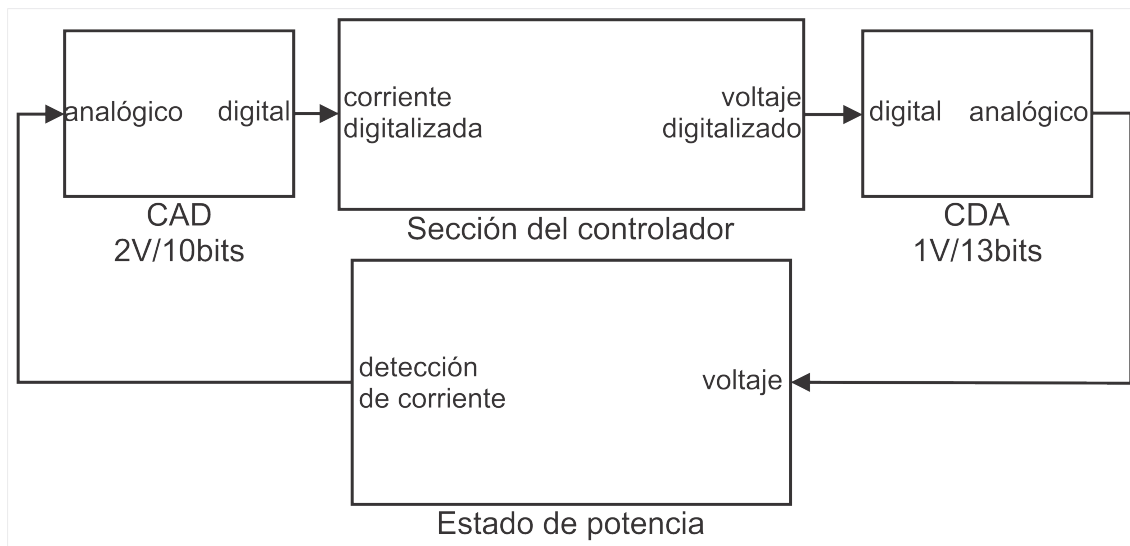


Figura 1.14. Diagrama de bloques del emulador basado en FPGA.

La figura 1.14 muestra el diagrama a bloques del emulador, en el se puede observar que la corriente digitalizada alimenta al controlador que emite el voltaje de salida digitalizado, la interfaz entre el dispositivo de carga y el emulador es proporcionado por el estado de potencia. El controlador reproduce el voltaje a través de la celda de combustible solo muestreando la corriente. Un convertidor analógico-digital es utilizado para digitalizar la forma de onda de la corriente mediante una escala completa de voltaje de 2 V y 10 bits. La cadena de bits es el código binario de la señal de corriente muestreada. El voltaje digitalizado es convertido a analógico mediante un convertidor digital- analógico de escala completa de voltaje de 1V y 13 bits y la ganancia de conversión se hace mediante un amplificador operacional. Así la señal analógica alimente al estado de potencia que se comporta como un buffer de voltaje [24]. Un transistor npn y npn son conectados como emisores seguidores. La ganancia de voltaje es unitaria y el offset de CC es evitado conectando un BJT npn y un pnp. La capacidad de corriente de los BJTs es fijada al valor máximo de corriente del stack de celdas de combustible bajo prueba. La corriente de carga es igual a la corriente en el emisor del BJT npn y el voltaje a través del resistor R_{sense} es sensado y amplificado por el amplificador reductor *Senseopamp*. La ganancia

del amplificador de sensado sirve para obtener la ganancia de la red de sensado. Un amplificador operacional es conectado a la salida del CDA para proporcionar la ganancia de conversión. Esto se muestra en la figura 1.15.

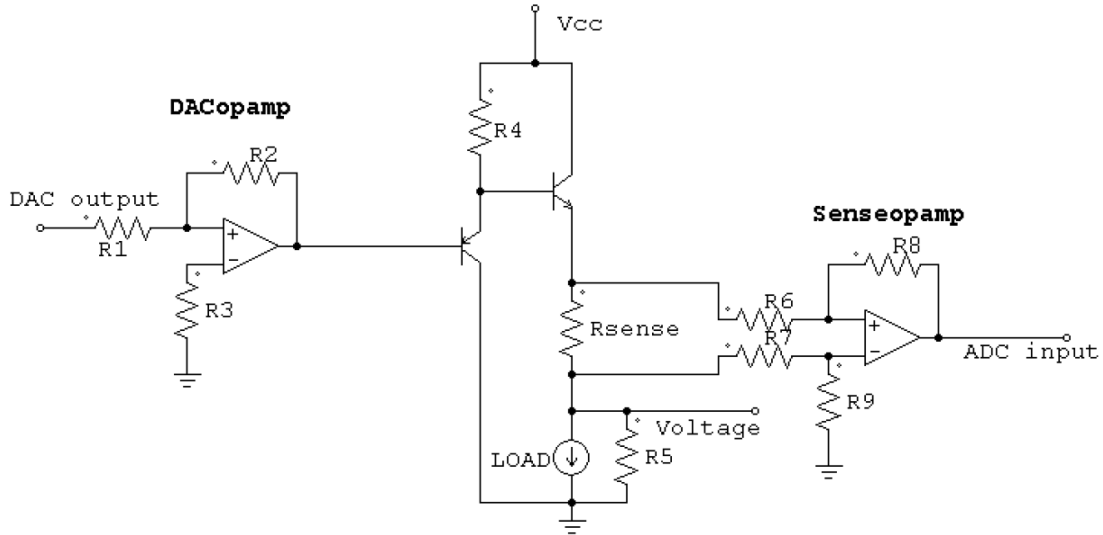


Figura 1.15. Etapa de ganancia para el sistema de emulación basado en una FPGA [24].

En este sistema de emulación los autores usan el modelo de celda de combustible que Simulink/Matlab implementa en su bloque *Fuel Cell Stack* y usan Aldec ACTIVE-HDL co-simulation toolbox para probar que el código de VHDL tiene un buen comportamiento.

El modelo que se utiliza en este trabajo esta dividido en una sección dinámica y una sección de estado estable. En la sección de estado estable se modela la curva I-V característica del stack de celdas de combustible en el rango de temperatura completa. se promedia un conjunto de caracterización nominal a $30^{\circ} C$ luego se ajusta según la ecuación 1.62.

$$V_{FC} = A - B \ln \left(1 + \frac{i_{FC}}{C} \right) - D e^{\frac{i_{FC}}{E}} \quad (1.62)$$

Donde I_{FC} es la corriente de la celda de combustible y V_{FC} es el voltaje a través

de la celda, note que este modelo permite reproducir la tres principales regiones de polarización del la celda de combustible. De la teoría y las pruebas se obtiene:

$$A = 18.35$$

$$B = 1.612$$

$$C = 0.0728$$

$$D = 9.732$$

$$E = 12.51$$

La función exponencial y logarítmica son descritas en VHDL mediante un algoritmo interactivo que solo usa desplazamientos y sumas. Para cada valor de temperatura se ha obtenido un conjunto de curvas I-V isotérmicas. La dispersión en las curvas medidas es igual a 0.4 V, y en consecuencia, la precisión del modelo no puede superar un límite de $\pm 0.2V$. El voltaje de salida del modelo de estado estable puede ser modelado como:

$$V(i, T) = V_{mod}(i, 30^\circ C) + C(i, T) \quad (1.63)$$

Donde $V(i, T)$ es la salida de voltaje a una temperatura T bajo una corriente de celda de combustible i ; $V_{mod}(i, 30^\circ C)$ es la salida del modelo isotérmico de estado estacionario correspondiente a la misma entrada de corriente i y $c(i, T)$ es la salida del subsistema de corrección que representa una temperatura T que es diferente de la temperatura nominal de $30^\circ C$. Para calcular $C(i, T)$ se tiene que

$$C(i, T) = C_0(T) i^0 + C_1(T) i + C_2(T) i^2 + C_3(T) i^3 \quad (1.64)$$

La sección dinámica es conectada en paralelo con la sección de estado estable. La salida del modelo es la entrada de la sección dinámica, que emite un término de corriente dinámica. La corriente dinámica y la corriente externa se suman para generar la señal de corriente de estado estacionario, que es la entrada de la sección de estado estable. El modelo dinámico se define mediante el método de Análisis de respuesta de frecuencia (FRA). En el rango de frecuencia de importancia, se ha medido la

función de transferencia de impedancia. La medición de la respuesta de frecuencia se realiza dentro del rango de frecuencia de 0 – 200 kHz. Se eligen tres polos y tres ceros para resolver el compromiso entre la complejidad y la precisión del modelo. La sección dinámica se implementa mediante un filtro digital que reproduce la función de transferencia z-domain, tal como se expresa mediante (1.65) obtenida al aplicar la transformada de Euler a la función de transferencia aproximada.

$$F(z) = a_0 + \frac{a_1}{z - b_1} + \frac{a_2}{z - b_2} + \frac{a_3}{z - b_3} \quad (1.65)$$

1.3.2. Emulación de la celda de combustible basada en dSPACE

En el trabajo de A. Gebregergis et al [1] propone un sistema de emulación basado en el modelo electroquímico de la celda de combustible

$$V_{fc} = E - V_{act} - V_{con} - V_{ohmic} \quad (1.66)$$

Donde E es el voltaje reversible de Nernst, V_{act} es la pérdida por activación, V_{con} es la pérdida por concentración o transferencia de masa y V_{ohmic} son la pérdida óhmica. Cada una de las pérdidas de voltaje de la celda de combustible son descritas a detalle por el autor muy similarmente a como se describieron en la sección 1.1. La teoría que se utiliza para describir el voltaje de Nernst y las pérdidas de voltaje son descritas en bloques de Simulink/Matlab como se muestra en la figura 1.16.

En el caso del voltaje de Nernst este se puede expresar en términos de la presión parcial de los gases de alimentación de la celda de combustible esta dada por:

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (1.67)$$

Donde $E_0 = 1.1 V$ que es el potencial estándar, $R = 8.314 kJ/kmol K$ es la constante universal de los gases, T es la temperatura de operación de la celda en Kelvin, $F = 96486 C/mol$ es la constante de Faraday, P_{H_2} , P_{O_2} y P_{H_2O} son la presión parcial del hidrógeno, oxígeno y agua respectivamente.

La presión parcial de los gases se puede calcular a partir de la conservación de flujo de masa dada por

$$\left(\left(\frac{V}{K_x RT} \right) s + 1 \right) P_x(s) = \frac{1}{K_x} (N_x^{in} - 2nK_r I_{fc}) \quad (1.68)$$

Donde V es el volumen del electrodo, N_x^{in} es la razón de flujo molar de entrada, P_x es la presión parcial a la salida, K_x es la constante de la válvula molar. La ecuación

(1.68) se puede representar por su análogo eléctrico de la ecuación electroquímica como sigue:

$$((CR_x)s + 1)V_x(s) = R_x(I_x^{in} - 2nK_r I_{fc}) \quad (1.69)$$

Donde $C = \frac{V}{RT}$ es la capacitancia, $R_x = \frac{1}{K_x}$ es la resistencia, $K_r = \frac{N^r}{4F}$ es una constante, I_x^{in} y V_x son la corriente y el voltaje equivalentes a N^{in} y P_x y x son los respectivos gases.

Las caída de voltaje de activación esta expresada por la formula de Butler-Volmer (1.70) para todos los valores de corriente de la celda.

$$I_{fc} = I_0(e^{(\alpha_1 F/RT)V_{act}} - e^{(-\alpha_2 F/RT)V_{act}}) \quad (1.70)$$

Si $\alpha_1 = \alpha_2$ entonces (1.70) se puede reducir a

$$V_{act} = \frac{RT}{n\alpha F} \ln \left(z + \sqrt{z^2 + 1} \right) \quad (1.71)$$

Donde $z = \frac{I_{fc}}{2I_0}$ es la densidad de corriente de intercambio de la celda de combustible. El valor de la resistencia interna equivalente de la celda de combustible es obtenida del fabricante de la celda de combustible. Sin embargo la resistencia de la celda de combustible cambia con la temperatura de operación de la celda de combustible, este cambio esta dado por

$$r = 0.16 - 3.54 \times 10^{-4}T + 8.54 \times 10^{-4}I_{fc} \quad (1.72)$$

Como es bien sabido la pérdida óhmica esta dada por

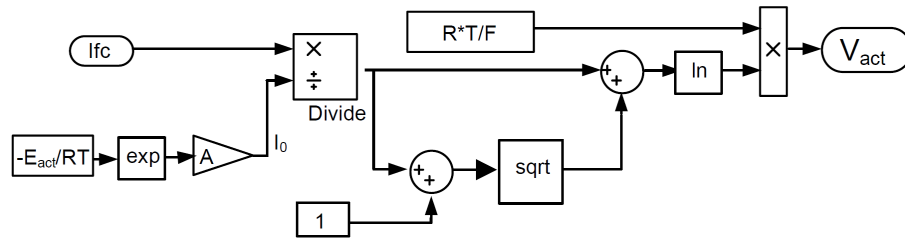
$$V_{ohmic} = rI_{fc} \quad (1.73)$$

Las pérdidas por concentración están dadas por

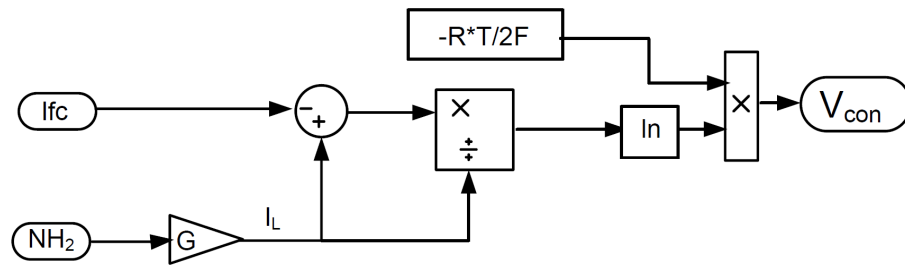
$$V_{con} = \frac{RT}{nF} \ln \left(1 - \frac{I_{fc}}{I_L} \right) \quad (1.74)$$

Es la densidad de corriente límite de la celda.

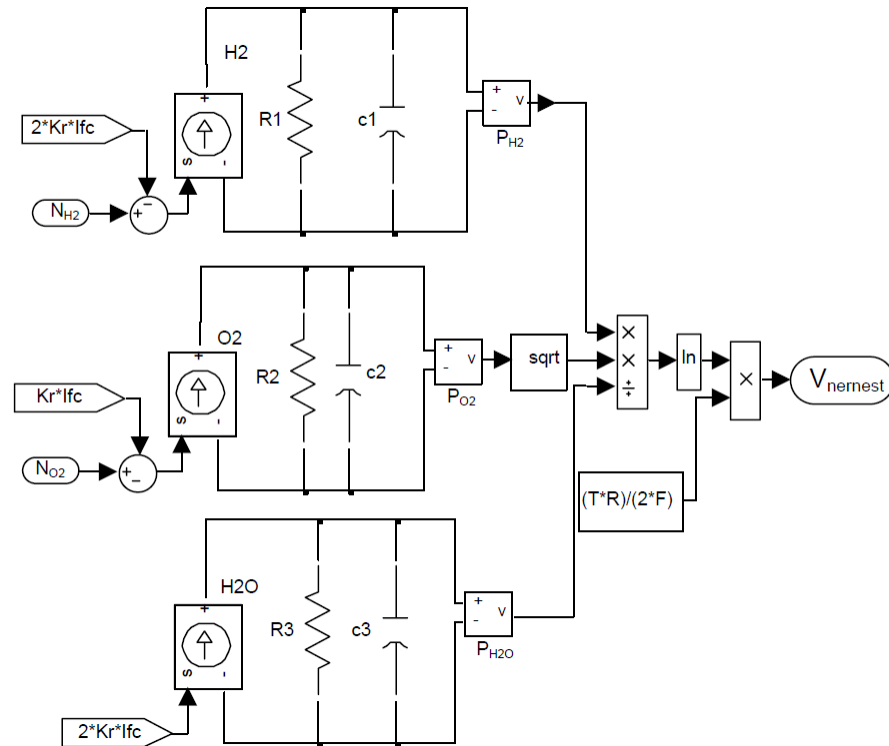
Cada una de las partes de este modelo es implementado en Simulink/Matlab como se muestra en la figura 1.16.



(a) pérdida de activación



(b) Pérdida de concentración



(c) Voltaje reversible de Nernst

Figura 1.16. Modelado del voltaje de Nernst y las pérdidas de voltaje de la celda de combustible en Simulink [1].

Capítulo 2

Modelado de la celda de combustible

Como se mencionó en la sección 1.2 existen una gran cantidad de modelos de la celda de combustible sin embargo muchos de ellos son muy complejos y específicos o se requiere la realización de varias pruebas para determinar ciertos valores requeridos en el modelo, aunque se han obtenido buenos resultados de la mayoría de los modelos abarcados en dicha sección, aquí no se podrán utilizar los modelos que requieren datos detallados de la celda, esto es debido a que no se cuenta con una celda de combustible real en el laboratorio . En este caso se requiere de un modelo que permita generar el comportamiento eléctrico de una celda de combustible o un stack a partir de los datos que generalmente proporcionan la hoja de especificaciones proporcionada por los fabricante de estos dispositivos.

La mayoría de los fabricantes proporcionan la siguiente información de los stacks:

1. Curva I-V.
2. Curva I-P.
3. Potencia nominal.
4. Temperatura de operación.
5. Presión nominal de hidrógeno.

-
6. Composición del hidrógeno.
 7. Número de celdas que conforman el stack.
 8. Área específica.

De los modelos estudiados y analizados en el capítulo anterior son el “*modelo genérico de la celda de combustible*” y el “*modelo electroquímico de la celda de combustible*”, los que nos permiten modelar la celda de combustible sin necesidad de realizar pruebas en celdas reales o conocer de forma detallada las características físicas, químicas y eléctricas de la celda.

El “*modelo genérico de la celda de combustible*” es utilizado como base por el bloque fuel cell de Simulink/Matlab, sin embargo, otros de los requerimientos que debe cumplir el modelo, es simplicidad, ya que este se utilizará para generar un programa de emulación. En este trabajo el modelo genérico se usa más como un apoyo para obtener un modelo por aproximación polinomial de la curva I-V del stack que se desea representar mediante el modelo.

El “*modelo electroquímico de la celda de combustible*” puede describir de forma general el comportamiento de la celda de combustible, sin embargo, también requiere de ciertos parámetros específicos que no son proporcionados por el fabricante, sin embargo, después de analizarlo es posible obtener estos parámetros a partir de los datos a los que si se tiene acceso. En las siguientes secciones se describirá el proceso que se llevó a cabo para adaptar los modelos antes mencionados a las necesidades requeridas.

2.1. Modelo por aproximación polinomial

El modelo de la celda de combustible por aproximación polinomial se obtiene a partir del bloque fuel cell stack de Simulink/Matlab, ya que con ayuda de este bloque es posible obtener cada uno de los puntos que conforman la curva I-V del stack que

se desea representar mediante este modelo. Para utilizar este bloque es necesario conocer los siguientes datos de la celda de combustible:

1. Voltaje a 0 A.
2. Voltaje a 1 A.
3. Corriente en el Punto de Operación Nominal (PON).
4. Voltaje en PON.
5. Corriente en el Punto de Operación Máximo (POM).
6. Voltaje en POM.
7. Número de celdas.
8. Eficiencia nominal del stack.
9. Temperatura de operación.
10. Razón del flujo nominal del aire.
11. Presión nominal del H_2 .
12. Presión nominal del aire.
13. Composición nominal del H_2 .
14. Composición nominal del aire.

Estos datos se pueden obtener de la hoja de especificaciones del fabricante, algunos de estos datos vienen especificados de forma explícita, sin embargo, el voltaje a 0 A, el voltaje a 1 A, la corriente en PON, el voltaje en PON, la corriente en POM y el voltaje en POM se obtienen a partir de la curva I-V e I-P, las cuales son proporcionadas por el fabricante generalmente.

Para obtener el voltaje a 0 A, debemos fijarnos en la curva I-V del stack e identificar

el valor del voltaje cuando la corriente es igual a cero amperios, para obtener el voltaje a 1 A se debe hacer lo mismo que con el voltaje a 0 A, solo que esta vez nos fijamos en el valor del voltaje cuando la corriente es igual a un amperio.

Para localizar el punto de operación nominal PON , es necesario considerar tanto la curva I-V como I-P. El PON será el punto en el que la curva I-V se cruza con la curva I-P, una vez localizado este punto, observamos los valores de voltaje y corriente que presenta la curva I-V en ese punto, dichos valores serán el V_{PON} en PON y la corriente I_{PON} en PON , respectivamente. Para obtener el punto de operación máxima POM , debemos localizar el nivel de potencia máxima P_{max} de la curva I-P y observar el valor de la corriente en dicho punto, este valor de corriente será la corriente I_{POM} en POM , posteriormente se debe observar que valor de voltaje corresponde a I_{POM} en la curva I-V, este valor de voltaje será el voltaje V_{POM} en POM . Este proceso se puede observar en la figura 2.1.

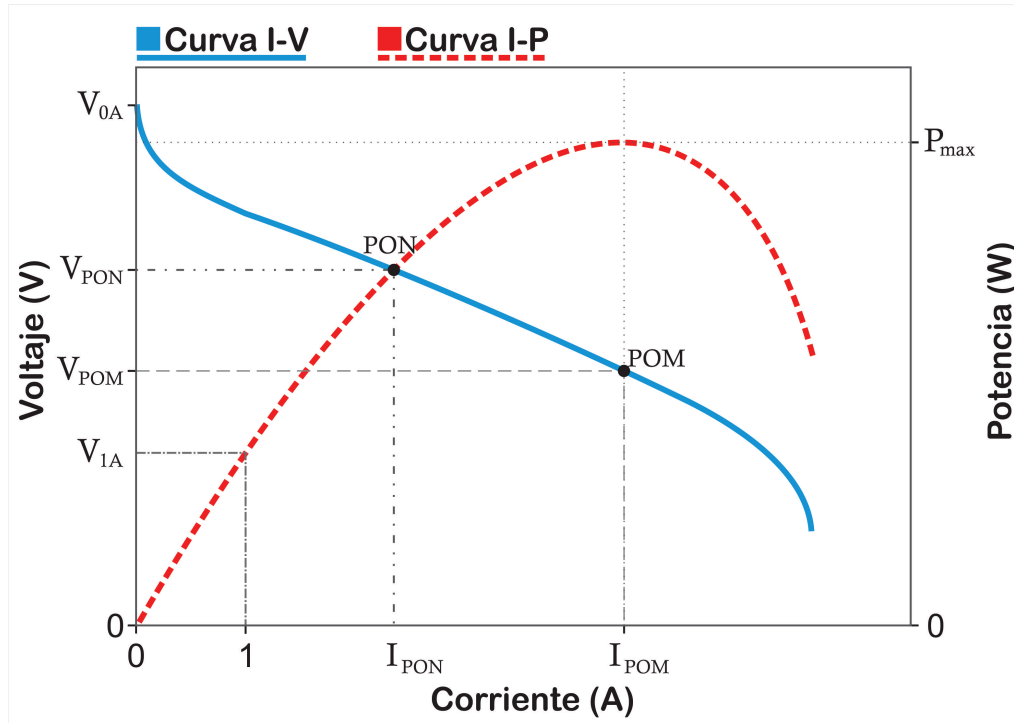


Figura 2.1. Proceso de obtención del voltaje a 0 y 1 A, la corriente y el voltaje en PON y la corriente y el voltaje en POM .

Una vez que se cuenta con todos los datos necesarios se debe simular en Simulink/Matlab el bloque *fuel cell stack*, este es conectado a un convertidor de CD-CD que mantiene un voltaje constante del lado de la carga, ese voltaje debe ser equivalente al valor del voltaje de circuito abierto de la celda, esto nos permite que la celda realice un barrido de corriente con el fin de obtener todas las regiones de polarización de la pila de celdas de combustible si se desea representar mediante el modelo, esto se muestra en la figura 2.2

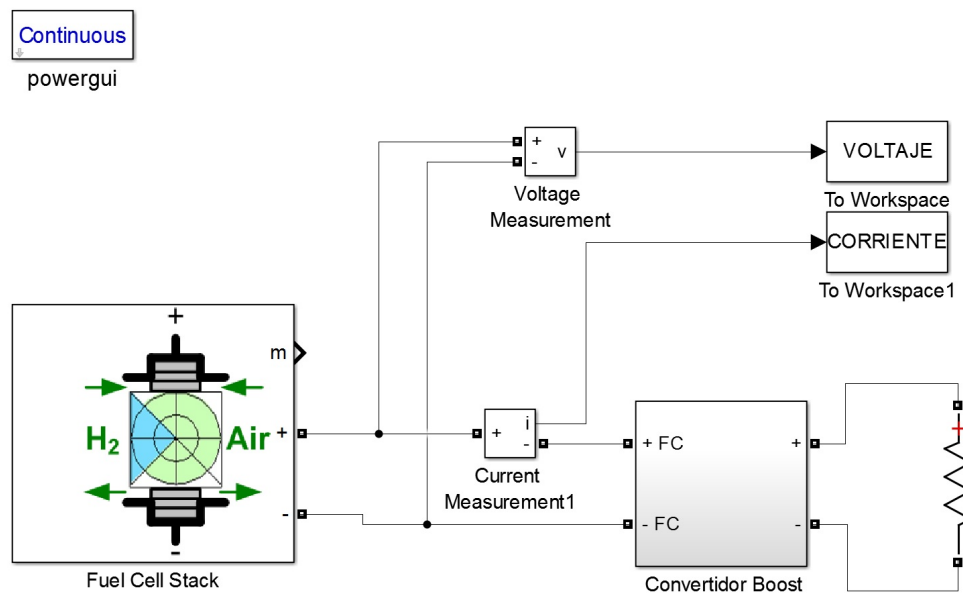


Figura 2.2. Diagrama de simulación de la pila de celdas de combustible de 20 W.

Los datos de corriente y voltaje generados por la simulación en Simulink/Matlab son enviados al espacio de trabajo de Matlab. Con los datos en Matlab es posible llevar a cabo el procesamiento necesario para obtener el modelo polinomial de la celda o stack. Dicho procesamiento consiste en los siguientes pasos:

1. Separación de la curva I-V en su tres principales regiones de polarización: (i) activación, (ii) óhmica y (iii) concentración.
2. Generar un polinomio por cada región.

3. Generar la curva I-V con los polinomios obtenidos.

Después de la simulación en Simulink se obtendrá una curva muy parecida a la mostrada en la figura 2.3 y como hemos visto en el Capítulo 1 de este trabajo, la primera curva pertenece a la región de polarización de activación, la región óhmica pertenece a la parte más recta de la curva I-V y la región de polarización de concentración esta representada por la curva al final de la curva I-V y que empieza cuando termina la región óhmica.

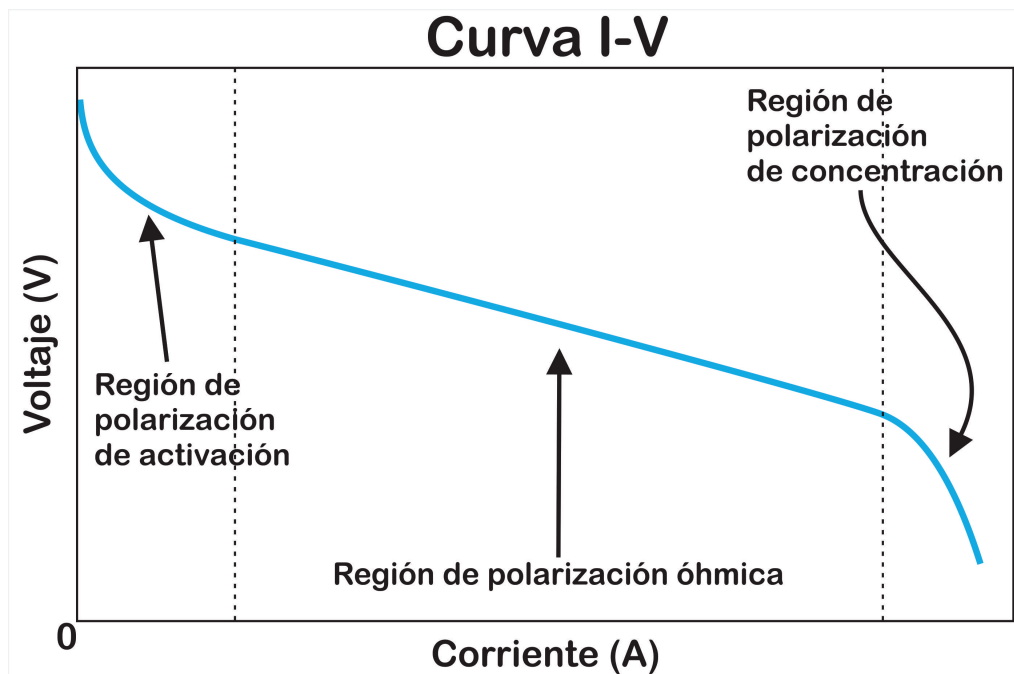


Figura 2.3. Curva I-V separada en sus tres principales regiones.

Para obtener todos los puntos en cada uno de las regiones es necesario localizar el valor frontera de corriente de las tres regiones de polarización y generar tres vectores con todos los valores en cada una de las regiones de polarización, esto se hace mediante el siguiente algoritmo:

```
for i=1:N do  
  if I(i)<Ilim1 then  
    I1(q)=I(i);
```

```

    V1(q)=V(i);
    q=q+1;
else if I(i) ≥  $I_{lim2}$  then
    I3(n)=I(i);
    V3(n)=V(i);
    n=n+1;
else
    I2(m)=I(i);
    V2(m)=V(i);
    m=m+1;
end if
end for

```

Donde i , q , n y m son el número de interacciones que se han realizado e I y V son el valor de la corriente y voltaje, respectivamente, de la curva I-V obtenida, $I1$ y $V1$ son los valores de corriente y voltaje en la región de activación, $I2$ y $V2$ son los valores de corriente y voltaje en la región óhmica e $I3$ y $V3$ son los valores de corriente y voltaje en la región de concentración, N es el número de valores de corriente y voltaje que conforman toda la curva I-V, I_{lim1} es el valor de corriente frontera entre la región de activación y la óhmica y I_{lim2} es el valor en la frontera entre la región óhmica y la de concentración. Una vez que la curva I-V es separada en tres vectores que contienen los valores de sus tres regiones de polarización, se usa la función “*polyfit(x, y, n)*” de Matlab con el fin de obtener el polinomio que describe cada una de las regiones, se busca que los polinomios obtenidos sean de un grado pequeños pero que también su resultado se mantenga muy cercano a la curva I-V original.

Finalmente los polinomios se unen para generar la curva I-V mediante el siguiente algoritmo:

```

for i=1:l do

```

```

if I(i) < Ilim1 then
    V(i) = polinomio de la región de polarización de activación
else if I(i) ≥ Ilim2 then
    V(i) = polinomio de la región de polarización de concentración
else
    V(i) = polinomio de la región de polarización óhmica
end if
end for

```

Este algoritmo es el resultado final del procesamiento y es capaz de describir el comportamiento eléctrico de la celda de combustible en cuestión, sin embargo, el comportamiento que describe será constante y si se quiere conocer el comportamiento de la celda de combustible bajo un cambio de temperatura, presión y/o flujo de masa se tiene que generar una nueva curva I-V mediante la simulación en Simulink y después realizar nuevamente todo el procesamiento anteriormente descrito.

2.2. Modelo electroquímico

El modelo electroquímico mencionado en la sección 1.2.3 se basa en la siguiente ecuación:

$$V = E_{oc} - A \ln(i) - ir - me^{ni} \quad (2.1)$$

Sin embargo, el cálculo de m y n no se pueden obtener a partir de los datos proporcionados por el fabricante por lo que se usará la ecuación (2.2) que describe con mucha precisión el comportamiento eléctrico de la celda de combustible y los efectos de la temperatura y presión.

$$V = E^0 + \frac{\Delta \hat{s}}{2F}(T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) - A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) - ir - B \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \quad (2.2)$$

Para poder utilizar este modelo es necesario conocer los siguientes parámetros:

1. Presión nominal del hidrógeno (p_{H_2}) y aire (p_{air}).
2. Número de celdas que conforman el stack de celdas de combustible nFC .
3. Temperatura de operación T .
4. Área específica A_e .
5. Corriente límite i_l .
6. Curva I-V del stack.

Todos los parámetros pueden estar indicados de forma explícita en la hoja de especificaciones y en la curva I-V del stack proporcionada por el fabricante. De la curva I-V se obtienen los valores de la corriente límite y el valor de corriente y voltaje en el punto de operación nominal.

Para usar el modelo descrito por 2.2 es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Este modelo describe con mayor precisión el comportamiento de una sola celda de combustible.
2. Los stacks están conformados por varias celdas de combustible conectadas en serie.
3. El modelo electroquímico trabaja con la densidad de corriente i , mientras que los datos del Stack proporcionados por el fabricante, generalmente, vienen en intensidad de corriente I .
4. La intensidad de corriente se debe expresar en Amperios [A].
5. La densidad de corriente se debe expresar en [$mA\ cm^{-2}$].
6. Las unidades del área específica deben ser [cm^2].

-
7. Debe tenerse muy en claro que en este caso r es la resistencia del área específica del stack.
 8. Las unidades de r son $[k\Omega \text{ cm}^2]$
 9. La p_{H_2} , p_{O_2} y p_{H_2O} que aparecen en 2.2 son la presión absoluta del hidrógeno, oxígeno y agua respectivamente en [bar].

Teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas y pensando en el caso ideal en el que cada una de las celdas en un stack tiene el mismo comportamiento y trabaja bajo las mismas consideraciones, tenemos que el voltaje de un stack estará dado por:

$$V_{stack} = nFC \left(V = E^0 + \frac{\Delta\hat{s}}{2F}(T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) - A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) - ir - B \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \right) \quad (2.3)$$

Como se mencionó anteriormente, este modelo requiere del valor en bares de la presión absoluta de los reactivos y el producto, para obtener la presión absoluta se debe considerar la composición nominal de los reactivos y el producto.

Generalmente las celdas de combustible trabajan con un nivel de pureza del hidrógeno de 99.98 % o mayor, y el 21 % del aire esta compuesto por oxígeno, entonces tenemos que

$$p_{H_2} = P_{H_2} * 0.9998 \quad (2.4)$$

$$p_{O_2} = P_{O_2} * 0.21 \quad (2.5)$$

Donde P_{H_2} y P_{O_2} son la presión en bar con la que el hidrógeno y oxígeno son ingresados a la celda de combustible.

Generalmente la depuración del agua generada por la celda de combustible no requiere de ningún tipo de extractor por lo que la presión a la que se encuentra es la presión atmosférica que equivale a $p_{H_2O} = 1.01325 \text{ bar}$.

Para poder usar el modelo electroquímico definido por 2.3, también es necesario

obtener la resistencia del área específica por celda r .

Para obtener la resistencia del área específica del stack se debe considerar la curva I-V del stack y fijarse en el punto de operación nominal y tomar los valores de corriente (I_1) y voltaje (V_1), también se debe considerar el punto de corriente a 0.125 A después del valor de corriente en el punto de operación nominal (I_2), así, como su voltaje correspondiente (V_2).

Estos puntos servirán para calcular la pendiente que resulta ser la resistencia del área específica del stack r_{stack} y se calcula como sigue:

$$r_{stack} = \frac{V_2 - V_1}{i_2 - i_1} \quad (2.6)$$

Entonces la la resistencia del área específica por celda estará dada por

$$r = \frac{-r_{stack}}{nFC} \quad (2.7)$$

Note que en la ecuación 2.6 se usa i_1 e i_2 y no I_1 e I_2 , es decir la expresión está en términos de la densidad de corriente y no de la intensidad de corriente como aparece en la curva I-V, para hacer la transformación de intensidad de corriente (I) en $[A]$ a densidad de corriente (i) en $[mA\ cm^{-2}]$, usaremos la siguiente relación:

$$i = \frac{I \times 1000}{A_e} \quad (2.8)$$

Donde A_e es el área específica del stack. Con estas ecuaciones y consideraciones es posible utilizar el modelo electroquímico de la celda de combustible conociendo solamente los parámetros proporcionados por el fabricante, este modelo, además, permite observar el comportamiento eléctrico de la celda ante variaciones de temperatura y presión.

Capítulo 3

Simulación del modelo electroquímico modificado y polinomial de la celda de combustible

Para entender el funcionamiento de la celda de combustible así como los modelos polinomial y electroquímico se realizaron algunas simulaciones que permitieron procesar la información obtenida hasta ahora, también se valida la respuesta de ambos modelos aquí propuestos.

3.1. Simulación de una celda de combustible con el bloque *fuel cell stack*

Con la finalidad de relacionarse plenamente con el bloque “*fuel cell stack*” de Simulink de MATLAB, que se basa en el modelo descrito en la sección 1.2.2 de este documento y dado que aún no se contaba con un tipo específico de stack de celdas de combustible de la que se extrajera los parámetros requeridos, se procedió a usar las pilas de celdas de combustible definidas por MATLAB.

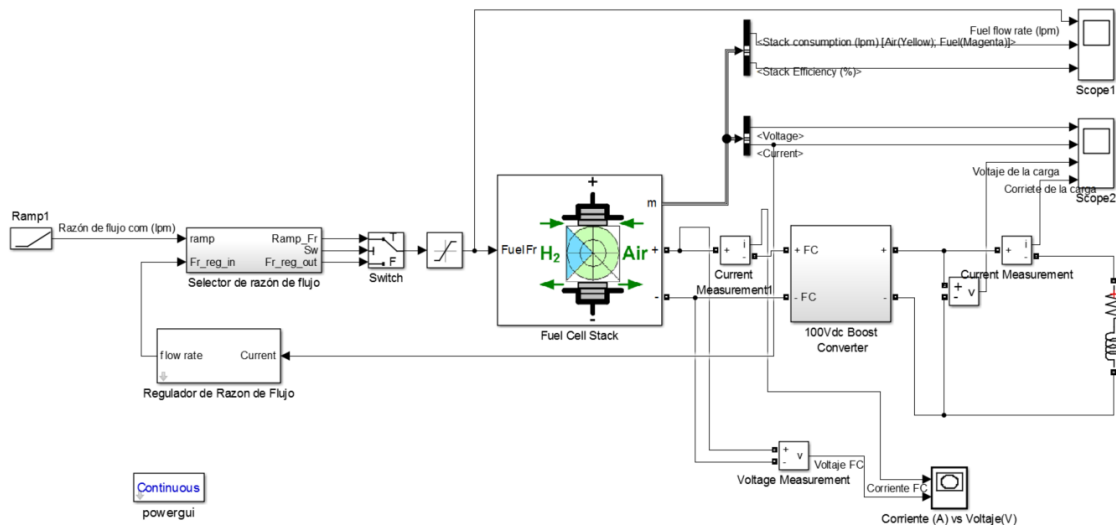


Figura 3.1. Diagrama de simulación en Simulink.

Simulink tiene precargados tres stacks de celdas de combustible tipo PEM a 1.26 kW , 6 kW y 50 kW . En este caso se decidió trabajar con la pila de 6 kW , la cual cuenta con parámetros mostrados en la Tabla 3.1.

Para la simulación de la pila de celdas de combustible se requiere de otros subsistemas para observar el comportamiento de la celda de combustible, por lo que se implementó un sistema de suministro de gases y un convertidor Boost con carga RL a voltaje constante de 100V (figura 3.1). El bloque de Simulink ya cuenta con salidas que nos permite observar algunos parámetros de la celda de combustible tales como eficiencia, consumo de gases, razón de flujo, composición,, pendiente de la curva de Tafel, corriente de intercambio, voltaje de Nernst, voltaje de circuito abierto, voltaje y corriente.

Tabla 3.1. Parámetros de la pila de celdas de combustible de 6 kW

Parámetros de la pila de Celda de Combustible	
Potencia nominal de la pila	5998.5 <i>W</i>
Potencia máxima de la pila	8325 <i>W</i>
Resistencia de la celda de combustible	0.07833 Ω
Voltaje de Nerst de una sola celda (E_n)	1.1288 <i>V</i>
Utilización nominal de H_2	99.56 %
Utilización nominal O_2	59.3 %
Consumo nominal de combustible	60.38 <i>SLPM</i>
Consumo nominal de aire	143.7 <i>SLPM</i>
Corriente de intercambio (i_0)	0.29197
Coefficiente de intercambio (α)	0.60645
Composición del combustible (x_{H_2})	99.95 %
Composición del Oxidante (y_{O_2})	21 %
Razón de flujo nominal del combustible a utilización nominal del H_2	50.06 <i>LPM</i>
Razón de flujo máxima del combustible a utilización nominal del H_2	84.5 <i>LPM</i>
Razón de flujo máxima del aire a utilización nominal del O_2	506.4 <i>LPM</i>
Temperatura del sistema (T)	338 <i>K</i>
Presión de alimentación del combustible (P_{Fuel})	1.5 <i>bar</i>
Presión de alimentación del aire (P_{Air})	1 <i>bar</i>

3.1.1. Resultados de simulación de la celda de combustible genérica

Durante la simulación se observó como la pila de celdas de combustible funciona bajo la demanda de alimentación impuesta por el convertidor Boost, se observa los niveles de voltaje y corriente, tanto a la salida de la FC como en la carga RL del convertidor. También se observa la razón de flujo de gases entregado por el sistema de suministro de gases y el consumo de hidrógeno y oxígeno de la celda de combustible. En la figura 3.2 se observa como la razón de flujo de combustible se estabiliza a 50 lpm y se mantiene constante durante 10 s, después empieza a aumentar la razón de flujo de forma lineal, provocando que la eficiencia de la pila disminuya (figura 3.4), esto se debe a que al proporcionar más combustible del que consume la pila (figura 3.3), este se desperdicia y por lo tanto la eficiencia es menor, esto también provoca que la corriente caiga y el voltaje aumente como se observa en la figura 3.5 y 3.6,

posteriormente después de aproximadamente 3.5 s la razón de flujo a la entrada de la celda se hace constante nuevamente y los demás parámetros se estabilizan.

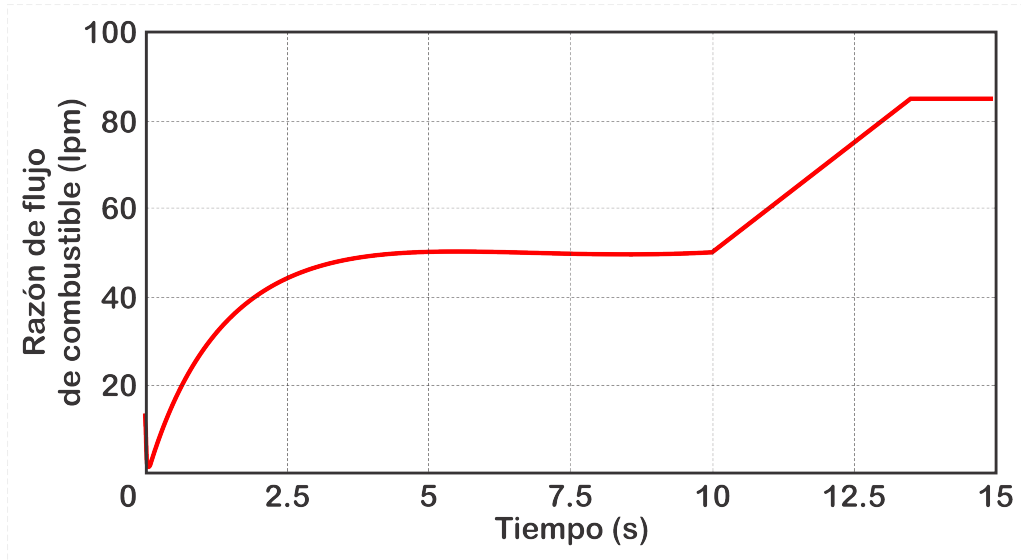


Figura 3.2. Gráfica de la razón de flujo de combustible de la pila.

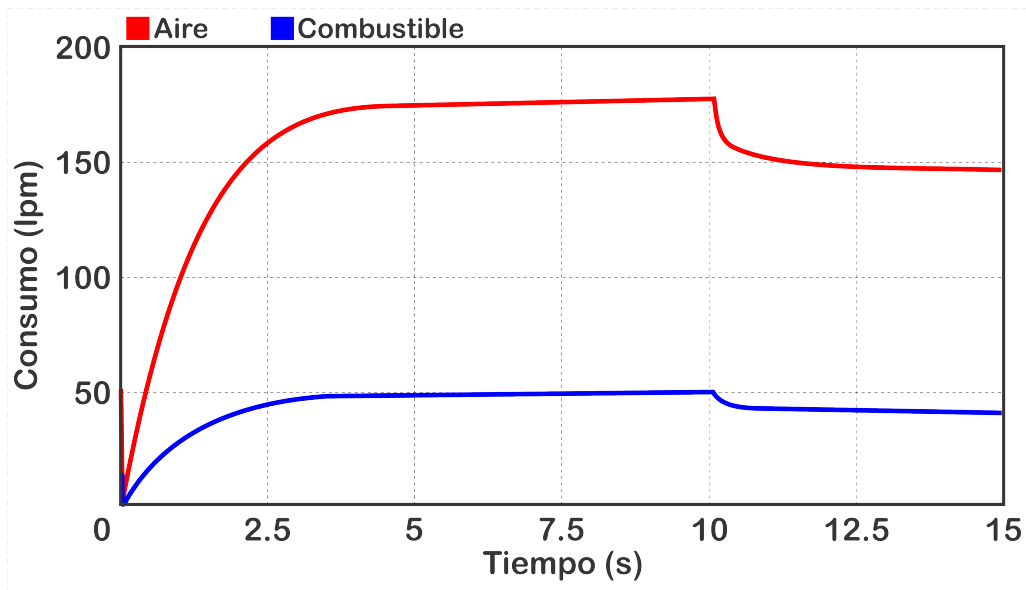


Figura 3.3. Gráfica del consumo de reactivos de la pila.

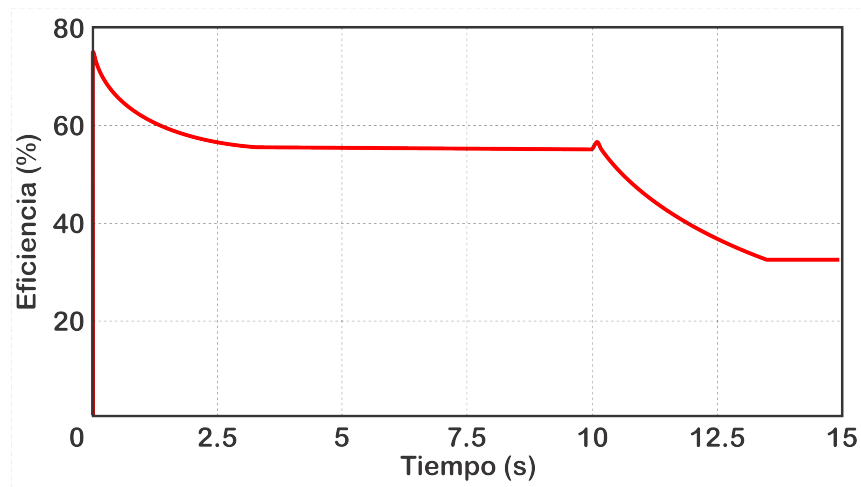


Figura 3.4. Gráfica de la eficiencia de la pila.

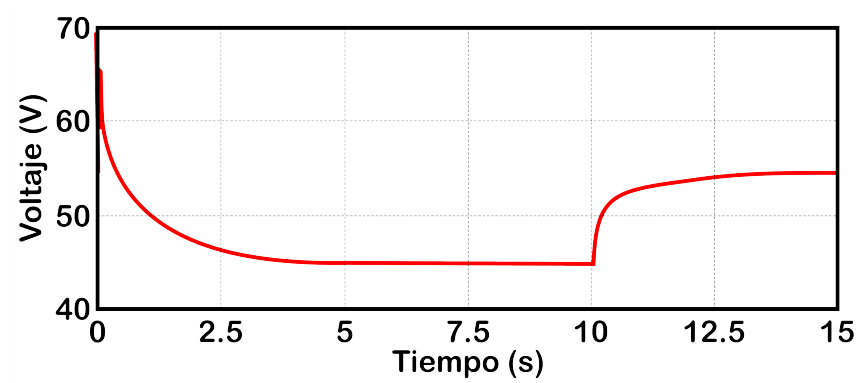


Figura 3.5. Gráfica de voltaje de la pila.

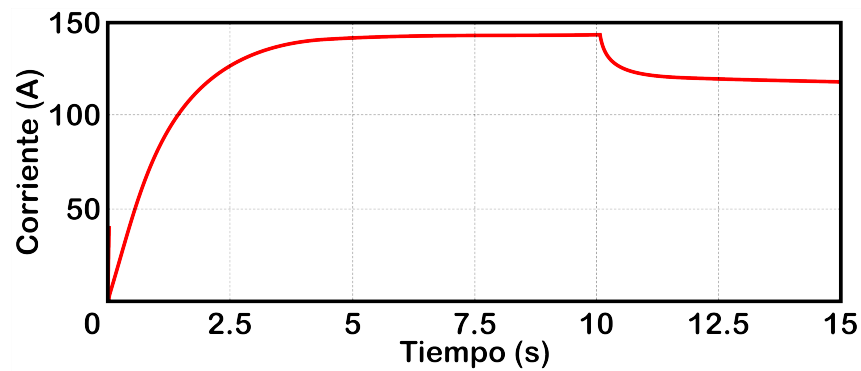


Figura 3.6. Gráfica de corriente de la pila.

3.2. Simulación del stack de celdas de combustible de 20 W

Esta simulación tiene la finalidad de observar el comportamiento de una celda de combustible y obtener su curva I-V para obtener su modelo por aproximación polinomial. Para llevar a cabo la simulación se escogió un stack de 20 W y sus datos se muestran en la Tabla 3.2 que en conjunto con la figura 3.7 nos permiten obtener los parámetros necesarios para la simulación, esta información fue adquirida de la hoja de especificaciones proporcionados por Fuel Cell Store, quien distribuye esta pila de celdas de combustible.

Entre los parámetros requeridos para la simulación están el voltaje y la corriente en el Punto de Operación Nominal (PON) y en el punto de operación máximo (POM), los cuales se determinaron como se explicó en la sección 2.1 y se muestra en la figura 3.7.

Tabla 3.2. Parámetros de la pila de celdas de combustible de 20 W [2]

Parámetro	Valor
Número de celdas	10
Potencia	20 W
Rendimiento	6 V @ 3.4 A
Reactivos	Hidrógeno y aire
Temperatura de operación	60°C
Presión del H_2	0.45 – 0.55 bar
Pureza del H_2	$\geq 99.995\%$
Razón de flujo a salida máxima	0.25 lpm
Eficiencia	40% a plena potencia

Con los datos obtenidos a partir de la Tabla 3.2 y la curva característica de I-V (figura 3.7) se obtuvieron todos los datos necesarios para realizar una descripción

detallada de la pila de celdas de combustible y realizar la simulación, dichos datos se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Datos requeridos para la simulación del stack de celdas de combustible de 20 W

Parámetro	Valor
Voltaje a 0 A	9.6 V
Voltaje a 1 A	7.35 V
Corriente en PON	2.5 A
Voltaje en PON	6.1 V
Corriente en POM	4 A
Voltaje en POM	5 V
Número de celdas	10
Eficiencia nominal del stack	40 %
Temperatura de operación	60°C
Razón del flujo nominal del aire	0.25 lpm
Presión nominal del H_2	0.50 bar
Presión nominal del aire	2.5 bar
Composición nominal del H_2	99.995 %
Composición nominal del aire	oxígeno 21 %
	Agua(humedad) 0.5 %

Una vez obtenidos todos los datos requeridos para el bloque *fuel cell stack* de Simulink/Matlab que representa la pila de las celdas de combustible, ésta fue conectada a un convertidor de CD-CD que mantiene un voltaje constante de 9.6 V del lado de la carga, y que nos permite realizar un barrido de corriente con el fin de obtener todas las regiones de polarización de la pila de celdas de combustible de 20 W, esto se muestra en la figura 3.8. A diferencia de la primera simulación (figura 3.1) no se utilizó un bloque de selección de flujo, ya que en este caso solo se

quiere observar el comportamiento de la pila bajo condiciones ideales, al no haber un bloque que suministre combustible y/o aire en la entrada de la pila, se supone que la pila funciona a una tasa fija de conversión de gases (tasa nominal de conversión), es decir, el suministro de gases se ajusta de acuerdo con la corriente de modo que siempre se suministre un poco más de lo necesario para la pila en cualquier carga.

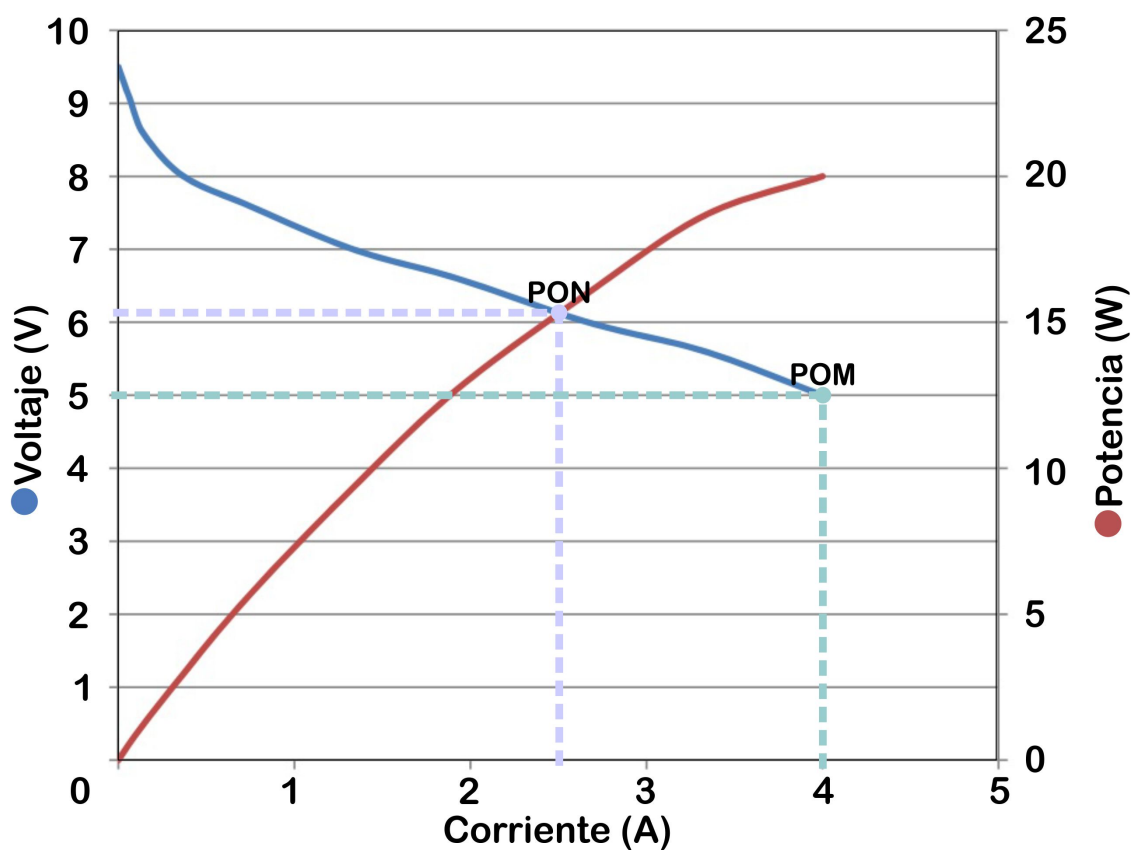


Figura 3.7. Gráficas de I-V y I-P de la pila de celdas de combustible de 20 W [2].

Durante la simulación se realizó la medición del voltaje y corriente en la pila de celda de combustible y se gráfico el voltaje contra la corriente para obtener la curva característica, mostrados en sección 3.2.1.

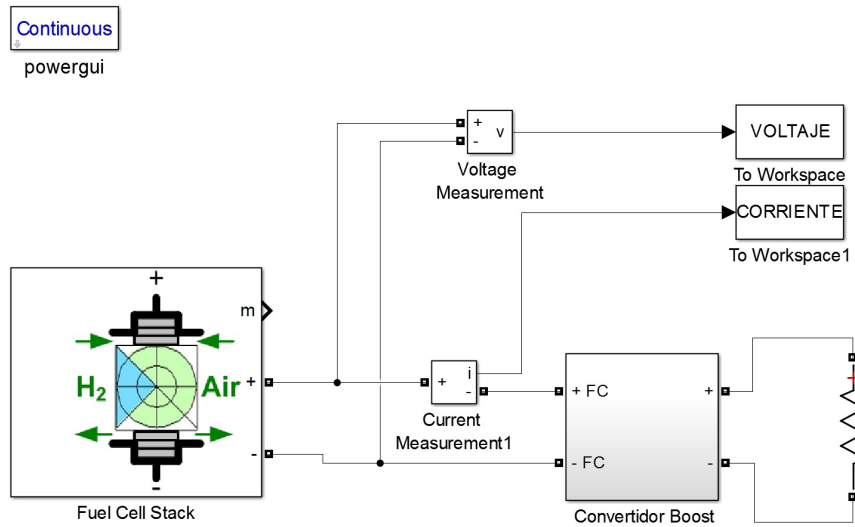


Figura 3.8. Diagrama de Simulación de la pila de celdas de combustible de 20 W.

3.2.1. Resultados de simulación de un stack específico

Para la simulación de la pila de 20 W se configuró el convertidor Boost para que entregara a la salida (lado de la carga R) 11.5 V constantes, esto con el fin de poder caracterizar la pila y obtener su curva de I-V. La figura 3.9 muestra el voltaje en la carga R que se mantiene muy cerca de los 11.5 V.

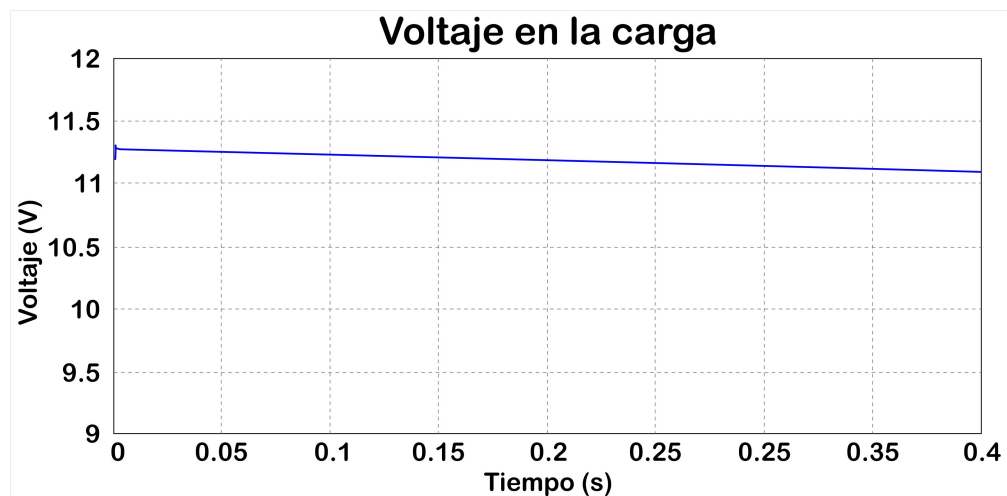


Figura 3.9. Gráfica del voltaje en la carga.

La figura 3.10 muestra la variación del voltaje en la pila de celdas de combustible, la cual empieza en su voltaje máximo de 10.5 V el cual es el voltaje de circuito abierto de la celda (0 A), después cae rápidamente a 5.5 V ya que entra la carga y demanda corriente de la celda finalmente decrece lentamente hasta alcanzar 5.3 V debido a la demanda de corriente la carga.

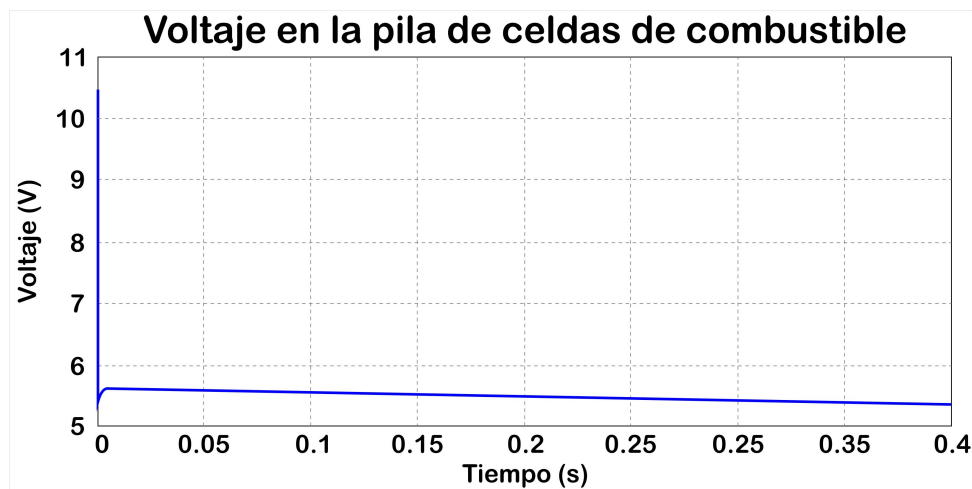


Figura 3.10. Gráfica del voltaje en la pila de celdas de combustible.

La figura 3.11 muestra el comportamiento de la corriente de la pila de las celdas de combustible, la cual comienza en cero, ya que la carga se encuentra desconectada de la celda, se dispara a 3.2 A en cuanto el convertidor entra en funcionamiento y aumenta lentamente conforme conforme la carga regula el voltaje a la salida el cual debe permanecer constante.

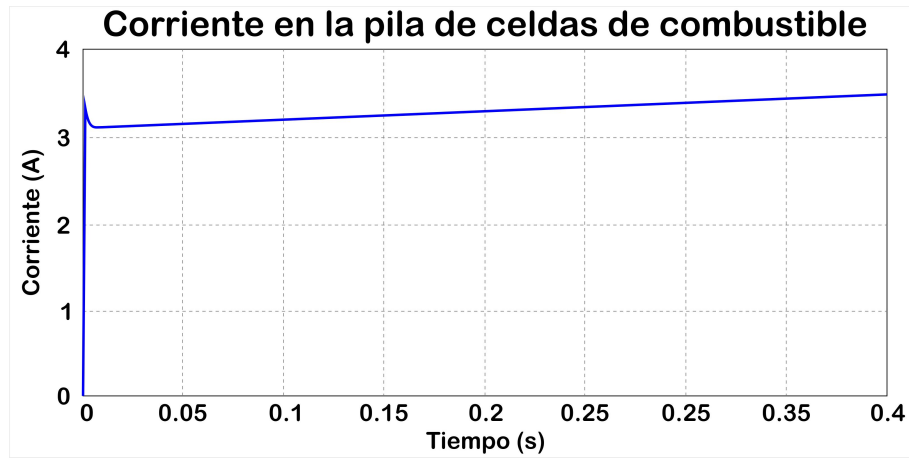


Figura 3.11. Gráfica de la corriente en la pila de celdas de combustible.

Por último, la figura 3.12, es la curva de I-V de la pila de combustible de 20 W, en esta curva se puede observar el comportamiento de la pila, el cual se divide en tres regiones de polarización, la primera región corresponde a la pérdida por activación, la segunda a la pérdida óhmica y la tercera a la pérdida por transferencia de masa. La eficiencia de la pila de celdas de combustible se encuentra, aproximadamente a un 37.5% como se puede ver en la figura 3.13.

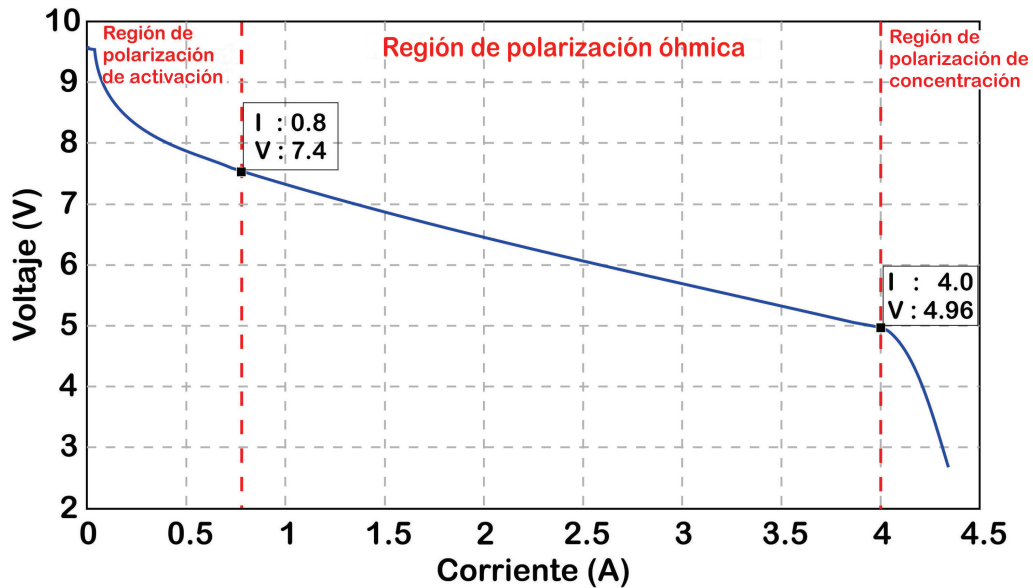


Figura 3.12. Curva de I-V de la pila de combustible de 20 W.

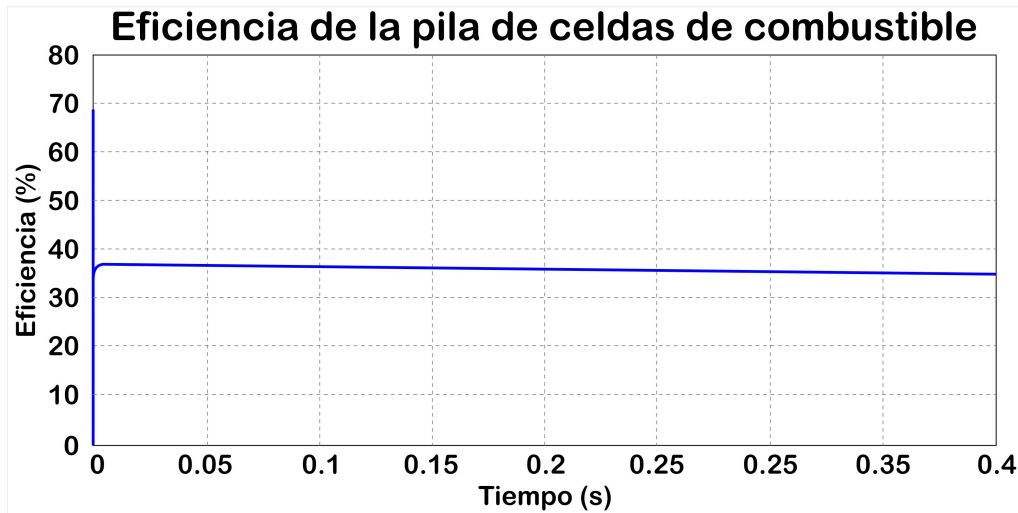


Figura 3.13. Gráfica de la eficiencia de la pila de celdas de combustible de 20 W.

3.3. Simulación del modelo electroquímico de la celda de combustible PEM

Se realizó la simulación del modelo descrito por la ecuación 2.3. La cual se muestra nuevamente a continuación:

$$V = 10 \times \left(E^0 + \frac{\Delta \hat{s}}{2F} (T - T_0) - \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}} \right) - A \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) - ir - \left(\frac{RT}{2F} \right) \ln \left(1 - \frac{i}{i_l} \right) \right) \quad (3.1)$$

Para llevar acabo la simulación y con el fin de validar el modelo electroquímico, se utilizaron los datos del stack de celdas de combustible de 20 W.

Ya que se considera que cada una de las 10 celda de combustible que conforman el stack de 20 W proporcionan el mismo valor de voltaje y trabajan bajo condiciones idénticas.

Para obtener la resistencia del área específica del stack se debe considerar la curva I-V del stack de 20 W e identificar el punto de operación nominal y obtener el valor

de corriente I_1 y voltaje V_1 en dicho punto, en este caso

$$I_1 = 2.5 \text{ A} \quad (3.2)$$

$$V_1 = 6.125 \text{ V} \quad (3.3)$$

También se debe obtener el valor del voltaje a 0.125 A, después del valor de la corriente en el punto de operación nominal, entonces

$$I_2 = 2.5 + 0.125 = 2.625 \text{ A} \quad (3.4)$$

$$V_2 = 6.0625 \text{ V} \quad (3.5)$$

Con estos valores se puede obtener la pendiente de esta región, que resulta ser la resistencia del stack r_{stack} . Sin embargo antes se debe convertir la corriente I_1 e I_2 a densidad de corriente $mA \text{ cm}^{-2}$. Entonces tenemos que el stack tiene un área específica $A_e = 6 \text{ cm}^2$, por lo que podemos obtener la densidad de corriente de la siguiente forma

$$i_1 = \frac{I_1 * 1000}{A_e} = \frac{2.5 \text{ A} \times 1000}{6 \text{ cm}^2} = 250 \text{ mA cm}^{-2} \quad (3.6)$$

$$i_2 = \frac{I_2 * 1000}{A_e} = \frac{2.625 \text{ A} \times 1000}{6 \text{ cm}^2} = 262.5 \text{ mA cm}^{-2} \quad (3.7)$$

Entonces ya podemos obtener la resistencia del área específica del stack mediante la siguiente relación

$$r_{stack} = \frac{6.0625 - 6.125}{262.5 - 250} = -0.0050 \text{ k}\Omega \text{ cm}^2 \quad (3.8)$$

Considerando que el stack está conformado por 10 celdas de combustible conectadas

en serie, entonces se tiene que

$$r = \frac{-r_{stack}}{n FC} = -\frac{-0.0050}{10} = 5.0 \times 10^{-4} \text{ k}\Omega \text{ cm}^2 \quad (3.9)$$

Todo lo anterior es descrito en un script de Matlab para realizar la simulación del modelo electroquímico. Es importante mencionar que la densidad de corriente de intercambio i_0 , el cambio en la entropía $\Delta\hat{s}$ y la pendiente de tafel A son calculados como se muestra en la sección 1.2.3 de este documento, y se considera que $\alpha = 0.47$.

3.3.1. Resultados de la simulación del modelo electroquímico de la celda de combustible PEM

Con todos los parámetros necesarios para simular el stack de 20 W mediante el modelo electroquímico de la celda de combustible, se obtuvo la curva i-V mostrada en la figura 3.14, esta está en razón de voltaje contra la densidad de corriente, ya que éstas son las unidades de medida con las que trabaja este modelo.

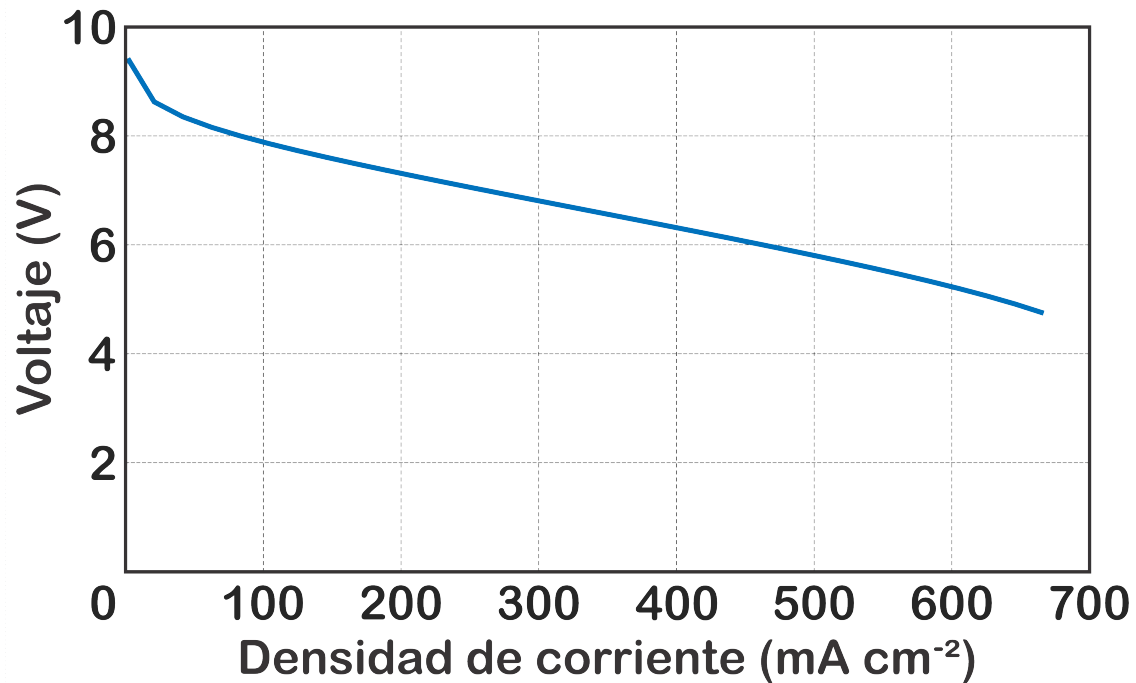


Figura 3.14. Curva de polarización del stack de 20 W obtenida a partir del modelo electroquímico.

Para validar que la curva i -V obtenida a partir de este modelo tiene un resultado aceptable, esta es comparada con la curva i -V proporcionada por el fabricante. Sin embargo para hacer esto es necesario pasar de la densidad de corriente i en $mA\ cm^{-2}$ a la intensidad de corriente I en A , esto se hace de la siguiente forma

$$I = i * A_e / 1000 \quad (3.10)$$

La comparación de ambas curvas se muestra en la figura 3.15, en la que se puede observar la curva I -V obtenida por el modelo electroquímico en términos de la corriente y de esta forma compararla con mayor facilidad con la curva I -V proporcionada por el fabricante.

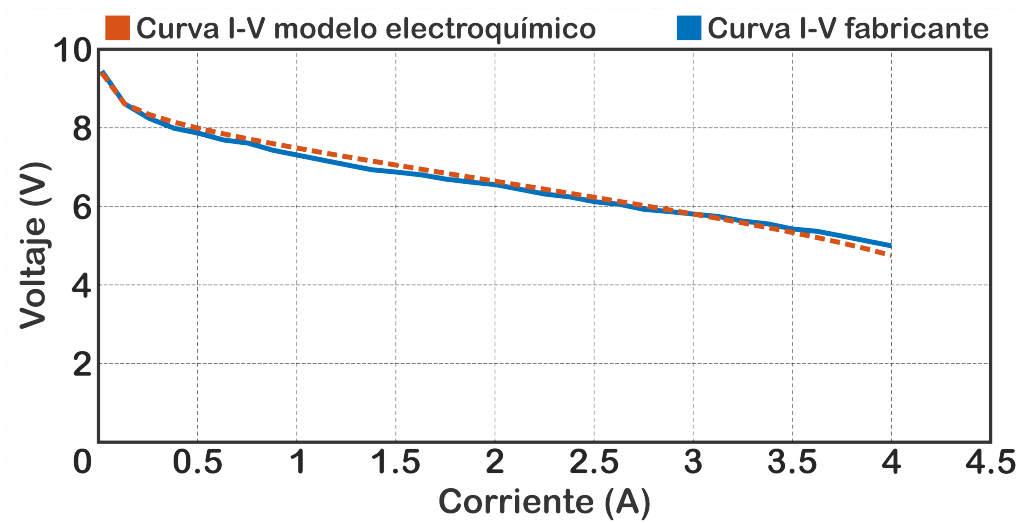


Figura 3.15. Comparación entre la curva I-V obtenida por el modelo electroquímico y la proporcionada por el fabricante.

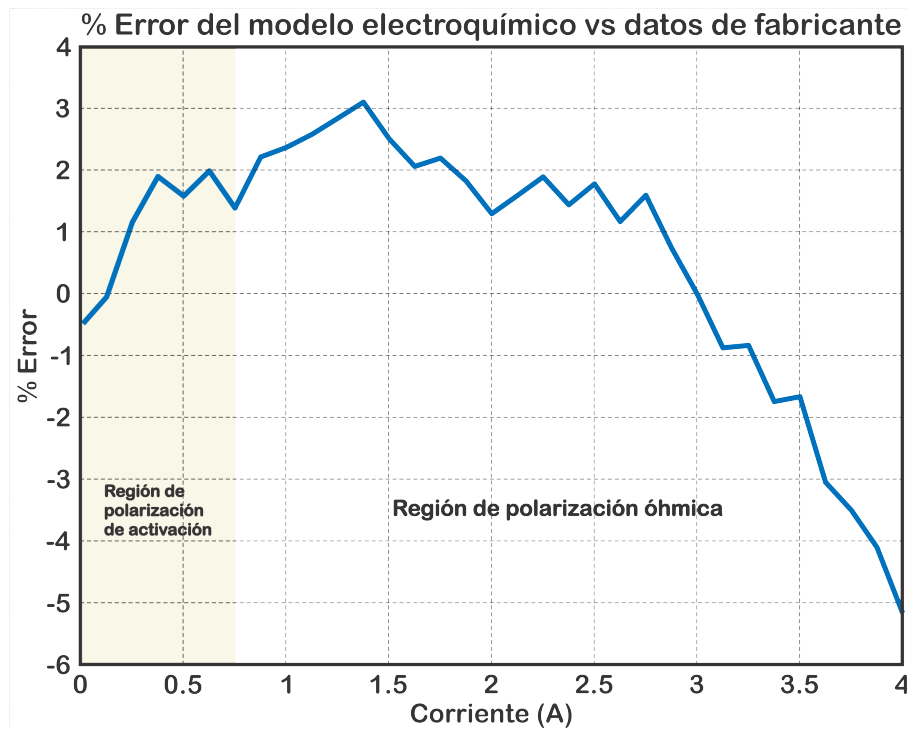


Figura 3.16. Porcentaje de error del modelo electroquímico con respecto a la curva I-V del fabricante.

Como podemos ver en la figura 3.15, la curva obtenida con el modelo electroquímico es muy cercana a la que proporciona el fabricante ya que está se obtuvo bajo las condiciones nominales de operación ($T = 60^{\circ}C$, $P_{H_2} = 0.5 \text{ bar}$ y $P_{Aire} = 1.5 \text{ bar}$). El índice de error relativo se muestra en la figura 3.16, esta figura nos permite observar con mayor precisión qué tan cercana es la curva generada por el modelo electroquímico a la curva proporcionada por el fabricante.

Como se puede ver en la figura 3.16 el porcentaje de error depende del nivel de corriente en el que se esté trabajando, en la región de polarización de activación se puede llegar a tener un error de hasta el $+2\%$ mientras que en la región de polarización óhmica el error se encuentra entre el 0% hasta 3% , después de 3 A el error cae hasta -5.2% , esto quiere decir que después de 3 A el modelo electroquímico genera un voltaje menor al valor real (valor medido por el fabricante y proporcionado en la curva I-V) y se aleja del valor real conforme la corriente aumenta.

Al calcular r , i_0 , $\Delta\hat{s}$ y A para la curva I-V de la celda de combustible de 20 W bajo condiciones nominales de operación, es posible observar la respuesta de la celda ante variaciones de temperatura y presión, La figura 3.17 muestra la respuesta del modelo electroquímico a $60^{\circ}C$ (Temperatura de operación nominal, línea azul), $80^{\circ}C$ (línea roja), $100^{\circ}C$ (línea verde) y $120^{\circ}C$ (línea rosa), como es evidente de dicha figura el valor de voltaje aumenta conforme la temperatura aumenta, esto se debe principalmente a que tanto la densidad de corriente de intercambio como la resistencia de la celda y la corriente límite se mantienen constantes, cuando en realidad deberían variar con respecto a la corriente de la celda de combustible.

La figura 3.18 muestra la respuesta del modelo ante diferentes valores de presión de alimentación del hidrógeno, la línea azul muestra la respuesta del modelo a 0.5 bar (presión nominal del hidrógeno), la línea roja muestra la respuesta del modelo a 1.5 bar y la línea verde muestra la respuesta del modelo a 2.5 bar .

La respuesta del modelo ante la variación de presión de alimentación de aire se muestra en la figura 3.19, la línea azul representa la respuesta del modelo a 2.5 bar (presión nominal de alimentación del aire), la línea roja representa la respuesta del

modelo a 3.5 bar, la línea verde representa la respuesta del modelo a 4.5 bar.

Por ultimo en la figura 3.20 se muestra la respuesta del modelo ante el incremento de la presión de alimentación del hidrógeno y aire, la línea azul representa la respuesta del modelo a los valores nominales de presión del hidrógeno y aire, la línea roja representa la respuesta del modelo a presión de 1.5 bar para el hidrógeno y 3.5 bar para el aire, la línea verde representa la respuesta del modelo a presión de 2.5 bar para el hidrógeno y 4.5 bar para el aire.

Como podemos ver de la figura 3.18 y 3.19 el aumento en la presión de alimentación del hidrógeno incrementa de forma más significativa el valor del voltaje que al incrementar la presión de alimentación del aire, el incremento en la presión de alimentación tanto del hidrógeno como del aire, incrementa el voltaje un poco más que con el aumento en la presión de alimentación del hidrógeno (figura 3.20 y 3.18), sin embargo la diferencia es muy pequeña.

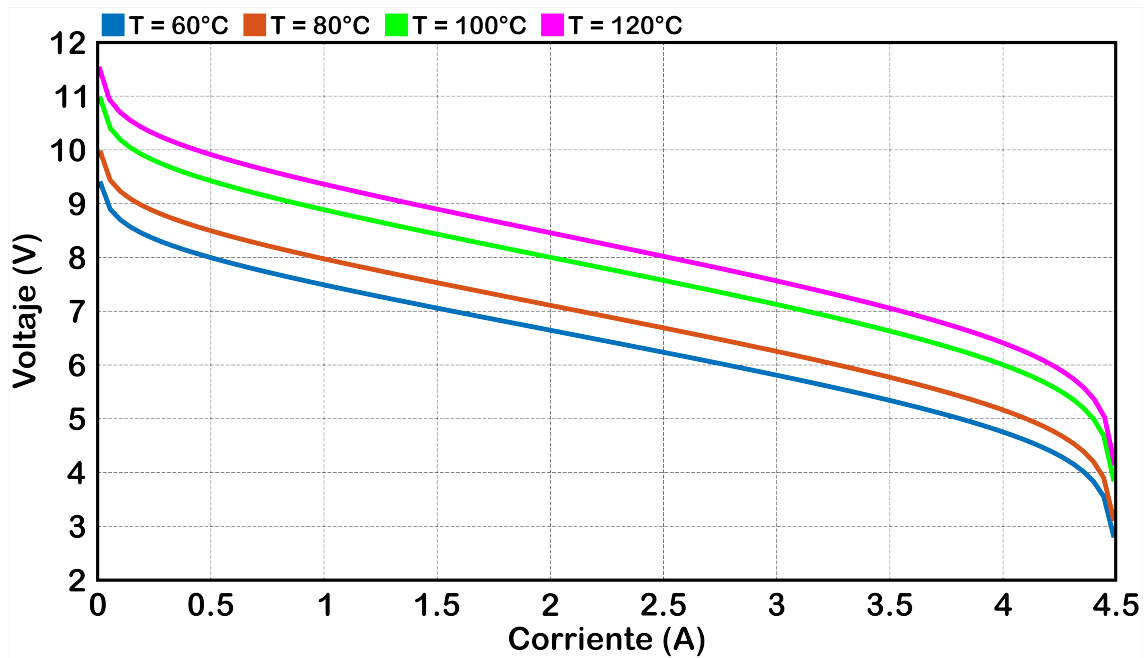


Figura 3.17. Respuesta del modelo electroquímico ante diferentes valores de temperatura de operación.

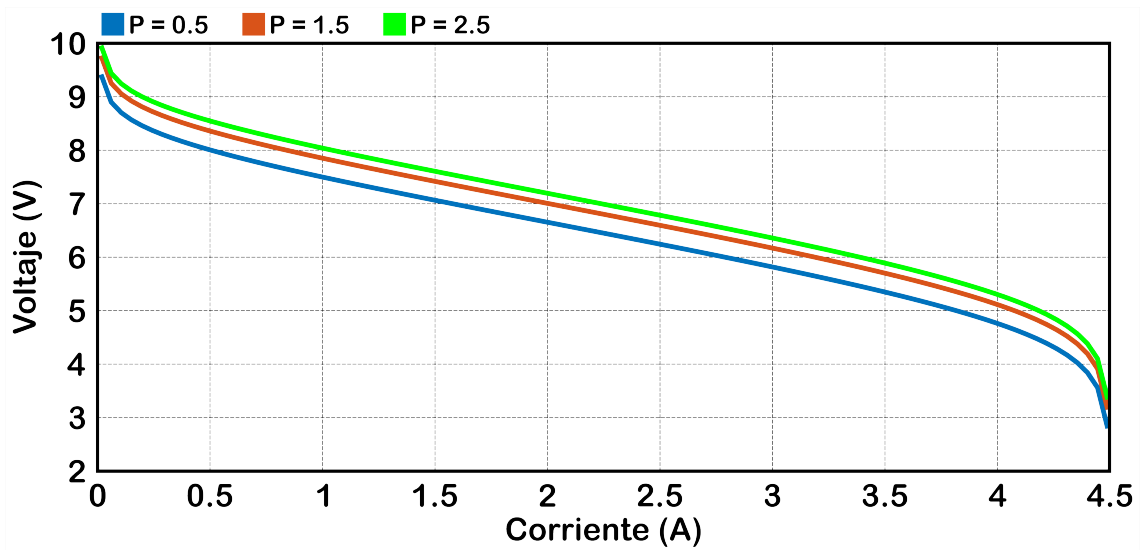


Figura 3.18. Respuesta del modelo electroquímico ante diferentes valores de presión de alimentación de hidrógeno.

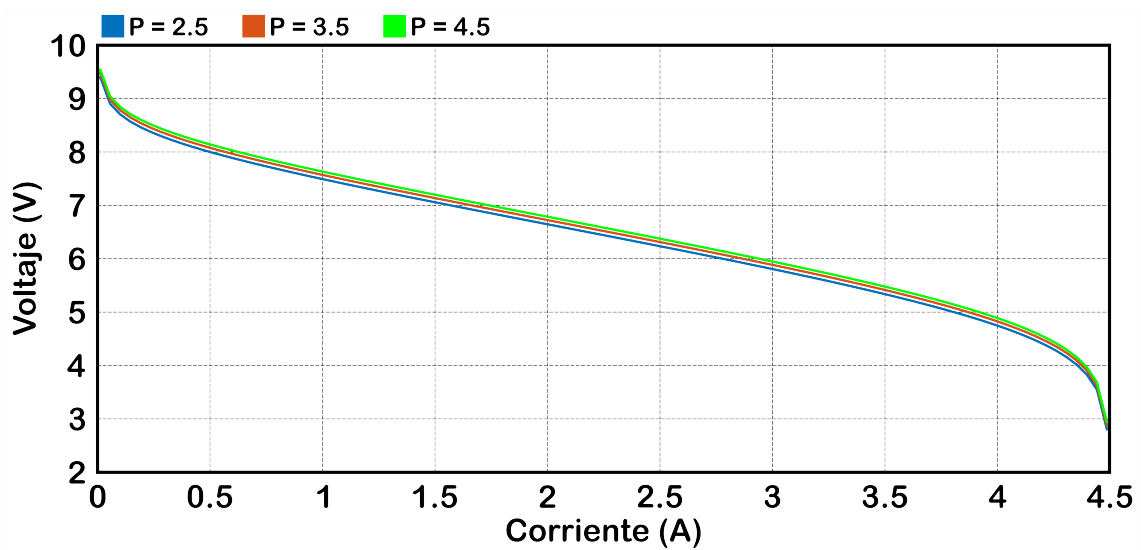


Figura 3.19. Respuesta del modelo electroquímico ante diferentes valores de presión de alimentación de aire.

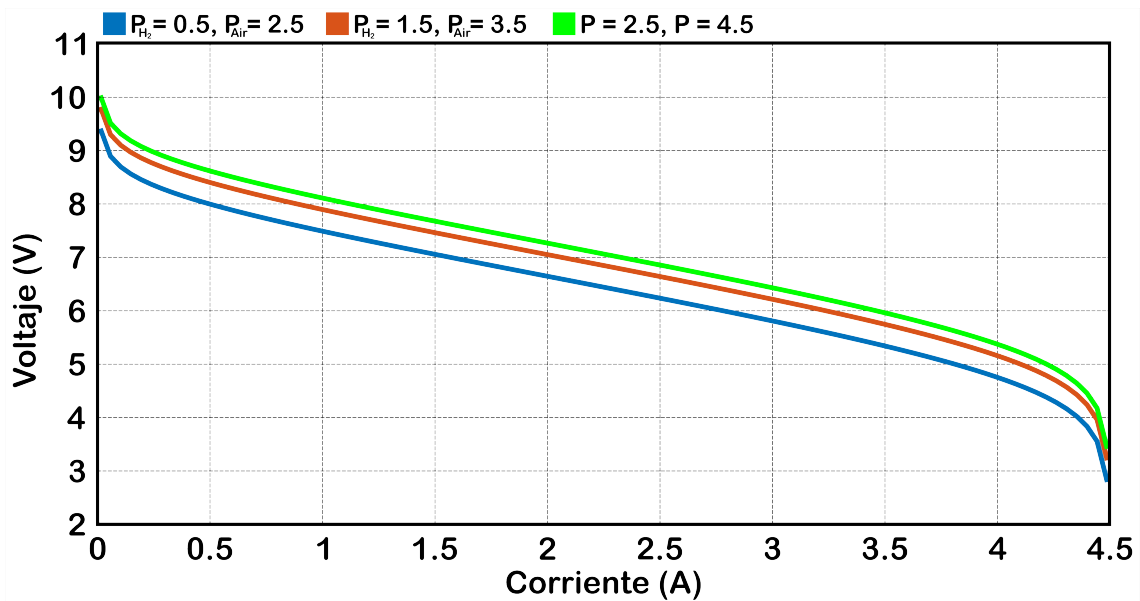


Figura 3.20. Respuesta del modelo electroquímico ante diferentes valores de presión de alimentación de hidrógeno y aire.

Capítulo 4

Desarrollo del sistema de emulación de la celda de combustible

Para realizar la emulación de la celda de combustible se utilizará una fuente de voltaje de CD programable.

La fuente de voltaje es una fuente de TDK-lambda de la serie génesis modelo GEN400-37 de 15 kW, esta fuente puede ser programada en modo remoto, mediante un puerto serie (RS-232) y cuenta con librerías y controladores que permiten su configuración mediante el entorno de desarrollo de LabVIEW.

4.1. Emulación del stack de 20 W a partir de su curva I-V

Para la emulación se usa el perfil eléctrico de la pila de celdas de combustible de 20 W, la cual se ha simulado en la sección 3.2 de este trabajo. Durante la simulación se obtuvo la curva de I-V de la pila de 20 W. La curva de I-V se utilizó para obtener un aproximación polinomial, ésta se obtuvo con ayuda de Matlab a partir de los datos de la curva I-V de la pila y con la función *polyfit*, la cual entrega los coeficientes del polinomios. Para poder llegar a un buen acercamiento a la curva de

I-V de la pila de 20 W y obtener polinomios pequeños se dividió la curva I-V en sus tres regiones de polarización y se obtuvo un polinomio por cada región.

Como resultado del procesamiento de los datos obtenidos y separados por regiones tenemos que cuando $I \leq 0.8 A$, es decir cuando se encuentre en la región de polarización de activación entonces el voltaje en esta región estará dado por

$$V = 5.8543I^4 - 17.6231I^3 + 17.9995I^2 + 8.8100I + 9.6235 \quad (4.1)$$

Cuando la corriente se encuentre en la región de polarización óhmica, es decir cuando $0.8 A < I < 4 A$, entonces el voltaje estará dado por

$$V = -0.0074I^3 + 0.0856I^2 - 1.0517I + 8.2706 \quad (4.2)$$

Y cuando la corriente se encuentre en la región de polarización de concentración, es decir cuando $I \geq 4 A$, entonces el voltaje estará dado por

$$V = -17.1348I^2 + 136.1080I - 265.3031 \quad (4.3)$$

En la figura 4.1 se puede apreciar la cercanía de la aproximación polinomial por regiones con la curva I-V de la pila de 20 W, la línea azul representa la curva de I-V que se obtuvo durante la simulación, la línea punteada verde representa la aproximación polinomial de la región de polarización de activación, la línea punteada naranja representa la aproximación polinomial de la región de polarización óhmica y la línea punteada amarilla representa la aproximación polinomial de la región de polarización de activación. Para observar la proximidad entre la curva I-V obtenida de la simulación y la curva I-V obtenida de la simulación por partes descrita por los polinomios, se muestra el error relativo en la figura 4.2, en la que podemos observar que el porcentaje de error oscila entre -2.2 % y 0.7 % en la región de polarización de activación (0 – 0.8 A), de -5 % a 0 % en la región de polarización óhmica (0.8 – 4 A) y de -2.5 % a 2.5 % en la región de polarización de concentración (4 – 4.33 A).

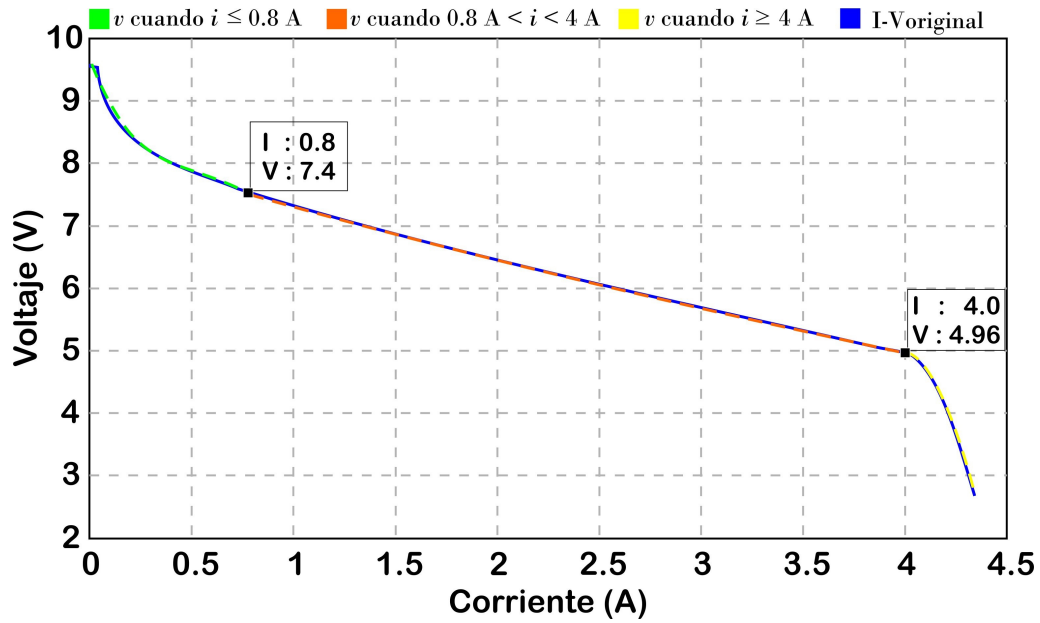


Figura 4.1. Gráfica de la simulación por partes y la curva I-V de la pila de 20 W obtenida en Simulink.

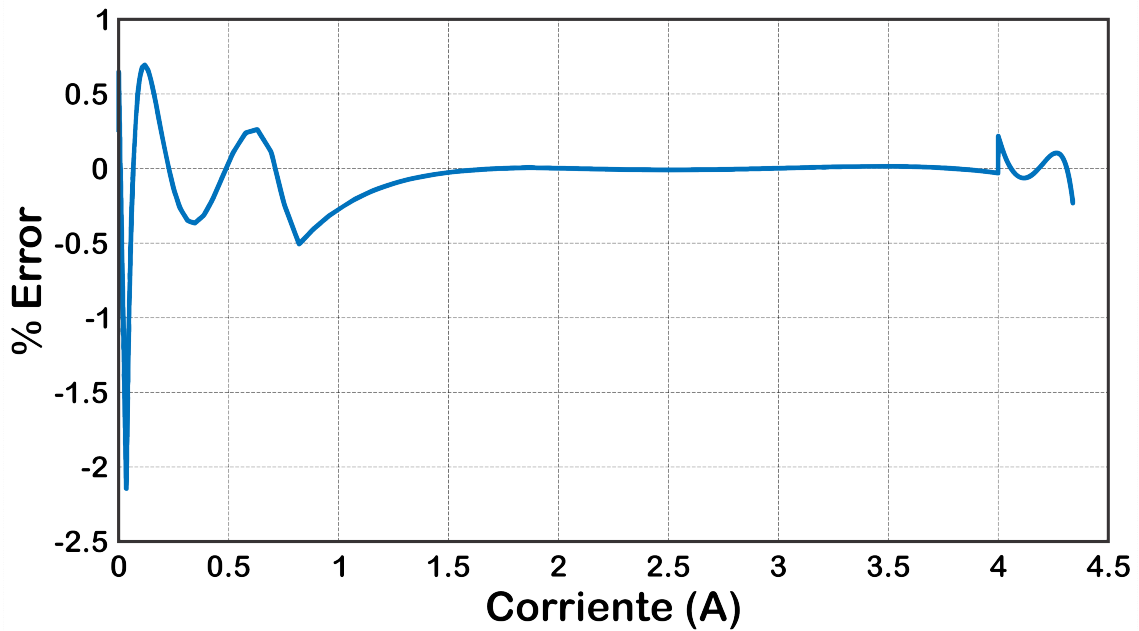


Figura 4.2. Gráfica de error de la simulación por partes con respecto a la curva I-V obtenida en Simulink.

Los polinomios obtenidos fueron programados en la fuente para que esta se comporte con el perfil eléctrico de la celda de combustible y así poder emularla. Con la representación de la curva I-V mediante polinomios, se procedió a desarrollar el programa adecuado para llevar a cabo la comunicación entre la fuente de CD GEN400-37 y la PC, esto se llevo a cabo mediante la librería *Lambda GENESYS Serial DC Power* de labVIEW, la cual es proporcionada por el fabricante. La figura 4.3 muestra el diseño de la programación.

El primer bloque fuera de la estructura *While loop* llamado “*GENser Initialize*” permite configurar la salida del puerto serial y gestiona la comunicación entre la PC y la fuente de CD, el siguiente bloque llamado “*GENser Config Output On-Off*” permite que la fuente se apague y encienda cuando el usuario lo indique mediante un interruptor virtual, los bloques “*GENser Meas Output Current*” y “*GENser Meas Output Voltage*” permiten que la fuente mande a la PC los niveles de voltaje y corriente respectivamente que hay en sus terminales de salida y los bloques “*GENser Config Voltage Limit*” y “*GENser Config Current Limit*” sirven para mandar el valor de voltaje y corriente que el usuario requiera. Dentro de las estructura *case* se encuentran descritas las rectas dadas por (4.1), (4.2) y (4.3) y estos responden a las condiciones correspondientes.

La figura 4.4 muestra el panel frontal de la aplicación desarrollada para controlar la fuente GEN400-37 en él se muestra el puerto de comunicación (VISA) por el que se manda y recibe información, también se muestra la dirección de la fuente y la velocidad de BAUD, los cuales deben coincidir con los de la fuente o se arrojará un error, el botón *Output ON* habilita la salida de la fuente, en *Corriente y Voltaje*, se verán los valores de corriente y voltaje y por último en la *Curva I-V* se verá la gráfica del voltaje contra la corriente en la salida de la fuente.

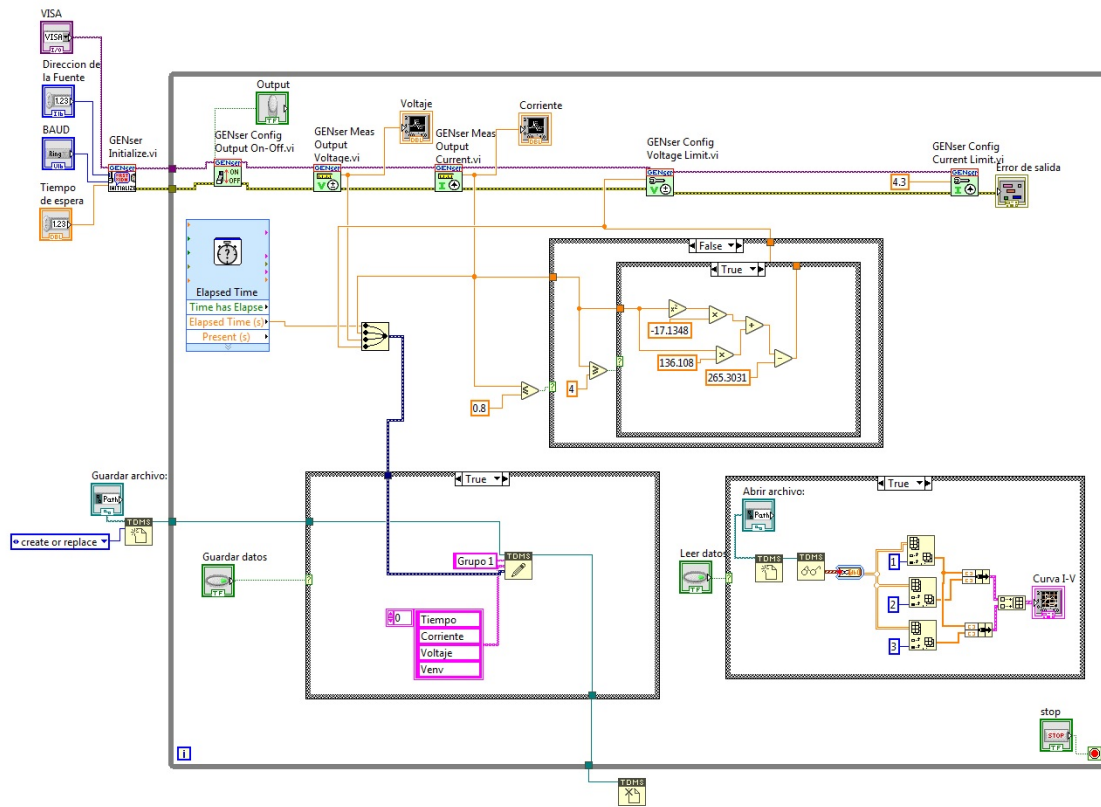


Figura 4.3. Programa de emulación en Labview.

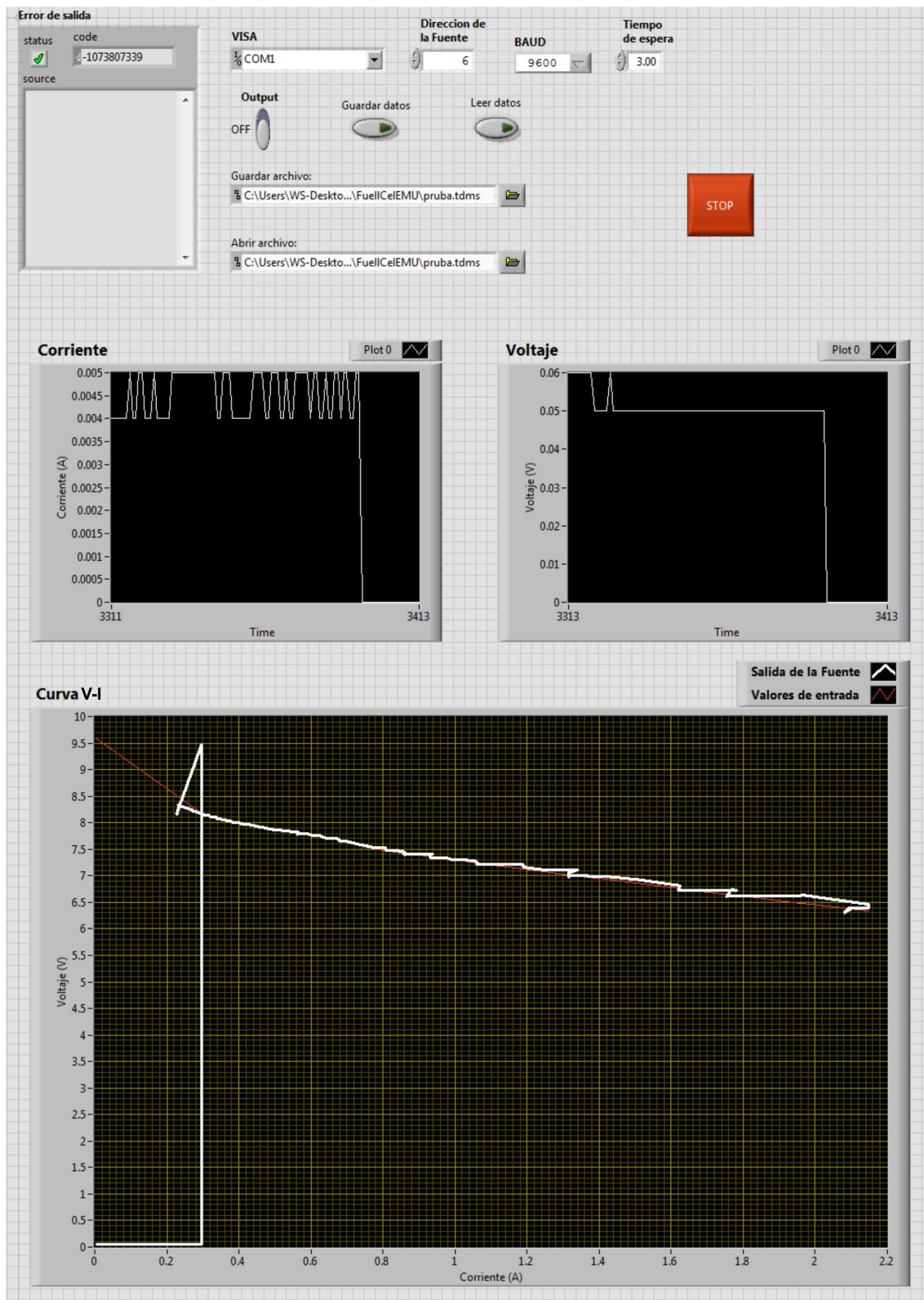


Figura 4.4. Panel frontal.

4.1.1. Prueba de la emulación del stack de 20 W a partir de su curva I-V

Después de haber realizado la programación de la fuente, ésta se probó para asegurar que el comportamiento que presenta sea el deseado.

Para probar la emulación se conectó una carga electrónica a la salida de la fuente ya programada. La carga electrónica es programada en modo corriente constante y con un barrido en corriente de 0 - 4.3 A, ya que la corriente en la salida de la fuente dependerá de la carga que tenga conectada. El sistema de prueba se muestra en la figura 4.5.

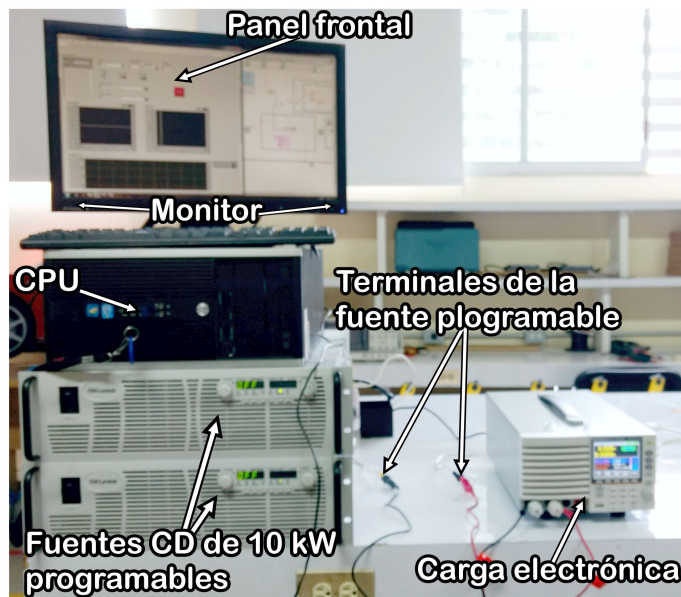


Figura 4.5. Sistema de prueba para la fuente GEN400-37.

En el panel frontal mostrado en la figura 4.5, se indican los datos necesarios (dirección, BAUD, etc.) para realizar la comunicación con la fuente de CD, también se debe indicar el lugar en donde se guardarán y leerán los datos obtenidos, durante la emulación se observa las gráficas en tiempo real de corriente y voltaje a la salida de la fuente de CC y se guardan dichos datos para posteriormente mostrarlos en su curva I-V.

4.2. Emulación del stack de 20 W basada en el modelo electroquímico

Para realizar la emulación basada en el modelo electroquímico se llevo acabo la descripción de dicho modelo en el entorno de programación de Labview, en el cual se incluye el procesamiento de los datos que proporciona el fabricante para obtener los datos requeridos por el modelo, esto se muestra en la figura 4.6.

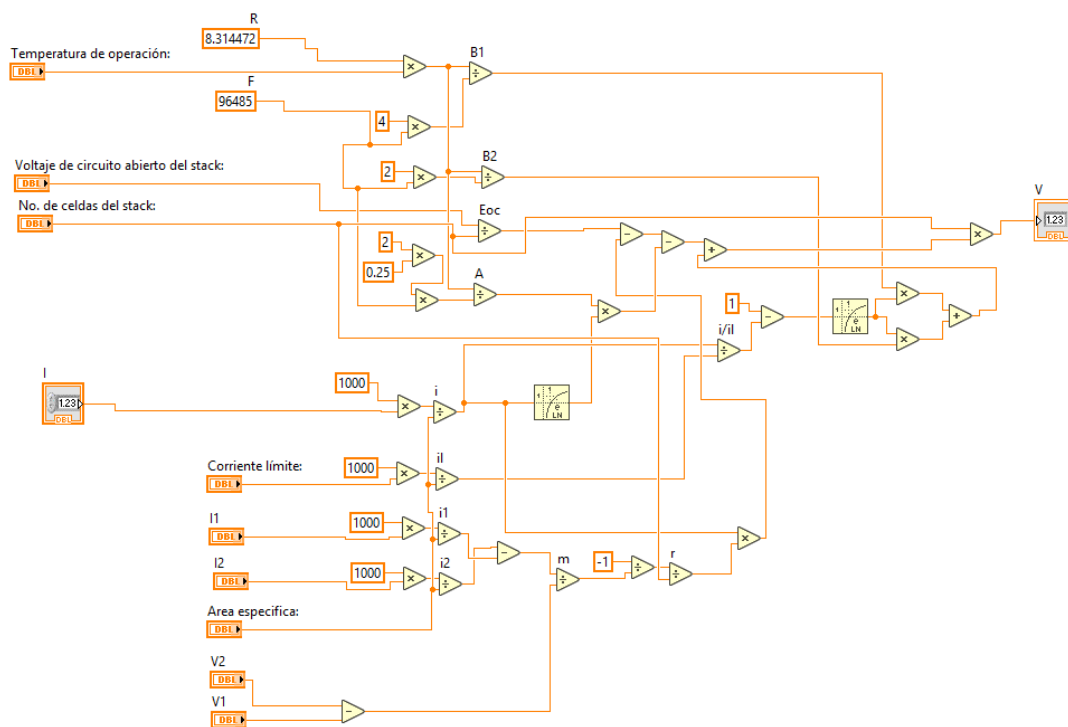


Figura 4.6. Descripción del modelo electroquímico en Labview

Para que la fuente emulara el comportamiento del stack de 20 W se debe llevar a cabo la comunicación entre la fuente de CD GEN400-37 y la PC, el cual es muy similar al generado en la sección 4.1.

El primer bloque fuera de la estructura *While loop* llamado “*GENser Initialize*” permite configurar la salida del puerto serial y gestiona la comunicación entre la PC y la fuente de CD, el siguiente bloque llamado “*GENser Config Output On-Off*” permite que la fuente se apague y encienda cuando el usuario lo indique mediante un interruptor virtual, los bloques “*GENser Meas Output Current*” y “*GENser Meas Output Voltage*” permiten que la fuente mande a la PC los niveles de voltaje y corriente respectivamente que hay en sus terminales de salida y los bloques “*GENser Config Voltage Limit*” y “*GENser Config Current Limit*” sirven para mandar el valor de voltaje y corriente que el usuario requiera. En este caso el voltaje que se desea enviar es el calculado por el modelo electroquímico, la descripción completa del programa se muestra en la figura 4.7.

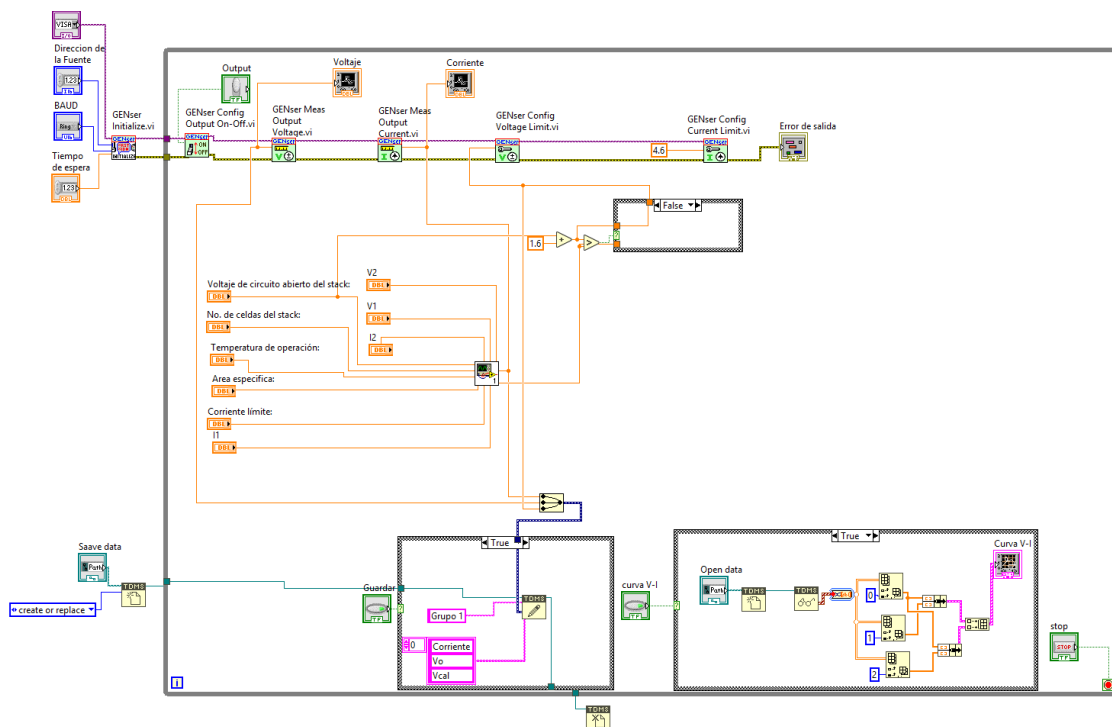


Figura 4.7. Descripción del programa de emulación en Labview.

La interfaz gráfica del programa de emulación mostrado en la figura 4.8 permite al usuario meter los datos para la emulación, sin necesidad de hacer ningún tratamiento

previo, es decir el usuario solo necesita introducir

1. voltaje de circuito abierto del stack $E_{oc-stack}$.
2. Numero de celdas que conforman el stack de celdas de combustible nFC .
3. Temperatura de operación T .
4. Área específica A_e .
5. Corriente límite i_l
6. punto de inicio (I_1, V_1) y final (I_2, V_2) de la recta descrita por la región óhmica.

En la interfaz gráfica el usuario no solo podrá introducir la información del stack y de la fuente sino que también podrá observar el valor de la corriente y el voltaje en gráficas individuales y en tiempo real, puede guardar los datos obtenidos y visualizar la curva I-V generada por la fuente.

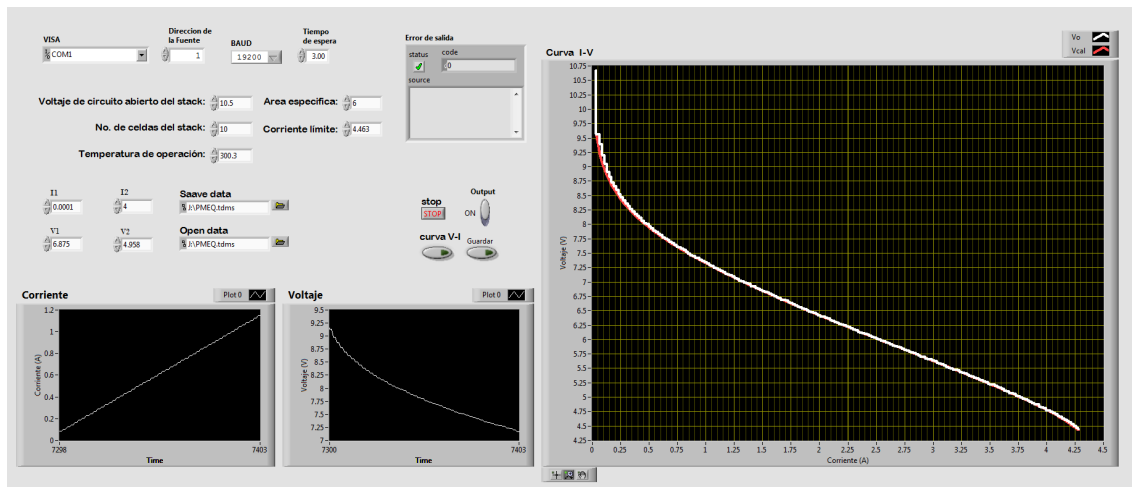


Figura 4.8. Interfaz gráfica del programa de emulación.

4.2.1. Prueba de la emulación del stack de 20 W basada en el modelo electroquímico

Después de haber realizado la programación de emulación para la fuente, ésta se probó para asegurar que el comportamiento que presenta sea el deseado.

Para probar la emulación se conectó una carga electrónica a la salida de la fuente ya programada. La carga electrónica es programada en modo corriente constante y con un barrido en corriente de 0 - 4.5 A, ya que la corriente en la salida de la fuente dependerá de la carga que tenga conectada. El sistema de prueba se muestra en la figura 4.9, el cual es el mismo que el que se utilizó para probar la emulación a partir de la curva I-V.

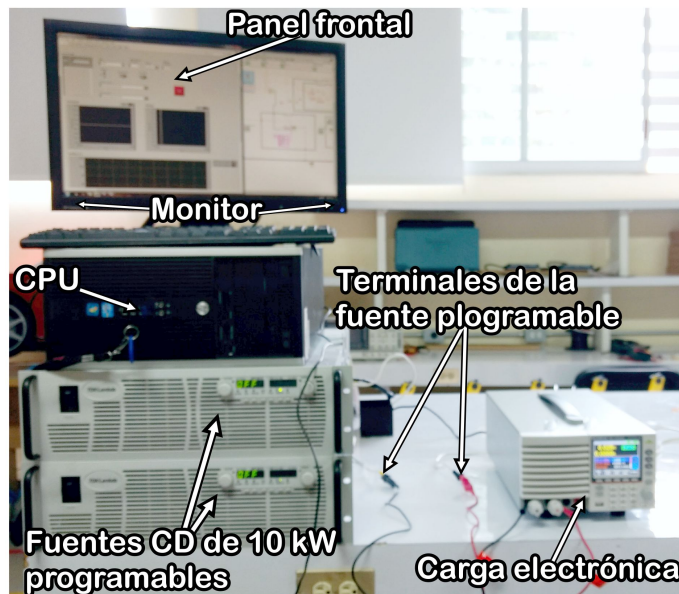


Figura 4.9. Sistema de prueba para la fuente GEN400-37.

En el panel frontal mostrado en la figura 4.8, se indican los datos necesarios (dirección, BAUD, etc.) para realizar la comunicación con la fuente de CD, también se debe indicar el lugar en donde se guardarán y leerán los datos obtenidos, así como la información del stack de celdas de combustible, durante la emulación se observa las gráficas en tiempo real de corriente y voltaje a la salida de la fuente de CC y se

guardan dichos datos para posteriormente mostrarlos en su curva I-V.

Es importante mencionar que en el caso de esta emulación, el usuario puede cambiar los valores requeridos de la celda de combustible, es decir que puede emular de forma directa cualquier celda de combustible que desee. En este caso se introdujeron los datos de stack de 20 W.

Capítulo 5

Resultados de la emulación de la celda de combustible

Anteriormente se describieron dos métodos para realizar la emulación de la celda de combustible y como obtener los datos necesarios para llevar a cabo la emulación, en esta sección se presentan los resultados obtenidos de ambos métodos.

5.1. Resultados de la emulación del stack de 20 W a partir de su curva I-V

Como resultado de la emulación se obtuvo el comportamiento mostrado en la figura 5.1, en esta se observa el voltaje medido a la salida de la fuente representada por la línea roja, también se observa el valor calculado por la función por partes representados por la línea azul, como podemos observar, el valor del voltaje a la salida de la fuente es muy cercano al valor calculado por los polinomios de cada región, sin embargo, a la fuente le es difícil igualar los valores en las regiones polarización de activación y en la de concentración.

En la figura 5.1 también se logran observar las tres regiones de polarización del stack emulado, la región de polarización de concentración se encuentra cuando $i < 0.8 A$,

la región de polarización óhmica está en $0.8 A < i < 4.1 A$ y por último la región de polarización de concentración aparece cuando $i > 4.1 A$.

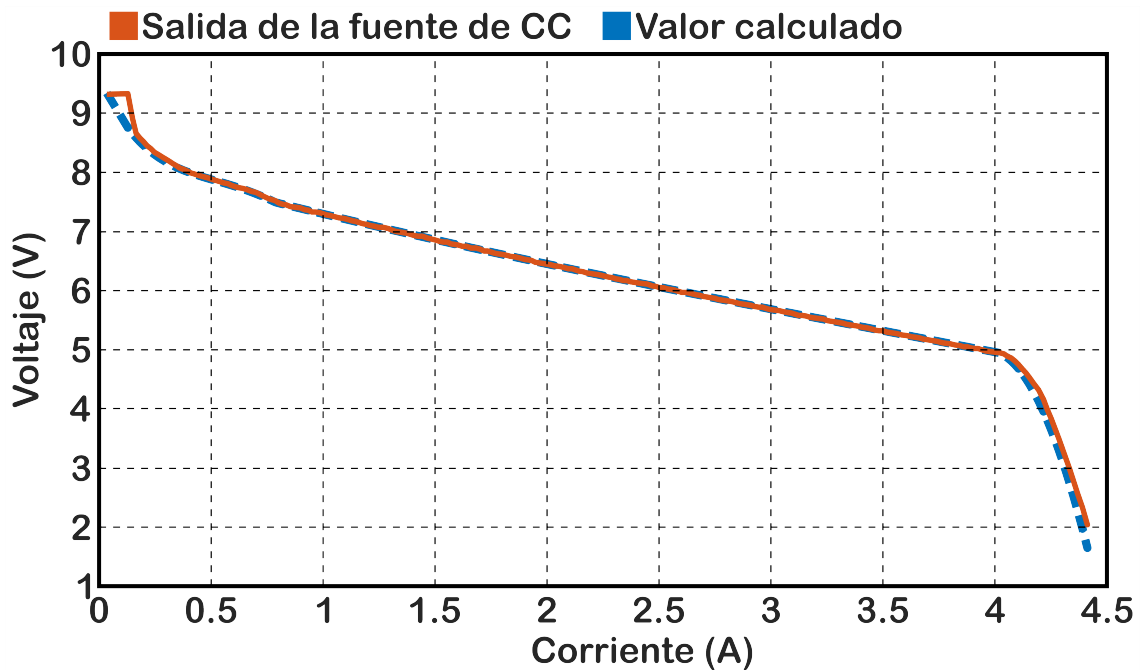


Figura 5.1. Gráfica de I-V obtenidos de la fuente y del programa realizado en LabVIEW de la emulación del stack de 20 W a partir de su curva I-V.

En la figura 5.2, se puede observar el error relativo que tiene la salida de la fuente con respecto al valor calculado por la función por partes. Como podemos ver en dicha figura hay un error del 6.1 % a 0.128 A, posterior a este punto el error es casi de 0 % (0.5 % - 0.2 %), pasando la región de polarización óhmica, es decir decir después de 4A el error empieza a incrementarse hasta 19.18 %.

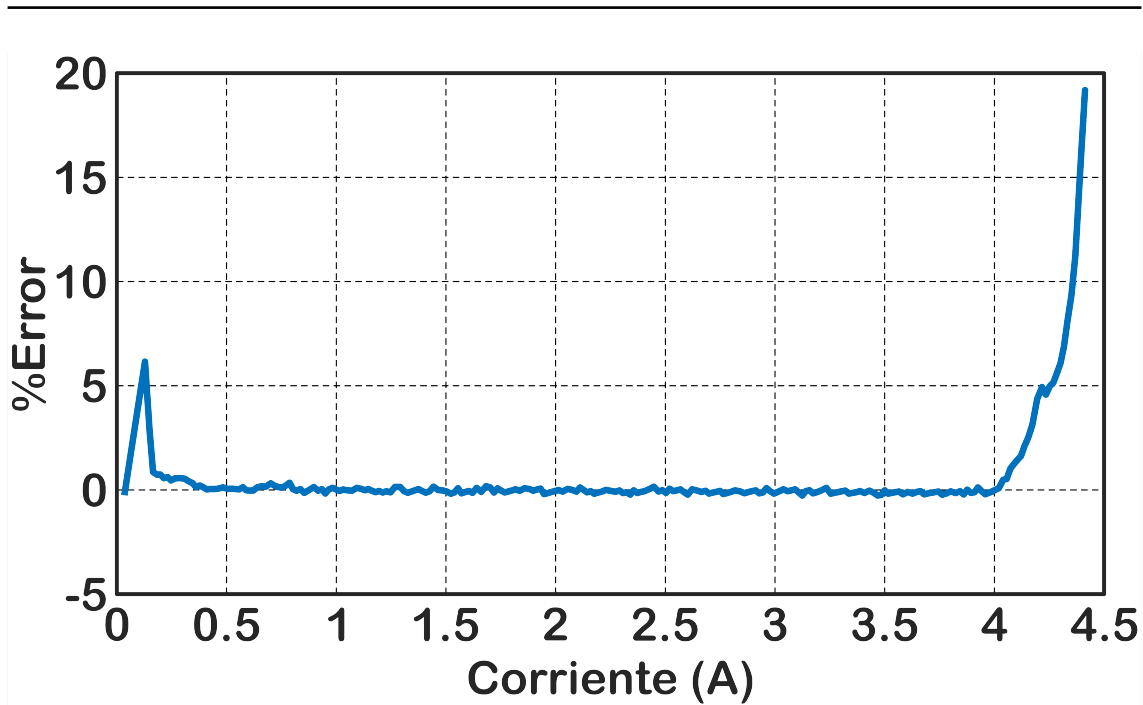


Figura 5.2. Porcentaje de error a la salida de la fuente CC con respecto al valor calculado.

5.2. Resultados de la emulación del stack de 20 W basada en su modelo electroquímico

Como resultado de la emulación del stack de 20 W basado en su modelo electroquímico se tiene la gráfica mostrada en la figura 5.3. esta gráfica muestra la curva I-V obtenida a la salida de la fuente programable representada por la línea azul continua también muestra la curva I-V calculada por el modelo electroquímico descrito en el programa de emulación, como podemos observar la emulación abarca las tres regiones de polarización del stack, y además la fuente logra generar con un retardo mínimo los valores solicitados por el modelo electroquímico, en la región de polarización de la curva I-V de la fuente se pueden observar unos pequeños escalones, esto se debe a el valor de corriente demandado en ese instante y al comportamiento natural de la fuente de voltaje de CC.

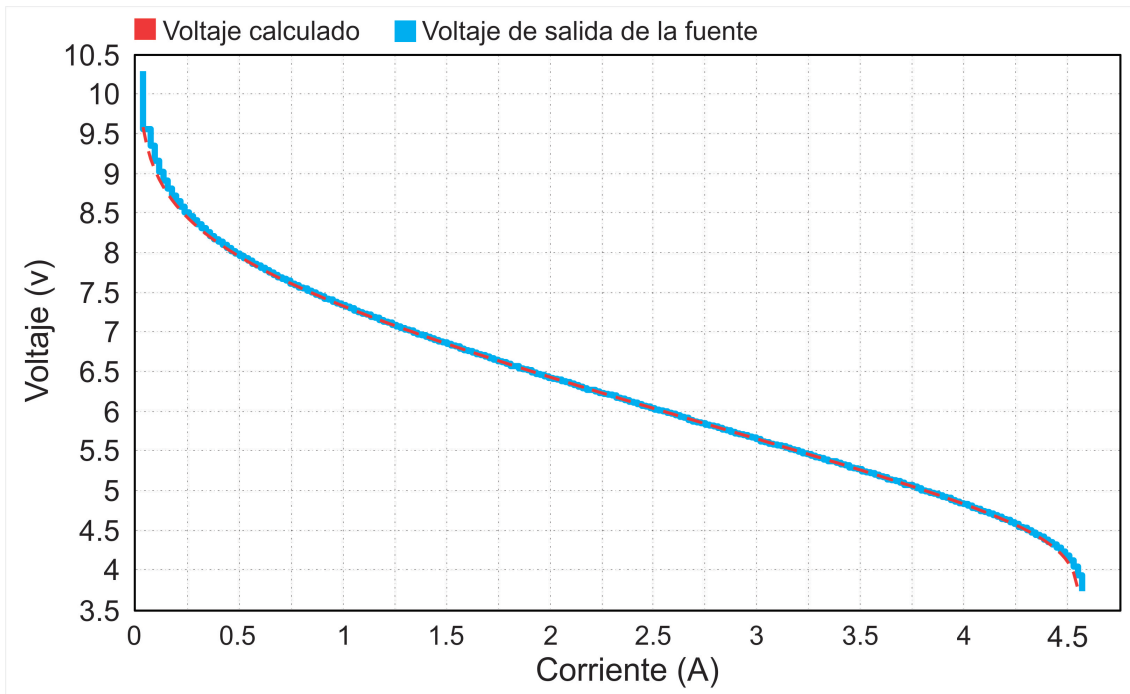


Figura 5.3. Gráfica de I-V obtenidos de la fuente y del programa realizado en LabVIEW del stack de 20 W a partir del modelo electroquímico.

Si comparamos el modelo electroquímico con el modelo por aproximación polinomial observaremos que la curva generada por el modelo electroquímico es más suave y los valores calculados por dicho modelo son más fáciles de reproducir para la fuente.

Conclusiones

El emulador de celda de combustible desarrollado en este trabajo es una herramienta que permite a estudiantes e investigadores hacer pruebas sin la necesidad de hacer fuertes inversiones en la compra de la celda, ni correr riesgos de dañarla al someterla a puntos de operación extremos. Los resultados experimentales muestran que el emulador reproduce el comportamiento eléctrico de la celda ante variaciones de carga y temperatura satisfactoriamente.

Respecto a la operación de la celda de combustible se pudo observar que su respuesta eléctrica depende del material de la MEA, el diseño de los canales de flujo de los platos colectores, el material de los platos colectores, el nivel de humedad en la MEA, la temperatura de operación, la presión de alimentación de los gases y la concentración másica de los reactivos. Los parámetros mencionados anteriormente son indispensables para simular algunos modelos de celda de combustible, tales como el electroquímico y de circuito equivalente, sin embargo, si no se ha fabricado la MEA de la celda de combustible o se ignora el diseño de los platos colectores, entonces no es posible aplicar estos modelos. En algunos casos como en el modelo de circuito equivalente, es posible obtener los parámetros requeridos a partir de una serie de pruebas que se aplican al stack de celdas de combustible que se desea emular, sin embargo, en los casos en los que no se cuenta con la celda de combustible, o con el equipo de pruebas necesario, ni con todos los datos particulares de la celda, entonces no es posible aplicar de forma directa ninguno de los modelos antes mencionados. El modelo genérico de la celda de combustible combina características del modelo

eléctrico y electroquímico, y se puede utilizar a partir de los datos generales de la celda de combustible o stack, sin embargo, este modelo solo reproduce de forma precisa las dos primeras regiones de polarización.

Para obtener la respuesta eléctrica de la celda de combustible a partir de su modelo electroquímico se tuvieron que realizar algunas modificaciones a este modelo y se propusieron algunas equivalencias provenientes de la teoría de funcionamiento de la celda, de este modo solo se requiere de la información proporcionada por el fabricante para aplicar el modelo electroquímico. De acuerdo con el modelo de la celda de combustible obtenido en este trabajo, se puede concluir que es posible generar el comportamiento eléctrico de la celda sin contar con todos los datos específicos del stack de celdas de combustible o celda.

De los resultados de simulación se puede concluir que los dos modelos propuestos en este trabajo son adecuados toda vez que las respuestas son muy similares a las obtenidas usando el bloque “fuel cell stack” de simulink.

Finalmente, en referencia al emulador se concluye que la fuente de voltaje de corriente directa programable es una buena opción para la emulación, ya que le es posible seguir fiablemente el comportamiento de la celda de combustible, además, se concluyó que el modelo electroquímico es una mejor opción para la emulación ya que permite observar su comportamiento eléctrico ante variaciones de temperatura de forma instantánea.

Bibliografía

- [1] Abraham Gebregergis and Pragasen Pillay. Implementation of fuel cell emulation on dsp and dspace controllers in the design of power electronic converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, pages 285–294, month 2010.
- [2] Fuel Cell Store. Stack 20 w, 2015. Distributor.
- [3] Ye Qiang, Cui Hengbin, and Deng Mingli. Design of a 100w fuel cell test system. In *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pages 1–4, March 2010.
- [4] Juan E. Tibaquirá and Jonathan D. Posner. Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et Technica*, 2009.
- [5] James Larminie and Andrew Dick. *Fuel Cell Systems Explained*. WILEY, 2^a edition, 2003.
- [6] Jinfeng Wu Jianlu Zhang, Huamin Zhang and Jiujun Zhang. *PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis*. Elsevier, 2013.
- [7] Juan Carlos Ruiz Morales, Juan Peña Martínez, David Marrero López, and D. Pérez Coll. Pilas de combustible. *Dialnet*, (3), Septiembre 2006.
- [8] F. Herb, P. R. Akula, K. Trivedi, L. Jandhyala, A. Narayana, and M. Wöhr. Theoretical analysis of energy management strategies for fuel cell electric vehicle

-
- with respect to fuel cell and battery aging. In *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, pages 1–9, Nov 2013.
- [9] M. A. Rahman, M. H. Shawon, S. K. Ghosh, and Md. Ariful Hoque Sojib. Stability enhancement of fuel cell generation system including dvr. In *2014 International Conference on Informatics, Electronics Vision (ICIEV)*, pages 1–5, May 2014.
- [10] M. Becherif, D. Hissel, and S. Gaagat. Electrical equivalent model of a proton exchange membrane fuel cell with experimental validation. *Renewable Energy*, 36(10):2582 – 2588, 2011. Renewable Energy: Generation and Application.
- [11] R. Glises, D. Hissel, F. Harel, and M.C. Péra. New design of a pem fuel cell air automatic climate control unit. *Journal of Power Sources*, 150(Supplement C):78 – 85, 2005.
- [12] M. A. El-Sayed and A. M. Sharaf. A novel stabilization dynamic filter scheme for fuel cell utilization system. In *2009 IEEE Electrical Power Energy Conference (EPEC)*, pages 1–8, Oct 2009.
- [13] Caisheng Wang, M. H. Nehrir, and S. R. Shaw. Dynamic models and model validation for pem fuel cells using electrical circuits. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(2):442–451, June 2005.
- [14] Melika Hinaje, Stéphane Raël, Panee Noiying, Dinh An Nguyen, and Bernard Davat. An equivalent electrical circuit model of proton exchange membrane fuel cells based on mathematical modelling. *Energies*, 5(8):2724–2744, 2012.
- [15] Shiang-Wuu Perng, Horng-Wen Wu, Tswen-Chyuan Jue, and Kuo-Chih Cheng. Numerical predictions of a pem fuel cell performance enhancement by a rectangular cylinder installed transversely in the flow channel. *Applied Energy*, 86(9):1541 – 1554, 2009.
-

-
- [16] Woojin Choi, Jo.W. Howze, and Prasad Enjeti. Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current. *Journal of Power Sources*, 158(2):1324 – 1332, 2006.
- [17] Souleman Njoya, Oliver Tremblay, and Louis-A. Dessaint. A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles. In *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pages 1722–1729, Sept 2009.
- [18] S. Caux, W. Hankache, M. Fadel, and D. Hissel. Pem fuel cell model suitable for energy optimization purposes. *Energy Conversion and Management*, 51(2):320 – 328, 2010.
- [19] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld. Polymer electrolyte fuel cell model. *J. Electrochemical*, 138(8):2334 – 2342, 1991.
- [20] Ryan O’hayre, Suk-Won Cha, Whitney G. Colella, and Fritz B. Prinz. *Fuel Cell Fundamentals*. WILEY, 3^a edition, 2016.
- [21] Shan Jia and Hongtan Liu. Direct measurement of lateral current density distribution in a pem fuel cell with a serpentine flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(3):1449 – 1456, 2014.
- [22] Giuseppe Marsala, Marcello Pucci, Gianpaolo Vitale, Maurizio Cirrincione, and Abdellatif Miraoui. A prototype of a fuel cell pem emulator based on a buck converter. *Applied Energy*, 86(10):2192 – 2203, 2009.
- [23] N. A. Parker-Allotey, A. T. Bryant, and P. R. Palmer. The application of fuel cell emulation in the design of an electric vehicle powertrain. In *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, pages 1869–1874, June 2005.
- [24] V Boscaino, G Capponi, and F Marino. Fpga implementation of a fuel cell emulator. In *SPEEDAM 2010*, pages 1297–1301, June 2010.
-

-
- [25] W. David Verry. Dc-dc converter topology in a 5kw pem fuel cell. *2014 IEEE 36th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, pages 1–8, Sept 2014.
- [26] Alfredo Iranzo, Miguel Muñoz, Eduardo López, Javier Pino, and Felipe Rosa. Experimental fuel cell performance analysis under different operating conditions and bipolar plate designs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20):11437 – 11447, 2010. Hyceltec 2009 Conference.
- [27] Hinaje Melika, Raël Stéphane, Noiying Panee, Nguyen Dinh An, and Davat Bernard. An equivalent electrical circuit model of proton exchange membrane fuel cells based on mathematical modelling. *Energies*, 5(8):2724, 2012.
- [28] M. Becherif, D. Hissel, S. Gaagat, and M. Wack. Current density and catalyst-coated membrane resistance distribution of hydro-formed metallic bipolar plate fuel cell short stack with 250 cm² active area. *Journal of Power Sources*, 301(10):2582 – 2588, 2011.
- [29] Mathias Reum. Sub-millimeter resolved measurement of current density and membrane resistance in polymer electrolyte fuel cells (pefc). *SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH*, pages 26–34, 2008.
- [30] J.J. Hwnag, W.R. Chang, R.G. Peng, P.Y. Chen, and A. Su. Experimental and numerical studies of local current mapping on a {PEM} fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(20):5718 – 5727, 2008.
- [31] F. Laurencelle, R. Chahine, J. Hamelin, K. Agbossou, M. Fournier, T. K. Bose, and A. Laperrière. Characterization of a ballard mk5-e proton exchange membrane fuel cell stack. *Fuel Cells*, 1(1):66–71, 2001.

Anexo 1: Artículos

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis se produjeron dos artículos.

El primero se titula: “*Simulación y Emulación de un Stack de Celdas de Combustible de 20 W Mediante una Fuente Programable*”. Este artículo se presentó en el Foro ROC&C 2017 y se publicará en sus memorias con ISBN: 978-607-95630-3-5.

El segundo titulado “*Emulación de un Stack de Celda de Combustible PEM a Partir de Su Modelo Electroquímico Simplificado Mediante una Fuente Programable*” se envió al XIV Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET 2018) y aún se encuentra en proceso de evaluación.

Los artículos completos se muestra a continuación en el orden que fueron mencionados:

Simulación y Emulación de un Stack de Celdas de Combustible de 20 W Mediante una Fuente Programable

Nayeli I. Hernández Zárata¹, Beatriz E. Graniel García², Gerardo Mino Aguilar³ y Edgar Peralta Sánchez⁴

Facultad de Ciencias de la Electrónica
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Av. Sn. Claudio y 18 Sur, 72000 Puebla, Puebla

¹nayeli.hernandezza@alumno.buap.mx

²beatriz.graniel@correo.buap.mx

³gmino44@gmail.com

⁴edgarps@ieee.org

Resumen - El objetivo de este trabajo es generar una herramienta de desarrollo que permita realizar implementaciones de aplicaciones de una celda de combustible sin necesidad de invertir demasiado tiempo en el entendimiento del funcionamiento de la misma. En este artículo se presenta la simulación y emulación de un stack de celdas de combustible tipo PEM de 20 W. La simulación se realiza en MATLAB y el perfil I-V obtenido es usado por el sistema de emulación que está basado en una fuente de voltaje programable. Mediante LabVIEW se realiza una interfaz gráfica de usuario para monitorear y controlar la fuente de voltaje programable. Con este método no se requiere conocer los modelos y parámetros detallados de la celda, siendo la principal contribución de este trabajo. Se presentan resultados de simulación y emulación de la celda de combustible.

Índice de Términos – Celda de combustible, emulación, stack

I. INTRODUCCIÓN

LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE SON fuentes alternas de energía que han ganado popularidad en los últimos años, esto se debe a su baja o nula generación de desechos contaminantes y a su buena eficiencia (62% - 83%) [1]. Existen diferentes tipos de celdas de combustible, entre las cuales se encuentran las alcalinas (AFC), de metanol directo (DMFC), de ácido fosfórico (PAFC), de carbonato fundido (MCFC), de óxido sólido (SOFC) y de membrana de intercambio protónico (PEMFC) [2], sin embargo, esta última es la más utilizada ya que se puede utilizar en aplicaciones de baja a mediana potencia (0.5 W - 1 MW) y usa como combustible hidrógeno y oxígeno (aire).

La PEMFC es un dispositivo electroquímico que convierte energía química en eléctrica de forma directa [3], mediante una reacción conocida como óxido-reducción (redox). En general una celda de combustible tipo PEM, consta de un ensamble membrana electrodo (MEA), el cual contiene el ánodo y el cátodo separados por la membrana de intercambio protónico (PEM), esta membrana sirve

como electrolito y ayuda a conducir los protones del ánodo al cátodo como se muestra en la figura 1. Durante la operación de la PEMFC, el combustible, en este caso hidrógeno, es oxidado electroquímicamente dentro de la capa catalizadora (CL) del ánodo produciendo tanto protones como electrones. Los protones son transportados al cátodo a través de la membrana, mientras que los electrones pasan a través del circuito externo conectado entre el ánodo y cátodo de la PEMFC. Los electrones y protones se combinan con el oxidante, en este caso el oxígeno del aire, dentro de la capa catalizadora del cátodo, produciendo tanto agua como calor (reacción exotérmica) [1].

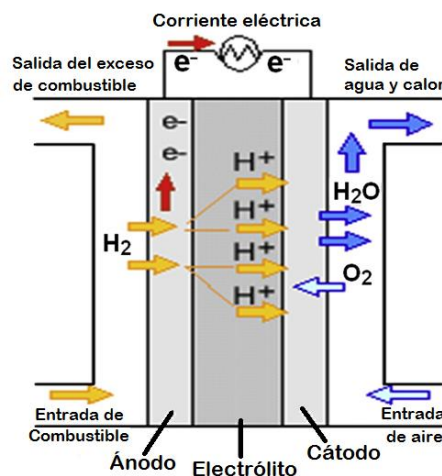


Figura 1. Esquemático de la celda de combustible PEM [4]

El proceso de conversión de energía realizado por la PEMFC se describe y modela mediante un grupo de ecuaciones electroquímicas, tales como la entalpía, la energía libre de Gibbs, ecuaciones de Nernst, pendiente de Tafel, entre otras. Estas describen las reacciones que se llevan a cabo dentro de la celda de combustible e involucran diferentes parámetros de la celda de combustible, tales como la concentración de los gases, presión de suministro de los gases (hidrógeno y oxígeno), temperatura de operación, área activa de la celda, cantidad de humeado, coeficientes de los materiales con el que está hecho la MEA, entre otros parámetros. En los trabajos de investigación en los que se quieren obtener nuevos materiales para la membrana de intercambio protónico

el modelo electroquímico resulta muy útil, sin embargo, cuando la investigación se concentra en desarrollar una aplicación en la que se quiere usar la celda de combustible como fuente de alimentación este tipo de modelos es demasiado complicado e incompatible con el sistema, por lo que no es posible realizar la simulación del mismo, para poder llevar a cabo la simulación de la implementación de un stack de celdas de combustible con un sistema eléctrico o electrónico, se requiere de un circuito equivalente de la celda de combustible como el obtenido por Caisheng Wang et al. [5] o el de Woojin Choi et al. [6], sin embargo, para obtener los valores de algunas resistencias y capacitancias involucradas en el circuito eléctrico se requiere de la realización de pruebas al stack que se va a utilizar, lo cual no siempre es deseable ya que no se cuenta con el stack de celdas de combustible o con el equipo para probarlas. Como una alternativa para la simulación de la celda de combustible está el bloque fuel cell stack de simulink/MATLAB, el cual está basado en el modelo de celda descrito en [7], este modelo permite llevar a cabo la simulación de la celda a partir de parámetros proporcionados por la hoja de especificaciones de una celda de combustible comercial.

Una vez que se desarrolló el prototipo en el que se utilizará la celda de combustible como fuente de alimentación, se requiere de una serie de pruebas con el fin de corregir errores y verificar que el comportamiento del prototipo sea el deseado, probar el prototipo con el stack de celdas de combustible no siempre es recomendado, ya que, las celdas de combustible son dispositivos costosos que si no se trabajan bajo las condiciones adecuadas de operación pueden dañarse, también existe la posibilidad de no contar con el sistema necesario para echar a andar la celda de combustible, por lo que en ocasiones se requiere de la emulación del comportamiento eléctrico de las celdas de combustible o stack, comercialmente existen algunos sistemas de Hardware In the Loop, como dSPACE que ya cuentan con un modelo de la celda de combustible, sin embargo este tipo de sistemas es muy costoso y adquirirlo con el único fin de emular la celda de combustible sería un desperdicio de recursos, En algunos trabajos de investigación se ha llevado a cabo la emulación de la celda de combustible, como el de [8] en el que realiza la emulación de una celda de combustible a partir de un convertidor Buck y el de [9] en el que la emulación se hace a partir de una FPGA. Sin embargo, en ambos trabajos los autores llevan a cabo la descripción de un modelado, que como vimos anteriormente puede llegar a ser demasiado complicado y no siempre se cuenta con los parámetros necesarios.

El objetivo de este trabajo es mostrar que es posible obtener una emulación de una celda de combustible o stack de forma más simple, rápida y sin necesidad de conocer a detalle todos los parámetros de la celda de combustible, esto se logrará a partir del perfil eléctrico de la celda de combustible o stack. En general, el comportamiento de la celda de combustible se puede describir mediante su perfil de voltaje contra corriente (I-V), como el que se muestra en la figura 2. El perfil de I-V tanto de las celdas como de los stacks de celdas de combustible tiene la misma forma, aunque difieren en magnitudes dependiendo de la capacidad de estas, sin embargo, en dicha gráfica se puede observar las cuatro regiones de pérdida de voltaje. (i) pérdida de voltaje de circuito abierto (OCV) causada por el cruce de hidrógeno que pasa por la membrana del ánodo al cátodo y el potencial mixto que se genera en el cátodo, (ii) pérdida de activación que es la pérdida causada por la lenta cinética de la reacción, (iii) pérdida Óhmica que es la pérdida causada por la resistencia de la membrana, y (iv) pérdida por transferencia de masa que es la pérdida causada por el cambio en la concentración de los reactantes conforme el combustible es utilizado y a la dificultad de mover los productos fuera de los sitios de reacción [4].

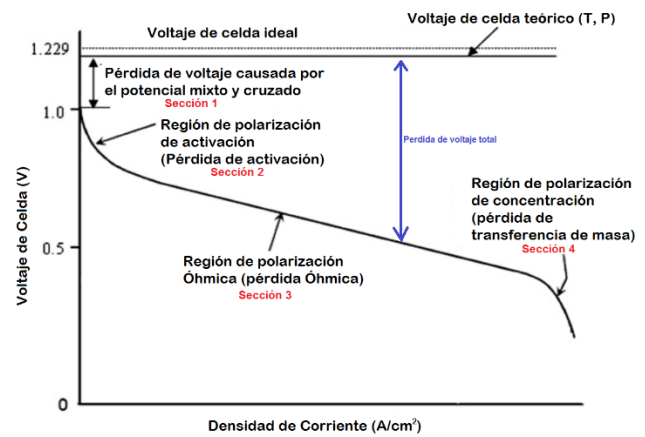


Figura 2. Curva I-V de la celda de combustible PEM [4]

II. DESARROLLO

Para la emulación de la celda de combustible se requiere del perfil eléctrico de la celda de combustible, en este caso se escogió una celda de combustible de 20 W de la cual se obtuvo su perfil eléctrico o perfil I-V, para obtener dicho perfil se realizó en simulink/MATLAB la simulación de esta celda de combustible y los datos obtenidos se utilizaron para poder programar dicho perfil a la fuente de voltaje de corriente directa programable. En las siguientes secciones se describe de forma detallada cada uno de los procedimientos mencionados anteriormente.

A. Stack de Celdas de Combustible

Un stack de celdas de combustible es un arreglo de celdas de combustible conectadas en serie mediante platos bipolares, la formación del stack se realiza con la finalidad de obtener mayor potencia eléctrica [10].

En este caso se decidió emular un stack de celdas de combustible de 20 W, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 1 que en conjunto con el perfil de la figura 3, nos permite obtener los datos necesarios para la simulación.

TABLA 1
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL STACK A SIMULAR

Parámetro	Valor
Tipo de celda de combustible	PEM
Número de celdas	10
Potencia nominal	20 W
Rendimiento	6 V @ 3.4 A
Reactantes	Hidrógeno y aire
Temperatura externa	5 – 40 °C
Temperatura de operación	60 °C
Presión del hidrógeno	0.45 – 0.55 bar
Presión del Aire	2.5 bar
Pureza del Hidrógeno	99.995% de H ₂
Razón de flujo nominal del aire	0.25 lpm
Eficiencia nominal del stack	40%

La figura 3 muestra el perfil de corriente contra voltaje y de corriente contra potencia del stack de 20 W, ambas graficas están sobrepuestas con la finalidad de poder localizar el Punto de Operación Nominal (PON), que es el punto en el que el perfil de potencia se junta con el de voltaje, en dicha figura también se puede apreciar el Punto de Operación Máximo (POM) que es el punto de potencia máxima.

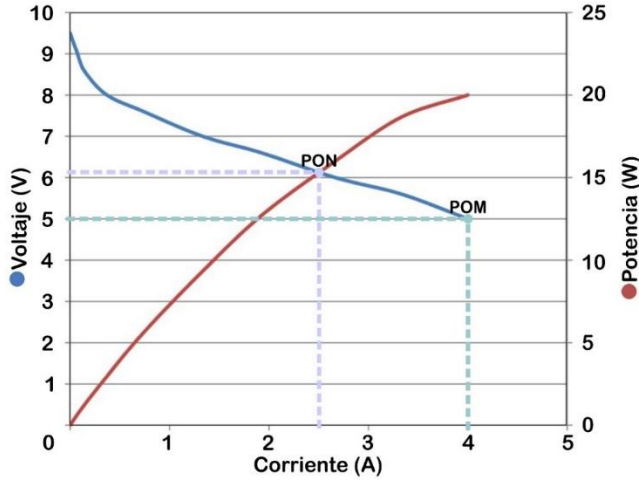


Figura 3. Curva I-V y I-P del stack de celdas de combustible PEM de 20 W

B. Simulación y Procesamiento

La simulación de la celda de combustible se realizó a partir del bloque *fuel cell stack* de simulink/MATLAB, este bloque está basado en el modelo de celda de combustible descrito en [7], el cual toma en cuenta las pérdidas por activación, pérdidas óhmicas y pérdidas por transferencia de masa y se describe principalmente por (1) y (2).

$$E = E_{oc} - N A \ln \left(\frac{i_{fc}}{i_0} \right) \cdot \frac{1}{s \frac{T_d}{3} + 1} \quad (1)$$

$$V_{fc} = E - R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (2)$$

Donde

E_{oc} = Voltaje de circuito abierto [V].

N = número de celdas.

A = pendiente de Tafel [V].

i_0 = corriente de intercambio [A].

T_d = tiempo de respuesta [s].

R_{ohm} = resistencia interna [Ω].

i_{fc} = corriente de la celda de combustible [A].

V_{fc} = voltaje de la celda de combustible [V].

En (1) las pérdidas por activación se representan por $N A \ln(i_{fc}/i_0)$, las pérdidas por transferencia de masa se describen por $1/(sT_d/3 + 1)$ y en (2) se describen las pérdidas óhmicas como $R_{ohm} \cdot i_{fc}$ [11].

Para realizar la simulación del stack de 20 W se requirió de los parámetros proporcionados por el fabricante y mencionados en la sección II. A, que se muestran en la tabla 2.

TABLA 2
PARÁMETROS REQUERIDOS POR EL BLOQUE FUEL CELL STACK

Parámetro	Valor	
Voltaje en 0 A	9.6 V	
Voltaje en 1 A	7.35 V	
Corriente en PON	2.5 A	
Voltaje en PON	6.1 V	
Corriente en POM	4 A	
Voltaje en POM	5 V	
Número de celdas	10	
Eficiencia nominal del stack	40%	
Temperatura de operación	60 °C	
Razón de flujo nominal del aire	0.25 lpm	
Presión nominal del hidrógeno	0.50 bar	
Presión nominal del aire	2.5 bar	
Composición nominal del hidrógeno	99.995%	
Composición nominal del aire	Oxígeno	21%
	Agua (humedad)	0.5%

La simulación del stack de celda de combustible se realizó con la finalidad de obtener cada uno de los valores que conforman su perfil I-V y así poder generar un perfil para programarlo en la fuente de voltaje de corriente directa, por lo que en la simulación el stack de celdas de combustible se conectó a un convertidor Boost el cual opera a voltaje de salida constante con un valor que es igual al voltaje de circuito abierto del stack (11.7 V en este caso), obligando a la celda a recorrer su perfil I-V, el diagrama de esta simulación se muestra en la figura 4.

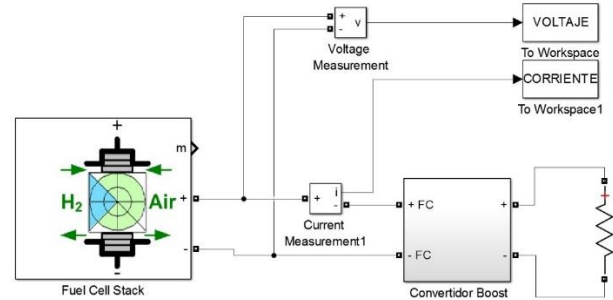


Figura 4. Diagrama de simulación en simulink/MATLAB del stack de celdas de combustible de 20 W

De la simulación se obtuvo el perfil I-V del stack de 20 W mostrada en la figura 5, en esta figura podemos apreciar las regiones de polarización de concentración, óhmica y de activación. Estas tres regiones son separadas y se modelan independientemente mediante una aproximación polinomial usando MATLAB, se eligieron polinomios de grados pequeños que podamos programar fácilmente y no consuman altos recursos computacionales.

Como resultado del procesamiento de los datos obtenidos tenemos que cuando $i \leq 0.8 A$, es decir cuando se encuentre en la región de polarización de activación, el voltaje en esta región estará dado por

$$V = 5.8543 i^4 - 17.6231 i^3 + 17.9995 i^2 - 8.8100 i + 9.6235 \quad (3)$$

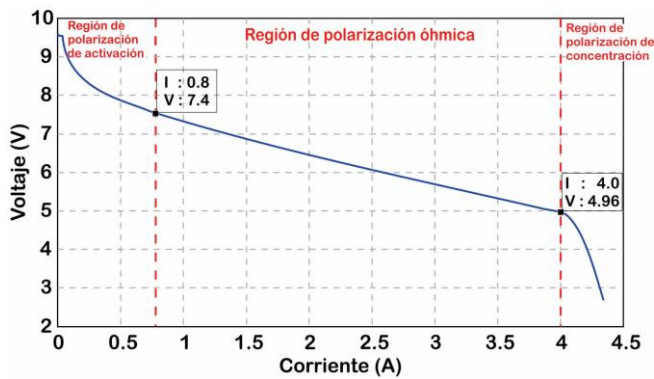


Figura 5. Curva I-V obtenida de la simulación

Cuando $0.8 A < i < 4 A$ (región de polarización óhmica) el voltaje estará dado por

$$V = 0.0074 i^3 + 0.0856 i^2 - 1.0517 i + 8.2706 \quad (4)$$

Y cuando $i \geq 4 A$ (región de polarización de concentración) el voltaje será

$$V = -17.1348i^2 + 136.1080 i - 265.303 \quad (5)$$

La figura 6 muestra la gráfica I-V original y sus tres aproximaciones polinomiales sobrepuestas, como podemos ver la aproximación es muy cercana a la señal original, sin embargo, no es idéntica, especialmente en la región de polarización de activación.

C. Programación de la Fuente de Corriente Directa

La fuente de corriente directa programable que se utilizó para realizar la emulación de la celda de combustible es una fuente de voltaje de 15 kW de corriente directa de TDK-Lambda modelo GEN 400-37.5. Esta fuente se puede controlar de forma remota mediante un puerto de comunicación serial (RS232), el fabricante proporciona los controladores y las librerías necesarias para poder llevar a cabo la programación de la fuente en LabVIEW.

Para comenzar con la programación en el entorno de LabVIEW, se requiere verificar que la comunicación entre PC y fuente se lleve a cabo correctamente, esto se hace con el VI "GENser Initialize", una vez que este bloque ha confirmado la comunicación, permite que los demás VIs entren en funcionamiento, el VI "GENser Config Output On-Off" permite que la salida de la fuente pueda ser activada o desactivada, el VI "GENser Meas Output Voltage" mide el voltaje en la salida de la fuente, el VI "GENser Meas Output Current" mide la corriente a la salida de la fuente y los VIs "GENser Config Voltage Limit" y "GENser Config Current Limit", limitan el nivel de voltaje y corriente respectivamente a la salida de la fuente según se indique.

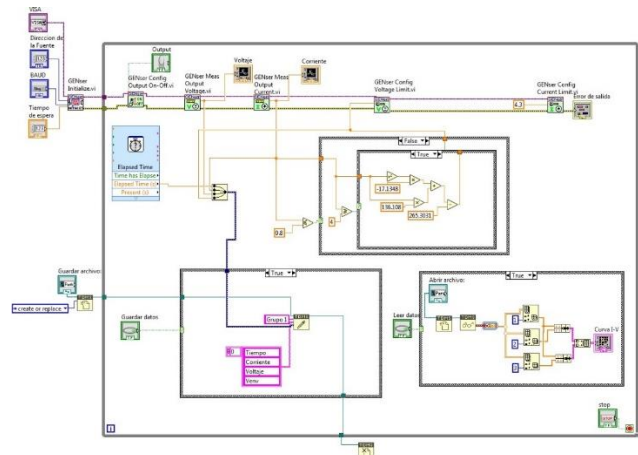


Figura 7. Diagrama a bloques del programa de emulación de la celda de combustible en LabVIEW.

Para llevar a cabo la emulación de la celda de combustible se tomó el valor de la corriente medida por el VI "GENser Meas Output Current" para variar el valor del voltaje según las regiones y los polinomios determinados en la sección 2.2, el valor del voltaje en función de la corriente medida, se mandó al VI "GENser Config Voltage Limit", mientras que en "GENser Config Current Limit" solo se limitó la corriente al último valor obtenido de la simulación (4.3 A), ya que la corriente en la salida de la fuente dependerá de la carga que tenga

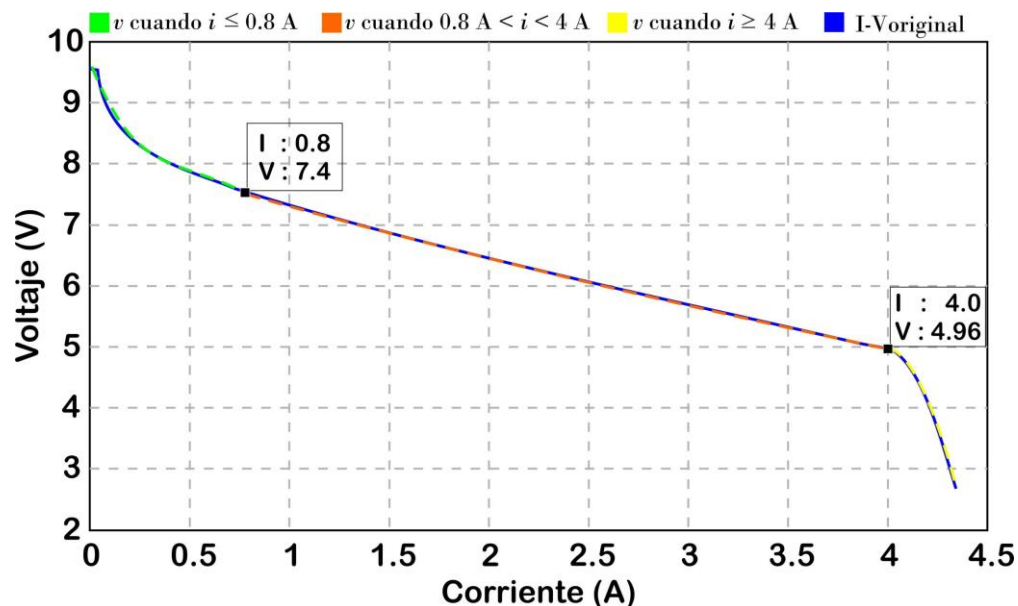


Figura 6. Curva I-V obtenida de la simulación y sus aproximaciones polinomiales

conectada, en este caso se utiliza una carga electrónica para llevar a cabo la variación de corriente y los datos de corriente y voltaje medidos a la salida de la fuente se pueden observar en una gráfica, estos datos también son guardados para después mostrar el perfil de I-V, la figura 7 muestra el diagrama a bloques del programa de emulación de la celda de combustible mientras que la figura 8 muestra el sistema de prueba utilizado.

En el panel frontal mostrado en la figura 8, se indican los datos necesarios (dirección, BAUD, etc.) para realizar la comunicación con la fuente de CD, también se debe indicar el lugar en donde se guardarán y leerán los datos obtenidos, durante la emulación se grafica en tiempo real la corriente y el voltaje a la salida de la fuente de CD y se guardan dichos datos para posteriormente desplegarlos en su forma de I-V.

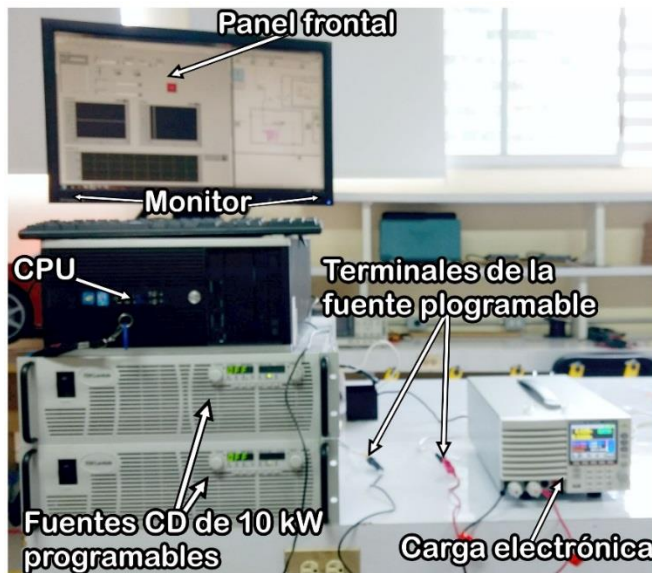


Figura 8. Sistema de prueba

D. Resultados

Como resultado de este trabajo se obtuvo el comportamiento mostrado en la figura 9, en esta se observa el voltaje medido a la salida de la fuente representada por la línea blanca, también se observa el valor ideal obtenido de los polinomios (perfil I-V del stack) representados por la línea roja, como podemos observar, el valor del voltaje a la salida de la fuente es muy cercano al valor calculado por los polinomios de cada región, sin embargo, a la fuente le es difícil igualar los valores en las regiones con pendientes pronunciadas. En la figura 9 se logran observar las tres regiones de polarización del stack emulado, la región de polarización de concentración se encuentra cuando $i < 0.8 A$, la región de polarización óhmica está en $0.8 A < i < 4.1 A$ y por último la región de polarización de concentración aparece cuando $i > 4.1 A$.

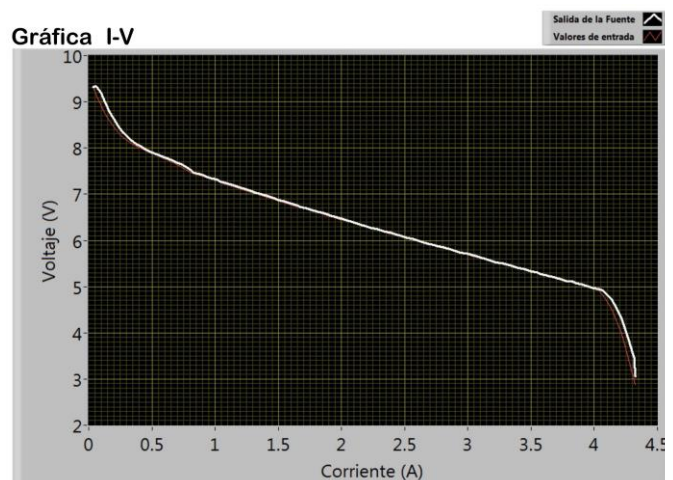


Figura 9. Gráfica de I-V obtenida a la salida de la fuente de CD

III. CONCLUSIONES

Es posible realizar la emulación de una celda de combustible a partir de su perfil I-V y sin necesidad de requerir de un modelo complejo. El procesamiento de los datos obtenidos a partir de la simulación es simple, rápido, y nos evita la complejidad de tener que adaptar un modelo de la celda de combustible al hardware y entorno de programación que se esté utilizando, esto permite que el proceso de emulación sea rápido y disminuya el uso de memoria y procesamiento.

Este tipo de emulación simplifica el trabajo en las pruebas para aplicaciones de la celda de combustible, ya que el desarrollador no tendrá que conocer de forma detallada el comportamiento de la celda de combustible, simplemente podrá trabajar con un perfil específico y adaptarlo a sus necesidades específicas, permitiéndole concentrarse en la aplicación y no en la celda de combustible que alimentará dicha aplicación.

REFERENCIAS

- [1] Larminie James y Dicks Andrew, "Fuel Cell Systems Explained", Segunda edición, John Wiley & Sons, pag. 33, ISBN> 0-47084857-X, 2003.
- [2] Alrewoq M. y Albarbar A., "Investigation Into The Characteristics Of Proton Exchange Membrane Fuel Cell-Based Power System", ET Science, Measurement & Technology, vol. 10, no. 3, pag. 200-206, 2016.
- [3] Derbeli Mohamed, Farhat Maissa, Barambones Oscar y Sbita Lassaad, "Fuel Cell Power System Using Sliding Mode and Super-twisting Algorithms", International Journal of Hydrogen Energy, no. 13, vol. 42, pag. 8833 – 8844, 2017
- [4] Jianlu Zhang J. W., Huamin Zhang y Zhan J., "PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis", Elsevier, pag. 2, 23-24, 2013.
- [5] Wang Caisheng, Nehrir Hashem y Shaw Steven R., "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits", IEEE Power Engineering Society General Meeting, pag. 2115, Vol. 3, 2005
- [6] Choi Woojin, Enjeti Prasad y Howze J.W., Development of an equivalent circuit model of a fuel cell to evaluate the effects of inverter ripple current, Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, vol. 1, pag. 355-361, 2004

- [7] Souleman Njoya M., Olivier Tremblay y Louis-A. Dessaint, "A Generic Fuel Cell Model for the Simulation of Fuel Cell Power Systems", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pag. 1722-1729, 2009.
- [8] Marsala Giuseppe, Pucci Marcello, Vitale Gianpaolo, Cirrincione Maurizio y Miraoui Abdellatif, "A Prototype of a fuel cell emulation based on a buck converter", Applied Energy, Elsevier, vol. 86, pag. 2192-2203, 2009
- [9] Boscaiono V., Capponi G. y Marino F., "FPGA implementation of a fuel cell emulation", International Symposium on Power Electronic, Electrical Drives, Automation and Motion, IEEE, pag. 1297-1301, 2010
- [10] Waller M. G., Walluk M. R. y Trabold T. A., "Design of an integrated propane fuel reformer and fuel cell system for unmanned aerial system (UAS) applications", 2016 IEEE Systems and Technologies for Remote Sensing Applications Through Unmanned Aerial Systems (STRATUS), Rochester, NY, pag. 1-4., 2016.
- [11] Zhou D., Wu Y., Gao F., Breaz E., Ravey A., Miraoui A, Degradation Prediction of PEM Fuel Cell Stack Based on Multi-Physical Aging Model with Particle Filter Approach, no.99, 2017.



Beatriz Eugenia Graniel García. Es Doctora en Ingeniería Química por la Universidad de Manchester, UK. Actualmente se desempeña como Profesor Investigador en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la "Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, BUAP".



Edgar Peralta Sánchez (S'99—M'05), obtuvo el título de Licenciado en Electrónica por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, el grado de Maestro en Ciencias Por la Universidad de las Américas Puebla, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Manchester en Inglaterra. Actualmente se desempeña como Profesor Investigador en la Facultad de Ciencias de la Electrónica, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

Autores



Nayeli I. Hernández Zárate en 2017 recibió el grado de licenciatura en electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), actualmente estudia en la Maestría en Ingeniería Electrónica, Opción Instrumentación Electrónica de BUAP.



Gerardo Mino Aguilar estudió su Licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), México en 1995. Obtuvo la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en la Universidad de las Américas Puebla, México y estudió un doctorado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de 2002 a 2006 en la Universidad Politécnica de Cataluña. Ha sido investigador y profesor desde 2002 a la fecha. Desde octubre de 2014 hasta la

actualidad, se desempeña como jefe de la Oficina de Estudios de Investigación y Postgrado en la Facultad de Ciencias Electrónicas de BUAP. Además, es el jefe de Sistemas Electrónicos de Potencia para control de movimiento, calidad de energía y generación de energía por fuentes renovables, y el jefe del área de electrónica de potencia.

Emulación de un Stack de Celda de Combustible PEM a Partir de Su Modelo Electroquímico Simplificado Mediante una Fuente Programable

N. I. Hernández ^a, B. E. Graniel ^b, G. Mino ^c, E. Peralta ^d

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencia de la Electrónica

^a *nayeli.hernandezza@alumno.buap.mx*, ^b *beatriz.graniel@correo.buap.mx*, ^c *gmino44@gmail.com*, ^d *edgarps@ieee.org*

Resumen—En este artículo se presenta la emulación de un stack de celdas de combustible a partir de un modelo electroquímico simplificado y se explica cómo obtener los parámetros requeridos por el modelo, solo con los datos que el fabricante proporciona. Se muestran los resultados obtenidos por el modelo y se explica el funcionamiento del sistema de emulación, el cual se basa en una fuente de corriente directa programable en LabVIEW. El sistema de emulación aquí propuesto permite reproducir el comportamiento de un stack o celda de combustible sin necesidad de realizar pruebas a la celda de combustible real.

Palabras clave. Celda de combustible, emulación, stack

1. Introducción

En los últimos años los altos niveles de contaminación ambiental y la escasez de combustibles fósiles han generado un fuerte interés por los sistemas de generación de energía alternativos tales como las celdas de combustible, que debido a buena eficiencia (62% – 83% [1]) y baja o nula emisión de sustancias contaminantes, así como su tamaño relativamente reducido permite su implementación en sistemas de transportación, no obstante, también pueden ser utilizadas en aplicaciones estacionarias. Existen distintos tipos de celda de combustible, sin embargo, en este trabajo solo nos enfocaremos en la celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC). La PEMFC es uno de los tipos de celdas de combustible más utilizadas ya que se alimenta con hidrógeno y oxígeno (elementos muy abundantes y fáciles de conseguir) y además que solo genera agua como residuo.

La PEMFC es un sistema de generación de energía, que transforma energía química en energía eléctrica de forma directa, mediante una reacción de oxidación-reducción [2], en general una celda de combustible tipo PEM, consta de un ensamble membrana electrodo (MEA), el cual contiene el ánodo y el cátodo separados por la membrana de intercambio protónico (PEM), esta membrana sirve como electrolito y ayuda a conducir los protones del ánodo al cátodo como se muestra en la fig. 1. Durante la operación de la PEMFC, el combustible, en este caso hidrógeno, es oxidado electroquímicamente dentro de la capa catalizadora (CL) del ánodo produciendo tanto protones como electrones. Los protones son transportados al cátodo a través de la membrana, mientras que los electrones pasan a través del circuito externo conectado entre el ánodo y cátodo de la PEMFC. Los electrones y protones se combinan con el oxidante, en este caso el oxígeno del aire, dentro de la capa catalizadora del cátodo, produciendo tanto agua como calor (reacción exotérmica) [3].

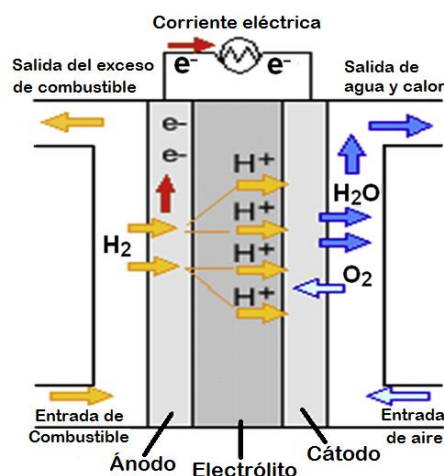


Fig 1. Esquemático de la celda de combustible PEM [4]

Aunque la celda de combustible tiene muchas ventajas, aún no se implementan o utilizan de forma masiva, esto se debe principalmente a su costo elevado, el cual puede llegar a ser hasta de \$19000.00 (US), además la celda de combustible requiere de sistemas auxiliares tales como sistema de alimentación de gases, controlador de temperatura y humedad, reguladores de presión, entre otros [4-6]. Todos estos sistemas son necesarios para que la celda de combustible opere de forma apropiada y se obtenga la mejor eficiencia posible de ella, ya que de operar en condiciones poco favorables la MEA podría llegar a dañarse reduciendo la eficiencia de la celda y su vida útil e incluso podría llegar a romperse, provocando la necesidad de reemplazarla por una nueva lo cual también es costoso ya que la MEA generalmente está construida de platino y una sola MEA podría llegar a costar hasta \$173.00 (US).

Con la finalidad de evitar el desperdicio de recursos y facilitar y promover el uso e implementación de la celda de combustible se proponen emular el comportamiento de la celda de combustible. Ya que generalmente, una vez que se desarrolló el prototipo en el que se utilizará la celda de combustible como fuente de alimentación, se requiere de una serie de pruebas con el fin de corregir errores y verificar que el comportamiento del prototipo sea el deseado, y como se mencionó anteriormente probar el prototipo con la celdas de combustible no siempre es recomendado, ya que pueden dañarse, también existe la posibilidad de no contar con el sistema necesario para echar a andar la celda de combustible, por lo que en ocasiones se requiere de la emulación del

comportamiento eléctrico de la celdas de combustible o stack, comercialmente existen algunos sistemas de Hardware In the Loop, como dSPACE que ya cuentan con un modelo de la celda de combustible, sin embargo este tipo de sistemas es muy costoso y adquirirlo con el único fin de emular la celda de combustible sería un despreejo de recursos.

En la literatura se han reportado algunos sistemas de emulación de la celda de combustible, generalmente estos sistemas están basados en convertidores CC-CC como en [7] en el que se usa un convertidor Buck y en [8] en el que se aplica una emulación de celda de combustible para un vehículo eléctrico, los emuladores suelen ser controlados por DSPs o FPGAs, en cuyo caso el diseño del modelo de la celda de combustible debe ser orientado al dispositivo en cuestión [9]. En el caso en el que se utiliza un convertidor CC-CC, la complejidad del sistema de emulación aumenta, ya que, no solo se debe modelar la celda, además también se debe diseñar el convertidor y considerar la respuesta eléctrica de este.

Un sistema de emulación se puede obtener de diversas formas según la necesidad de cada aplicación e investigador. En este trabajo se presenta un sistema de emulación de celda de combustible en el que se utiliza como hardware una fuente de corriente directa programable y se realiza la descripción del modelo electroquímico de la celda de combustible en el entorno de programación de LabVIEW, mediante los cuales se logra obtener la respuesta eléctrica de la celda de combustible.

2. Desarrollo del sistema de emulación de la PEMFC

Para desarrollar el sistema de emulación de la PEMFC aquí presentado, se utilizó el modelo electroquímico de la celda de combustible y se busco obtener cada uno de los parámetros requerido por este modelo solo con los datos que generalmente se encuentran en una hoja de especificaciones de un stack o celda de combustible PEM. Los datos que generalmente proporciona el fabricante son los siguientes:

- Curva I-V.
- Curva I-P.
- Potencia nominal.
- Temperatura de operación.
- Presión nominal de hidrógeno.
- Composición del hidrógeno.
- Numero de celdas que conforman el stack.
- Área específica.

A. Modelo electroquímico de la celda de combustible

El modelo electroquímico que se presenta a continuación es un modelo simplificado de la celda de combustible. Como generalmente se presenta en muchos trabajos de investigación el voltaje de la celda de combustible estará dada por el voltaje de Nernst y todas sus caídas o pérdidas de voltaje a lo largo de

su curva de polarización (fig. 2), esto se puede expresar como sigue:

$$V = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{tran} \quad (1)$$

Donde

E es el voltaje de circuito abierto reversible

ΔV_{act} es la caída de voltaje debido a la pérdida de activación.

ΔV_{ohm} es la caída de voltaje debido a la pérdida óhmica

ΔV_{tran} es la caída de voltaje debido a la pérdida de transferencia de masa.

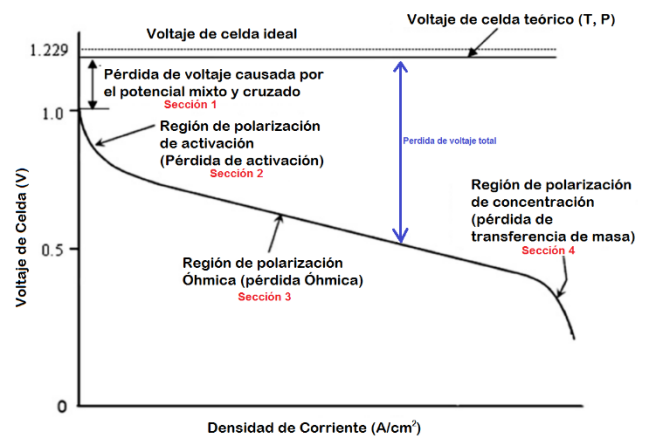


Fig 2. Curva I-V de la celda de combustible PEM [4]

El voltaje de circuito abierto reversible (E) siempre es menor al voltaje de circuito abierto real (E_{oc}) y se puede expresar como sigue

$$E = E_{oc} - A \ln(i_0) \quad (2)$$

Donde i_0 representa la densidad de corriente de intercambio y A a la pendiente de Tafel la cual está dada por

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (3)$$

Aquí $R = 8.314472 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y es la constante universal de los gases, T es la temperatura dada en Kelvin, $F = 96485 \text{ C}$ conocida como constante de Faraday y α es el coeficiente de transferencia de carga y es proporcional a la energía eléctrica aplicada que se aprovecha en el cambio de la razón de reacción electroquímica. Este valor depende del material del que está hecho el electrodo y la reacción involucrada, sin embargo, para el electrodo del hidrógeno el valor es de 0.5 para diferentes materiales de electrodo [1], [3] y [9].

La caída de voltaje debido a la pérdida de activación (ΔV_{act}) esta dada por

$$\Delta V_{act} = A \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (4)$$

Donde i es la densidad de corriente de la celda de combustible y se expresa en $mA\ cm^{-2}$.

La caída de voltaje debido a la pérdida óhmica (ΔV_{ohm}) está dada por

$$\Delta V_{ohm} = ir \quad (5)$$

Donde r es la resistencia de área específica de la celda y está dada en $k\Omega\ cm^2$.

La caída de voltaje debido a la pérdida de transferencia de masa está dada por

$$\Delta V_{tran} = -B \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) \quad (6)$$

Donde i_l es la densidad de corriente límite de la celda, y se puede observar en su curva I-V como el valor de densidad de corriente en el punto de final de la curva I-V [9]. La constante B esta dada por

$$B = \frac{RT}{zF} \quad (7)$$

Donde z es el número de electrones móviles, del lado del ánodo (B_{H_2}) $z = 2$ y del cátodo (B_{O_2}) $z = 4$ [1].

Si sustituimos (2) y de (4) - (6) en (1) y usando propiedades logarítmicas, tenemos que (1) se puede expresar en su forma simplificada como sigue:

$$V = E_{oc} - A \ln(i) - ir + B_{H_2} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) + B_{O_2} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) \quad (8)$$

La ecuación anterior describe el comportamiento de una sola celda de combustible PEM.

B. Aplicación del modelo

Para poder aplicar el modelo electroquímico dado por (8) a cualquier stack o celda de combustible que se desee emular, es necesario obtener todos los parámetros requeridos por el modelo, esto se hace a partir de los datos proporcionados por el fabricante de la celda o stack. En este caso se trabajó con un stack de celdas de combustible de 20 W y sus características están dadas en la tabla 1 y la fig. 3. De la fig.3 podemos observar que el fabricante proporciona la curva I-V e I-P en términos de la corriente y no en términos de la densidad de corriente como lo requiere el modelo electroquímico, entonces para poder aplicarlo es necesario transformar la corriente (I) en Amper a densidad de corriente (i) en mili Amper sobre centímetro cuadrado, esto se hace como sigue:

$$i = \frac{1000 I}{A_e} \quad (9)$$

Donde A_e es el área específica de la celda.

TABLA 1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL STACK DE 20 W

Parámetro	Valor
Tipo de celda de combustible	PEM
Número de celdas	10
Potencia nominal	20 W
Rendimiento	6 V @ 3.4 A
Reactantes	Hidrógeno y aire
Temperatura externa	5 – 40 °C
Temperatura de operación	60 °C
Presión del hidrógeno	0.45 – 0.55 bar
Presión del Aire	2.5 bar
Pureza del Hidrógeno	99.995% de H ₂
Razón de flujo nominal del aire	0.25 lpm
Eficiencia nominal del stack	40%
Área específica	6 cm ²

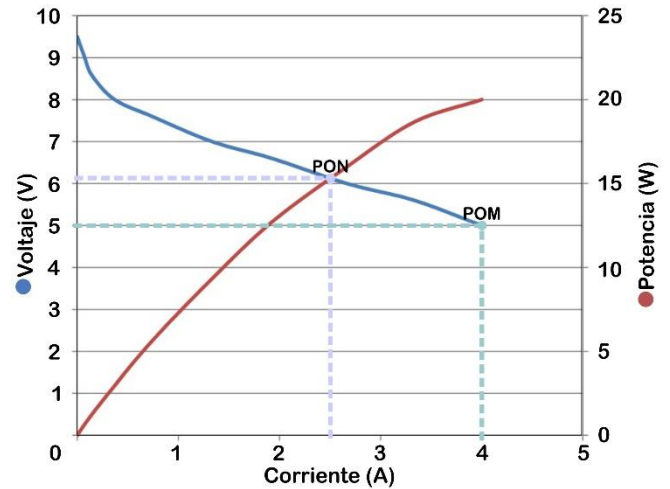


Fig 3. Curva I-V e I – P del stack de celdas de combustible de 20 W

Para poder obtener la resistencia del área específica de la celda, se debe obtener el valor de corriente (i_1) y voltaje (V_1) en donde la región de pérdida óhmica empieza, así como también los valores de voltaje (V_2) y corriente (i_2) en donde dicha región termina, esto con el fin de obtener la pendiente de dicha región que corresponde al valor de la resistencia de área específica del stack (r_{stack}).

$$r_{stack} = \frac{V_2 - V_1}{i_2 - i_1} \quad (10)$$

Si se supone que cada una de las celdas de combustible que conforman el stack son idénticas y afectan a la celda de igual modo, entonces tenemos que la resistencia de área específica de cada celda (r) está dada por

$$r = -\frac{r_{stack}}{N_{fc}} \quad (11)$$

Donde N_{fc} es el número de celdas que conforman el stack.

Para obtener el voltaje por celda de combustible tenemos

$$E_{oc} = \frac{E_{oc-stack}}{N_{fc}} \quad (12)$$

Donde $E_{oc-stack}$ es el voltaje de circuito abierto real del stack.

Finalmente, la ecuación que describe el comportamiento del stack se muestra a continuación

$$V_{stack} = N_{fc} \left(E_{oc} - A \ln(i) - ir + \frac{RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) + \frac{RT}{4F} \ln \left(1 - \frac{i}{i_2} \right) \right) \quad (13)$$

Con las ecuaciones de (9) – (13) y los datos proporcionados en la tabla 1 y la fig. 3 podemos reproducir la curva I-V del stack de 20 W.

C. Simulación del modelo electroquímico

Las ecuaciones de (9) – (13) fueron programadas en un script de Matlab y solo se requirieron los datos del stack de 20 W mostrados en la tabla 2, para reproducir la curva I-V de dicho stack.

TABLA 2. PARÁMETROS DEL STACK DE 20 W REQUERIDOS POR EL MODELO ELECTROQUÍMICO

Parámetro	Valor
Número de celdas (N_{fc})	10
Voltaje de circuito abierto real ($E_{oc-stack}$)	9.5 V
Temperatura de operación (T)	60 °C
Voltaje inicio región óhmica (V_1)	6.875 V
Corriente inicio región óhmica (I_1)	0.8 A
Voltaje fin región óhmica (V_2)	5 V
Corriente fin región óhmica (I_2)	4 A
Área específica (A_e)	6 cm ²

Como resultado de la simulación en Matlab se obtuvo la curva mostrada en la fig. 4. Como podemos ver la curva está en términos de la densidad de corriente por lo que es difícil determinar si corresponde con la proporcionada por el fabricante, sin embargo, también podemos observar las tres regiones de polarización del stack de 20 W.

Para poder validar la respuesta obtenida, se llevo a cabo la simulación del stack de 20 W con el bloque “fuel cell stack” de Simulink/Matlab y se comparó la curva obtenida por el modelo electroquímico simplificado y la curva generada por el bloque “fuel cell stack”, esto se muestra en la fig. 5. Para llevar a cabo la comparación de ambas curvas, se obtuvo la curva I-V generada por el modelo electroquímico en términos de la corriente (I) en Amperes.

Como podemos ver en la fig. 5 la curva generada por el modelo electroquímico es muy cercana a la generada por el bloque “fuel cell stack” por lo que podemos decir que el modelo electroquímico simplificado es apropiado para usarlo en el sistema de emulación.

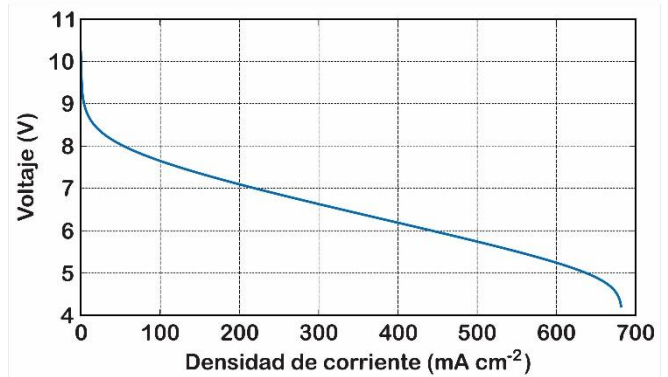


Fig 4. Curva I-V del stack de celdas de combustible de 20 W obtenida de la simulación en Matlab

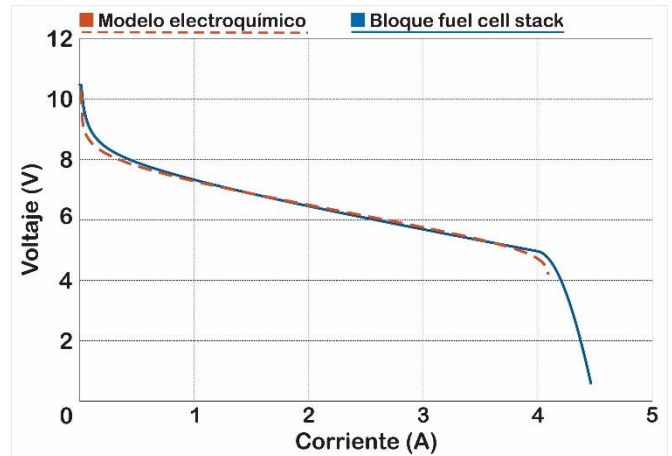


Fig 5. Comparación de las Curvas I-V obtenidas por el modelo electroquímico y el bloque fuel cell stack de simulink/Matlab.

D. Sistema de emulación de la celda de combustible

Para llevar a cabo la emulación de la celda de combustible se utilizó una fuente de 15 kW de corriente directa de TDK-Lambda modelo GEN 400-37.5. Esta fuente se puede controlar de forma remota mediante un puerto de comunicación serial (RS-232), el fabricante proporciona los controladores y las librerías necesarias para poder llevar a cabo la programación de la fuente en LabVIEW.

Durante el proceso de emulación el programa generado en LabVIEW para la fuente, toma el valor de la corriente medida por el VI “GENser Meas Output Current” para variar el valor del voltaje según lo determina el modelo electroquímico, el

valor del voltaje en función de la corriente medida, se manda al VI “GENser Config Voltage Limit” que se encarga de establecer el valor del voltaje a la salida de la fuente (fig. 6).

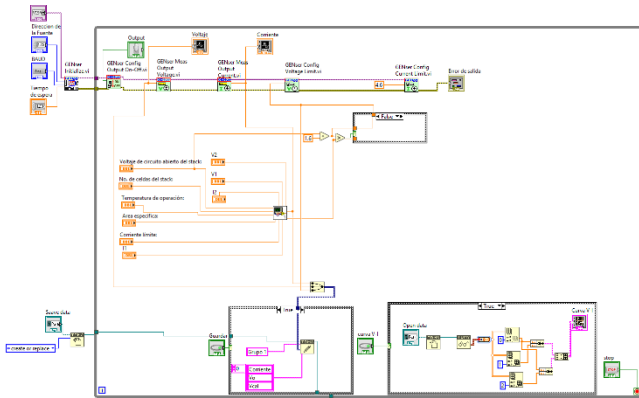


Fig 6. Descripción del programa de emulación en LabVIEW.

La corriente en la salida de la fuente dependerá de la carga que tenga conectada la fuente, en este caso se utiliza una carga electrónica para llevar a cabo la variación de corriente y los datos de corriente y voltaje medidos a la salida de la fuente se pueden observar en la interfaz gráfica de usuario, en la que el usuario solo tendrá que indicar los parámetros mencionados en la tabla 2 para generar la emulación del stack, como se muestra en la fig. 7.

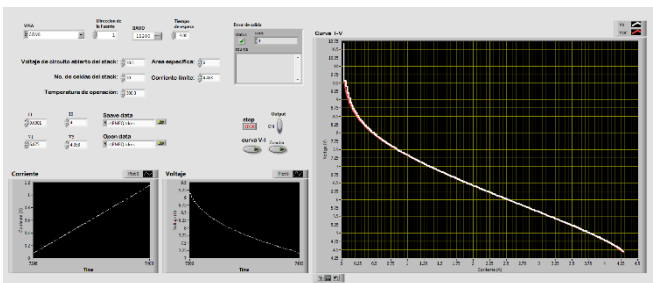


Fig 7. Interfaz gráfica de usuario.

En la interfaz de usuario se deben indicar los datos necesarios (dirección, BAUD, etc.) para realizar la comunicación con la fuente de CD, el lugar en donde se guardarán y leerán los datos obtenidos, durante la emulación se grafica en tiempo real la corriente y el voltaje a la salida de la fuente de CD y se guardan dichos datos para posteriormente desplegarlos en su forma de I-V.

El sistema utilizado para probar el sistema de emulación se muestra en la fig. 8.

En la fig. 9 se muestra la curva I-V generada por el sistema de emulación, en el cual se aprecian las tres regiones

de polarización. El valor generado por la fuente es muy cercano al valor calculado por el modelo, en las zonas en las que el voltaje cae con mayor rapidez aparecen pequeños escalones sin embargo estos se van haciendo menos evidentes conforme se aumenta la corriente.

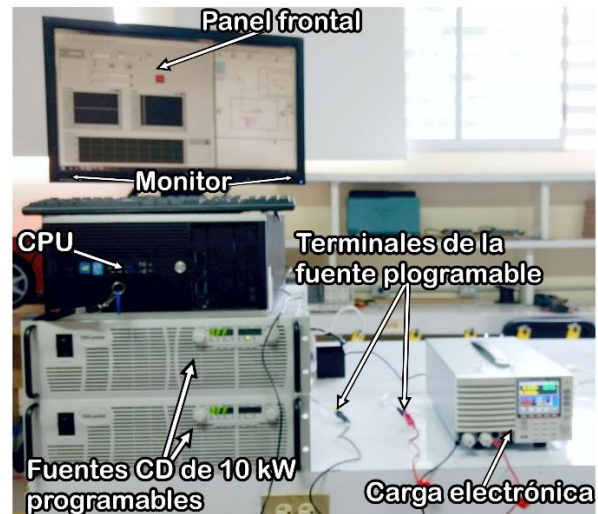


Fig 8. Interfaz gráfica de usuario.

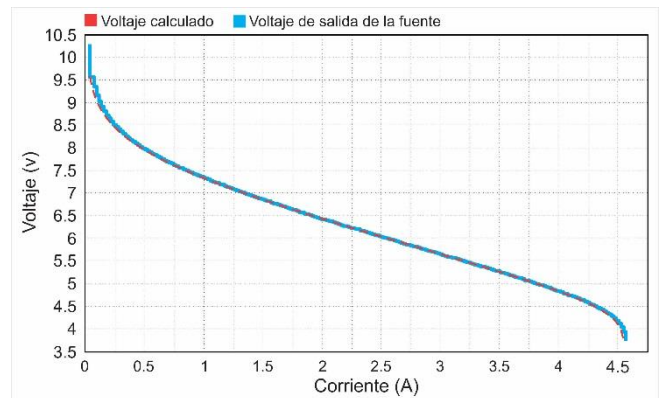


Fig 8. Cuva I-V generada por el sistema de emulación.

3. Conclusiones

Es posible realizar la emulación de una celda de combustible a partir de un modelo electroquímico simplificado, este modelo nos permite generar el comportamiento de una celda de combustible o stack con muy pocos datos de la celda, que se pueden obtener fácilmente con solo ver la hoja de especificaciones de la celda o stack.

Este tipo de emulación simplifica el trabajo en las pruebas para aplicaciones de la celda de combustible, ya que el que desarrollador no tendrá que conocer de forma detallada el comportamiento de la celda de combustible o llevar a cabo pruebas al stack para determinar ciertos datos que modelos más complejos y detallados requieren, además de que al trabajar con una emulación los riesgos de dañar la celda son nulos y los recursos gastados menores.

4. Referencias

- [1] Larminie James y Dicks Andrew, "Fuel Cell Systems Explained", Segunda edición, John Wiley & Sons, pag. 33, ISBN> 0-47084857-X, 2003.
- [2] Alrewq M. y Albarbar A., "Investigation Into The Characteristics Of Proton Exchange Membrane Fuel Cell-Based Power System", ET Science, Measurement & Technology, vol. 10, no. 3, pag. 200-206, 2016.
- [3] Jianlu Zhang J. W., Huamin Zhang y Zhan J., "PEM Fuel Cell Testing and Diagnosis", Elsevier, pag. 2, 23-24, 2013.
- [4] Derbeli Mohamed, Farhat Maissa, Barambones Oscar y Sbita Lassaad, "Fuel Cell Power System Using Sliding Mode and Super-twisting Algorithms", International Journal of Hydrogen Energy, no. 13, vol. 42,
- [5] Zhou D., Wu Y., Gao F., Breaz E., Ravey A., Miraoui A., "Degradation Prediction of PEM Fuel Cell Stack Based on Multi-Physical Aging Model with Particle Filter Approach", no.99, 2017.
- [6] Waller M. G., Walluk M. R. y Trabold T. A., "Design of an integrated propane fuel reformer and fuel cell system for unmanned aerial system (UAS) applications", 2016 IEEE Systems and Technologies for Remote Sensing Applications Through Unmanned Aerial Systems (STRATUS), Rochester, NY, pag. 1-4., 2016.
- [7] Marsala Giuseppe, Pucci Marcello, Vitale Gianpaolo, Cirrincione Maurizio y Miraoui Abdellatif, "A Prototipe of a fuel cell emulation based on a buck converter", Applied Energy, Elsevier, vol. 86, pag. 2192-2203, 2009
- [8] N. A. Parker-Allotey, A. T. Bryant, and P. R. Palmer, "The application of fuel cell emulation in the design of an electric vehicle powertrain", in 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, June 2005, pp. 1869-1874.
[Online] Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1581886/>
- [9] Boscaiono V., Capponi G. y Marino F., "FPGA implementation of a fuel cell emulation", International Symposium on Power Electronic, Electrical Drives, Automation and Motion, IEEE, pag. 1297-1301, 2010

5. Biografías

Nayeli I. Hernández Zárate en 2017 recibió el grado de licenciatura en electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), actualmente estudia en la Maestría en Ingeniería Electrónica, Opción Instrumentación Electrónica de BUAP.

Gerardo Mino Aguilar estudió su Licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), México en 1995. Obtuvo la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en la Universidad de las Américas Puebla, México y estudió un doctorado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica de 2002 a 2006 en la Universidad Politécnica de Cataluña. Ha sido investigador y profesor desde 2002 a la fecha. Desde octubre de 2014 hasta la actualidad, se desempeña como jefe de la Oficina de Estudios de Investigación y Postgrado en la Facultad de Ciencias Electrónicas de BUAP. Además, es el jefe de Sistemas Electrónicos de Potencia para control de movimiento, calidad de energía y generación de energía por fuentes renovables, y el jefe del área de electrónica de potencia.

Beatriz Eugenia Graniel García es Doctora en Ingeniería Química por la Universidad de Manchester, UK. Actualmente se desempeña como Profesor Investigador en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la "Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, BUAP".

Edgar Peralta Sánchez (S'99—M'05), obtuvo el título de Licenciado en Electrónica por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, el grado de Maestro en Ciencias Por la Universidad de las Américas Puebla, y el de Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Manchester en Inglaterra. Actualmente se desempeña como Profesor Investigador en la Facultad de Ciencias de la Electrónica, de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).

