

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DEL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEM

Realizado por

Sergio David Rincón Murcia

Proyecto de Grado presentado en cumplimiento del requisito
para optar por el grado de Ingeniería Electrónica



Grupo de Investigación MEM (Modelado-Electrónica-Monitoreo)
Facultad de Ingeniería Electrónica
División de Ingenierías

Mayo de 2022

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EMULADOR DEL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE PEM

Realizado por

Sergio David Rincón Murcia

Proyecto de grado presentado como requisito
para optar al título de Ingeniero Electrónico

Dirigido por

Ing. Edwin Francisco Forero García

Co-Dirigido por

Ing. Jhon Erik Navarrete Gómez

Ing. Carlos Andrés Torres Pinzón

MEM

Facultad de Ingeniería Electrónica

División de Ingenierías

Mayo de 2022

«El trabajo de grado titulado **Diseño e Implementación de un Emulador del Comportamiento Eléctrico de una Pila de Combustible PEM**, realizado por el estudiante **Sergio David Rincón Murcia**, cumple con los requisitos exigidos por la **Universidad Santo Tomas** para optar al título de **Ingeniero Electrónico.**»

Ing. Edwin Francisco Forero García
Docente Tutor

Ing. Jhon Erik Navarrete Gómez
Docente Tutor

Ing. Carlos Andrés Torres Pinzón
Docente Tutor

Ing. Armando Mateus Rojas
Evaluador 1 del proyecto

Ing. Juan Manuel Calderón Chávez
Evaluador 2 del proyecto

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

Ingeniería Electrónica

Este proyecto de grado fue aceptado para optar al título de *Ingeniero Electrónico* en Mes Año.

Director: Ing. Edwin Francisco Forero García.
Magíster en Ingeniería Electrónica.
Universidad Industrial de Santander
Bogotá, Colombia.

Ing. Jhon Erik Navarrete Gómez.
Magíster en Ingeniería Electrónica.
Universidad Santo Tomas
Bogotá, Colombia.

Ing. Carlos Andrés Torres Pinzón.
Magíster en Ingeniería Electrónica.
Universitat Rovira i Virgili
Tarragona, España.

Jurados: Ing. Armando Mateus Rojas.
Magíster en Ingeniería Electrónica.
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia.

Ing. Juan Manuel Calderón Chávez.
Magíster en Ingeniería Electrónica.
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia.

Sustentación proyecto de grado: Día Mes Año, Bogotá, Colombia.

Sergio David Rincón Murcia

*A mis padres, por su incansable esfuerzo,
apoyo y motivación en todo este proceso, quienes con
sus sabias palabras respaldaron y complementaron mi formación.*

Agradecimientos

Agradezco a mis directores que me brindaron sus conocimientos y consejos para la realización de esta tesis, asimismo agradezco a todos los docentes que fueron parte de mi proceso de aprendizaje destacando el trabajo de los ingenieros Jhon Erik Navarrete Gómez y de Edwin Francisco Forero Garcia. Agradezco a las personas que fueron parte de mi crecimiento profesional, a mis padres, mis hermanos y a mis compañeros que me brindaron todo su apoyo; finalmente y lo más importante agradezco a Dios que sin su guía no hubiera alcanzado mis mayores logros.

Resumen

El proyecto de grado titulado *“Diseño e Implementación de un Emulador del Comportamiento Eléctrico de una Pila de Combustible PEM”* presenta el desarrollo de un emulador en tiempo real de una pila de combustible, contemplando los comportamientos eléctricos desde un modelo estático y uno dinámico; con el fin de desarrollar nuevas investigaciones en este campo sin la necesidad de tener el sistema físico, de esta forma poder estudiar los comportamientos de la pila de combustible en una amplia gama de situaciones en ambientes controlados.

Los modelos estudiados se abarcan desde dos perspectivas, la primera se basa en un análisis teórico que fundamenta sus estudios en fenómenos físicos, químicos y eléctricos, postulando un modelo estático que considera aspectos termodinámicos y electroquímicos. El segundo modelo trae en consideración los fenómenos dinámicos del sistema, exponiendo nuevas ecuaciones que basan sus análisis desde la experimentación y la práctica, pero sin dejar de lado la teoría de las pilas de combustible.

Posterior al estudio de los modelos, se definen las ecuaciones que representan el comportamiento eléctrico de la pila de combustible, de forma de poder optimizar las ecuaciones de cada modelo respecto a la curva de polarización del sistema físico, haciendo uso de un algoritmo bioinspirado. Teniendo las ecuaciones de los modelos optimizados se procede a implementarlas en una arquitectura RIO, de manera de emularlo en tiempo real y así mismo validar su funcionamiento acoplando una etapa de potencia que permita llevar a la práctica el modelo descrito.

Índice general

Resumen	II
Lista de Tablas	V
Lista de Figuras	VI
Introducción	1
1. Planteamiento del Problema	3
2. Antecedentes	5
3. Justificación	8
4. Impacto Social	9
5. Objetivos	10
5.1. Objetivo General	10
5.2. Objetivos Específicos	10
6. Revisión Literaria	11
6.1. Introducción a las pilas de combustible	11
6.2. Termodinámica en las Pilas de Combustible	13
6.2.1. Entalpía	13
6.2.2. Entropía	14
6.2.3. Energía Libre de Gibbs	14
6.2.4. Voltaje Teórico	15
6.2.4.1. Voltaje Reversible	15
6.2.4.2. Voltaje Nernst	17
6.3. Electroquímica de las pilas de combustible	20
6.3.1. Método Teórico	21
6.3.1.1. Pérdidas Por Activación	21
6.3.1.2. Pérdidas Por Concentración	22
6.3.1.3. Pérdidas Óhmicas	24
6.3.2. Método Empírico	25
6.3.2.1. Modelo Eléctrico	26

6.3.2.2.	Primer Modelo Eléctrico	27
6.3.2.3.	Segundo Modelo Eléctrico	28
6.3.3.	Voltaje de las Pilas de Combustible	30
6.3.4.	Potencia eléctrica y eficiencia de las pilas de combustible	31
7.	Implementación del Algoritmo de Optimización	32
7.1.	Optimización de Enjambre de Partículas	33
7.1.1.	Definir las Variables del Algoritmo	34
7.1.2.	Definir los límites de las Partículas	36
7.2.	Estructura del Algoritmo	39
8.	Implementación del Modelo en una Arquitectura RIO	42
8.1.	Estructura de una arquitectura RIO	43
8.1.1.	Operaciones matemáticas	45
8.2.	Implementación de los modelos	46
8.2.1.	Modelo Estático	47
8.2.2.	Modelo Dinámico	49
9.	Análisis y Resultados	55
9.1.	Producción del Hidrógeno	55
9.1.1.	Especificaciones del Agua	56
9.1.2.	Almacenamiento del Hidrógeno	57
9.2.	Manejo de la Pila de Combustible	59
9.3.	Resultados del algoritmo de optimización	61
9.4.	Resultados del Modelo	65
9.4.1.	Pruebas de Polarización	65
9.4.2.	Pruebas de Variaciones de Carga	66
	Conclusiones	69
	Bibliografía	71

Índice de cuadros

1.	Tipos de pilas de combustible	12
2.	Límites de los parámetros del modelo teórico	38
3.	Límites de los parámetros del primer modelo dinámico	38
4.	Límites de los parámetros del segundo modelo dinámico	38
5.	Especificaciones de los puertos análogos del dispositivo de adquisición myRIO-1900	43
6.	Principales especificaciones del dispositivo de adquisición myRIO-1900	44
7.	Principales especificaciones de la celda electrolítica Titan EZ-120	56
8.	Principales especificaciones del Hydrofill PRO	57
9.	Principales especificaciones del Hydrostik PRO	58
10.	Parámetros físicos de la pila de combustible	62
11.	Parámetros optimizados del modelo teórico	62
12.	Parámetros optimizados del primer modelo eléctrico	63
13.	Parámetros optimizados del segundo modelo eléctrico	64

Índice de figuras

1.	Reacción química de una celda de combustible [20]	12
2.	Descripción gráfica de la entropía	14
3.	Transporte de masas en una celda de combustible PEM [20]	19
4.	Representación gráfica de las pérdidas por activación según el cambio del coeficiente de carga [31]	23
5.	Representación gráfica de las pérdidas por concentración [32]	24
6.	Representación gráfica de las pérdidas óhmicas [33]	25
7.	Modelo eléctrico de una pila de combustible PEM[36]	27
8.	Curva de polarización de una celda de combustible PEM [33]	30
9.	Eficiencia y potencia de una pila de combustible PEM [33]	31
10.	Diagrama del algoritmo de optimización de enjambre de partículas	34
11.	Polarización de la pila de Combustible	35
12.	Comportamiento de las partículas al momento de minimizar el error MSE	36
13.	Espacios de búsqueda modificados para la optimización del algoritmo PSO	37
14.	Diagrama de bloques del hardware de la myRIO-1900	44
15.	Configuración de la variable fixed-point	45
16.	Logaritmo natural en la FPGA	46
17.	Estructura Modelo	47
18.	Diagrama de bloque usado para inicializar el modelo de la celda	48
19.	Diagrama de bloque usado para el cálculo de las pérdidas	48
20.	Diagrama de bloque del simulador	49
21.	Diagrama de bloque usado para el cálculo del voltaje de Nernts del modelo dinámico	50
22.	Perdidas por activación para los diferentes modelos dinámicos establecidos	50
23.	Perdidas por concentración para los diferentes modelos dinámicos establecidos	51
24.	Perdidas óhmicas para los diferentes modelos dinámicos establecidos	51
25.	Diagrama de bloque usado para el cálculo del voltaje del condensador	52
26.	Diagrama de bloque usado para el cálculo del voltaje de la celda del modelo dinámico	53
27.	Diagrama de bloque para la simulación del modelo dinámico	54
28.	Sistema para la producción de hidrógeno (1. Celda electrolítica, 2. Tanque de agua, 3. Barómetro de 145 psi, 4. Tanque atrapa llamas)	56

29.	Sistema utilizado para la producción y almacenamiento del hidrógeno	58
30.	Diagrama de un sistema de una pila de combustible	59
31.	Comportamiento de la pila de combustible ante la válvula de purga	60
32.	Pila de combustible empleada (1. Regulador de presión 12 Psi, 2. Sensores de temperatura cartuchos de hidrógeno, 3. Sensor de temperatura del sistema, 4. Ventiladores)	61
33.	Optimización método teórico	63
34.	Optimización método empírico primer modelo	64
35.	Optimización método empírico segundo modelo	65
36.	Comparación de la emulación del modelo teórico con los datos experimentales .	66
37.	Comparación entre la emulación del los modelos dinámicos con los datos experimentales	67
38.	Montaje experimental Fuel Cell (1. Fuel Cell H-Cell 2.0, 2. Reóstato)	67
39.	Montaje experimental emulación (1. myRIO 1900, 2. Reóstato, 3. Fuente programable Protek PD-4506)	68
40.	Comparación de la respuesta dinámica entre los datos experimentales y la emulación de los modelos	68

Introducción

Hoy en día el uso indiscriminado de fuentes de energías provenientes del petróleo o derivados y el aumento del consumo energético en la sociedad, está afectando directamente los recursos naturales del planeta, de forma que, gobiernos e instituciones promuevan el crecimiento de nuevas fuentes de energía renovables para mitigar el daño ocasionado por las emisiones de dióxido de carbono. En este contexto, el hidrógeno como vector energético es un fuerte candidato para sustituir el papel que juegan los combustibles fósiles en el sistema energético, siendo el elemento más abundante en el universo, además de que la energía producida es limpia siempre y cuando se obtenga libre de emisiones contaminantes.

Para la utilización del hidrógeno como fuente de energía se emplean pilas de combustibles, de forma de producir corriente eléctrica por medio de las reacciones químicas, sin embargo, el hidrógeno al ser un gas altamente inflamable ha dificultado el avance en el campo de las energías renovables, debido al riesgo de realizar pruebas sin tener una adecuada infraestructura ni el equipo requerido para mitigar cualquier inconveniente. Una de las alternativas para el desarrollo de pruebas seguras y fiables, es la implementación de un emulador que represente los comportamientos del sistema real, de tal forma de evaluar el modelo del sistema en la mayoría de los escenarios, disminuyendo tiempos y costos del proyecto.

Este trabajo de grado se enfoca en implementar un emulador del comportamiento eléctrico de una pila de combustible PEM, proporcionando las herramientas necesarias para su realización. En el capítulo 1 se expone el planteamiento del problema en donde se describe la formulación del problema, por otra parte en el capítulo 2 se hace una revisión a los trabajos que se han hecho, formulando los antecedentes del proyecto. En los capítulos 3 y 4 se expone la justificación y el impacto social respectivamente, así mismo en el capítulo 5 se describen los objetivos del proyecto acotando y delimitando la solución del problema.

En el capítulo 6 se describe la teoría de las pilas de combustible exponiendo diversos modelos matemáticos del sistema, por otra parte, en el capítulo 7 se implementa un algoritmo de

optimización con la finalidad de optimizar los parámetros de los modelos de acuerdo a los comportamientos del sistema real. En el capítulo 8 se implementa el modelo optimizado en una arquitectura Reconfigurable Input Output (RIO) de forma que en el capítulo de análisis y resultados se analice los comportamientos de la emulación respecto al sistema físico, además de abordar puntos que fueron necesarios para la realización de las pruebas. Como último se muestran las conclusiones y asimismo se sugieren posibles investigaciones además de recomendar la presente investigación en nuevos campos de estudio.

Capítulo 1

Planteamiento del Problema

Actualmente, el progreso de nuevas tecnologías en el ámbito de la ingeniería involucra un continuo avance en el desarrollo de nuevos proyectos que son en mayor medida enfocados en áreas como las energías alternativas, la electrónica de potencia y los sistemas de control. No obstante, este progreso lleva consigo varias fases de implementación, entre las cuales se encuentran la etapa de diseño del controlador y la elaboración de las pruebas físicas. Estas etapas suelen incrementar los costos y los tiempos por causa de fallas inesperadas que no se previnieron en la simulación, por factores adversos como lo son la temperatura, el ruido electromagnético o la respuesta del controlador cuando se somete a perturbaciones [1, 2].

En el caso de los sistemas complejos como los que se tratan en el campo de las energías renovables, se presenta un desafío en la elaboración de las pruebas físicas, puesto que se requieren varias pruebas para obtener un producto para la comercialización [3], en otras palabras, para evaluar la fiabilidad de estos sistemas se requiere un sinnúmero de pruebas que garantice un entorno seguro tanto para el personal a cargo del manejo de los equipos como del hardware en cuestión. Por otra parte, los avances tecnológicos exigen la actualización y la mejora de los productos existentes, lo que implica en muchas ocasiones rediseñar los controladores adecuándolos a las mejoras de los sistemas, estos avances al requerir nuevas pruebas demandan nuevos cronogramas de forma que el tiempo requerido juega un papel importante para la modernización [4].

Debido a las problemáticas expuestas anteriormente, se requiere el uso de nuevas técnicas de simulación que permitan emular los sistemas a partir de un modelo evaluado en situaciones reales [5-7]. En este trabajo de desarrollo se emplea una pila de combustible de membrana de

intercambio de protones (PEMFC) que, al ser alimentadas por hidrógeno y oxígeno en estado gaseoso, exige regular los gases según la carga eléctrica demandada, además de disipar el calor y el agua producidas por las reacciones químicas. Por consiguiente, se vuelve cada vez más complejo realizar las pruebas del sistema en conjunto, por lo que es necesario diseñar un entorno que emule el modelo de la PEMFC de manera que sea parametrizable, facilitando el desarrollo de esta tecnología; garantizando la seguridad del sistema y evaluándola en una amplia gama de situaciones. [2, 8, 9]. Dado lo anterior, este trabajo pretende darle respuesta a la siguiente pregunta:

¿De qué forma es posible emular y validar el comportamiento eléctrico de una pila de combustible, garantizando la fiabilidad del sistema en situaciones críticas como la falta de oxígeno o la demanda excesiva de corriente?

Capítulo 2

Antecedentes

La industria de la aviación incentivó el desarrollo de modelos de aeronaves hace más de 25 años con simulaciones en tiempo real de aviones [6], sin embargo, en ese momento la infraestructura para la implementación de estos modelos era bastante costosa ya que implicaba un alto nivel de procesamiento. No fue sino hasta el 2005 que W. Ren y sus socios hicieron uso de la amplia capacidad de procesamiento en tiempo real que tenía la Universidad de la Florida, desarrollando y emulando el comportamiento de un modelo de controlador de potencia de grado industrial enfocado a barcos de la armada de los Estados Unidos. Esta investigación dio inicio al desarrollo de naves que implementan un sistema de control de compensación de cargas eléctricas en el bus de distribución. Al tener el nivel de procesamiento necesario para el desarrollo de pruebas del modelo, pudieron reducir el tiempo de simulación incluso cuando fue aumentada la complejidad del sistema. Si bien aumentaron la velocidad repartiendo la carga computacional, se vieron en la necesidad de retroalimentar el sistema con una señal análoga, debido a que la frecuencia de conmutación era muy elevada, lo cual conllevaba a un mayor tiempo de cómputo desfavoreciendo el modelo del sistema [10].

En el mismo año se muestra una alternativa en el desarrollo de modelos partiendo de una plataforma virtual llamada Virtual Test Bed Real-Time (VTB-RT) [11] [5]. El enfoque del proyecto es proporcionar las herramientas necesarias a los ingenieros que diseñan sistemas de control, con el fin de mostrar una herramienta para el desarrollo de cualquier tipo de modelo antes de su implementación en la realidad. Los investigadores del proyecto partieron del problema de la interfaz de simulación, abordando dos métodos para reducir los tiempos de cómputo, el primer método fue la implementación de una técnica llamada Firing Signal Averaging (FSA) y el segundo consistía en la utilización de la técnica Time Variant First-Order Approximation (TFA).

Los resultados de la plataforma VTB-RT muestran diferentes enfoques para la implementación de modelos en tiempo real, uno de estos se muestra en la elaboración de un controlador de potencia digital para aplicaciones aeroespaciales con el fin de modelar el sistema de conversión de energía compuesto por paneles solares y baterías [12]. El inconveniente para el desarrollo del controlador digital fue el costo de implementar pruebas reales en las naves aeroespaciales. Los resultados de esta investigación muestran que la plataforma VTB-RT es una herramienta eficaz para la implementación de modelos de sistemas de control digital.

Al tratar modelos complejos, los sistemas virtuales no son una opción para emular correctamente los comportamientos de un sistema, por lo cual se requiere conocer cómo implementar el modelo en una tarjeta de desarrollo. En el artículo [13] se muestra los requisitos que debe tener el dispositivo en el que se va a embeber el modelo, entre los cuales se encuentra el nivel de procesamiento requerido para ejecutar la emulación en tiempo real. En esta investigación se usó un controlador de National Instrument PXI 8196 que proporciona una alta capacidad de adquisición de datos, no obstante, se concluyó que la velocidad de procesamiento de esta tarjeta tenía limitaciones para emular sistemas de mayor complejidad. En relación con los requisitos para la emulación de los sistemas se describen las técnicas para la implementación de los modelos, la primera se llama Controller Hardware-in-the-Loop (CHIL), que consiste en la elaboración de pruebas enfocadas en el controlador permitiendo que las señales eléctricas sean de baja potencia. La segunda se le denomina Power Hardware-in-the-Loop (PHIL), la cual consiste en la elaboración de pruebas adaptando las señales eléctricas por medio de una etapa de potencia que permita emular el sistema como si se estuviese probando el sistema real [3].

Con los avances tecnológicos, las tarjetas de desarrollo cada vez son más rápidas, de manera que se puede emular los comportamientos de un modelo abarcando más campos de acción. En el campo de la electrónica de potencia más concretamente en el ámbito de los convertidores, se elaboraban pruebas a pequeñas escalas para establecer el comportamiento de un sistema con mayores prestaciones, sin embargo, no es la solución para los proyectos de mayor complejidad. Los diseños análogos para simular sistemas complejos requieren mayor tiempo de planeación, esto para asegurar un comportamiento muy similar al real, por lo que la implementación de modelos que emulen el sistema mejora los tiempos de desarrollo además de ser una opción más rentable y segura. Los resultados muestran que la emulación del modelo del sistema es eficaz en condiciones de régimen permanente, siendo evaluado con la técnica de HIL la cual ha demostrado estabilidad durante un largo periodo de tiempo, así mismo, la utilización de esta técnica permite reducir el error asegurando que el modelo del convertidor se comporte como si se tuviera el sistema real [1].

Por lo que se refiere a los avances tecnológicos, en el artículo [14] se muestra la aplicación de un modelo de un sistema complejo, abarcando la problemática de un sistema de control compuesto por un motor eléctrico, un inversor y un banco de baterías. Los resultados obtenidos muestran un aumento en el nivel de procesamiento logrado tiempos de 200ns a 500ns a partir de la utilización de la FPGA como elemento de cómputo para los elementos eléctricos. Por otra parte, los sistemas mecánicos se simulaban en una CPU ya que la dinámica del sistema es más lenta, de manera que el tiempo de cómputo estuviese alrededor de 10us a 50us.

Aunque la mayoría de los enfoques se centran en el campo de la electrónica de potencia, es bien sabido que se puede plantear modelos para sistemas como las pilas de combustible, que al ser altamente riesgosas necesita la implementación de esta metodología. En el artículo [2] se presenta un modelo de pila de combustible evaluada por sus tres submodelos que describen su funcionamiento, esto son el térmico, el de fluidos y el eléctrico. Los investigadores parten de la necesidad de probar el controlador en condiciones seguras, además de no dañar el hardware por fallos en los auxiliares que regulan la cantidad de hidrógeno y oxígeno. Los resultados se validaron con una pila de combustible de 1,2KW con una excelente concordancia entre la emulación y el sistema real.

Uno de los aspectos más importantes a la hora de emular cualquier sistema es la frecuencia de muestreo, ya que, esta nos indica las especificaciones que debe tener el hardware para emular de una manera más precisa los comportamientos del sistema; las investigaciones en este campo han mostrado diversas formas que ayudan a aumentar la velocidad de cálculo. Entre las técnicas están la construcción para minimizar los cálculos algebraicos (MAC), la separación del modelo para un simulador de varios núcleos (MS) y el modelo de capa reducida (RL), estas técnicas dan como resultado una mejora del 80 % en la velocidad de procesamiento en comparación al modelo base [15].

Capítulo 3

Justificación

Actualmente los avances tecnológicos crean nuevas soluciones para las problemáticas industriales, desarrollando nuevos productos y prototipos para su comercialización. Es bien sabido que la innovación conlleva un incremento en los costos y en el tiempo de producción, esto debido a las extensas pruebas que deben realizarse para tener un producto en condiciones.

En el campo de las energías renovables donde el sistema físico representa el principal activo del producto a comercializar, se debe asegurar un ambiente controlado para no dañar el sistema. Por otra parte, en el desarrollo de pruebas de una pila de combustible es importante tener en cuenta su dinámica, esto debido al comportamiento que tiene el sistema cuando se somete a corrientes fluctuantes, ya que las membranas no soportan cambios repentinos en corriente. Asimismo, si no hay un control en la cantidad de oxígeno e hidrógeno según la corriente demandada, la pila de combustible se auto-destruirá para suplir la corriente requerida.

La implementación del modelo de una pila de combustible, permite realizar las pruebas en un ambiente controlado y así mismo permite estudiar el sistema ante situaciones de falla que dañarían la planta en condiciones reales. Por otra parte, el uso de la tarjeta de desarrollo myRIO para la emulación de una celda de combustible es a partir de una necesidad académica que involucra el laboratorio de Investigación de Energías de la Universidad Santo Tomás.

Capítulo 4

Impacto Social

La creciente demanda energética a nivel mundial ha provocado la explotación indiscriminada de los recursos naturales, sufriendo cambios a nivel climático que afectan en mayor medida a las comunidades de bajos recursos [16]. El aumento en la emisión de gases provenientes de la quema de combustibles fósiles o sus derivados como el gas o el carbón, conlleva a efectos adversos en la atmósfera, aumentando la temperatura del planeta y el nivel de los mares. Por causa de estas problemáticas el planeta requiere la implementación y el desarrollo de fuentes renovables, disminuyendo la dependencia de las fuentes energéticas contaminantes, que son una de las principales causas del deterioro de los recursos del planeta [17].

Por lo que se refiere al aumento del efecto invernadero, el transporte juega un papel importante al requerir en mayor medida combustibles fósiles [18]. En la actualidad, las empresas automovilísticas optan por la implementación de las pilas de combustible como fuente energética, sin embargo, aún sigue habiendo un aumento en la contaminación producida por los automóviles que usan fuentes fósiles o sus derivados. Es necesario impulsar nuevos desarrollos que ayuden a la comunidad científica a optimizar y acelerar el diseño de las fuentes energéticas como lo son las PEMFC, de modo que contribuya a la disminución de fuentes contaminantes.

Este proyecto facilita la implementación de las tecnologías que funcionan a partir de las pilas de combustible, planteando un modelo de una PEMFC que impacta directamente a la comunidad científica y a su vez repercute en la posibilidad de probar el diseño sin la necesidad de un sistema físico. Asimismo, este modelo al aportar nuevas estrategias en la implementación de fuentes de energía renovable ayuda en gran medida a las dificultades al incursionar en el sector energético no contaminante.

Capítulo 5

Objetivos

5.1. Objetivo General

Implementar un emulador del comportamiento eléctrico de una Pila de Combustible PEM usando un algoritmo que ajuste los parámetros del modelo basado en técnicas de optimización.

5.2. Objetivos Específicos

1. Seleccionar un modelo basado en ecuaciones diferenciales que represente el comportamiento eléctrico de una pila de combustible.
2. Implementar un algoritmo que ajuste los valores del modelo basado en técnicas de optimización usando datos experimentales adquiridos previamente.
3. Embeber el modelo en una arquitectura de entradas y salidas reconfigurables (RIO) con características de parametrización y funcionamiento en tiempo real.
4. Establecer un análisis comparativo entre el modelo construido y el prototipo físico en escenarios controlados.

Capítulo 6

Revisión Literaria

Este capítulo abarca la teoría de las pilas de combustibles haciendo referencia a la termodinámica del sistema, exponiendo como se relaciona la entropía, la entalpía y la energía libre de Gibbs con el voltaje del sistema. Por otra parte, se habla de la electroquímica examinando las pérdidas de la pila de combustible respecto a un análisis teórico haciendo referencia a un modelo estático y a dos modelos empíricos que representan las características dinámicas y estáticas del sistema.

6.1. Introducción a las pilas de combustible

Las pilas de combustible son dispositivos que utilizan un proceso electroquímico para convertir la energía química de un combustible como el hidrógeno en energía eléctrica [19], enfatizando que para llevar a cabo esta reacción es necesario un electrolito que permita la interacción entre las moléculas y los electrones de los diferentes elementos. Dentro de los electrolitos que se encuentran en la actualidad se pueden categorizar por el material de fabricación, la temperatura de funcionamiento y los elementos que están presentes en la reacción química.

En la tabla 1 se puede evidenciar una comparación de los diferentes tipos de pilas de combustibles haciendo alusión a las más relevantes. Para la resolución del proyecto se hace uso de una pila de combustible PEM (PEMFC) la cual una de sus principales ventajas es el funcionamiento a bajas temperaturas, una alta eficiencia, una vida útil más larga y una rápida puesta en marcha. Por otra parte, por lo que respecta a las desventajas se encuentra el costo de fabricación de la membrana como el mantenimiento y cuidado de esta, debido a que es muy propensa a desgastarse si en la reacción química no cumple con los requerimientos establecidos.

	PEMFC	AFC	SOFC	DMFC
Estado electrolito	Solido	Disolución acuosa	Solido	Solido
Temperatura	<100 °C	65 - 250 °C	600 - 1000 °C	<100 °C
Combustible	H ₂	H ₂	H ₂ y reformados	Metano y Agua
Oxidante	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂

TABLA 1: Tipos de pilas de combustible

Por lo que respecta a las reacciones químicas involucradas en la pila de combustible, el proceso consiste en separar el hidrógeno molecular en dos electrones y en dos isótopos de hidrógeno de carga positiva, esto con ayuda de la membrana que solo permite el paso de los protones desde ánodo al cátodo. Los electrones que fueron separados del hidrógeno molecular, viajan desde el ánodo hacia el cátodo promedio de una conexión física entre los electrodos denominada resistencia eléctrica. En el lado del cátodo se reacciona el oxígeno con los electrones que viajaron por la resistencia además de los isótopos de hidrógeno de carga positiva produciendo agua y calor en el proceso. En la figura 1 se muestra gráficamente el proceso de las reacciones que se dan dentro de una celda de combustible evidenciando como es la interacción de los elementos en los respectivos canales de la celda.

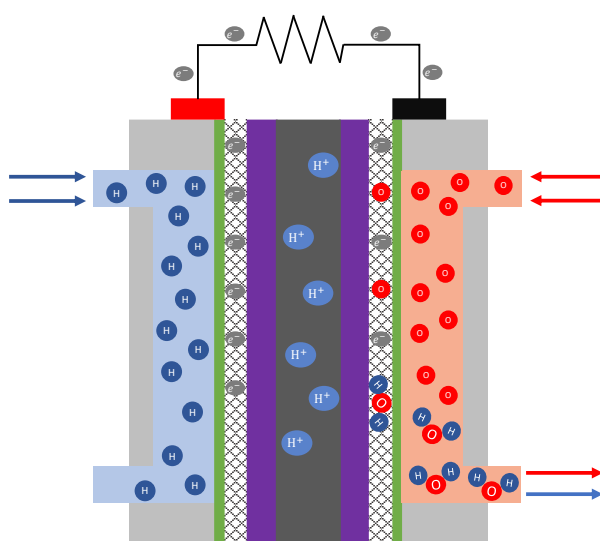
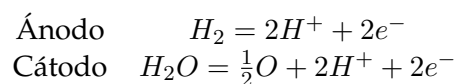


FIGURA 1: Reacción química de una celda de combustible [20]

6.2. Termodinámica en las Pilas de Combustible

La termodinámica es una parte de la física que estudia el cambio de la energía de un estado a otro [21], de tal forma que a partir de ecuaciones termodinámicas sea posible comprender sistemas electroquímicos como lo son las pilas de combustible. Estas ecuaciones permiten conocer el rendimiento que tiene una celda de combustible, de modo que se pueda predecir variables como el voltaje, la temperatura, la presión, el volumen y los moles que están presentes en la reacción electroquímica [21, 22].

Los temas que se tratarán en las siguientes secciones abarcan temáticas como la entalpía y entropía, que son fundamentales para predecir la energía libre de Gibbs, la cual se encarga de calcular el máximo trabajo que puede realizar un sistema termodinámico. Por otra parte, se presenta el voltaje teórico que tiene una pila de combustible abarcando temas como el voltaje reversible, el voltaje de Nernst y la relación que tiene este con la temperatura y la presión.

6.2.1. Entalpía

La entalpía en un sistema termodinámico es la cantidad de energía requerida para formar o romper enlaces químicos. En el caso de las pilas de combustible la entalpía calcula la energía que se produce al formar nuevos enlaces como los que se dan en el cátodo, combinando los isótopos de hidrógeno con el oxígeno, formando nuevos enlaces para producir agua.

La entalpía H , se define como la suma de la energía interna U con el producto de la presión p y el volumen V , sin embargo, existen tablas dentro de las cuales se puede conocer la energía interna y la entalpía, siempre y cuando se conozca la presión y la temperatura. Es necesario aclarar que se le llama entalpía de las sustancias en su estado neutral cuando la temperatura es igual a 25°C y la presión es de una atmósfera [19, 21].

$$H = U + pV \quad (6.1)$$

El cambio de la entalpía ΔH , se puede definir por medio de la ecuación (6.1), cambiando las variables de estado por el cambio de la energía interna ΔU y el cambio de la presión por el volumen ΔpV , no obstante, existen otras formas de definir este cambio de la entalpía, esto a partir de la resta del cambio de la entalpía de los productos con el cambio de la entalpía de los reactivos.

Cuando el cambio de la entalpía es negativo se libera calor de los reactivos a los productos, esto se evidencia al analizar la reacción que genera la celda de combustible en el cátodo produciendo agua además de generar calor, por otra parte, si la entalpía es positiva esto quiere decir que la reacción absorbe calor.

6.2.2. Entropía

La entropía es la medida del desorden en un sistema termodinámico, esto quiere decir que se estima el desorden a partir de cuan separadas están las moléculas una de la otra, por lo que un sistema como el agua que está en estado sólido, la entropía va a hacer muy pequeña gracias a que las moléculas están juntas. No obstante, cuando se evalúan gases como el agua a temperaturas mayores de 100°C, la entropía aumenta a medida que las moléculas están más separadas una de la otra. El cálculo del delta de la entropía ΔS , si bien es una medida de desorden es posible calcularla o estimarla como la integral del cociente entre el calor cedido Q y la temperatura T [21, 23].

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\delta Q}{T} dT \quad (6.2)$$

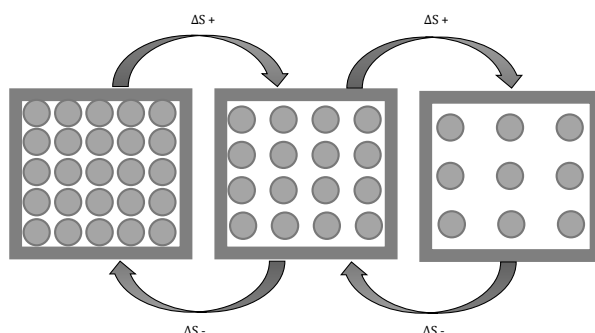


FIGURA 2: Descripción gráfica de la entropía

6.2.3. Energía Libre de Gibbs

La energía libre de Gibbs se puede definir como un potencial termodinámico que predice si la reacción que requiere el sistema es espontánea o no. Una forma para calcular el cambio de la energía libre Gibbs ΔG , es a partir del cambio de la entalpía ΔH con la resta de la temperatura

T por el cambio de la entropía ΔS , de tal forma, si esta es negativa se dice que se libera energía de forma tal que los reactivos poseen más energía que los productos, por lo cual la reacción se le denomina exergónicas o espontáneas [21, 23, 24].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6.3)$$

La energía libre Gibbs en las pilas de combustibles, se expresan negativamente, ya que la reacción puede ocurrir sin la necesidad de adicionar energía. Por otra parte, si se abarca las celdas electrolíticas las cuales necesitan electricidad para separar las moléculas del agua, se dice que esta reacción no es espontánea, dando a entender que es necesario adicionar energía para que pueda ocurrir la reacción, así pues, el cambio de la energía libre de Gibbs para este caso será positiva.

6.2.4. Voltaje Teórico

El voltaje teórico de una celda de combustible es aquel que no tiene pérdidas y está estrechamente relacionado con la termodinámica del sistema, de esta forma en esta sección se trata temas como el voltaje reversible y el voltaje de Nernst. Así mismo se relaciona el voltaje teórico con la temperatura y la presión abarcando temas que conciernen a la entropía y a las presiones parciales que se originan en el cátodo y ánodo de la celda de combustible.

6.2.4.1. Voltaje Reversible

El voltaje reversible es aquel voltaje el cual se puede obtener a partir del cambio de la energía libre Gibbs, la cual se define como una medida de trabajo o potencia eléctrica máxima a una temperatura y presión constante [21, 24], de tal modo esta relación se expresa como:

$$W_{elect} = -\Delta G \quad (6.4)$$

Por lo que se refiere a la potencia eléctrica, esta se puede relacionar con la carga Q y el voltaje E , de tal forma de poder establecer una relación entre el cambio de la energía libre de Gibbs y el voltaje reversible E_r . La carga se relaciona con el número de electrones por mol de combustible n por la constante de Faraday F .

$$W_{elect} = EQ$$

$$E_r = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (6.5)$$

El cálculo del voltaje reversible se determina por el cambio de la energía libre Gibbs, ya sea por medio de tablas o a partir del cálculo de la entalpía y entropía de las sustancias en su estado neutral. Para el caso de la reacción donde los reactivos es el hidrógeno con el oxígeno en estado gaseoso y el producto es agua en estado líquido, el cálculo para el cambio de la energía libre de Gibbs se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \Delta G &= \left[h_{H_2O(L)} - \left(h_{H_2(g)} + \frac{1}{2} h_{O_2(g)} \right) \right] - T \left[s_{H_2O(L)} - \left(s_{H_2(g)} + \frac{1}{2} s_{O_2(g)} \right) \right] \\ \Delta G &= \left[-285826 - \left(0 + \frac{1}{2} 0 \right) \right] - 298K \left[69,92 - \left(130,8 + \frac{1}{2} 205,14 \right) \right] \\ \Delta G &= -237153,66 \frac{J}{mol} \end{aligned}$$

Donde $h_{H_2O(L)}$, $h_{H_2(g)}$, $h_{O_2(g)}$ es la entalpía del agua en estado líquido, la entalpía del agua en estado gaseoso y la entalpía del oxígeno en estado gaseoso respectivamente, de igual forma para $s_{H_2O(L)}$, $s_{H_2(g)}$, $s_{O_2(g)}$ es la entropía del agua en estado líquido, la entropía del hidrógeno en estado gaseoso y la entropía del oxígeno en estado gaseoso. Es necesario resaltar que los anteriores valores hacen referencia a mediciones hechas a temperaturas de 25°C y a presiones de una atmósfera, como lo indica en el análisis del libro [25].

El cálculo desarrollado para el cambio de la energía libre de Gibbs es teniendo como referencia que se usó una pila de combustible PEM, es decir una pila de combustible que trabaja por debajo del punto de ebullición del agua, por lo cual la entalpía y entropía del agua se toman en estado líquido.

Para el cálculo del voltaje reversible se toma en consideración que por medio de la reacción que se da en el ánodo de la celda de combustible, el número de electrones por mol de hidrógeno son dos, ya que el hidrógeno molecular cuando pasa por la membrana se divide en dos isótopos de hidrógeno y en dos electrones. A partir de lo anterior el voltaje reversible según el cálculo del cambio de la energía libre de Gibbs es el siguiente.

$$E_r = \frac{-(-237153,66 \frac{J}{mol})}{2 \frac{mol_{e^-}}{mol} 96487 \frac{C}{mol_{e^-}}}$$

$$E_r = 1,229V$$

6.2.4.2. Voltaje Nernst

El voltaje de Nernst es la relación que hay entre el voltaje reversible en condiciones estándar (temperaturas de 25°C y a presiones de una atmósfera) con el voltaje en circuito abierto a diferentes temperaturas y presiones [22].

La relación que hay entre el voltaje y la temperatura está dada por el cambio de la entropía asumiendo que la entalpía no cambia en función de la temperatura. Dicho lo anterior esta relación se puede expresar de la siguiente forma [21].

$$\Delta E_r = \frac{-(\Delta H - T\Delta S)}{nF}$$

$$\Delta E_r = \frac{dE_r}{dT}(T - T_{ref})K$$

$$\Delta E_r = \frac{\Delta S}{nF}(T - T_{ref})K \quad (6.6)$$

Donde ΔS se define en condiciones estándar, T es la temperatura de la celda y T_{ref} es la temperatura de referencia en grados K. El delta del voltaje reversible se define de la siguiente manera [26, 27].

$$\Delta S = s_{H_2O(l)} - \left(s_{H_2(g)} + \frac{1}{2}s_{O_2(g)} \right)$$

$$\Delta S = 69,92 - \left(130,8 + \frac{1}{2}205,14 \right)$$

$$\Delta S = -163,33 \frac{J}{molK}$$

$$\Delta E_r = \frac{-163,33 \frac{J}{molK}}{2 \frac{mol_{e^-}}{mol} 96487 \frac{C}{mol_{e^-}}}(T - T_{ref})K$$

$$\Delta E_r = -0,84638 \times 10^{-3} \frac{J}{CK}(T - T_{ref})K$$

De tal forma que el voltaje en relación con la temperatura queda expresado como:

$$E_o = E_r + \Delta E_r \quad (6.7)$$

Para establecer la relación entre la presión y el voltaje se debe tener en cuenta la energía libre Gibbs con la presión, a si pues, haciendo uso de la ley de los gases ideales R se defina la relación entre el voltaje y la presión. Estableciendo lo anterior el voltaje de Nernst se puede escribir de la siguiente forma partiendo del análisis expuesto en [21, 28].

$$E = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{ppH_2 ppO_2^{0,5}}{ppH_2O} \right) \quad (6.8)$$

Donde ppH_2 es la presión parcial que ejerce el hidrógeno en el ánodo, ppO_2 es la presión parcial que ejerce el oxígeno en el cátodo y ppH_2O es la presión parcial del agua.

Por lo que se refiere a la presión que ejerce el agua en el cátodo, está es igual a uno, dado que el agua está en estado líquida y que por el correcto funcionamiento de la celda esta se debe estar se extrayendo para que no obstaculice los poros de la membrana, de forma que la ecuación (6.8) se reescribe de la siguiente manera.

$$E = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \left(ppH_2 ppO_2^{0,5} \right) \quad (6.9)$$

Para el cálculo de las presiones parciales se debe tener en consideración que las concentraciones efectivas del hidrógeno y del oxígeno se determinan con un análisis de transporte de masas. El análisis correspondiente se puede evidenciar en el artículo [26] en el cual se establece que hay tres factores que delimitan las concentraciones del hidrógeno y oxígeno, la primera es el transporte de masas entre los canales de flujo de gas y los electrodos porosos, la segunda es transporte de masas entre la capa difusora de gas y el catalizador; la tercera es el transporte de masas entre las partículas de agua y la superficie del catalizador. En la figura 3 se evidencia en que zonas está presente el transporte de masas.

Por lo que se refiere a las presiones parciales, estas se estiman a partir del análisis elaborado en los artículos [26, 28].

$$ppH_2 = 0,5P_{H_2O_{sat}} \left[\frac{1}{\exp \left(\frac{RTi_a}{4FP_a D_{H_2O, H_2}} \right) X_{H_2O}} - 1 \right] \quad (6.10)$$

$$ppO_2 = P_{H_2O_{sat}} \left[\frac{1}{\exp \left(\frac{RTil_c}{4FP_c D_{H_2O, O_2}} \right) X_{H_2O}} - 1 \right] \quad (6.11)$$

Donde i es la corriente de la celda, l_a y l_c es el ancho entre los electrodos y el catalizador, P_a y P_c son las presiones que ejercen el hidrógeno y el oxígeno en el ánodo y el cátodo respectivamente sin haber pasado por los componentes de la celda, X_{H_2O} es la fracción molar del agua, D_{H_2O, H_2} con D_{H_2O, O_2} es la difusión binaria entre el agua con el hidrógeno y el oxígeno respectivamente y $P_{H_2O_{sat}}$ es la presión de saturación del agua.

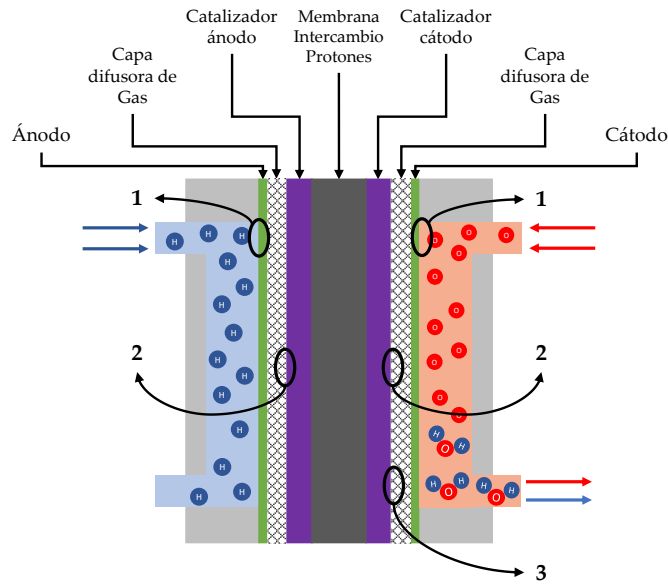


FIGURA 3: Transporte de masas en una celda de combustible PEM [20]

Para el cálculo de la presión de saturación del agua se puede estimar su valor por medio de los análisis hechos en los trabajos [26, 27, 29]

$$P_{H_2O_{sat}} = 10^{[-2,1794 + (0,02953T_c) - (9,1837 \times 10^{-5}T_c^2) + (1,4454 \times 10^{-7}T_c^3)]} \quad (6.12)$$

Donde T_c es la temperatura de la celda en grados centígrados.

Por lo que se refiera al cálculo de la fracción molar del agua se debe conocer la cantidad de moles que tienen las reacciones, no obstante, si no se tienen los moles se puede deducir la fracción molar del agua a partir del análisis propuesto en el capítulo del libro [30].

En primera instancia se calcula la presión del agua en estado gaseoso $P_{H_2O(g)}$ multiplicando la humidificación de los gases Θ por la presión de saturación del agua gaseosa P_{sat} . La humidificación de los gases se define suponiendo que los gases no tienen humedad y que el cálculo de la presión de saturación es en base a la temperatura de la celda en grados centígrados.

$$P_{sat} = \frac{-2846,4 + (411,24T_c) - (10,554T_c^2) + (0,16636T_c^3)}{10000}$$

$$P_{H_2O(g)} = \Theta P_{sat} \quad (6.13)$$

Posteriormente se calcula la fracción molar del agua en estado gaseosa dividiendo la presión del agua en estado gaseosa $P_{H_2O(g)}$ con la presión total P_{tol} la cual en este caso es uno.

$$X_{H_2O(g)} = \frac{P_{H_2O(g)}}{P_{tol}} \quad (6.14)$$

Al definir la fracción molar del agua en estado gaseosa se define la fracción molar del agua en estado líquida $X_{H_2O(L)}$ de la siguiente manera.

$$X_{H_2O(L)} = \frac{X_{H_2O(g)} P_{sat}}{P_{tol}} \quad (6.15)$$

Por último, se calcula la fracción molar del agua sumando las fracciones molares del agua en estado gaseosa y líquida.

$$X_{H_2O} = X_{H_2O(g)} + X_{H_2O(L)} \quad (6.16)$$

6.3. Electroquímica de las pilas de combustible

La electroquímica de las pilas de combustible, a diferencia de la termodinámica permite conocer aspectos teóricos que aporta información sobre fenómenos físicos como la rapidez con la que ocurre la reacción en los electrodos, la velocidad con la que se produce corriente eléctrica y puede predecir las pérdidas que tiene el sistema durante la reacción química.

Esta sección se enfoca en determinar las pérdidas que tiene una celda de combustible en función de dos métodos. El primero es un método Teórico el cual tiene como base ecuaciones que se

originan en la literatura, analizando la matemática de las reacciones que ocurren en el sistema. El segundo método se fundamenta en la experimentación y en la recolección de datos reales, de forma que a partir de ecuaciones sencillas se cree un modelo que se aproxime a la realidad[20].

Por lo que se refiere a las pérdidas del sistema se estudian tres factores, la primera son las pérdidas de activación, la segunda son las pérdidas por concentración y la última son pérdidas originadas por resistencias parásitas. Definiendo las pérdidas del sistema se abarca el voltaje de la celda de combustible con pérdidas además de su eficiencia y potencia eléctrica.

6.3.1. Método Teórico

Los modelos teóricos, es decir los que basan sus ecuaciones en función de procedimientos matemáticos, se definen por medio de ecuaciones que relacionan lo práctico y lo teórico teniendo en cuenta las reacciones electroquímicas que se dan en la pila de combustible, dando como resultado un modelo aproximado.

En las siguientes secciones se hablará acerca de las pérdidas de una pila de combustible en base a un análisis matemático expuesto en los escritos [23, 24, 28, 31] los cuales representan el modelo matemático a partir del análisis que tiene la termodinámica y la electroquímica en las pilas de combustible PEM.

6.3.1.1. Pérdidas Por Activación

Las pérdidas de activación o el voltaje de activación es un potencial que se origina cuando se comienza la reacción en los electrodos de la celda de combustible, así mismo este voltaje se caracteriza por ser no lineal, de tal forma que para densidades de corriente bajas las pérdidas son mayores que a densidades de corriente altas. Estas pérdidas se relacionan con la cinética lenta de los electrodos, de tal forma que tanto en el cátodo y en el ánodo se requiera un potencial para iniciar la reacción, es necesario precisar que cuando se reduce el oxígeno en el cátodo se requiere un potencial mayor que al que se origina cuando se oxida el hidrógeno en el ánodo.

Por lo que se refiere a las pérdidas por activación el método teórico las define relacionado la densidad de corriente (i) con la densidad de corriente de intercambio (i_o) que es una constante que relaciona la tasa de flujo de electrones que van desde y hacia el electrolito, de tal forma que la formula se define a partir de la ecuación (6.17).

$$V_{act_a} + V_{act_c} = \left(\frac{RT}{nF\alpha_a} \ln \left(\frac{i}{i_{o,a}} \right) \right) + \left(\frac{RT}{nF\alpha_a} \ln \left(\frac{i}{i_{o,c}} \right) \right)$$

$$V_{act} = \left(\frac{RT}{nF\alpha_a} \ln \left(\frac{i}{i_o} \right) \right) \quad (6.17)$$

De acuerdo a la ecuación de Tafel la cual define la polarización reversible de un electrodo, la ecuación (6.17) se puede extrapolar de la siguiente forma.

$$V_{act} = a + b \ln(i) \quad (6.18)$$

$$a = -\frac{RT}{nF\alpha_a} \ln(i_o) \quad b = \frac{RT}{nF\alpha_a}$$

Donde R es la constante de los gases ideales, T es la temperatura de la celda en grados kelvin, n es el número de electrones por mol de combustible, F es la constante de Faraday y α_a es el coeficiente de transferencia de carga la cual es la encargada de definir la velocidad con la que se produce la reacción electroquímica, es decir la cinética de los electrodos.

El parámetro α_a tiene un rango entre cero y uno, de tal forma si este se aproxima a uno las pérdidas disminuyen y así mismo cuando se acerca a cero las pérdidas aumentan, por otro lado, si la densidad de corriente de intercambio disminuye el efecto en el voltaje de activación será un aumento en las pérdidas. En la figura 4 se observa el comportamiento que tiene las pérdidas por activación según el cambio del coeficiente de carga .

6.3.1.2. Pérdidas Por Concentración

Las pérdidas por concentración o también llamadas pérdidas por el transporte de masas, se dan cuando el hidrógeno y oxígeno, los reactivos, pasan por los canales de flujo hasta reaccionar en la superficie del catalizador [22, 28, 32]. Estas pérdidas se relacionan directamente con la capa difusora de gas y el electrolizador, de forma tal que el análisis hecho para predecir las presiones parciales se enlaza con el análisis para predecir las pérdidas por concentración.

De la misma forma que existe presiones parciales tanto del hidrógeno y el oxígeno, las pérdidas por concentración se producen en el ánodo y el cátodo, de forma tal que es necesario tener claridad que aspectos físicos repercuten en la disminución o el aumento de estas pérdidas. En

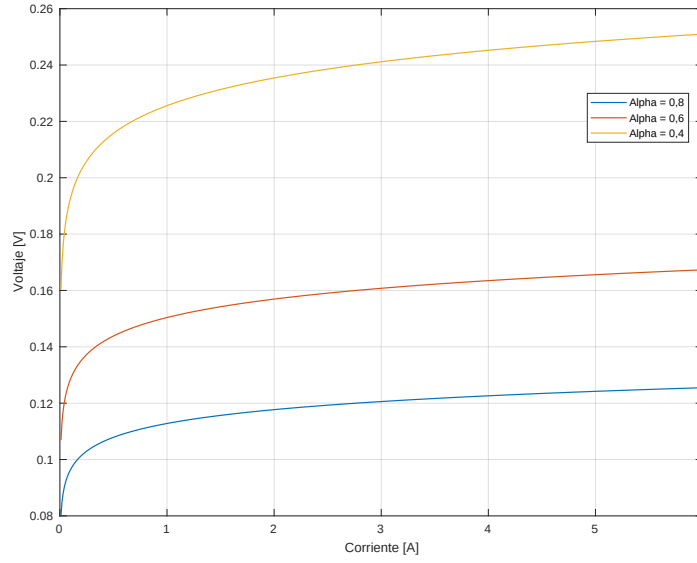


FIGURA 4: Representación gráfica de las pérdidas por activación según el cambio del coeficiente de carga [31]

base a la figura 3 se conoce los tres aspectos que afectan a las presiones parciales, no obstante, esto indica las presiones eficaces a las que el catalizador se somete, de forma tal que no tiene en cuenta la velocidad con la que se consume los reactivos; así pues es un análisis netamente para el voltaje de Nernst, el cual no tiene en consideración pérdidas. Estableciendo lo anterior las pérdidas por concentración se definen de la siguiente manera.

$$V_{con} = E_{Nert,C_0} - E_{Nert,C_1}$$

$$V_{con} = \left(E - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{1}{C_0} \right) \right) - \left(E - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{1}{C_1} \right) \right)$$

$$V_{con} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_0}{C_1} \right) \quad (6.19)$$

$$\frac{C_0}{C_1} = \frac{i_L}{i_L - i}$$

Donde i_L es la corriente máxima que se puede obtener de la pila de combustible. Por otra parte, en la medida que la densidad de corriente se aproxime a la corriente limite aumentará las pérdidas del sistema, sin embargo este fenómeno rara vez se da en la realidad, ya que, por aspectos físicos de la pila de combustible más concretamente en el electrodo poroso la densidad de corriente no es capaz de llegar a la corriente limite. En consecuencia, a lo dicho anteriormente

en los escritos [28, 32] proponen añadir un parámetro α_c que aumente las pérdidas de tal forma que el modelo se aproxime a la realidad. En la figura se muestra el comportamiento que tiene las pérdidas de concentración comparando la ecuación teórica con la propuesta por los autores.

$$V_{con} = \frac{RT}{nF} \left(1 + \frac{1}{\alpha_c} \right) \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right) \quad (6.20)$$

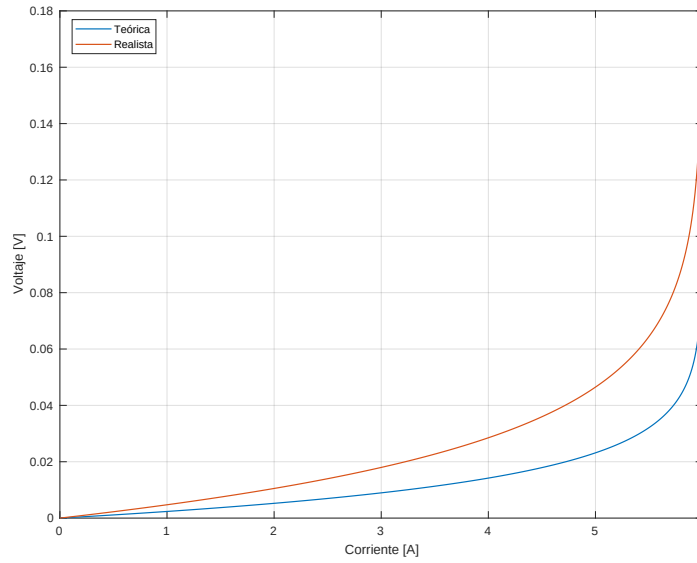


FIGURA 5: Representación gráfica de las pérdidas por concentración [32]

6.3.1.3. Pérdidas Óhmicas

Las pérdidas óhmicas, es un voltaje el cual a la hora de modelar una pila de combustible es el que tiene más relevancia [33], ya que, en comparación con las pérdidas de activación o concentración, las cuales se dan al inicio y al final de la reacción, estas están presentes en todas las fases de la reacción. Estas pérdidas se dividen en dos grupos, la primera hace referencia a la resistencia eléctrica la cual es la suma de todos los componentes de la pila de combustible y la segunda hace referencia a las pérdidas iónicas la cual representa la resistencia del electrolito. Una de las características las pérdidas iónicas es que son más difíciles de predecir que las eléctricas, ya que están sometidas al viaje de los iones del hidrógeno por la membrana, en consecuencia, la ecuación general que representa las pérdidas óhmicas se muestra a continuación.

$$V_{ohm} = iR_{ohm} \quad (6.21)$$

$$R_{ohm} = R_{elec} + R_{ion}$$

Donde R_{elec} es la resistencia eléctrica y R_{ion} es la resistencia derivada por las pérdidas iónicas. Por lo que se refiere a las pérdidas iónicas, si bien estas son más difíciles de calcular es posible estimar su valor en base al ancho del electrolizador de la membrana L que está dado en centímetros sobre la conductividad de la membrana σ , que para las pilas de combustible PEM está alrededor de 0,10 a 0,001 por el área de la membrana.

$$R_{ion} = \frac{L}{\sigma A}$$

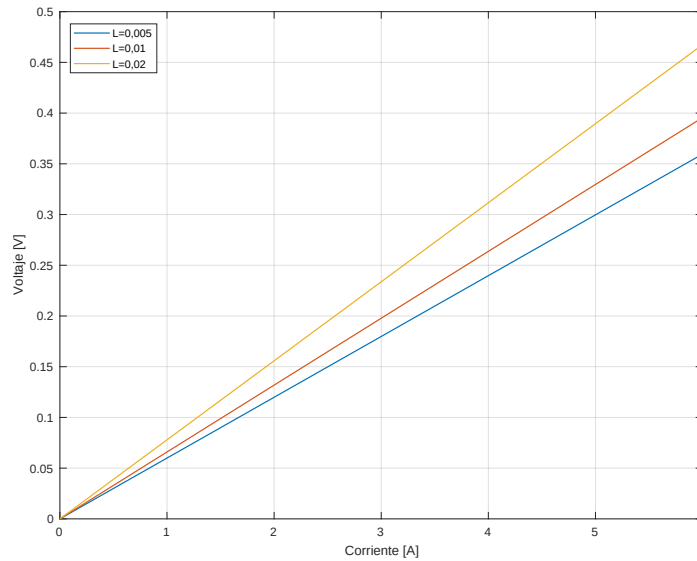


FIGURA 6: Representación gráfica de las pérdidas óhmicas [33]

6.3.2. Método Empírico

El método empírico fundamenta sus ecuaciones basándose en un análisis práctico, de tal forma que puedan representar los comportamientos del sistema, construyendo un modelo a partir de datos recolectados y de la experimentación. Es necesario precisar que no porque las ecuaciones sean empíricas significa que se desliga de su comportamiento natural, es decir, los comportamientos no lineales que tienen las pérdidas de activación y concentración tendrán el mismo comportamiento que el teórico, de igual forma pasa con las pérdidas óhmicas.

Uno de los aspectos más importantes que tienen los modelos empíricos en contra parte de un modelo no empírico es la postulación de modelos dinámicos, en otras palabras, además de simular los comportamientos estáticos de la pila de combustible, simule los comportamientos del sistema conforme evoluciona el tiempo, estableciendo un modelo más acorde con la realidad [34].

Estableciendo lo anterior en las siguientes secciones se hablará de dos métodos empíricos que abstraen los comportamientos de la pila de combustible por medio de un modelo eléctrico.

6.3.2.1. Modelo Eléctrico

Este modelo se caracteriza por representar los comportamientos que tiene las pilas de combustible por medio de un circuito equivalente, simulando los comportamientos estáticos y dinámicos que tiene el sistema. El circuito se compone de resistencias, un condensador, una fuente dependiente de voltaje y una fuente de voltaje que representa el voltaje de Nernst.

Por lo que se refiere al voltaje de Nernst, este cambia con respecto al teórico, ya que al simular los comportamientos dinámicos de la celda es necesario replantear este voltaje teniendo en consideración el análisis de los siguientes escritos [35, 36].

$$E = E_o + \frac{RT}{nF} \ln \left(ppH_2 ppO_2^{0,5} \right) - \lambda_e i(s) \frac{\tau_e s}{\tau_e s + 1} \quad (6.22)$$

Donde λ_e es una constante empírica y τ_e es una constante de tiempo que hace referencia al tiempo que tarda la pila de combustible en reaccionar a los transitorios de carga, dada en segundo.

Uno de los aspectos más importantes al plantear un modelo dinámico de una pila de combustible es el efecto llamado “carga de doble capa” [27, 34], esto debido al contacto de dos materiales cargados a diferentes potenciales que produce una acumulación de carga en la superficie de los materiales, es decir, este efecto actúa como un elemento almacenador de energía comportándose como un condensador, de tal forma que en las variaciones de carga el comportamiento en el voltaje no sea instantáneo si no que haya un retraso el cual es afectado por las pérdidas de activación y concentración.

En la figura 7 se muestra el circuito equivalente en donde se puede definir la constante tiempo como la suma de las pérdidas de concentración y activación por el condensador, como se observa en la ecuación (6.23). Por otra parte, el voltaje del condensador C se define a partir de la

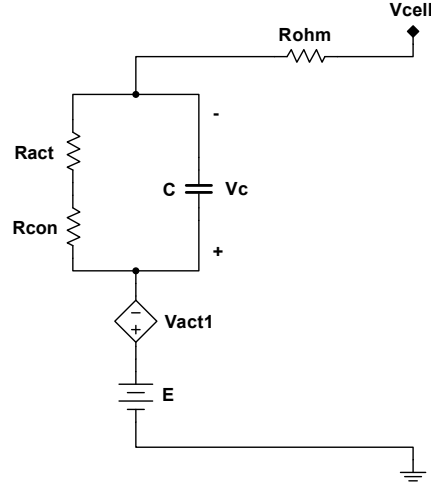


FIGURA 7: Modelo eléctrico de una pila de combustible PEM[36]

ecuación (6.24) de modo que al ocurrir cambios en la corriente se pueda evidenciar la dinámica que tiene la celda de combustible de acuerdo a la constante de tiempo; el valor del condensador C se obtiene de forma experimental debido a que no es posible definir su valor a partir de una ecuación.

$$\tau = (R_{act} + R_{con}) C \quad (6.23)$$

$$V_C = \left(i - C \frac{dV_C}{dt} \right) (R_{act} + R_{con}) \quad (6.24)$$

Por lo que se refiere al desarrollo de las ecuaciones para encontrar los valores de los componentes eléctricos, se debe tener en cuenta que se tiene distintas postulaciones, sin embargo, lo que determina que modelo usar es la exactitud al momento de comparar los datos experimentales con el modelo simulado. En cuanto a los modelos se establecerá dos postulaciones de diferentes autores que abstraen de una manera simplificada los comportamientos que tiene una pila de combustible.

6.3.2.2. Primer Modelo Eléctrico

El primer modelo parte de un análisis adscrito en el libro [36] y en los artículos [27, 37] el cual basa sus ecuaciones a partir del análisis teórico. Por lo que se refiere a las pérdidas de activación, estas tienen como base la ecuación (6.18), sin embargo, añaden un parámetro η_o el cual es un

voltaje que es referido a la parte invariante de la temperatura de tal forma que las pérdidas de activación se representen de la siguiente manera.

$$V_{act} = V_{act_1} + V_{act_2}$$

$$V_{act_1} = \eta_o + (T - T_{ref}) \left(\frac{-R}{nF\alpha_a} \ln(i_o) \right) \quad (6.25)$$

$$V_{act_2} = T \left(\frac{R}{nF\alpha_a} \ln(i) \right) \quad (6.26)$$

$$R_{act} = \frac{V_{act_2}}{i} \quad (6.27)$$

Las pérdidas por concentración se relacionan de la misma forma como el análisis teórico, de tal forma que la ecuación (6.20) define el comportamiento que tiene R_{con} definiendo la de la siguiente manera.

$$V_{con} = \frac{RT}{nF} \left(1 + \frac{1}{\alpha_c} \right) \ln \left(\frac{i_L}{i_L - i} \right)$$

$$R_{con} = \frac{V_{con}}{i} \quad (6.28)$$

Por ultimo para las pérdidas óhmicas el análisis propuesto define una resistencia R_{ohm_0} la cual depende de la temperatura además de plantear dos constantes empíricas K_{RI} y K_{RT} , de forma tal que la resistencia óhmica se define de la siguiente manera.

$$R_{ohm} = R_{ohm_0} + K_{RI}i + K_{RT}T \quad (6.29)$$

6.3.2.3. Segundo Modelo Eléctrico

El segundo modelo consta de un análisis netamente experimental en el cual en los artículos [29, 35, 38-40] han demostrado su eficacia al representar correctamente las características eléctricas de una pila de combustible.

Para las pérdidas de activación, el voltaje V_{act_1} se relaciona con unos parámetros $E_1, E_{21}, E_{22}, E_{23}$ y E_3 los cuales son constantes que se obtienen de forma experimental.

$$V_{act_1} = E_1 + E_2T + E_3Ln(C_{O_2}) \quad (6.30)$$

$$E_2 = E_{21} + E_{22}Ln(A) + E_{23}Ln(C_{H_2})$$

$$C_{O_2} = \frac{ppO_2}{5,08 \times 10^6 \exp\left(\frac{-498}{T}\right)} \quad C_{H_2} = \frac{ppH_2}{1,09 \times 10^6 \exp\left(\frac{77}{T}\right)}$$

La resistencia de activación (R_{act}) se define por una constante E_4 de modo que se define de la siguiente forma.

$$R_{act} = -\frac{E_4T Ln(i)}{i} \quad (6.31)$$

Continuando con las pérdidas de concentración, estas se definen a partir de un parámetro B el cual cumple la función de modificar las pérdidas de concentración del sistema.

$$V_{con} = B Ln\left(\frac{i_L}{i_L - i}\right) \quad (6.32)$$

$$R_{con} = \frac{V_{con}}{i} \quad (6.33)$$

Por ultimo de acuerdo con las pérdidas óhmicas se tiene una resistencia equivalente de la membrana R_M mas una resistencia iónica R_C de tal forma que la ecuación se define de la siguiente manera.

$$R_{ohm} = R_M + R_C \quad (6.34)$$

$$R_M = \frac{L}{A} \frac{181,6 \left(1 + 0,03 \frac{i}{A} + 0,062 \left(\frac{T}{303}\right)^2 \left(\frac{i}{A}\right)^{2,5}\right)}{\left(\psi - 0,634 - 3 \frac{i}{A} \exp\left(4,18 \frac{T-303}{T}\right)\right)}$$

Donde L es el espesor de la membrana, A es el área de la celda y ψ es una constante en función de la humedad relativa.

6.3.3. Voltaje de las Pilas de Combustible

El voltaje de una celda de combustible se define por medio de su voltaje de Nernst menos las pérdidas del sistema, no obstante, es necesario precisar que si bien la forma general para definir el voltaje de la celda es como se expresó anteriormente, la fórmula difiere si estamos representando un sistema estático o dinámico.

Para representar el voltaje de la celda sin ninguna dinámica, es decir un sistema estático, el cual define su salida en curso únicamente con su entrada en curso que en el caso de las celdas de combustible sería la temperatura, la presión o la corriente, la ecuación se define de la siguiente manera.

$$V_{cell} = E - (V_{act} + V_{con} + V_{ohm}) \quad (6.35)$$

La ecuación (6.35) representa el voltaje estático de la celda de combustible dando por hecho que las pérdidas y el voltaje de Nernst se relacionan con el método teórico, ya que las ecuaciones no poseen ningún tipo de dinámica. Por otra parte, en la figura 8 se representa la curva de polarización de una celda de combustible en donde se identifica varias zonas que representan las pérdidas del sistema, el voltaje reversible y el voltaje de Nernst.

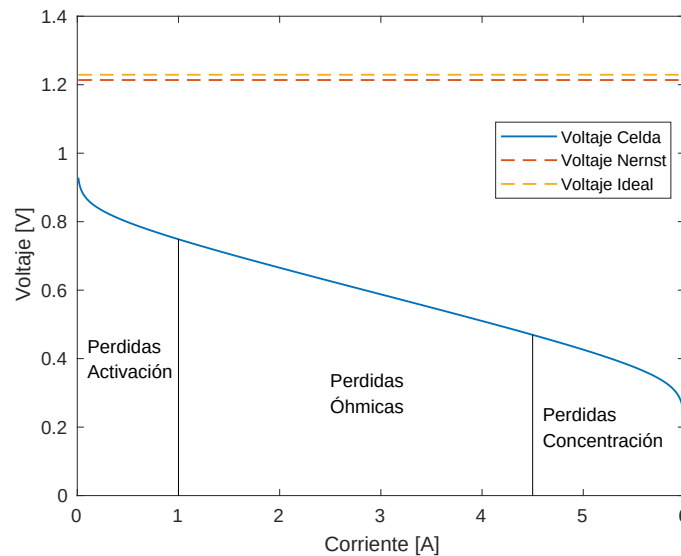


FIGURA 8: Curva de polarización de una celda de combustible PEM [33]

Por lo que se refiere al modelo dinámico, el voltaje se define por medio de la ecuación (6.36) que hace referencia al potencial de los dos modelos eléctricos el cual se hablaron en la sección 6.3.2.1. Es necesario resaltar que no difiere la curva de polarización entre el modelo estático con

el dinámico, solo hay diferencias entre los modelos cuando hay variaciones de carga, en donde se observan transitorios los cuales son emulados por medio de una respuesta de primer orden calculando el tiempo de carga del condensador basándonos en la ecuación (6.23).

$$V_{cell} = E - V_{act_1} - V_C - V_{ohm} \quad (6.36)$$

6.3.4. Potencia eléctrica y eficiencia de las pilas de combustible

La eficiencia en el marco de las pilas de combustible es un parámetro que indica el comportamiento del sistema en cuestión de la energía necesaria para alimentar una carga. Para evaluar la eficiencia de un sistema electroquímico existen distintos enfoques, no obstante, para este caso se hace la relación entre el voltaje de la pila de combustible incluyendo las pérdidas con el voltaje teórico. En la figura 9a se detalla la eficiencia respecto a la corriente, notando que a mayor corriente la eficiencia es menor, por otra parte, en la figura 9b se representa el comportamiento de la potencia de una pila de combustible respecto a la corriente, evidenciando que a medida que la corriente se acerca a la corriente límite la potencia tiende a disminuir.

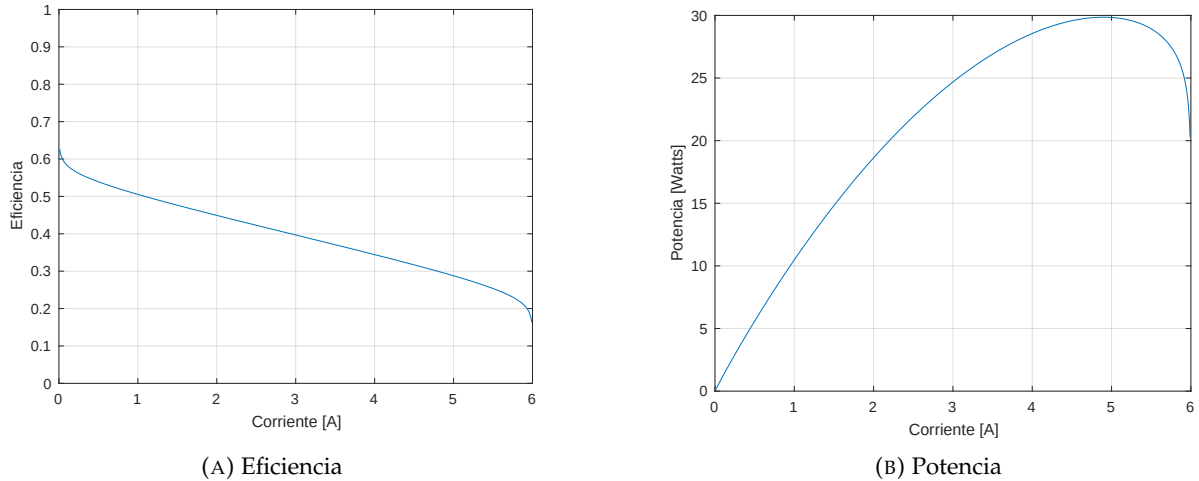


FIGURA 9: Eficiencia y potencia de una pila de combustible PEM [33]

Capítulo 7

Implementación del Algoritmo de Optimización

La implementación de modelos matemáticos para la emulación de sistemas posee incongruencias a la hora de contrastar la teoría con la práctica, uno de los factores que influyen en la discrepancia de los datos, son las condiciones en las que se propone el modelo, es decir, se elabora el modelo en situaciones ideales para formular ecuaciones más generales, de forma que a posteriori con la implementación de variables se pueda acomodar las ecuaciones conforme a los comportamientos que tiene el sistema en la práctica. Un ejemplo de estas variables puede ser desde pérdidas ocasionadas por elementos resistivos hasta parámetros físicos que tiene el sistema que no son invariables, como el desgaste ocasionado por el uso o factores adversos que modifiquen el comportamiento del sistema.

Respecto a las variables que modifican las ecuaciones a una forma más exacta se tiene una incertidumbre al determinar el valor de cada variable, puesto que si se está analizando un sistema de acuerdo a una función que determina el voltaje y se tienen más de dos variables el proceso matemático para la obtención de los valores se dificulta en comparación a tener la función con una única variable, ya que, se estaría involucrando un problema de toma de decisiones que implica escoger entre varias alternativas para obtener un resultado conforme a lo esperado. A partir de esta problemática surgen los algoritmos de optimización, dentro de los cuales existen diferentes clasificaciones como la optimización con restricciones, sin restricciones, con una o varias funciones objetivas o la optimización por medio de algoritmos evolutivos o bioinspirados los cuales han demostrado ser una solución robusta para los problemas con un elevado número de variables.

Uno de los aspectos más importantes dentro de los algoritmos bioinspirados son el hecho que basan sus análisis en comportamientos originados en la naturaleza, es decir, simula o abstrae conductas como la búsqueda que tiene el enjambre de abejas al encontrar una nueva colonia o funciones como la de una neurona planteando soluciones por medio del Deep Learning. En este proyecto se implementó un algoritmo heurístico de optimización por medio de enjambre de partículas (PSO) que basa su análisis en el comportamiento que tiene los pájaros o los cardumenes de peces, abstrayendo el movimiento con base en su velocidad, distancia y dirección de tal forma de encontrar una solución óptima combinando las decisiones individuales con las colectivas.

7.1. Optimización de Enjambre de Partículas

La optimización por enjambre de partículas busca minimizar o maximizar una función objetivo simulando partículas en un espacio de búsqueda que a partir del movimiento individual y colectivo se pueda llegar a una solución óptima. El algoritmo se caracteriza por realizar un seguimiento de las mejores posiciones de cada individuo con base en su función objetivo, de tal forma que en las siguientes iteraciones se modifique la posición de la partícula evaluando su velocidad por medio de la mejor posición colectiva g_{ix} , la mejor posición individual p_{xik} y con la posición actual $x_{i,k}$.

$$v_{i+1,k} = wv_{i,k} + c_1r_1(p_{xik} - x_{i,k}) + c_2r_2(g_{ix} - x_{i,k}) \quad (7.1)$$

En la ecuación (7.1) denotan una serie de variables como lo son la inercia w que es la encargada de mantener a la partícula en movimiento, un coeficiente cognitivo c_1 que es responsable de mover a la partícula hacia la mejor posición individual, un coeficiente social c_2 la cual mueve a la partícula a la mejor posición encontrada entre todas las partículas y por último r_1 y r_2 que pueden ser escalares o unos vectores que están comprendidos entre 0 - 1 que añaden fluctuaciones al movimiento de la partícula obteniendo mejores resultados en pro de un incremento en el tiempo de convergencia [41].

El diagrama de flujo de la figura 10 muestra de manera general los pasos del algoritmo de optimización. Para definir el objetivo a alcanzar, se puede delimitar por varios factores entre estos esta un error mínimo, es decir, el algoritmo solo se detiene siempre y cuando se tenga un error menor o igual al establecido. Por otra parte, se podría definir otro factor a partir de la tasa de cambio del error que, en otras palabras, se mide el resultado obtenido al restar el

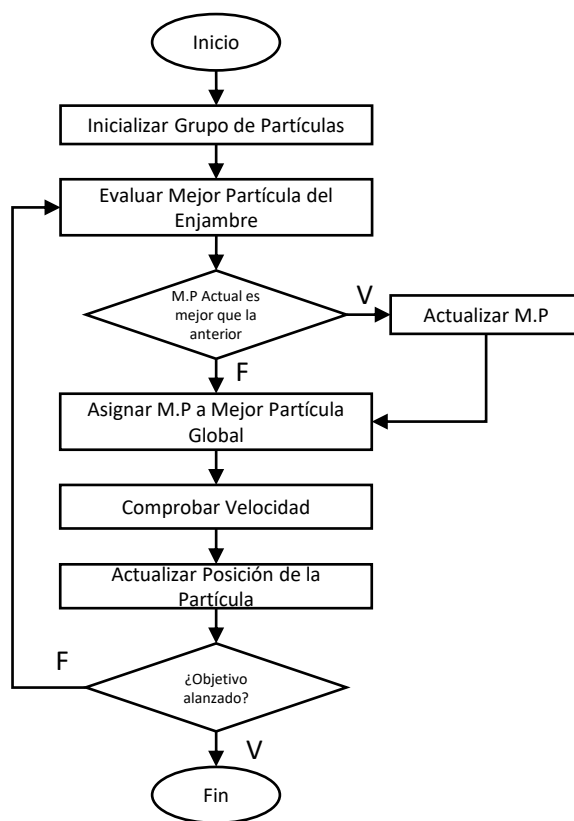


FIGURA 10: Diagrama del algoritmo de optimización de enjambre de partículas

error anterior con el actual, de forma tal que al llegar a un punto donde el resultado no varíe se detiene la optimización obteniendo mejores resultados que definiendo un error mínimo el cual se tiene la incertidumbre si es posible que llegue.

Con respecto a las consideraciones del algoritmo PSO, la primera es definir correctamente las variables w , c_1 y c_2 , de no definir adecuadamente las variables se corre el riesgo de que las partículas caigan en un mínimo local perjudicando a la optimización, por otra parte, la segunda consideraciones es definir correctamente los límites del plano de búsqueda, debido a que este establece en donde se encontrará los mínimos y máximos de la función.

7.1.1. Definir las Variables del Algoritmo

Esta sección se definirán las variables w , c_1 y c_2 del algoritmo PSO teniendo en cuenta que se debe delimitar la función objetivo, en el caso de este proyecto se define por medio del error al evaluar los datos obtenidos en la práctica con el modelo el cual se quiere optimizar.

En relación con los datos teóricos, estos se obtuvieron haciendo un análisis en la pila de combustible variando la resistencia de carga, obteniendo la curva de polarización del sistema la cual se muestra en la figura 11 que es evaluada por el cambio del voltaje y la corriente, es necesario aclarar que la curva de polarización es en base a una celda de forma que el voltaje de la pila de combustible se debe dividir por el número de celdas que para este caso serian 14. Con base en lo anterior la función objetivo se determina por el error entre los datos experimentales y el modelo, teniendo en cuenta que la entrada del sistema es la corriente y que el voltaje es la variable que se evalúa en el error cuadrático medio (MSE).

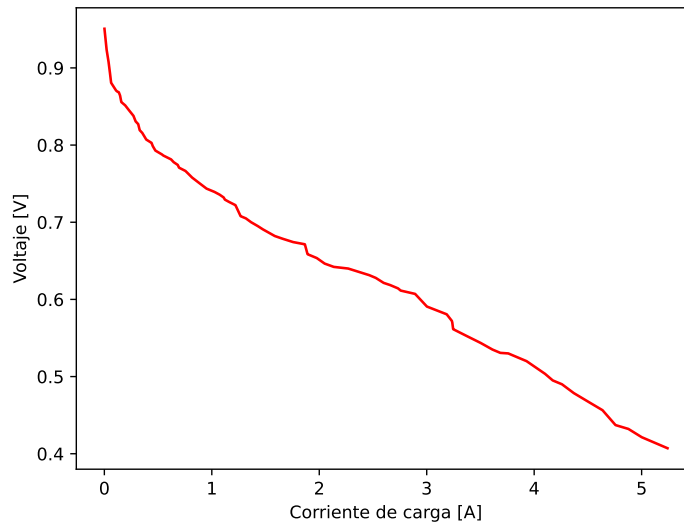


FIGURA 11: Polarización de la pila de Combustible

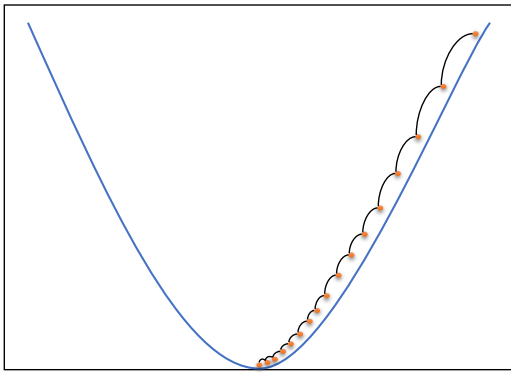
Los parámetros del modelo como α_a , α_c y otros al ser optimizados son los responsables de que concuerde el modelo, no obstante, cuando se evalúa la función objetivo solo se busca minimizar el error, sin embargo, implícitamente al minimizar el error las partículas del algoritmo modifican los parámetros para que al momento de evaluar el error MSE, basándose en el voltaje y la corriente, el modelo concuerde en el experimental.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (7.2)$$

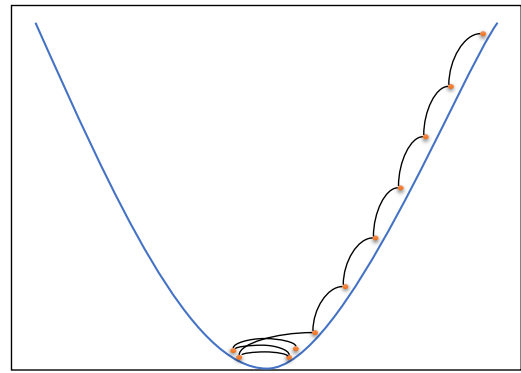
Donde y_i son los datos de referencia y $\bar{y}_i$ son los datos predichos, en otras palabras, es el arreglo de datos del voltaje con respecto a la corriente, aludiendo que los parámetros del modelo cuando el error se aproxime a cero son los que más aproximan al modelo con los datos experimentales.

Aclarando como se optimiza el algoritmo, se infiere que al minimizar el error MSE, este solo tendrá un mínimo global debido a que es una función convexa independientemente de cómo esté conformada $\bar{y}_i$. Con base a esto se define las variables del algoritmo partiendo del hecho que es más fácil la convergencia teniendo un mínimo global.

La primera variable que se definirá de acuerdo a lo dicho anteriormente es la inercia (w), que es la encargada de que la partícula este en movimiento, por lo cual se busca que en las primeras etapas o épocas del algoritmo la partícula explore todo el plano de búsqueda, de forma que en las épocas siguientes ya referenciando la dirección del mínimo global se disminuya la inercia procurando que el comportamiento sea como el de la figura 12a.



(A) Comportamiento deseado



(B) Comportamiento no deseado

FIGURA 12: Comportamiento de las partículas al momento de minimizar el error MSE

Por lo que se refiere a las variables c_1 y c_2 se debe precisar el impacto que tienen en el algoritmo cuando una es mayor que la otra, para el caso que c_1 sea mayor que c_2 se tiene mayor independencia en el movimiento de la partícula individual aumentando la exploración, pero aumentando el tiempo de convergencia. Por otra parte, si c_2 es mayor que c_1 se reduce la exploración, pero acelera la convergencia de forma que las partículas tienen menos independencia en el movimiento individual.

7.1.2. Definir los límites de las Partículas

En esta sección se habla de porque los límites en el espacio de búsqueda son tan importantes para que algoritmo optimice correctamente la función objetivo adecuando los parámetros del modelo. Cabe señalar que, aunque se definan correctamente las variables del algoritmo (w , c_1 y c_2), la optimización no será acorde con los datos experimentales si no se delimita correctamente

el espacio de búsqueda, ya que, independientemente si se definieron bien, al momento de optimizar la función objetivo (MSE), esta se optimizara de acuerdo a los límites del plano, de forma que si dentro de los límites no se encuentra el mínimo deseado no se obtendrá los parámetros que se adecuan al modelo.

Para explicar de mejor forma como afecta los límites en el espacio de búsqueda, se plantea un ejemplo de un plano de tres dimensiones, en la figura 13 se puede identificar dos planos, de los cuales el primero hace referencia al plano original abarcando el mínimo global de la función objetivo, por otra parte el plano de la figura 13b está modificado provocando que el mínimo local de la figura 13a se convierta en el mínimo global, de forma que el algoritmo minimice la función objetivo sin tener conocimiento de que existe otro mínimo. En el caso del ancho y de la profundidad son los parámetros que delimitan el plano y la altura es el resultado de la función objetivo.

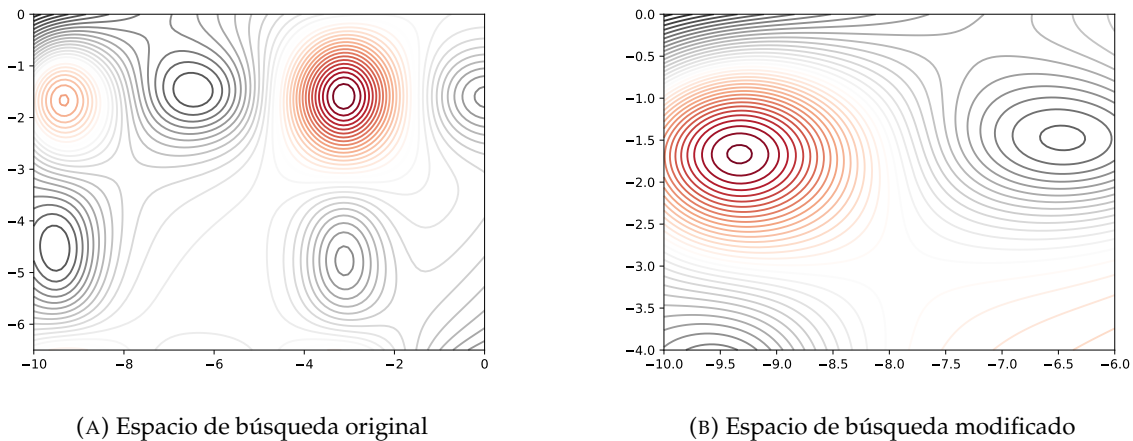


FIGURA 13: Espacios de búsqueda modificados para la optimización del algoritmo PSO

Relacionando el anterior ejemplo con el problema en cuestión, el cual es comparar datos experimentales con un modelo de pila de combustible, para posteriormente minimizar el error optimizando la función objetivo adecuando los parámetros del modelo, se plantea una analogía para comprender como cambia el análisis al tener una función objetivo como la de error cuadrático medio. Suponga que se tiene un plano de referencia como el de la figura 13a, no obstante, se desconoce los límites del plano, de forma que al usar el algoritmo PSO se puedan determinar cuáles son estos límites, con base en esto se plantea usar el error MSE para ir modificando los límites respecto al cambio del error, en función de esto se tiene en consideración trabajos de investigación previos para conocer cuales son los límites de acuerdo a cada modelo planteado.

En la tabla 2 se evidencia cuatro parámetros de los cuales en los artículos [31-33] definen los límites para cada parámetro.

	Parámetro	Mínimo	Máximo
1	α_a	0	1
2	α_c	0	1
3	R_{elec}	0	1
4	σ	0	1

TABLA 2: Límites de los parámetros del modelo teórico

Para el caso de la tabla 3 donde se analiza los parámetros del primer modelo dinámico se definen los límites de acuerdo a los siguiente trabajos de investigación [27, 36].

	Parámetro	Mínimo	Máximo
1	R_{ohm_0}	0	1
2	K_{RI}	0	1
3	K_{RT}	0	1
4	α_a	0	1
5	η_o	0	1
6	α_c	0	1

TABLA 3: Límites de los parámetros del primer modelo dinámico

Por ultimo para la tabla 4 se examino diferentes análisis para los límites de los nueve parámetros, no obstante, solo se tuvo en consideración los límites del el artículo [35] ya que se evidencio que son una manera más general abarcando distintos modelos.

	Parámetro	Mínimo	Máximo
1	ψ	1	50
2	R_C	0	1
3	E_1	-1,5	-0,5
4	E_{21}	0	10e-3
5	E_{22}	0	10e-4
6	E_{23}	0	10e-5
7	E_3	0	10e-5
8	E_4	-1	1
9	α_c	0	1

TABLA 4: Límites de los parámetros del segundo modelo dinámico

7.2. Estructura del Algoritmo

En este apartado se explica cómo es la estructura del algoritmo detallando el funcionamiento de la partícula, el enjambre y como se desarrolla la optimización. En el primer apartado se explica la clase partícula donde en la primera interacción la posición de la partícula es aleatoria delimitada por los límites de cada parámetro, en otras palabras la posición tiene un número de coordenadas que dependen de cuantos parámetros hayan; es aleatoria la posición ya que se quiere abarcar gran parte del espacio de búsqueda. Por otra parte, la velocidad es cero y el mejor valor y la mejor posición es un número que tiende al infinito para que no afecte al algoritmo, suponiendo que el método de optimización sea minimizar un valor.

Posterior de haber inicializado la partícula se procede a evaluarla, calculando un modelo en base a la posición de la partícula con el arreglo de datos de la corriente tomadas experimentalmente como se observa en el código 7.1, por otra parte, se define el mejor valor y la mejor posición luego de haber calculado el error MSE.

```
#Evaluar funcion objetivo
y_now = funcion_objetivo(*self.posicion, self.I_target)

#Evaluar error MSE
sumatoria = (np.sum((self.y_target - y_now) ** 2))
self.valor = np.sqrt(sumatoria / (self.I_target.__len__()))
self.errorRMSE.append(self.valor)

#Definir el mejor Valor & Posicion
if self.mejor_valor is None:
    self.mejor_valor = np.copy(self.valor)
    self.mejor_posicion = np.copy(self.posicion)
else:
    if self.valor < self.mejor_valor:
        self.mejor_valor = np.copy(self.valor)
        self.mejor_posicion = np.copy(self.posicion)
```

CÓDIGO 7.1: Método evaluar partícula

El ultimo método que tiene la clase partícula es el movimiento, implementando la ecuación (7.1) de forma que al minimizar la función objetivo la partícula cambie su posición respecto al cambio de la velocidad, que es evaluada en base al coeficiente cognitivo e individual. En el código 7.2 se puede evidenciar las variables r_1 y r_2 que como se mencionó anteriormente pueden ser un escalar o un vector, en este caso es un vector el cual añade fluctuaciones al movimiento entre un rango de uno a cero para incrementar la probabilidad de exploración. Se enfatiza que, si una partícula al momento de actualizar su posición sale del espacio de búsqueda, se debe cambiar

CÓDIGO 7.2: Método mover partícula

CÓDIGO 7.3: Inicializar Enjambre

```

inercia = 0.8
inercia_max = 0.9
inercia_min = 0.4
reduc_inercia = True

for i in range(0, n_iteraciones, 1):
    if reduc_inercia:
        inercia = ((inercia_max - inercia_min) * (n_iteraciones - i)
                    / n_iteraciones) + inercia_min

```

.

.

CÓDIGO 7.4: Reducir la inercia

La tercera y última etapa es la implementación de una condición de parada, de forma si el algoritmo antes de cumplir las épocas definidas ya cumple con los objetivos propuestos se detenga. En el código 7.5 se muestra como en base al mejor valor de todo el enjambre se puede detener el algoritmo partiendo de la diferencia entre el valor actual con el anterior.

```
parada_temprana = True
rondas_parada = 5
tolerancia_parada = 10e-5

for i in range(0, n_iteraciones, 1):
    historico_particulas.append(copy.deepcopy(enjambre.particulas))
    historico_mejor_posicion.append(copy.deepcopy(enjambre.mejor_posicion))
    historico_mejor_valor.append(copy.deepcopy(enjambre.mejor_valor))

    if i == 0:
        diferencia_abs.append(None)
    else:
        diferencia = abs(historico_mejor_valor[i] - historico_mejor_valor[i - 1])
        diferencia_abs.append(diferencia)

    if parada_temprana and i > rondas_parada:
        Diferencia = np.array(diferencia_abs[-rondas_parada:])
        if all(Diferencia < tolerancia_parada):
            print("Algoritmo detenido")
            break

.
```

CÓDIGO 7.5: Condición de parada

Capítulo 8

Implementación del Modelo en una Arquitectura RIO

La emulación de un modelo matemático en una arquitectura RIO, ARM o FPGA conlleva a estructurar el modelo de forma que el dispositivo en el cual se va a embeber el sistema pueda representar los comportamientos vistos en la simulación u observados en la realidad, de una manera lo más precisa posible.

Dentro de los aspectos para tener en cuenta en la emulación del modelo, se destaca la dinámica del sistema que nos indica la frecuencia a la que se debe muestrear la señal. Por lo que concierne a las pilas de combustible, estas poseen tres dinámicas, la eléctrica, la química y la mecánica, de forma que es fundamental definir que dinámica se va a representar. En este caso se emulará la eléctrica la cual es más rápida que la mecánica, pero más lenta que la química.

Al implementar el modelo en una arquitectura RIO, la cual está constituida por un procesador y una FPGA, se puede optar por varias opciones para embeber el modelo. La primera es embeber el modelo en la FPGA de forma que se disminuya el tiempo de cómputo, aumentando la frecuencia de muestreo. Por otra parte, se puede embeber el modelo en el procesador facilitando su implementación, pero aumentando los tiempos de cómputo en comparación con los de la FPGA, provocando que se dificulte emular correctamente sistemas que tengan dinámicas superiores a los milisegundos. Una solución a este problema es escalar en frecuencia el modelo, de forma que se pueda observar los comportamientos que se dan en altas frecuencias en bajas frecuencias, no obstante, esto conlleva un aumento en la complejidad del modelo.

En este capítulo se abarcará los aspectos que se tuvieron en cuenta a la hora de embeber el modelo, esclareciendo las diferencias que existen en emular el modelo en la FPGA o en el procesador. Posteriormente se expondrá la implementación de los tres modelos, resaltando las diferencias que existen entre el modelo estático con el dinámico y así mismo destacar los aspectos que se tuvieron en cuenta para cada uno de los modelos.

8.1. Estructura de una arquitectura RIO

En esta sección se muestra la estructura de una arquitectura RIO, más concretamente se detalla el dispositivo myRIO-1900 de National Instruments, el cual se caracteriza por ser una placa de evaluación en tiempo real que permite desarrollar aplicaciones en su microprocesador o en su FPGA. Se enfatiza en la estructura del dispositivo de forma que sea posible estructurar el modelo conociendo las limitaciones que tiene el instrumento en cuestión.

Por lo que se refiere a las especificaciones del instrumento, en la tabla 5 se evidencia las especificaciones de los periféricos del puerto análogo del conector A y B del dispositivo, asimismo en la tabla 6 se detalla sus principales características. Por otra parte, en la figura 14 se muestra el diagrama de bloques del Hardware del dispositivo de forma que se pueda comprender como es la interacción que tiene la FPGA, el procesador y sus periféricos.

Entrada Análoga		Salida Análoga	
Canales por conector	4	Canales por conector	2
Resolución	12 Bits	Resolución	12 Bits
Tasa de Muestreo	500 KS/s	Tasa de actualización	345 KS/s
Impedancia de entrada	500 K Ω	Corriente de salida	3 mA
Voltaje de entrada	0V a +5V	Voltaje de salida	0V a +5V

TABLA 5: Especificaciones de los puertos análogos del dispositivo de adquisición myRIO-1900

Abarcando el diagrama de bloques de la figura 14 se observa que la FPGA controla los puertos análogos y digitales. Para el manejo de los periféricos se puede optar por cargar en la FPGA un archivo bitfile o desde el procesador con el uso de la librería toolkit express Vis, la cual permite acceder a los periféricos por medio de un archivo bitfile cargado por defecto. El manejo de los periféricos por medio de la carga del archivo bitfile en la FPGA es más rápida que el uso de la librería toolkit express VIs, esto debido a que el archivo es compilado basándose en los

Especificaciones	
Tipo de Procesador	Xilinx Z-7010
Velocidad del procesador	667 MHz
Numero de núcleos del procesador	2
Tipo de FPGA	Xilinx Z-7010
Memoria no volátil	512 MB
Memoria RAM	256 MB
Frecuencia de la memoria RAM	533 MHz

TABLA 6: Principales especificaciones del dispositivo de adquisición myRIO-1900

periféricos que se usarán, pudiendo modificar directamente los parámetros de la FPGA que por el contrario en el procesador no se podría.

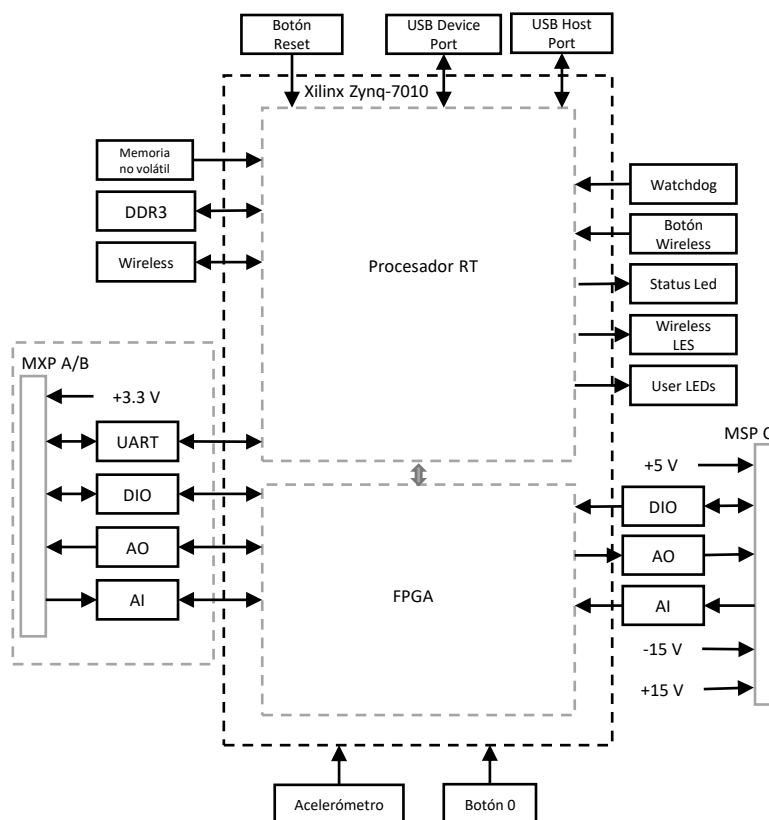


FIGURA 14: Diagrama de bloques del hardware de la myRIO-1900

Referente a las velocidades que se pueden obtener en el procesador en tiempo real, se tiene dos bases de tiempo, de 1KHz y de 1MHz de forma que el mínimo tiempo para el time loop es de 1us, si se requiere una base de tiempo menor, es necesario codificar el programa en la FPGA teniendo como referencia que es posible configurar una frecuencia máxima de reloj de 800MHz.

Es necesario aclarar que se debe configurar la frecuencia de acuerdo con las limitaciones de los procesos de la FPGA, es decir, si para ejecutar una suma se requiere 10ns la frecuencia de reloj debe permitir que se ejecute el proceso en cuestión, de otra forma no será posible compilar adecuadamente el archivo bitfile.

8.1.1. Operaciones matemáticas

Las operaciones matemáticas para la implementación de modelos se abarcan desde dos perspectivas, la primera y la más sencilla de implementar es a partir del procesador, el cual tiene una unidad de punto flotante que simplifica las operaciones matemáticas. La segunda es por medio de la FPGA haciendo uso de las variables de tipo fixed-point (punto fijo) debido a que en la FPGA no se cuenta con una unidad de punto flotante.

Dentro de la FPGA las operaciones matemáticas se deben tener cuenta que para el cálculo de ecuaciones o fórmulas se debe configurar las variables de acuerdo con el número que se desea representar, es decir, se debe configurar acorde con la longitud del número, la longitud del número entero y si el número es positivo o negativo. En la figura 15 se puede evidenciar un ejemplo si se quiere representar un número entre 0 - 255 con una variación entre números o delta de 1, de forma que para este caso solo se podrían representar números que estén en ese rango y además que no tenga decimales.

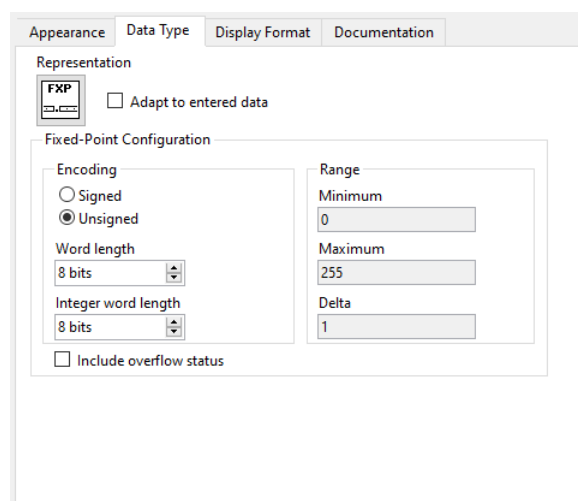


FIGURA 15: Configuración de la variable fixed-point

Para los logaritmos, exponenciales o funciones trigonométricas, el proceso involucra variables fixed-point además de tener restricciones en los rangos, esto provoca que para determinados

cálculos las operaciones no sean posibles de llevarlas a cabo. En la figura 16 se expone los parámetros que se deben tener en cuenta para el uso del logaritmo natural en la FPGA denotando que el rango permitido está entre $1/e$ y 1 , además de solo ejecutar la operación si el número de entrada está en un rango de 0 a 1 aproximadamente.

El inconveniente en ejecutar el modelo en la FPGA está delimitado por el rango de las funciones matemáticas, ya que, si se sobrepasa el rango de la función, el valor de salida o el cálculo se saturará por los límites de la función. Para la solución del anterior problema se puede involucrar LookUp Tables que permitan la búsqueda de una operación previamente calculada, no obstante, no es una solución fiable debido al consumo de memoria y a la precisión en los cálculos que es un aspecto importante para la emulación del modelo, otra alternativa es adecuar el modelo de acuerdo con los límites, sin embargo, en algunas operaciones no es posible optar por esta solución.

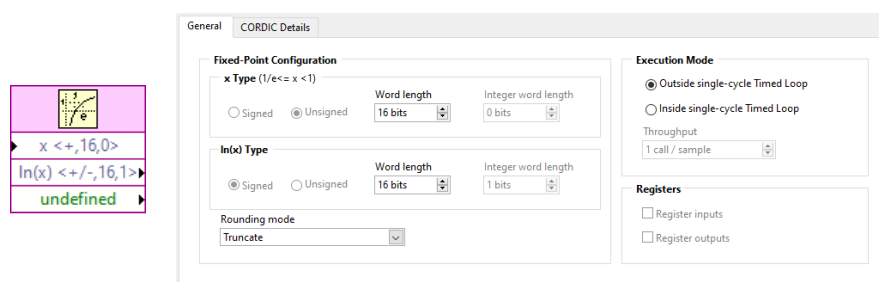


FIGURA 16: Logaritmo natural en la FPGA

8.2. Implementación de los modelos

El modelo de la pila de combustible, tanto para el método dinámico, como el estático, se emularon dentro del procesador, de forma que para el manejo de los periféricos solo se utilizará la FPGA. Lo anterior se aplicó de esta forma debido al manejo de las operaciones matemáticas en la FPGA, las cuales no emulan correctamente el comportamiento eléctrico de la celda por causa de un desbordamiento en los rangos de las operaciones.

Por lo que respecta a la frecuencia de muestreo a partir de la base de tiempos del procesador, se debe enfatizar que la dinámica del modelo está alrededor de los milisegundos, esto debido a que los sistemas como las pilas de combustible no son capaces de tolerar variaciones repentinas de carga, ya que se va desgastando la membrana disminuyendo su vida útil.

Por parte de la implementación en la myRIO-1900, existen distintos métodos para discretizar el modelo de forma que se pueda representar el comportamiento del sistema, no obstante, la tarjeta en cuestión está enfocada al desarrollo de aplicaciones en tiempo real de sistemas embebidos, de forma que LabVIEW ha desarrollado un módulo llamado *Control Design and Simulation* que permite la integración de estos sistemas de una manera simplificada, pero sin dejar de lado la robustez al emular los sistemas.

La estructura de los tres modelos en la myRIO, tienen en común que se desarrolla en dos etapas, la primera hace referencia a la inicialización en donde se definen los parámetros de la celda además de calcular las presiones parciales y el voltaje de Nernts. Como segunda etapa se tienen las pérdidas óhmicas, de concentración y las de activación, que para cada modelo se calcula las variables necesarias para la respectiva emulación, de forma que en la figura 17 únicamente se hace referencia a la configuración general.

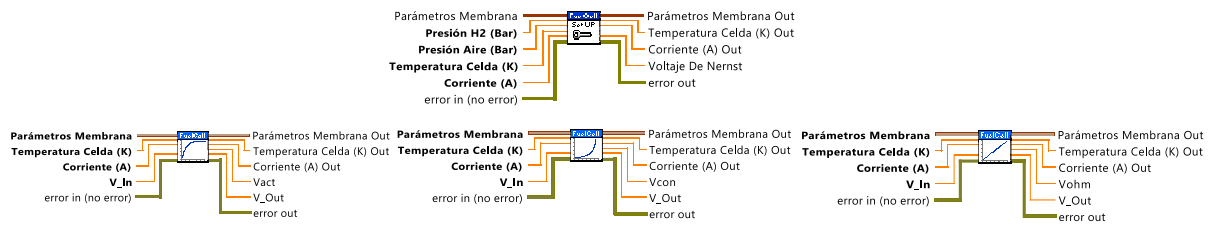


FIGURA 17: Estructura Modelo

8.2.1. Modelo Estático

En esta sección se describen los principales aspectos para la emulación del modelo estático en base al análisis teórico descrito en la sección 6.3.1. Como principal aspecto a tener en cuenta es la ausencia del módulo *Control Design and Simulation*, ya que, al no poseer ningún tipo de dinámica, no se requiere la solución de ecuaciones diferenciales.

Para la inicialización del modelo de la celda, en la figura 18 se puede evidenciar como está programado el VI (Virtual Instrument file) denotando el cálculo de las presiones parciales de acuerdo con las ecuaciones (6.10) y (6.11) además del cálculo del voltaje de Nernts descrito por la ecuación (6.9).

Dentro de los VIs que describen los comportamientos de las pérdidas de la pila de combustible, estos están diseñados como se muestran en la figura 19, denotando los tres diseños correspondientes para representar las pérdidas de activación, concentración y óhmicas; los diseños tienen

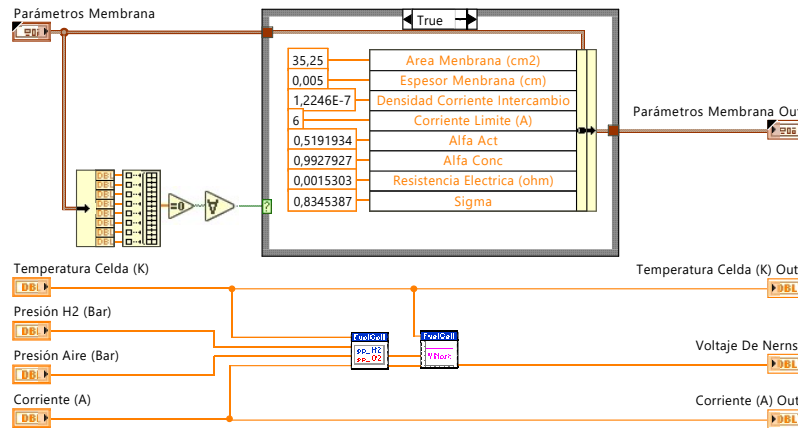


FIGURA 18: Diagrama de bloque usado para inicializar el modelo de la celda

como referencia las ecuaciones expuestas en el análisis del modelo estático o teórico señalado en la sección 6.3.1.

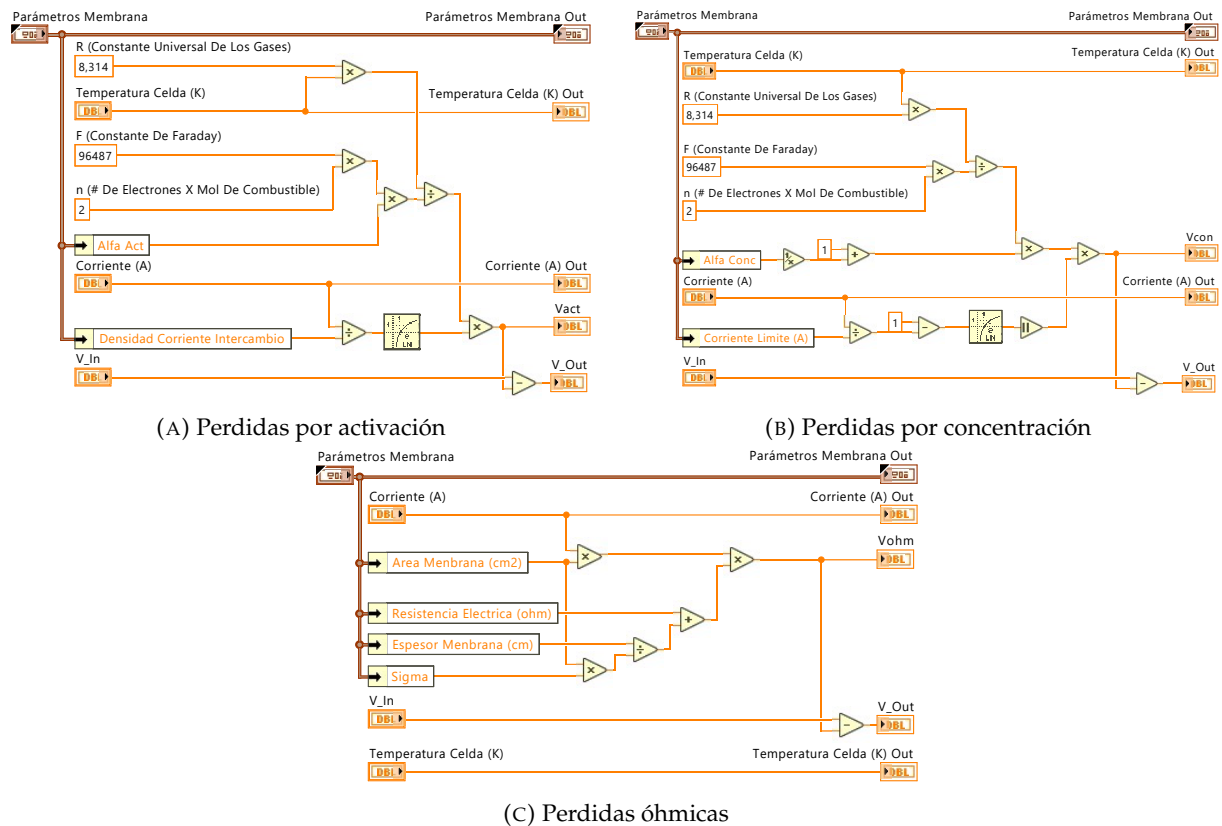


FIGURA 19: Diagrama de bloque usado para el cálculo de las pérdidas

Estableciendo cada uno de los VIs, se diseña el programa de forma que se pueda representar el modelo en tiempo real, en la figura 20 se evidencia la interacción entre el modelo diseñado en procesador y los periféricos controlados por la FPGA, es necesario enfatizar que se requiere

una serie de convecciones para el voltaje y la corriente, ya que, el hardware que emula la etapa de potencia tiene unos rangos para el control del voltaje y para la medición de la corriente.

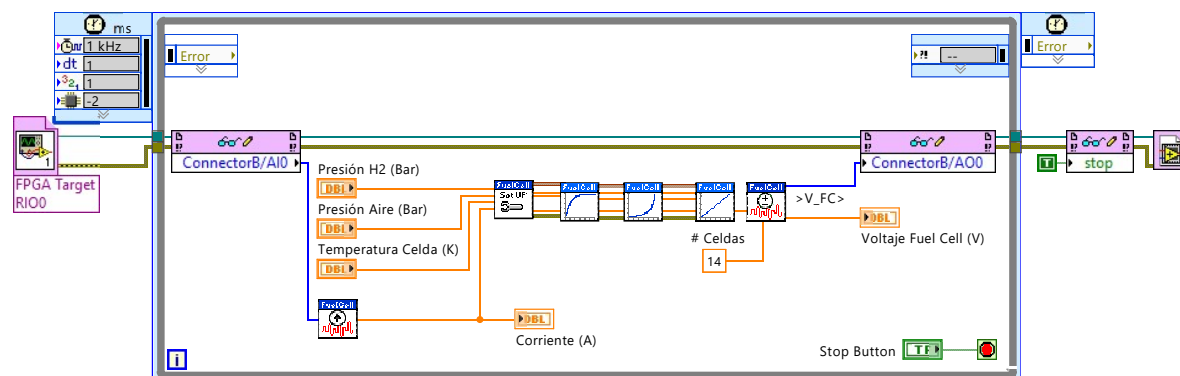


FIGURA 20: Diagrama de bloque del simulador

8.2.2. Modelo Dinámico

El modelo dinámico tiene como característica representar de forma más precisa los comportamientos de la pila de combustible en regímenes transitorios y estáticos, no obstante, en el diseño de los dos modelos definidos en el análisis de la sección 6.3.2.1, se establece una serie de similitudes respecto al modelo estático. Una de las principales similitudes son los VIs de inicialización con el de pérdidas, sin embargo, para el diseño del modelo en la myRIO se debe elaborar respecto a los parámetros y restricciones del módulo *Control Design and Simulation*.

Por lo que se refiere al diseño del VI de inicialización se elaboró de una manera muy similar que el de la figura 18, sin embargo, para el cálculo del voltaje de Nernts es necesario definirlo respecto a la ecuación 6.22, en la figura 21 se muestra cómo se implementó la ecuación teniendo en cuenta que se definió la variables τ_e y λ_e de acuerdo a los parámetros de la pila de combustible utilizada.

Las pérdidas del modelo dinámico tienen en consideración dos tipos de representaciones, la primera hace referencia al primer modelo eléctrico descrito en la sección 6.3.2.2 y la segunda se basa en el análisis de la sección 6.3.2.3. En la figura 22 se puede denotar como se diseñó los VIs que representan las pérdidas de activación para cada uno de los modelos.

En la figura 23, se evidencia que el diseño de las pérdidas por concentración para el primer modelo y para el segundo modelo hace referencia a las ecuaciones 6.28 y 6.34 respectivamente. Por último, por lo que se refiere a las pérdidas óhmicas, estas se diseñaron de acuerdo a la figura 24.

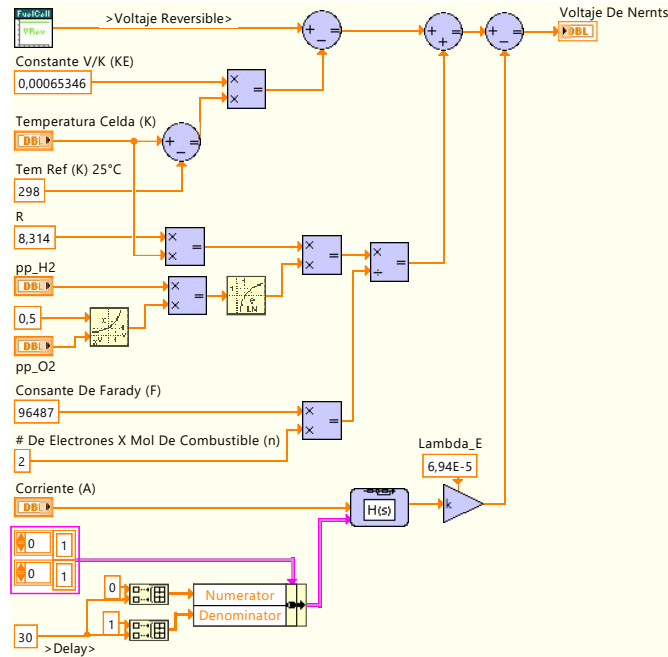
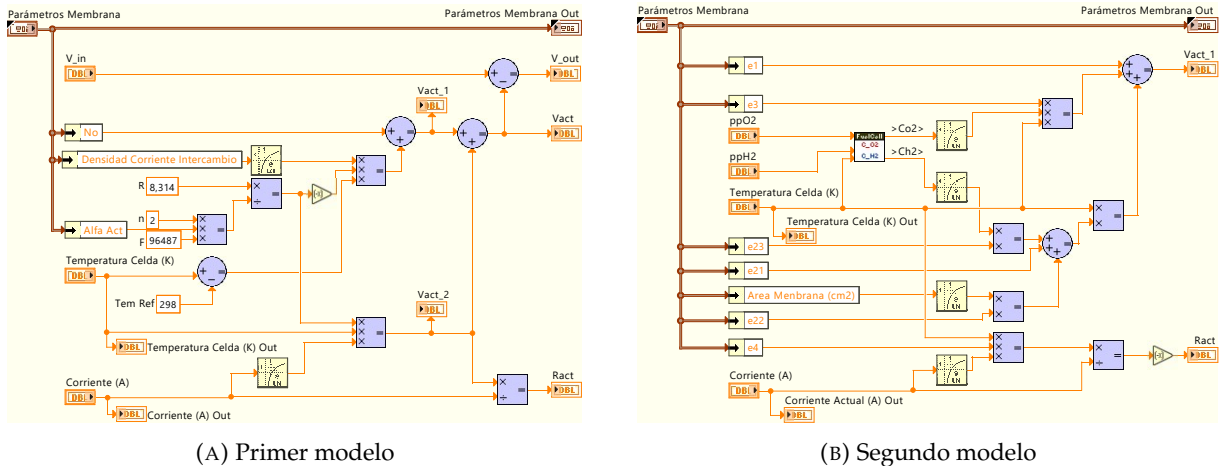


FIGURA 21: Diagrama de bloque usado para el cálculo del voltaje de Nernts del modelo dinámico



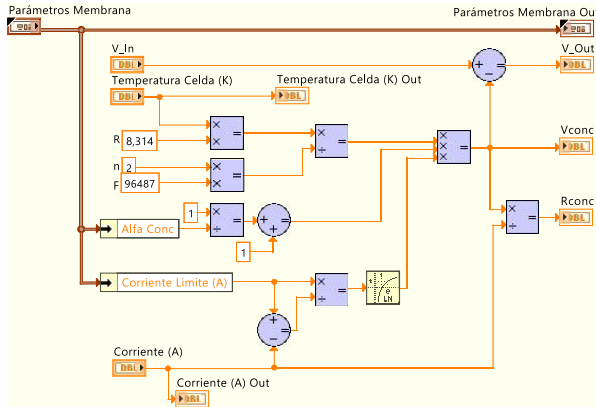
(A) Primer modelo

(B) Segundo modelo

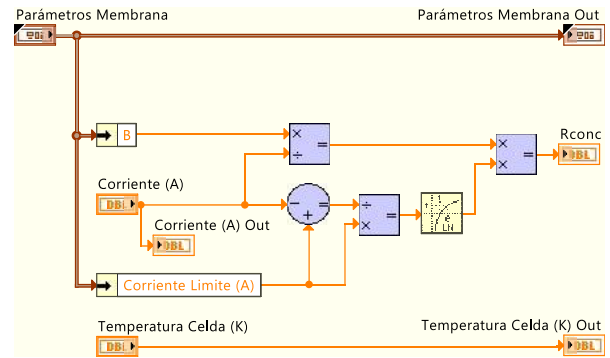
FIGURA 22: Pérdidas por activación para los diferentes modelos dinámicos establecidos

Para el diseño del VI que representa el voltaje del condensador es necesario plantear una ecuación que se pueda implementar, esto debido a que no es factible ejecutar el modelo con el derivador, ya que, presenta inconvenientes por la amplificación del ruido en altas frecuencias además de tener un comportamiento anormal a la hora de evaluar numéricamente las respuestas temporales del sistema.

Una alternativa para evitar el bloque del derivador es representar la ecuación 6.24, en su forma

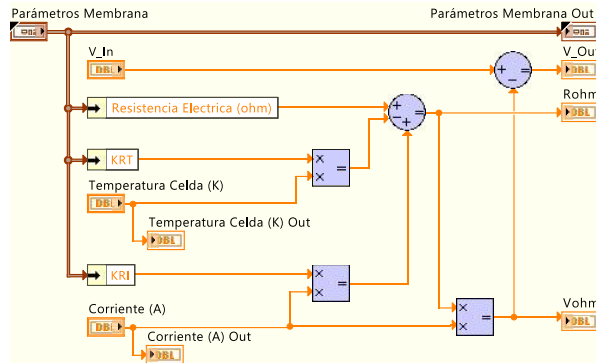


(A) Primer modelo

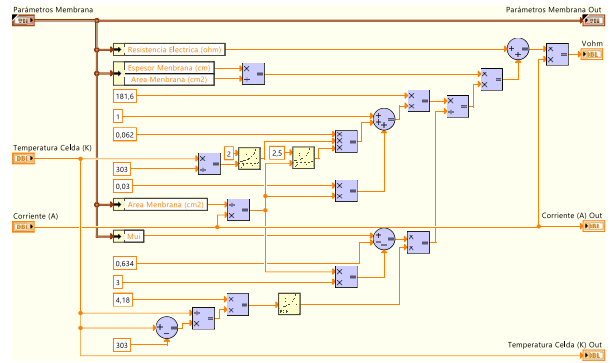


(B) Segundo modelo

FIGURA 23: Perdidas por concentración para los diferentes modelos dinámicos establecidos



(A) Primer modelo



(B) Segundo modelo

FIGURA 24: Perdidas óhmicas para los diferentes modelos dinámicos establecidos

análoga con integradores. En la ecuación 8.1, se puede evidenciar el voltaje del condensador a partir de integradores, los cuales no generan mayores problemas en la implementación.

$$V_C = \left(i - C \frac{dV_C}{dt} \right) (R_{act} + R_{con})$$

$$\int V_C = \int i (R_{act} + R_{con}) - \int C \frac{dV_C}{dx} (R_{act} + R_{con})$$

$$\int V_C - \int i (R_{act} + R_{con}) = -CV_C (R_{act} + R_{con})$$

$$\int \frac{i (R_{act} + R_{con})}{(R_{act} + R_{con}) C} - \int \frac{V_C}{(R_{act} + R_{con}) C} = V_C$$

$$\int \frac{i}{C} - \int \frac{V_C}{(R_{act} + R_{con}) C} = V_C \quad (8.1)$$

En la figura 25, se muestra el diagrama de bloques que representa la ecuación del voltaje del condensador, sin embargo, es importante asegurar que a la entrada del integrador no se tenga números inferiores de cero, ya que, esto ocasionaría una desestabilización del integrador provocando errores en los cálculos. Para mitigar el problema en cuestión se añade un limite de saturación que fije el mínimo valor mayor a cero, no obstante, cuando se está emulando las perdidas por activación hay errores en la representación del modelo, debido a que en esa etapa de la suma de R_{con} y R_{act} es negativa.

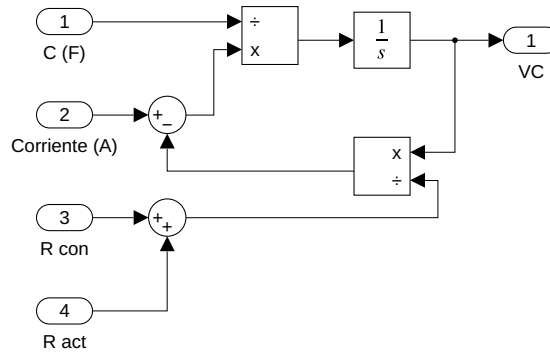


FIGURA 25: Diagrama de bloque usado para el cálculo del voltaje del condensador

La solución que se propuso para el problema de los números negativos causados por la suma de R_{con} y R_{act} fue definir el valor absoluto de esa suma, de esta forma, que a la entrada del integrador solo se obtengan números positivos. En consecuencia, al anterior cambio, se soluciona el problema con el integrador, no obstante, el cambio de signo debe repercutir de la misma forma en el voltaje del condensador, es decir, si se cambió de signo cuando la suma de R_{con} y R_{act} es negativa, el voltaje del condensador debe cambiar de signo para que en la ecuación 6.36, en donde se define el voltaje de la celda, este no se vea afectado por los cambios realizados. En la figura 26, se evidencia como se diseñó el VI teniendo en cuenta los aspectos expuestos anteriormente.

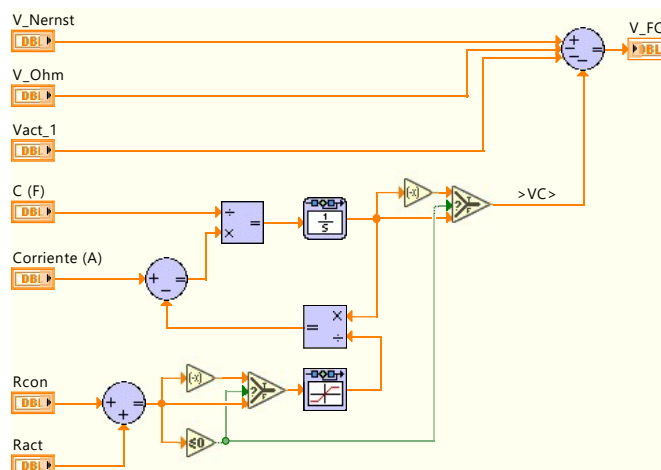


FIGURA 26: Diagrama de bloque usado para el cálculo del voltaje de la celda del modelo dinámico

El programa en donde se implementa cada uno de los VIs que componen a los respectivos modelos dinámicos de la pila de combustible, en la figura 27, se puede denotar dos bucles principales, el primero hace referencia a la simulación del modelo por medio del módulo *Control Design and Simulation*, en donde como parámetros de entrada se tiene la presión del aire y del hidrógeno además de la temperatura y la corriente. Dentro de la configuración del primer bucle, se definió el método Runge-Kutta 23 para la solución de las ecuaciones diferenciales, además de configurar el Initial Step Size y el Maximum Step Size como 0,001, por otra parte, para la configuración de los parámetros de tiempo, estos se sincronizaron con el reloj del procesador definiendo una base de tiempos de 1MHz y un tiempo de 10us.

Para el diseño del segundo bucle se evidencia el manejo de los periféricos de la FPGA, además de denotar que para la comunicación entre los dos bucles principales se usan las variables locales que transfieren el valor de la corriente y del voltaje de la celda. Para la configuración de los parámetros de tiempo se definieron en 1ms con una base de tiempos de 1kHz, esto en consecuencia a las especificaciones de la fuente programable, que emulará la etapa de potencia.

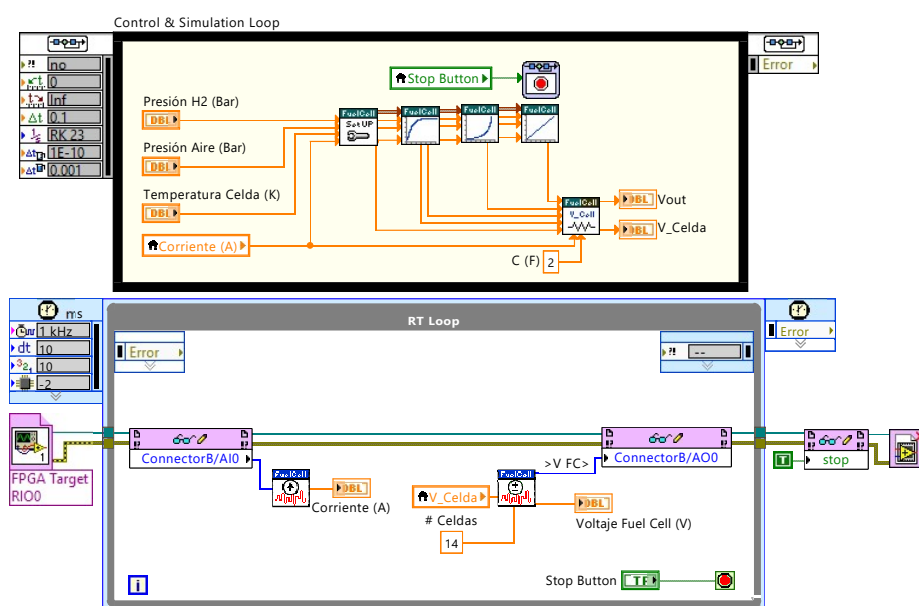


FIGURA 27: Diagrama de bloque para la simulación del modelo dinámico

Capítulo 9

Análisis y Resultados

En este capítulo se detalla cada uno de los aspectos que se tuvieron en cuenta para el funcionamiento del emulador, abarcando temáticas como la producción del hidrógeno y el manejo de la pila de combustible. Posteriormente se evalúa el funcionamiento de cada uno de los modelos respecto a los resultados de simulación y con los datos experimentales del sistema físico.

9.1. Producción del Hidrógeno

La producción del hidrógeno se puede categorizar en dos ramas, la primera hace referencia al termino hidrógeno azul, el cual se caracteriza por producir el hidrógeno a partir del reformado y gasificación de combustibles orgánicos, sin embargo, dentro de esta rama los subproductos originados por la producción del hidrógeno son las emisiones de dióxido de carbono (CO_2).

La segunda rama se le denomina hidrógeno verde, haciendo referencia al cuidado del medio ambiente con el uso de energías limpias para la producción del hidrógeno. Dentro de los métodos de esta rama, se encuentran la electrolisis y la termólisis que dividen las moléculas del agua en hidrógeno y oxígeno mediante energía eléctrica y energía térmica respectivamente.

Por lo que concierne al proyecto, se utilizó el método de la electrolisis del agua para la producción del hidrógeno, mas concretamente se usó una membrana de intercambio de protones (PEM) como electrolizador, de forma, que empleando esta membrana se pudiera reducir las pérdidas eléctricas al producir hidrógeno [42]. En la figura 28, se puede evidenciar un sistema básico, denotando la celda electrolítica con sus periféricos. Por lo referente a las especificaciones de la celda en la tabla 7 se muestran las principales características.

Especificaciones	
Numero de celdas	2
Diámetro de la celda	85mm
Tasa de flujo de hidrógeno	0 - 120
Tasa de flujo de oxígeno	0 - 60
Voltaje	4V
Corriente	9A
Tipo de membrana	Nafion PFSA
Temperatura de operación	5°C - 45°C

TABLA 7: Principales especificaciones de la celda electrolítica Titan EZ-120

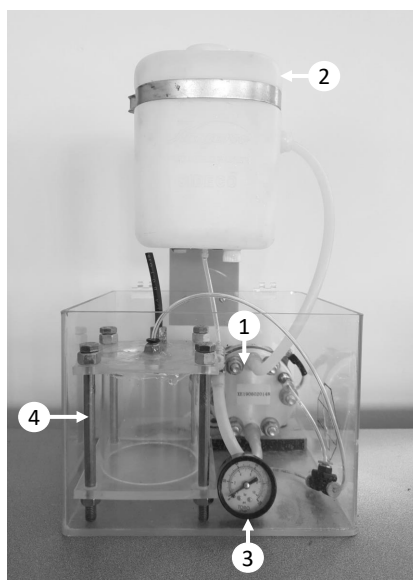


FIGURA 28: Sistema para la producción de hidrógeno (1. Celda electrolítica, 2. Tanque de agua, 3. Barómetro de 145 psi, 4. Tanque atrapa llamas)

9.1.1. Especificaciones del Agua

El uso de celdas electrolíticas PEM involucra una serie de especificaciones para su correcto funcionamiento, dentro de estas se encuentra la pureza del agua, ya que si además de las moléculas de hidrógeno y oxígeno están presentes minerales como los que se encuentran en el agua del grifo o en las aguas embotelladas, la celda electrolítica no trabajará adecuadamente provocando que se necesite más corriente para separar las moléculas, repercutiendo que se eleve la temperatura de la celda disminuyendo la eficiencia del sistema.

Debido al anterior problema se precisa agua con un alto nivel de pureza, por ende, los fabricantes recomiendan el uso de agua destilada o des-ionizada, de tal forma de obtener hidrógeno con una alta pureza, manteniendo una eficiencia alta prolongando la vida útil de la membrana.

9.1.2. Almacenamiento del Hidrógeno

El almacenamiento del hidrógeno es un factor clave para el uso de las pilas de combustibles, de forma que se ha venido estudiando distintos métodos para acumular grandes cantidades de hidrógeno cumpliendo con los requerimientos de seguridad para su utilización. Dentro de los métodos para almacenar hidrógeno se destaca el almacenamiento por gas a presión, en forma líquida y en hidruros metálicos; para este proyecto se utiliza el método de gas a presión almacenando el hidrógeno en cartuchos de 10L a una presión de 30 bares.

Por lo que se refiere al dispositivo que comprime el hidrógeno, se utilizó el Hydrofill PRO de la empresa Horizon Fuel Cell Technologies, el cual es en grandes rasgos es una celda electrolítica que produce el hidrógeno para posteriormente comprimirlo con un compresor. El tiempo que conlleva la cargar de los cartuchos está alrededor de cuatro a seis horas. En la figura 29a, se puede denotar el dispositivo utilizado y así mismo en la tabla 8, se pueden evidenciar sus especificaciones.

Especificaciones	
Tipo de celda	PEM
Potencia nominal	$\leq 23W$
Voltaje	10V - 19V
Tipo de agua	Des-ionizada ó destilada
Temperatura del agua	10°C - 40°C
Consumo de agua	20ml/hr
Presión de salida del hidrógeno	28 Bars
Producción del hidrógeno	3L/hr
Pureza del hidrógeno	99.99 %

TABLA 8: Principales especificaciones del Hydrofill PRO

Una de las características de los cartuchos utilizados son los materiales que lo componen, gracias a estos es posible almacenar grandes cantidades de hidrógeno en un espacio reducido, sin embargo, es necesario saber cuáles son sus limitaciones a la hora de alimentar una pila de combustible. En la figura 29b, se denota los cartuchos utilizados para el almacenamiento del hidrógeno.



(A) Hydrofill PRO



(B) Hydrostik PRO

FIGURA 29: Sistema utilizado para la producción y almacenamiento del hidrógeno

Dentro de sus principales restricciones se tiene la descarga del hidrógeno, ya que, al liberar el hidrógeno se pierde presión provocando una disminución gradual en el flujo. Este fenómeno se origina a partir de la aleación AB2 que es la encargada de la absorción del hidrógeno teniendo presente la relación que hay entre la presión y la temperatura del material, es decir, al disminuir la presión se reduce la tasa de absorción de calor provocando que a bajas temperaturas el flujo del hidrógeno disminuya. En la tabla 9, se puede evidenciar las especificaciones que tiene el cartucho Hydrostik PRO.

Especificaciones	
Material del cilindro	Aluminum 6061
Peso	90g
Pureza del gas	>99.99 % (CO <1ppm, CO ₂ <10ppm, O ₂ <4ppm)
Condición de descarga a 15°C	300 - 500 ml/min
Presión de descarga	30 Bar
Temperatura de descarga	5 - 50 °C

TABLA 9: Principales especificaciones del Hydrostik PRO

9.2. Manejo de la Pila de Combustible

El manejo correcto de una pila de combustible, implica asegurar un entorno en donde las variables involucradas se asemejen a las reacciones que se dan en la membrana teóricamente, es decir, garantizar que tanto en los canales en donde se ingresa el oxígeno y el hidrógeno no haya impurezas que obstaculice los poros de la membrana. En la figura 30, se muestra un sistema para el control de una pila de combustible teniendo en consideración aspectos como la refrigeración y el control en la entrada y a la salida de los canales de oxígeno e hidrógeno.

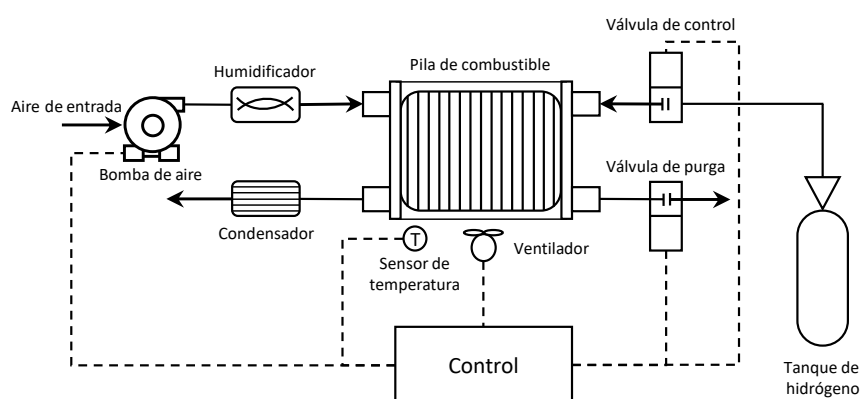
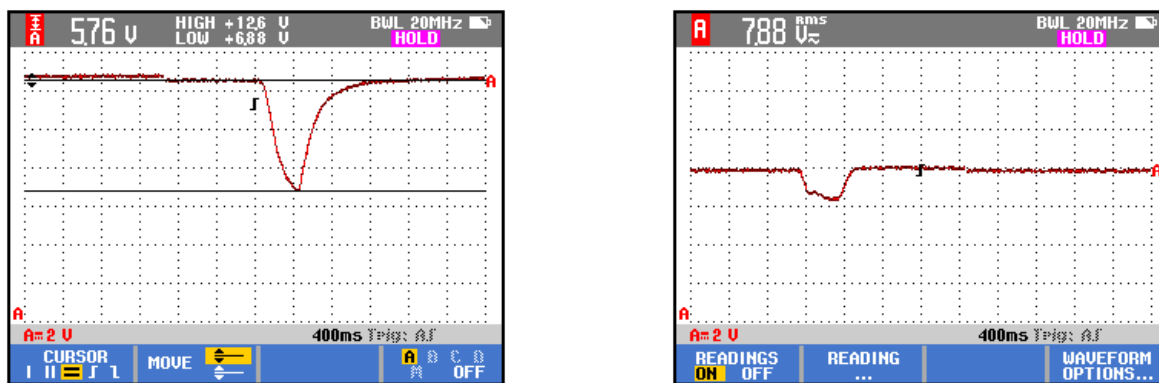


FIGURA 30: Diagrama de un sistema de una pila de combustible

Con lo referente a las válvulas de control de entrada y salida del hidrógeno se enfatiza que función cumplen y asimismo se identifica las repercusiones de un mal manejo de estas. La válvula de entrada del hidrógeno denominada válvula de control, se encarga del paso y del corte del suministro del hidrógeno, esto con el fin de poner en marcha el sistema y de detenerlo cuando no haya carga o cuando se encuentre una situación de falla, como lo es un incremento en la corriente nominal, un mal manejo de esta válvula provocaría un deterioro de la membrana causando una disminución en la vida útil de la pila de combustible.

La válvula de purga, tiene como función liberar una pequeña cantidad de hidrógeno en el canal de salida, con el fin de extraer de la pila de combustible el agua producida y gases inertes que no fueron utilizados en la reacción química, la ausencia de esta válvula repercute en la inundación en el lado del ánodo, provocando que se disminuya el voltaje y asimismo la potencia del sistema. En la figura 31, se puede evidenciar como es el comportamiento de la pila de combustible cuando se activa la válvula de purga siendo evaluada en dos situaciones, cuando el sistema no tiene carga y cuando está funcionando a su voltaje nominal.

Los comportamientos vistos a causa de la válvula de purga, no tienen en consideración un control según la corriente demandada, es decir, se activó el solenoide referenciado a la purga



(A) Sin Carga

(B) Con carga nominal

FIGURA 31: Comportamiento de la pila de combustible ante la válvula de purga

del sistema cada 20 segundos y con un tiempo de activación de 300 ms, por lo cual si se tiene en consideración un control respecto a las variables como la corriente y temperatura es posible mejorar la respuesta que tiene el sistema ante la perturbación de la purga.

En el lado del cátodo se puede evidenciar una bomba de aire que suministra el oxígeno para posteriormente pasar por un humidificador que extraiga la humedad presente en el aire. La cantidad de oxígeno suministrado por la bomba de aire debe ser capaz de proporcionar las moléculas requeridas según la corriente demandada, al no cumplirse este requerimiento la pila de combustible sufrirá el fenómeno falta de oxígeno, que repercute en la disminución de la potencia a causa de un incremento en la temperatura que provoca quemaduras en la superficie de la membrana disminuyendo su vida útil. Comúnmente se elabora un control para el motor de la bomba de aire según la corriente requerida, sin embargo, para las pruebas de la pila de combustible utilizada, se aseguró que los motores funcionen a su máxima capacidad, de forma que se asegure que no haya falta de oxígeno.

Finalizando esta sección se abarca el tema del control en la temperatura de la pila de combustible y así mismo del seguimiento en las presiones, más concretamente en el lado del ánodo en donde está presente el hidrógeno. La temperatura, es una variable que provoca el incremento o decremento en la potencia del sistema, de forma que a mayor temperatura el sistema reduce su potencia y así mismo su eficiencia, es decir, se procura refrigerar el sistema con tal de obtener una eficiencia alta. Por otra parte, como se enfatizó en el almacenamiento del hidrógeno en la sección 9.1.2 se debe tener un seguimiento en la temperatura de los tanques, de forma de controlar el sistema descuerdo al flujo del hidrógeno que es estimado por la temperatura del tanque y así prevenir fallas o daños en la membrana.

Con lo referente a las presiones del sistema en la figura 32, se evidencia el sistema utilizado denotando los reguladores de cada tanque de hidrógeno, en el lado del cátodo en donde se suministra el oxígeno, se puede evidenciar que los ventiladores son los encargados de suplir con el oxígeno además de actuar como *cooler* o refrigerador del sistema. Las membranas del sistema utilizado están orientadas de tal forma que el lado del cátodo reciba el flujo de aire provocado por los ventiladores.

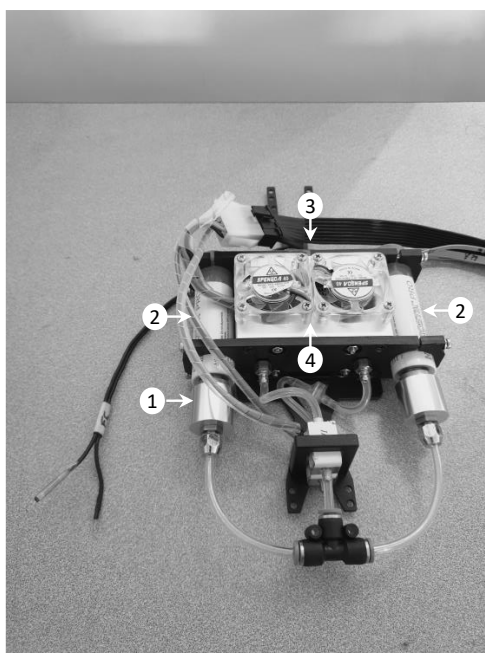


FIGURA 32: Pila de combustible empleada (1. Regulador de presión 12 Psi, 2. Sensores de temperatura cartuchos de hidrógeno, 3. Sensor de temperatura del sistema, 4. Ventiladores)

9.3. Resultados del algoritmo de optimización

En esta sección se presentan los resultados que se obtuvieron al optimizar los tres modelos por medio del uso del algoritmo de optimización PSO, teniendo en consideración que las épocas, la reducción en la inercia y la condición de parada son las mismas para los tres programas. Por otra parte, se ejecutó 10 veces el algoritmo de optimización para establecer el punto de convergencia y así mismo indicar el promedio y la desviación estándar de los datos. Es necesario enfatizar que se evalúa la eficacia del algoritmo a partir del valor del error y no respecto con los parámetros, ya que estos pueden ser distintos en cada ejecución, no obstante, el error debe ser replícale.

Las variables a optimizar solo se toman en cuenta las pérdidas del sistema, esto debido a que el cálculo para el voltaje de Nernts que se expresa en la ecuación (6.9), es posible determinarlo por medio de la termodinámica de la celda de combustible. Para la optimización de los parámetros de los modelos, se tienen como base unos parámetros físicos que representan las características de la pila de combustible, en la tabla 10, se muestra los parámetros que se tuvieron en cuenta para la implementación del algoritmo de optimización teniendo en consideración las condiciones en las que se elaboró el experimento.

Parámetro	Descripción	Valor
L	Espesor de la membrana	$0,005cm$
A	Área de la membrana	$35,25cm^2$
i_o	Densidad de corriente de Intercambio	$1,2246e^{-7} A/cm^2$
i_L	Corriente limite	$6A$
P_a	Presión del Hidrógeno en el ánodo	$0,5Bar$
P_c	Presión del aire en el catodo	$0,5Bar$
T	Temperatura de la pila de combustible	$303,15K$
T_{ref}	Temperatura de referencia	$298,15K$

TABLA 10: Parámetros físicos de la pila de combustible

El primer resultado a tratar hace referencia al modelo teórico visto en la sección 6.3.1, teniendo como referencia la tabla 2 que define los límites de cada parámetro. En la tabla 11, se muestra los parámetros evaluados, evidenciando que los valores del error son replicales independientemente de la ejecución.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
α_a	0,5192686	3,6750e-04
α_c	0,9943354	6,6259e-03
R_{elec}	0,0010288	7,1108e-04
σ	0,5199295	3,5052e-01
Mejor valor	0,0089369	1,2762e-06

TABLA 11: Parámetros optimizados del modelo teórico

En la figura 33a se puede evidenciar que la gráfica de color azul representa el comportamiento que tiene el modelo teórico, estableciendo un error promedio de 0,0089 respecto a los datos experimentales representados por la gráfica de color rojo. Por otra parte, en la gráfica 33 se

puede evidenciar que fue necesario 107 épocas para que la ejecución del algoritmo pudiera lograr el objetivo propuesto en la condición de parada.

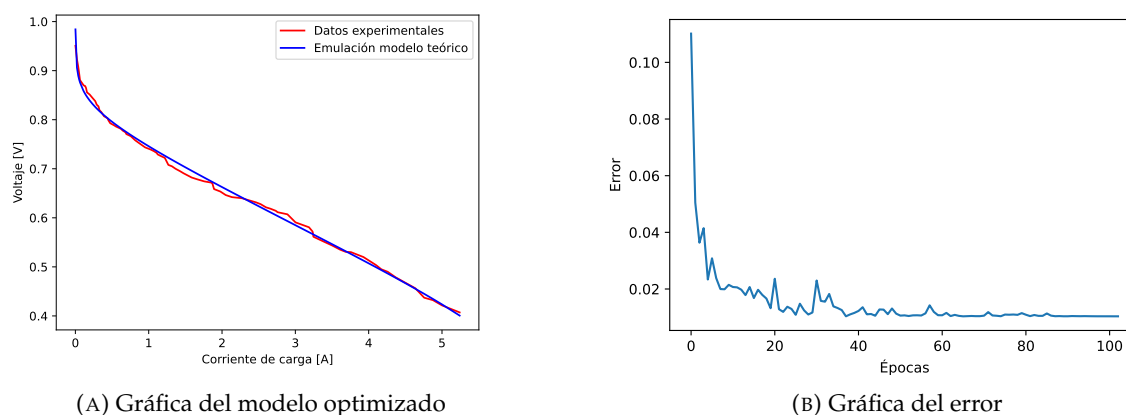


FIGURA 33: Optimización método teórico

Por lo que respecta al método empírico se analizó en primera instancia el primer modelo dinámico propuesto en la sección 6.3.2.2 evaluando el algoritmo con base a los límites expuestos en la tabla 3. En la tabla 12 se evidencia los valores de cada una de las variables del primer modelo dinámico.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
R_{ohm0}	0,0586769	2,3152e-04
K_{RI}	1,1035e-06	2,7989e-06
K_{RT}	1e-07	0
α_a	0,4882239	3,8802e-03
η_o	0,3952986	4,0058e-04
α_c	0,9896013	1,3928e-02
Mejor valor	0,0088370	2,7179e-06

TABLA 12: Parámetros optimizados del primer modelo eléctrico

En la figura 34 se muestra el comportamiento de la optimización, evidenciando que respecto al método teórico el modelo representa de mejor forma los datos experimentales.

El último resultado hace referencia al segundo modelo dinámico tratado en la sección 6.3.2.3 teniendo como límites los datos registrados en la tabla 4. En este modelo se observó que aunque tiene más parámetros para optimizar respecto a los anteriores, el mejor valor es parecido con el análisis hecho en el primer modelo dinámico.

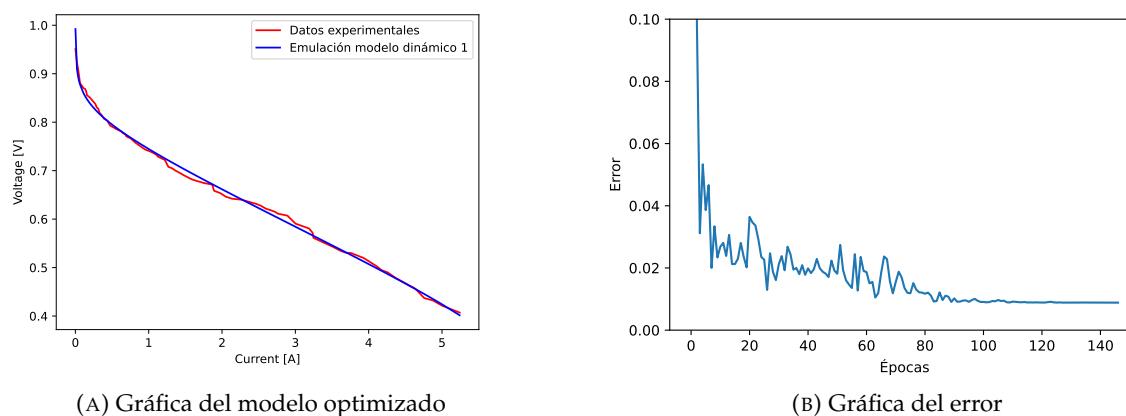


FIGURA 34: Optimización método empírico primer modelo

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
ψ	34,391172	9,6164889
R_C	0,0587384	5,2228e-03
E_1	-0,996728	7,5609e-02
E_{21}	7,4494e-04	5,7183e-04
E_{22}	7,0590e-04	2,4156e-04
E_{23}	3,9155e-05	3,7922e-05
E_3	6,9583e-05	3,6634e-05
E_4	-9,142e-05	1,0555e-05
α_c	0,0174026	1,1395e-02
Mejor valor	0,0089825	2,0841e-04

TABLA 13: Parámetros optimizados del segundo modelo eléctrico

Con relación a la optimización del segundo modelo eléctrico, se evidencio que, aunque se delimito un objetivo de optimización a través la condición de parada, este solo terminó de optimizar cuando acabo las épocas. Sin embargo, se hizo la prueba aumentando el número de épocas para saber si el error disminuía, no obstante, el error permaneció en el rango, de forma tal, que aunque no paro la optimización el resultado obtenido es satisfactorio con 250 épocas o con 1000 épocas.

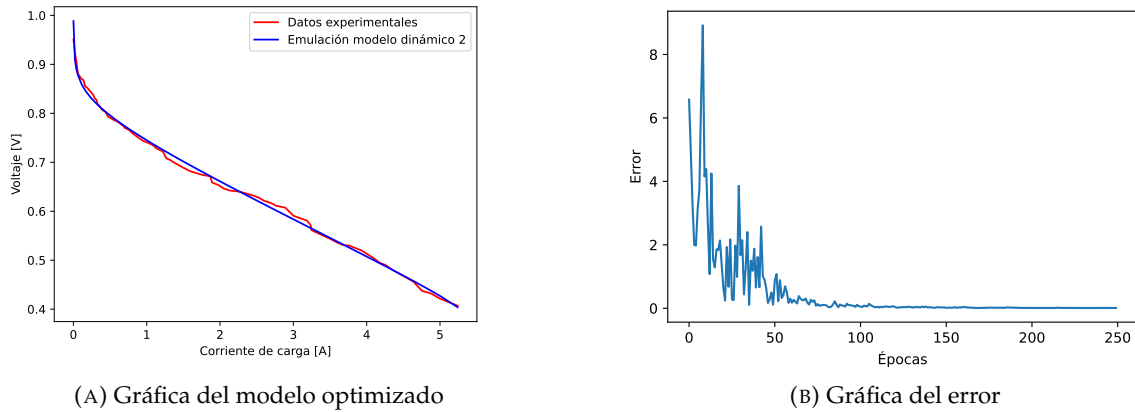


FIGURA 35: Optimización método empírico segundo modelo

9.4. Resultados del Modelo

En esta sección se expone los comportamientos de los modelos después de su optimización, teniendo como referencia la curva de polarización del sistema evidenciada en la figura 11 obtenida en base de lo explicado en la sección 9.2 que explica las condiciones en las cuales se evaluó la pila de combustible. Los resultados se abarcan desde dos perspectivas, la primera hace referencia a la comprobación de los modelos optimizados, respecto a la curva de polarización de sistema y la segunda expone los modelos a variaciones de carga de forma que se evalué los comportamientos dinámicos de la emulación respecto a la dinámica del sistema en la realidad.

9.4.1. Pruebas de Polarización

Las condiciones en las que se evaluó los modelos deben ser acordes con los valores de los parámetros para la implementación del algoritmo de optimización, los cuales se expresen en la tabla 10, es decir, en la myRIO los parámetros de presión del hidrógeno y del oxígeno se configuran a 0,5 Bar y para la temperatura se configuran a 303 grados Kelvin. Teniendo presente que los parámetros deben ser los más parecidos con los datos experimentales, en la figura 36 se evidencia una comparación entre el comportamiento del modelo teórico emulado por la myRIO con los datos experimentales. El rango para la corriente se tomó hasta los 6 amperios, esto con la finalidad de evidenciar las pérdidas por concentración en la emulación de una mejor manera, sin embargo, en la recolección de datos no se evaluó la pila de combustible en esas condiciones debido al riesgo que conlleva en someter la membrana a corrientes muy próximas a su corriente límite.

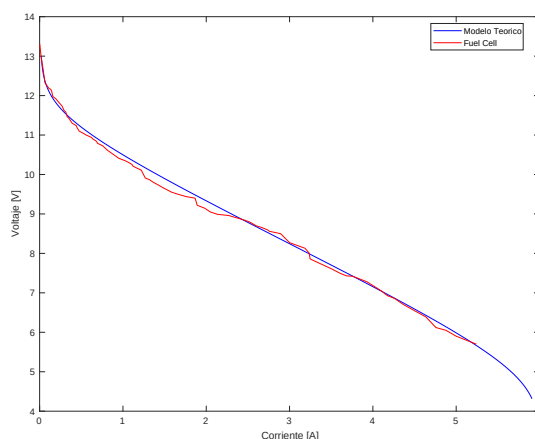


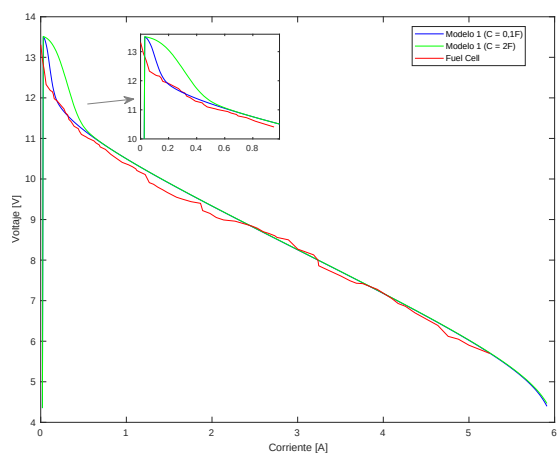
FIGURA 36: Comparación de la emulación del modelo teórico con los datos experimentales

La comparación de los modelos dinámicos con los datos experimentales se evidencia un comportamiento particular al iniciar con el modelo, es decir, en la figura 37 se puede observar que para los dos modelos la curva de polarización se asemeja a los datos experimentales exceptuando la región de pérdidas por activación. Este fenómeno se origina al arrancar el modelo debido a que se perturba el sistema desde su estado en reposo, sin embargo, esto solo se presenta en estados transitorios, por lo cual en estados estacionarios la curva de polarización de la emulación corresponde a los datos experimentales.

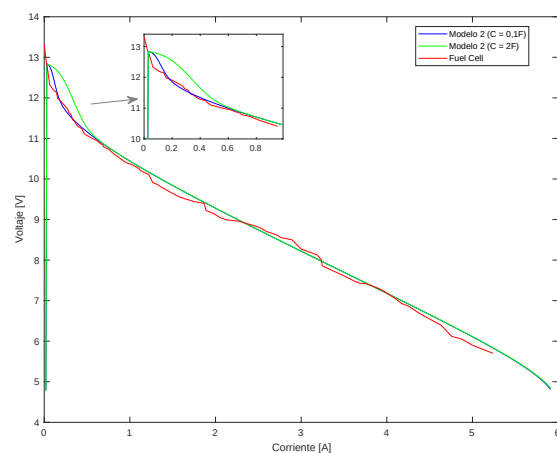
Un aspecto a tener en cuenta es el comportamiento del modelo dinámico en estado transitorio, ya que, el tiempo de estabilización y el sobre pico tiene una correlación con el valor del condensador y el modelo evaluado, esto radica que al cálculo de τ definido en la ecuación 6.23 sea diferente para los dos modelos, debido a que los parámetros de las resistencias son diferentes a pesar que ambos modelos representen de la manera más precisa la curva de polarización de la pila de combustible.

9.4.2. Pruebas de Variaciones de Carga

En esta sección se muestra el desarrollo de las pruebas de variación de carga con la finalidad de evaluar los modelos dinámicos respecto al comportamiento que tiene la pila de combustible. En la figura 38 se muestra el montaje experimental en el cual se evidencia un reóstato que actúa como carga eléctrica; se utilizaron dos reóstatos con diferentes valores de resistencia que conmutaban por medio de un relé cada segundo, con la finalidad de evaluar el comportamiento dinámico del sistema.



(A) Primer modelo dinámico



(B) Segundo modelo dinámico

FIGURA 37: Comparación entre la emulación de los modelos dinámicos con los datos experimentales

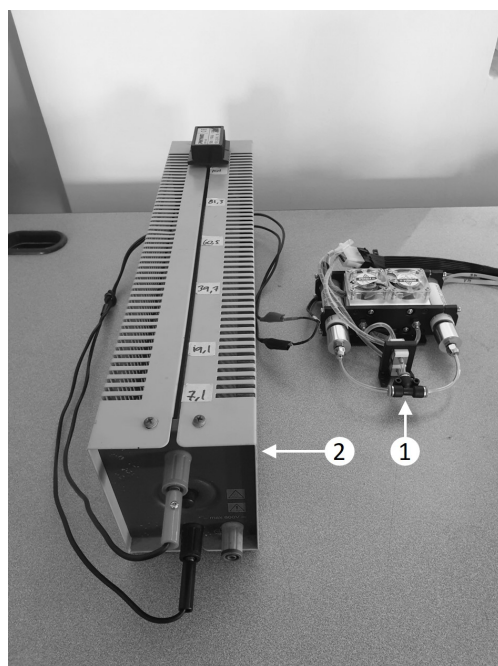


FIGURA 38: Montaje experimental Fuel Cell (1. Fuel Cell H-Cell 2.0, 2. Reóstato)

Luego de las pruebas experimentales en la pila de combustible, se procede a evaluar los modelos teniendo como referencia los dos valores de resistencia de los reóstatos, de forma que se trabaje en las mismas condiciones en la emulación. En la figura 39 se muestra el montaje experimental para la emulación de los modelos, es necesario resaltar que la comunicación entre la myRIO y la fuente programable es por medio del puerto analógico, no obstante, la fuente tiene unos rangos que están entre 0V a 10V para el control o la lectura del voltaje y la corriente, es decir, es necesario un acondicionamiento de la señal tanto a nivel de software como del hardware,

de manera que las señales se adecuen a los rangos de la fuente. La frecuencia de muestreo se evidenció que el modelo se puede representar con intervalos mayores de 1ms ya que a menos tiempo la señal se distorsiona.

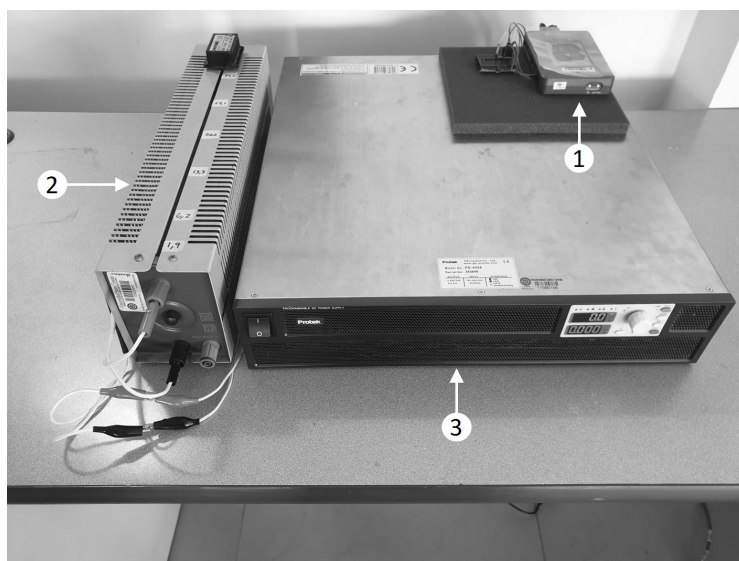
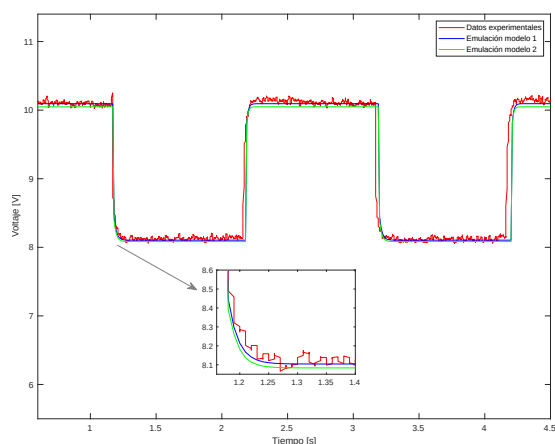
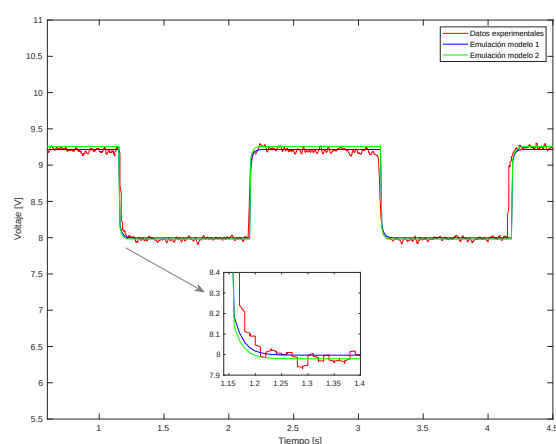


FIGURA 39: Montaje experimental emulación (1. myRIO 1900, 2. Reóstato, 3. Fuente programable Protek PD-4506)

En la figura 40 se puede evidenciar dos experimentos para evaluar la dinámica de los modelos respecto a los datos experimentales, los datos de los parámetros se tomaron en base a las tablas 12 y 13 y el valor del condensador para ambos modelos es 2 faradios.



(A) Variación de la carga de 1,4A a 3,1A



(B) Variación de la carga de 2A a 3,2A

FIGURA 40: Comparación de la respuesta dinámica entre los datos experimentales y la emulación de los modelos

Conclusiones

Este proyecto implementó un emulador del comportamiento eléctrico de una pila de combustible PEM, considerando los fenómenos estáticos y dinámicos del sistema. Inicialmente, se examinaron tres tipos de modelos matemáticos, el primero hace referencia a un análisis teórico que describe el comportamiento estático del sistema, además actúa como base para los diferentes tipos de análisis empíricos que exponen los comportamientos dinámicos, en consecuencia, se consideran dos modelos que describen desde diferentes enfoques la dinámica del sistema.

Sobre la base de los modelos matemáticos se implementa un algoritmo de optimización por enjambre de partículas que optimiza los parámetros de los modelos para adecuarlos al comportamiento de la curva de polarización del sistema físico. La curva de polarización resultante de los modelos optimizados se asemeja a los datos experimentales, evidenciando la similitud en las zonas por activación y óhmicas. En la zona por pérdidas por concentración no se visualiza explícitamente, no obstante, en la optimización se tiene en cuenta este cálculo, de forma que al evaluar los modelos a corrientes próximas a la corriente límite se observe el comportamiento del sistema en esta zona, aunque en los datos experimentales no se evidencien.

Los resultados de la optimización indican que existe una concordancia del mínimo error entre los tres modelos, lo que difiere es la cantidad de épocas que son necesarias para lograr ese valor de error. Por otra parte, respecto a los resultados del promedio y la desviación estándar se enfatiza que los parámetros del modelo teórico y del primer modelo dinámico, su desviación es baja de forma que no hay tanta dispersión en los datos respecto a su media. Contrariamente del segundo modelo dinámico en el cual la desviación de sus parámetros es alta, mostrando dispersiones respecto a su media, no obstante, aunque halla una dispersión en los parámetros se evidencia que la desviación estándar del mejor valor es baja, indicando que el punto de convergencia es común para distintas combinaciones de los valores de los parámetros.

La emulación de los modelos en una arquitectura RIO proporciona herramientas para la implementación de sistemas dinámicos en tiempo real de una manera precisa. Los resultados

experimentales contrastan con los de la pila de combustible H-Cell 2.0 validando los comportamientos estáticos y dinámicos. Los resultados indican que los modelos acogidos se adecúan al comportamiento del sistema, sin embargo, no se tiene la garantía de que los modelos representen de forma exacta los comportamientos eléctricos en todos los escenarios, debido a que no se tiene un control preciso en los periféricos del sistema, de forma que, se parte de la suposición que las reacciones presentes se dan de una manera total sin obstaculizaciones, pasando por alto el agua producida y las impurezas involucradas en la membrana, lo que provoca una inexactitud alrededor de los milivoltios respecto a la curva de polarización ideal del sistema.

Para futuras investigaciones se puede implementar un sistema de control que regule la cantidad de hidrógeno y oxígeno dependiendo de la corriente demandada, asimismo controlar el tiempo de la válvula de purga con relación a la corriente y a la producción de agua. Por otra parte, con la implementación del emulador se puede desarrollar diferentes sistemas con la metodología de Hardware-in-the-loop probando diferentes configuraciones y topologías en el uso de pilas de combustible, creando nuevos prototipos de una manera segura y fiable.

Bibliografía

- [1] L. A. Gregoire, K. Al-Haddad y G. Nanjundaiah, «Hardware-in-the-Loop (HIL) to reduce the development cost of power electronic converters», *India International Conference on Power Electronics, IICPE 2010*, 2011. DOI: 10.1109/IICPE.2011.5728153.
- [2] F. Gao, B. Blunier, D. Chrenko, D. Bouquain y A. Miraoui, «Multirate fuel cell emulation with spatial reduced real-time fuel cell modeling», *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, n.º 4, págs. 1127-1135, 2012, ISSN: 00939994. DOI: 10.1109/TIA.2012.2198909.
- [3] M. Steurer, F. Bogdan, W. Ren, M. Sloderbeck y S. Woodruff, «Controller and power hardware-in-loop methods for accelerating renewable energy integration», *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES*, págs. 44-47, 2007. DOI: 10.1109/PES.2007.386022.
- [4] I. K. Park, P. Forsyth, R. Kuffel y E. Tara, «Hardware in the loop (HILS) testing of a power electronics controller with RTDS», *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, págs. 5386-5391, 2013. DOI: 10.1109/IECON.2013.6700012.
- [5] B. Lu, X. Wu, H. Figueroa y A. Monti, «A low-cost real-time hardware-in-the-loop testing approach of power electronics controls», *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, n.º 2, págs. 919-931, 2007, ISSN: 02780046. DOI: 10.1109/TIE.2007.892253.
- [6] M. A. Mannah, A. Haddad y H. Bazzi, «Hardware in the loop simulation for optimal management of electrical power converters», *2014 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries, REDEC 2014*, págs. 43-48, 2014. DOI: 10.1109/REDEC.2014.7038529.
- [7] S. T. Cha, Q. Wu, A. H. Nielsen, J. Østergaard e I. K. Park, «Real-time Hardware-In-the-Loop (HIL) testing for power electronics controllers», *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2012, ISSN: 21574839. DOI: 10.1109/APPEEC.2012.6307219.

-
- [8] L. O. O. P. H. I. L. M. Odeling, S. Imulation, R. Mcneal y M. Belkhat, «(Hil) M», n.º 202, págs. 130-137, 2007.
 - [9] F. Gao, B. Blunier, M. Simões, A. Miraoui y A. El-Moudni, «PEM fuel cell stack hardware-in-the-loop emulation using DC/DC converter design», *2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2009*, págs. 2-7, 2009. DOI: 10.1109/EPEC.2009.5420939.
 - [10] W. Ren, M. Steurer y S. Woodruff, «Progress and challenges in real time hardware-in-the-loop simulations of integrated ship power systems», *2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, págs. 534-537, 2005. DOI: 10.1109/pes.2005.1489721.
 - [11] A. Monti, H. Figueroa, S. Lentijo, X. Wu y R. Dougal, «Interface issues in hardware-in-the-loop simulation», *2005 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, vol. 2005, págs. 39-44, 2005. DOI: 10.1109/ESTS.2005.1524650.
 - [12] Z. Jiang, R. A. Dougal, R. Leonard, H. Figueroa y A. Monti, «Hardware-in-the-loop testing of digital power controllers», *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, vol. 2006, págs. 901-906, 2006. DOI: 10.1109/apec.2006.1620645.
 - [13] J. Wu, Y. Cheng, A. K. Srivastava, N. N. Schulz y H. L. Ginn, «Hardware in the Loop test for power system modeling and simulation», *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE 2006 - Proceedings*, págs. 1892-1897, 2006. DOI: 10.1109/PSCE.2006.296201.
 - [14] M. Lemaire, P. Sicard y J. Belanger, «Prototyping and Testing Power Electronics Systems Using Controller Hardware-In-the-Loop (HIL) and Power Hardware-In-the-Loop (PHIL) Simulations», *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2015 - Proceedings*, págs. 2-7, 2015. DOI: 10.1109/VPPC.2015.7353000.
 - [15] J. H. Jung, S. Ahmed y E. Prasad, «Fast computation methods of PEM fuel cell dynamic models for real-time simulation», *2010 International Power Electronics Conference - ECCE Asia -, IPEC 2010*, n.º 4, págs. 954-961, 2010. DOI: 10.1109/IPEC.2010.5542182.
 - [16] W.-Y. Chang, «Equivalent Circuit Parameters Estimation for PEM Fuel Cell Using RBF Neural Network and Enhanced Particle Swarm Optimization», *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, págs. 1-8, 2013, ISSN: 1024-123X. DOI: 10.1155/2013/672681. dirección: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/672681/>.
 - [17] A. Zaidy, P. Pokharkar, R. Krishnan y D. Sonawane, «Dynamic modeling and simulation of a PEM fuel cell: MATLAB and LabVIEW modeling approach», en *2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)*, 2014, págs. 272-276. DOI: 10.1109/ICONCE.2014.6808744.

-
- [18] Y. Cao, Y. Li, G. Zhang, K. Jermisittiparsert y N. Razmjoooy, «Experimental modeling of PEM fuel cells using a new improved seagull optimization algorithm», *Energy Reports*, vol. 5, págs. 1616-1625, 2019, ISSN: 2352-4847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.013>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719306183>.
 - [19] M. H. Nehrir y C. Wang, «Principles of Operation of Fuel Cells», en *Modeling and Control of Fuel Cells: Distributed Generation Applications*. 2009, págs. 29-56. DOI: 10.1109/9780470443569.ch2.
 - [20] C. Spiegel, «Chapter 1 - An Introduction to Fuel Cells», en *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, C. Spiegel, ed., Burlington: Academic Press, 2008, págs. 1-14, ISBN: 978-0-12-374259-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012374259-9.50002-1>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123742599500021>.
 - [21] —, «Chapter 2 - Fuel Cell Thermodynamics», en *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, C. Spiegel, ed., Burlington: Academic Press, 2008, págs. 15-48, ISBN: 978-0-12-374259-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012374259-9.50003-3>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123742599500033>.
 - [22] A. Albarbar y M. Alrweq, «Design and Fundamental Characteristics of PEM Fuel Cells», en *Proton Exchange Membrane Fuel Cells: Design, Modelling and Performance Assessment Techniques*. Cham: Springer International Publishing, 2018, págs. 31-58, ISBN: 978-3-319-70727-3. DOI: 10.1007/978-3-319-70727-3_3. dirección: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70727-3_3.
 - [23] J. Hall, «Cell components», *Phytochemistry*, vol. 26, n.º 4, págs. 1235-1236, 1987, ISSN: 00319422. DOI: 10.1016/S0031-9422(00)82398-5.
 - [24] H. Machrafi, *Green Energy and Technology*. 2012, ISBN: 9781608054220. DOI: 10.2174/97816080528511120101.
 - [25] «Appendix B», en *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, C. Spiegel, ed., Burlington: Academic Press, 2008, pág. 411, ISBN: 978-0-12-374259-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012374259-9.50017-3>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123742599500173>.

-
- [26] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge y T. J. Harris, «Performance Modeling of the Ballard Mark {IV} Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell: {II} . Empirical Model Development», *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 142, n.º 1, págs. 9-15, 1995. DOI: 10.1149/1.2043959. dirección: <https://doi.org/10.1149/1.2043959>.
- [27] C. Wang, M. Hashem Nehrir y S. Shaw, «Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits», *2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 3, n.º 2, pág. 2115, 2005. DOI: 10.1109/pes.2005.1489284.
- [28] F. Barbir, «Chapter Three - Fuel Cell Electrochemistry», en *PEM Fuel Cells (Second Edition)*, F. Barbir, ed., Second Edition, Boston: Academic Press, 2013, págs. 33-72, ISBN: 978-0-12-387710-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387710-9.00003-5>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123877109000035>.
- [29] Y. Xiao y K. Agbossou, «Interface design and software development for PEM fuel cell modeling based on Matlab/Simulink environment», *2009 WRI World Congress on Software Engineering, WCSE 2009*, vol. 4, págs. 318-322, 2009. DOI: 10.1109/WCSE.2009.344.
- [30] C. Spiegel, «Chapter 10 - Modeling the Flow Field Plates», en *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, C. Spiegel, ed., Burlington: Academic Press, 2008, págs. 269-298, ISBN: 978-0-12-374259-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012374259-9.50011-2>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123742599500112>.
- [31] —, «Chapter 3 - Fuel Cell Electrochemistry», en *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, C. Spiegel, ed., Burlington: Academic Press, 2008, págs. 49-76, ISBN: 978-0-12-374259-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012374259-9.50004-5>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123742599500045>.
- [32] —, «Chapter 5 - Fuel Cell Mass Transport», en *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, C. Spiegel, ed., Burlington: Academic Press, 2008, págs. 97-125, ISBN: 978-0-12-374259-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012374259-9.50006-9>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123742599500069>.
- [33] —, «Chapter 4 - Fuel Cell Charge Transport», en *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*, C. Spiegel, ed., Burlington: Academic Press, 2008, págs. 77-96, ISBN: 978-0-12-374259-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012374259-9.50005->

7. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09780123742599500057>.
- [34] J. M. Andújar, F. Segura y M. J. Vasallo, «A suitable model plant for control of the set fuel cell-DC/DC converter», *Renewable Energy*, vol. 33, n.º 4, págs. 813-826, 2008, ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2007.04.013.
- [35] C. Restrepo, T. Konjedic, A. Garces, J. Calvente y R. Giral, «Identification of a Proton-Exchange Membrane Fuel Cell's Model Parameters by Means of an Evolution Strategy», *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 11, n.º 2, págs. 548-559, 2015, ISSN: 15513203. DOI: 10.1109/TII.2014.2317982.
- [36] M. H. Nehrir y C. Wang, «Dynamic Modeling and Simulation of PEM Fuel Cells», en *Modeling and Control of Fuel Cells*. IEEE, 2010, págs. 57-84. DOI: 10.1109/9780470443569.ch3.
- [37] R. I. Salim, «The performance of ACO in the parameter identification of a pem fuel cell model in comparison to GA and PSO», *5th International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies, PGSRET 2019*, págs. 26-27, 2019. DOI: 10.1109/PGSRET.2019.8882690.
- [38] R. Chibante y D. Campos, «An experimentally optimized PEM fuel cell model using PSO algorithm», *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, n.º 1, págs. 2281-2285, 2010. DOI: 10.1109/ISIE.2010.5637642.
- [39] Z. dan Zhong, H. bo Huo, X. jian Zhu, G. yi Cao e Y. Ren, «Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants», *Journal of Power Sources*, vol. 176, n.º 1, págs. 259-269, 2008, ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.10.080.
- [40] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley y P. R. Roberge, «Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell», *Journal of Power Sources*, vol. 86, n.º 1-2, págs. 173-180, 2000, ISSN: 03787753. DOI: 10.1016/S0378-7753(99)00484-X.
- [41] R. K. Arora, «Optimization: Algorithms and Applications (1st ed.)», *Chapman and Hall/CRC*, 2015. DOI: 10.1201/b18469.
- [42] S. Rincón-Murcia, E. Forero-Garcia, M. J. Torres y J. Ramirez-Pastran, «Electronic Unit for the Management of Energy Harvesting of Different Piezo Generators», *Crystals*, vol. 11, n.º 6, 2021, ISSN: 2073-4352. DOI: 10.3390/cryst11060640. dirección: <https://www.mdpi.com/2073-4352/11/6/640>.