



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

EXTRACCIÓN ÓPTIMA DE ENERGÍA DE UNA PEMFC

Que para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería Eléctrica

Presenta
Ing. Cynthia Lucero Valdez Hernández
G17073007

Director de Tesis
M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas

Co-Director de Tesis
Dr. Pedro Martin García Vite

Cd. Madero, Tamaulipas

Diciembre 2019



Instituto Tecnológico de Ciudad Madero
División de Estudios de Posgrado e Investigación

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cd. Madero, Tamps., a **27 de Noviembre de 2019**

OFICIO No.: U2.171/19
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS.

C. CYNTHIA LUCERO VALDEZ HERNÁNDEZ
NO. DE CONTROL G17073007
P R E S E N T E

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SECRETARIO:	HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
VOCAL:	RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
SUPLENTE:	GASTON HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
DIRECTOR:	HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
CO-DIRECTOR:	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

"EXTRACCIÓN ÓPTIMA DE ENERGÍA DE UNA PEMFC "

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Por mi patria y por mi bien" ®

JOSÉ AARÓN MELO BANDA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

c.c.p.- Archivo
Minuta

JAMB:RCG:jar



Av. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz Col. Los Mangos, C.P. 89440, Cd. Madero, Tam.

Tel. 01 (833) 357 48 20, e-mail: posgrado@itcm.edu.mx
www.tecnm.mx | www.cdmadero.tecnm.mx

Índice

	<i>Página</i>
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	ix
Agradecimientos	x
Dedicatoria	xi
Resumen	xii
Abstract	xiii
Capítulo 1	1
Introducción	1
1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.6 HIPÓTESIS	4
1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES	5
1.7.1. ALCANCES	5
1.7.2. LIMITACIONES	5
Capítulo 2	6
Marco Teórico	6
2.1 CELDAS DE COMBUSTIBLE	7
2.1.1 Tipos de celdas de combustible	7
2.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEMFC)	9
2.2.1 Elementos que conforman una PEMFC	11
2.2.1.1 Membrana de Intercambio Protónico (PEM)	11
2.2.1.2 Placas Catalizadoras	12
2.2.1.3 Placas Difusoras	12
2.2.1.4 Placas Bipolares	13
2.2.2 Características eléctricas de una PEMFC	13

2.2.2.1 Potencial Eléctrico Reversible de una PEMFC o Potencial de Nernst	14
2.2.2.2. Curva Característica Voltaje-Corriente.	15
2.2.2.3 Densidad de Corriente.	16
2.2.2.4 Pérdidas Irreversibles	17
2.2.2.4.1 Pérdidas por Activación.....	17
2.2.2.4.2 Pérdidas Óhmicas	18
2.2.2.4.3 Pérdidas de Transferencia de Masa.....	19
2.3 MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA (MAXIMUM POWER POINT)	21
2.3.1 Algoritmos MPPT	22
2.4 CONVERTIDORES ESTATICOS DE POTENCIA (CEPS).....	22
2.5 CONCLUSIONES	24
Capítulo 3	25
Simulación de una FC tipo PEM	25
3.1 MODELADO DE UNA PEMFC.....	26
3.2 SIMULACIÓN DE UNA PEMFC.....	28
3.3.1 Simulación en MATLAB	28
3.3.2 Simulación en SIMULINK.	29
3.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN	31
3.4.1 Obtención de la Curva Característica Voltaje-Corriente.....	31
3.4.2 Comparación de la Curva Obtenida Contra la Curva Analítica	33
3.5 CONCLUSIONES	34
Capítulo 4	35
Emulación de una FC tipo PEM	35
4.1 EMULACIÓN DE UNA PEMFC.....	36
4.2 GENERALIDADES DEL SISTEMA DIGITAL EMULADOR.....	37
4.2.1 Microcontrolador (MCU).....	38
4.2.2 Convertidor Digital-Analógico (DAC)	41
4.2.2 Fuente de Voltaje Controlada por Voltaje (CVS)	42
4.2.3 Sistema de Adquisición de Datos (Sensor de Corriente).	44
4.3 VALIDACIÓN DE SISTEMA DIGITAL EMULADOR	46
4.3.1 Variación de Temperatura.....	47
4.3.1 Variación de Parámetros	48

4.4 CONCLUSIONES	50
Capítulo 5	51
Pruebas y Resultados Experimentales	51
5.1 OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LA CURVA CARACTERISTICA DE UNA FC TIPO PEM.....	52
5.2 CONVERTIDOR DE POTENCIA CONECTADO A UNA FC TIPO PEM.....	58
5.2.1 Diseño del Convertidor de Potencia.....	60
5.2.2 Generación de la Señal PWM	61
5.2.3 Implementación del Convertidor Boost	63
Capítulo 6	67
Conclusiones Generales y Trabajos Futuros	67
Apéndice A	73
Parámetros para el cálculo del modelo matemático de una FC tipo PEM	73
Apéndice B	75
Especificaciones técnicas y curva voltaje-corriente de una FC tipo PEM	75
Referencias	77

Lista de figuras

Página

Figura 2.1 Circuito esquemático de una FC tipo PEM.....	10
Figura 2.2 Curva característica I-V de una FC tipo PEM	15
Figura 2.3 Pérdidas irreversibles de una FC tipo PEM.	20
Figura 2.4 Topología de convertidores de potencia (a)boost, (b)buck, y (c)buck-boost.....	23
Figura 3.1 Esquema de bloques SIMULINK.	30
Figura 3.2 Curva característica V-I en función de la densidad de corriente.	32
Figura 3.3 Curva V-I en función de la corriente	33
Figura 3.4 Curva I-V obtenida mediante SIMULINK en función de la corriente	33
Figura 4.1 Sistema emulador digital.....	37
Figura 4.2 Diagrama de flujo de la programación en el MCU.....	39
Figura 4.3 Configuración del ATmega328P.	40
Figura 4.4 Configuración del DAC0830.	42
Figura 4.5 Esquema de conexión de la fuente INSTEK PS-1830.....	43
Figura 4.6 Fuente INSTECK PS-1830 utilizada.	44
Figura 4.7 Circuito de medición de corriente.....	45
Figura 4.8 Curva voltaje-corriente variando la temperatura.	47
Figura 4.9 Curva potencia-voltaje variando la temperatura.	48
Figura 4.10 Curva potencia-voltaje de una FC tipo PEM de 100 W.....	49
Figura 5.1 Diagrama de bloques del sistema para la obtención de la curva característica de la PEMFC.....	52
Figura 5.2 Diagrama esquemático de la carga electrónica.....	53
Figura 5.3 Diagrama esquemático del circuito de control.....	55
Figura 5.4 Configuración experimental para la obtención de la curva característica de la PEMFC.....	56
Figura 5.5 Instrumentación necesaria para la obtención de la curva característica de la PEMFC.....	57
Figura 5.6 Curva característica voltaje-corriente de la PEMFC.....	58
Figura 5.7 Convertidor de potencia interconectado al emulador digital.	58
Figura 5.8 Diagrama esquemático del convertidor de potencia conectado al emulador digital.	60
Figura 5.9 Configuración de la señal PWM.	62
Figura 5.10 Convertidor boost utilizado.....	63
Figura 5.11 Convertidor boost implementado.....	64
Figura 5.12 Resultados experimentales con 55% de ciclo de trabajo obtenidos mediante el osciloscopio Tektronix TDS2024C.	65

Figura 5.13 Valores de corriente de salida de la FC tipo PEM obtenidos mediante el osciloscopio Tektronix TDS2024C. 65

Lista de tablas

	<i>Página</i>
Tabla 2.1 Características principales de las celdas.....	8
Tabla 2.2 Características de los principales algoritmos.	22
Tabla 4.3 Parámetros del circuito del ATmega328P	41
Tabla 4.4 Parámetros del circuito DAC0830.....	42
Tabla 4.5 Parámetros del sensor L18P005D15.....	46
Tabla 4.6 Parámetros FC tipo PEM de 100 W.	49
Tabla 5.7 Parámetro del circuito carga electrónica	54
Tabla 5.8 Parámetros de circuito de control.	56
Tabla 5.9 Parámetros del convertidor de potencia boost.....	61
Tabla 5.10 Parámetros de la señal PWM.....	63
Tabla 5.11 Rendimiento del emulador digital con diferentes valores de ciclo de trabajo...	64

Agradecimientos

Primeramente, gracias infinitas a Dios por todas las bendiciones que ha derramado sobre mí y los míos, por las oportunidades que me ha otorgado a lo largo de la vida. Toda la gloria sea para él.

Agradezco a las instituciones que a continuación enlisto por su apoyo incondicional y colaboración para la realización de este trabajo de investigación:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Secretaría de Energía (SENER) por el apoyo brindado a través de la beca 496068.

Al Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Al personal docente, administrativo y de apoyo de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

A mi director y co-director de tesis, el M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas y el Dr. Pedro Martín García Vite por compartir sus conocimientos y experiencias y por su disponibilidad permanente para la aclaración de dudas durante el desarrollo de este proyecto. A los profesores evaluadores por sus valiosos comentarios para la realización de este trabajo, Dr. Gastón Hernández Martínez y M.C. Rafael Castillo Gutiérrez.

A mis profesores de asignatura, M.C. Aarón González Hernández, M.C. Eduardo Nacú Salas Cabrera, Ing. Rodolfo Castillo y Mtra. Gladys Galiana por su paciencia, dedicación, respeto, responsabilidad y compromiso con la enseñanza.

A mis compañeros y amigos por los momentos agradables, consejos, ayuda y risas interminables, Ing. José María Castillo Hernández, Ing. Víctor Alexis Gómez Mata, Ing. Iván Sánchez Gámez, M.C. María del Rosario Rivera Espinoza y el M.C. Gerardo Velasco Pérez.

A mi papa y a mi hermano por apoyarme y motivarme a seguir adelante y no desistir.

Dedicatoria

A mi adorada madre María de Jesús Hernández Ángel (1969-2017) por ser mi más grande y bonita motivación en la vida. No lo hubiera podido hacer sin ti. Mi ángel hermoso, siempre estás en mi mente y en mi corazón. Te amo.

A mi papa y hermano por su apoyo, consejos y motivación a lo largo de esta travesía. Esto es de ustedes y para ustedes.

A todos los maestros que han tenido a bien compartir conmigo sus enseñanzas y conocimientos.

Extracción óptima de energía de una PEMFC

Cynthia Lucero Valdez Hernandez

Resumen

En la actualidad, la alta demanda de energía ha propiciado un incremento en la generación de energía proveniente de fuentes renovables. Esta energía posee grandes ventajas como alta eficiencia y bajo impacto ambiental. Dentro de las fuentes de generación de energía renovables, las celdas de combustible (FC, del inglés Fuel Cell) han aumentado su aprovechamiento. En particular las del tipo de membrana de intercambio protónico (PEMFC, del inglés Proton Exchange Membrane Fuel Cell) que utilizan hidrógeno y oxígeno como combustibles. Una PEMFC es un dispositivo electroquímico capaz de realizar una conversión de energía química a eléctrica mediante una reacción oxidación-reducción, la energía generada por una PEMFC se puede considerar limpia, eficiente y confiable. Sin embargo la desventaja más grande que presentan las FC tipo PEM son sus altos costos, debido a que para lograr una óptima operación son necesarios equipos y sistemas auxiliares complejos. Adicional a esto, resulta complicado operarlas dentro de un ambiente controlado. Estas dificultades han dado pie al desarrollo de sistemas emuladores de FC tipo PEM, los cuales representan una solución para llevar a cabo pruebas experimentales. Considerando lo anterior, se ha evaluado y codificado un modelo matemático simplificado que describe el comportamiento de una FC tipo PEM, seguido por la programación de este en un microcontrolador ATmega328P con el propósito de llevar a cabo la emulación de una FC tipo PEM convencional. Adicional se ha empleado un convertidor digital-analógico con el fin de convertir señales, un sistema de adquisición de datos que consiste en un sensor de corriente de salida, una fuente de voltaje controlada por voltaje para crear una interfaz entre la etapa de acondicionamiento de señales y la etapa de potencia. Esta fuente alimenta una resistencia de carga, en donde se encuentra el sensor de corriente, mismo que retroalimenta la señal al microcontrolador para su adquisición y procesamiento y de esta manera cerrar el lazo del sistema empleado. Los resultados experimentales muestran que el emulador sigue correctamente la curva característica de la PEMFC.

Optimal energy extraction from a PEMFC

Cynthia Lucero Valdez Hernandez

Abstract

At present, high energy demand has led to an increase in the generation of energy from renewable sources. This energy has great advantages such as high efficiency and low environmental impact. Among the sources of renewable energy generation, fuel cells (FC) have increased their use. In particular those of the proton exchange membrane type (PEMFC), which use hydrogen and oxygen as fuels. A PEMFC is an electrochemical device capable of converting chemical energy to electrical energy through an oxidation-reduction reaction, the energy generated by a PEMFC can be considered clean, efficient and reliable. However, the biggest disadvantage of PEMFC is their high costs, because complex auxiliary equipment and systems are necessary to achieve an optimum operation. In addition to this, it is difficult to operate them in a controlled environment. These difficulties have led to the development of emulatory systems of PEMFC, which represent a solution to carry out experimental tests. Considering the above, a simplified mathematical model describing the behavior of a PEMFC has been evaluated and coded, followed by programming it in an ATmega328P microcontroller with the purpose of carrying out the emulation of a conventional PEMFC. Additionally, a digital-analog converter has been employed in order to convert signals, a data acquisition system consisting of an output current sensor, a voltage-controlled voltage source to create an interface between the signal conditioning stage and the power stage. This source feeds a load resistor, where the current sensor is located, which establishes the feedback to the microcontroller for acquisition and processing and thus close the loop of the used system. The experimental results show that the emulator follows correctly the characteristic curve of PEMFC.

Capítulo

1

Introducción

La situación de los sistemas energéticos en la actualidad ha contribuido con expansión de graves problemas medioambientales como el cambio climático, la lluvia ácida o el efecto invernadero. El consumo de combustibles fósiles así como la emisión de estos ha orillado a la comunidad científica a buscar fuentes de energía que sean amigables con el medio ambiente, tal es el caso de las energías renovables. Por tal motivo, es de suma importancia el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan el aprovechamiento máximo de los recursos energéticos presentes en nuestro planeta. En este contexto, la tecnología de las celdas de combustible ofrece la posibilidad de generar energía de manera eficiente, limpia y abundante. El presente capítulo presenta la introducción a la problemática en la cual se centra este trabajo, la misma está relacionada con la generación de energía mediante celdas de combustible. Se exponen los objetivos y fundamentos para el desarrollo de la investigación, así como los alcances y limitaciones del estudio.

1.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

En la actualidad la constante demanda de energía a nivel mundial, el agotamiento de los combustibles fósiles y los efectos contaminantes, han orillado al hombre a buscar nuevas fuentes de energía alternativas que mitiguen estos impactos.

Las energías renovables son fuentes de energía limpia, inagotable y crecientemente competitiva. Actualmente las celdas de combustible (FC, del inglés fuel cell) presentan una alternativa confiable, ya que éstas generan una energía de alta eficiencia y bajo impacto ambiental.

Las FCs son capaces de realizar una conversión de energía química a energía eléctrica similar a una batería. Sin embargo, a diferencia de las baterías, las celdas de combustible no se agotan o necesitan recargarse de nuevo. Las FCs producen electricidad y calor en tanto sea constante el suministro de combustible [1].

Entre los múltiples tipos de FCs disponibles, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC, del inglés Proton Exchange Membrane Fuel Cell) son las más comúnmente utilizadas, esto debido a sus bajas temperaturas de operación y al uso de hidrógeno y oxígeno como combustibles. Éstas exhiben una característica no lineal en su operación. Dentro de sus condiciones de trabajo, existe un punto máximo de potencia en su curva característica voltaje-corriente, este punto se denomina MPP (por sus siglas en inglés, Maximum Power Point).

A pesar de que las PEMFC presentan numerosas ventajas en comparación con otro tipo de celdas de combustible se deben de tener en cuenta que la escasa implementación o utilización es debido principalmente a su costo elevado, el cual puede superar los \$30,000 (USD)[2].

Con el fin de contar con un instrumento de laboratorio con la capacidad de imitar el comportamiento de una FC tipo PEM, se han desarrollado emuladores los cuales representan una solución alternativa para el desarrollo y experimentación de este tipo de FC.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para aplicaciones prácticas, el voltaje de salida que proporciona una única PEMFC es escaso, por lo que para crear suficiente voltaje de salida y potencia las celdas son agrupadas, combinándolas en serie, en lo que en inglés se denomina “Fuel Cell Stack” (FC Stack). El número de celdas usadas varía según el diseño y el requerimiento que se demande.

La corriente y voltaje de salida de un FC Stack dependen de la carga. En cualquier condición, solo existe un único punto máximo de potencia (MPP) en la curva característica voltaje-corriente.

Si bien las FC tipo PEM presentan un amplio abanico de ventajas, la desventaja más grande con la que se enfrentan es en el ámbito económico. Esto debido a que un sistema de generación de energía basado en FC tipo PEM necesita de sistemas auxiliares costosos y complejos para su óptima operación, adicionado a que el control de los mismos resulta complicado.

Por las características de operación de las FC tipo PEM, existe la necesidad de incorporar un convertidor de potencia en conjunto con una técnica de control consistente en un algoritmo de seguimiento de máximo punto de potencia (MPPT), esto para acondicionar adecuadamente la potencia extraída de la celda de combustible.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Un emulador de este tipo de sistemas es una solución atractiva para llevar a cabo pruebas preliminares. Un emulador, reemplaza el costo efectivo del sistema de generación de energía basado en FC y permite reproducir el comportamiento de una FC tipo PEM en modo estable y a su vez obtener la curva voltaje-corriente igual o parecida a la teórica, esto con precisión con la finalidad de evaluar estrategias de control. Adicional a esto, el ambiente de operación podrá ser mejor controlado que en un sistema de FC tipo PEM real.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema emulador digital capaz de imitar el comportamiento de una FC tipo PEM con la finalidad de obtener la curva voltaje-corriente de forma experimental.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar y codificar el modelo matemático simplificado de una FC tipo PEM.
- Simular en MATLAB/SIMULINK del modelo matemático simplificado.
- Validar del modelo matemático simplificado.
- Implementar el sistema emulador digital.
- Implementar un sistema de adquisición de datos para medir la tensión y corriente de salida.
- Obtener la curva característica del sistema PEMFC de forma experimental.
- Simular e implementar un convertidor estático de potencia al sistema emulador digital.

1.6 HIPÓTESIS

La programación de un modelo electroquímico simplificado en un sistema digital permitirá generar un voltaje de control en función de la corriente medida con el fin de imitar el comportamiento de una celda PEM real.

1.7 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.7.1. ALCANCES

- Programación flexible, capacidad de modificar la curva voltaje-corriente según las características del fabricante.
- Implementación del algoritmo en plataforma digital.
- Simulación del algoritmo operando el convertidor de potencia.
- Prototipo experimental con el algoritmo.
- La carga alimentada por el sistema a implementar es considerada constante.
- Emulación de una FC tipo PEM de hasta 100 W.

1.7.2. LIMITACIONES

- Abastecimiento del combustible hidrógeno.
- Alimentación constante del combustible al sistema PEMFC.
- Control de variables atmosféricas como presión y temperatura.

Capítulo

2

Marco Teórico

Actualmente el uso de fuentes de energías renovables se ha posicionado rápidamente en muchas áreas tecnológicas jugando un papel importante e imprescindible tanto en el ámbito industrial como en el ámbito doméstico. Un claro ejemplo es el uso de sistemas fotovoltaicos (PV, photovoltaic), siendo sistemas confiables, seguros y atractivos para el usuario. En contraste, el uso de fuentes de generación basadas en el empleo de combustibles como el hidrógeno se ha limitado, en cierta manera, debido a sus elevados costos de generación y almacenamiento así como la implementación física, emisiones de CO_2 , difícil manejo y durabilidad [3]. No obstante existen dispositivos como las celdas de combustible (FCs) cuyo residuo de generación es agua y las cuales podrían ayudar a la reducción de CO_2 y contrarrestar la dependencia de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. Los sistemas basados en FCs son compactos, ideales para aplicaciones a pequeña escala, sin dejar de lado que presentan una alta eficiencia que oscila entre 45-60%, superando ampliamente a la de los combustibles fósiles que es de alrededor del 33%. A lo largo de este capítulo se presentan conceptos y datos relevantes acerca de las celdas de combustible, esto con la finalidad de comprender su funcionamiento, identificar los tipos de FCs existentes así como de analizar las ventajas que presenta este tipo de energía renovable.

2.1 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una celda de combustible se podía definir como un dispositivo electroquímico capaz de convertir energía química en energía eléctrica en corriente directa. Las baterías como las celdas de combustible basan su comportamiento en un proceso electroquímico con la deferencia que las celdas de combustible mantienen su capacidad de generar energía durante su operación siempre y cuando se les suministre combustible, lo cual no sucede con las baterías convencionales las cuales pierden su capacidad de generación durante su operación [3].

Básicamente, una celda de combustible es un convertidor energético electroquímico que transforma directamente la energía química almacenada en el combustible en energía eléctrica, siendo su característica más relevante es la capacidad de generar potencia limpia, directa y de alto rendimiento energético.

El funcionamiento de una FC es bastante sencillo. La FC está formada por dos electrodos, llamados ánodo y cátodo, y un electrolito que los pone en contacto. Más adelante se explicará el principio de funcionamiento de una manera más detallada.

2.1.1 Tipos de celdas de combustible

Existen cinco tipos de FCs, las mismas presentan diferencias entre sí, como lo es el electrolito empleado, el combustible que utilizan y la temperatura de operación. Los cinco tipos de FCs desarrollados actualmente son los siguientes [4]:

- Celda de combustible alcalina (Alkaline Fuel Cell, AFC)
- Celda de combustible de ácido fosfórico (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)
- Celda de combustible de membrana de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane, PEMFC- DMFC)
- Celda de combustible de óxidos sólidos (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)
- Celda de combustible de carbonatos fundidos (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

A su vez en función del combustible que utilicen para operar, las FCS de membrana de intercambio protónico se dividen en:

- Celdas de hidrógeno (PEMFC)
- Celdas de metanol directo (DMFC)

En la Tabla 2.1 se observan las principales características que presentan los diferentes tipos de FCs

Tabla 2.1 Características principales de las celdas

Tipo de FC's	Electrolito	Combustible	Potencia [kW]	Temperatura [°C]	Eficiencia eléctrica [%]
AFC	Solución alcalina	Hidrógeno	10-100	60-220	60-70
PEMFC	Membrana de intercambio protónico	Hidrógeno	0.1-500	70-200	50-70
DMFC	Membrana de intercambio protónico	Metanol	0.001-100	90-120	20-30
PAFC	Ácido fosfórico	Hidrógeno	Mayor a 10 MW	200	55
MCFC	Carbonato fundido	Hidrógeno, Metano-CH ₄	100MW	650	55
SOFC	Óxido cerámico	Hidrógeno, CH ₄ , CO	Mayor a 1000MW	600-100	60-65

Las celdas de combustible MCFC y PAFC son las menos utilizadas. Las AFC son utilizadas frecuentemente para aplicaciones espaciales y el costo de las mismas es elevado.

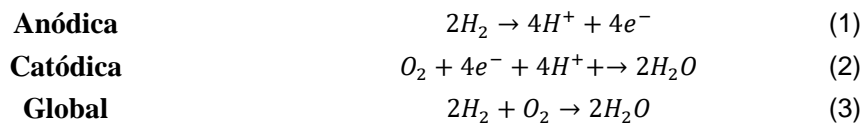
Las DMFC, PEMFC y SOFC son las más viables y utilizadas actualmente. Las DMFC utilizan metanol como combustible el cual posee una baja densidad de potencia. Las PEMFC poseen mayores densidades de potencia y operan con temperaturas relativamente bajas, menos de 100 °C lo cual facilita el aislamiento y la rapidez de arranque. Las SOFC presentan alta eficiencia y alta densidad de potencia, sin embargo presenta un problema asociado a las elevadas temperaturas de operación, mayor de 600°C lo cual dificulta el aislamiento y el tiempo de arranque.

El presente trabajo de investigación se ha centrado en las celdas de combustible de membrana intercambio protónico (PEMFC).

2.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA DE INTERCAMBIO PROTÓNICO (PEMFC)

La celda de combustible de membrana intercambio protónico es una de las más sencillas y usadas en la actualidad, ésta se alimenta en el ánodo con hidrógeno en estado gaseoso y en el cátodo con oxígeno puro.

Una FC tipo PEM transforma energía por medio de una reacción reducción-oxidación. Dicho en otras palabras, se basa en la oxidación parcial del hidrógeno en el ánodo y la reducción del oxígeno en el cátodo. El hidrógeno llega al ánodo catalizador oxidado electroquímicamente y se disocia en protones (p^+) y electrones (e^-), dicha reacción es denominada “reacción anódica”. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, mientras que los electrones son forzados a viajar por un circuito externo conectado, produciendo una corriente eléctrica. Es decir, se produce energía eléctrica ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el cátodo, los electrones (conducidos a través del circuito externo) y los protones se combinan con el oxidante, las moléculas del oxígeno produciendo calor y agua. Esta reacción es denominada “reacción catódica” y es producida más lentamente que la oxidación del hidrógeno. A continuación se describen las reacciones anódica y catódica así como la reacción global del sistema [4].



En la Figura 2.1 se muestra el circuito esquemático de una PEMFC, así mismo se describen las diferentes partes que la conforman. De igual manera la operación de la misma queda descrita de manera explícita.

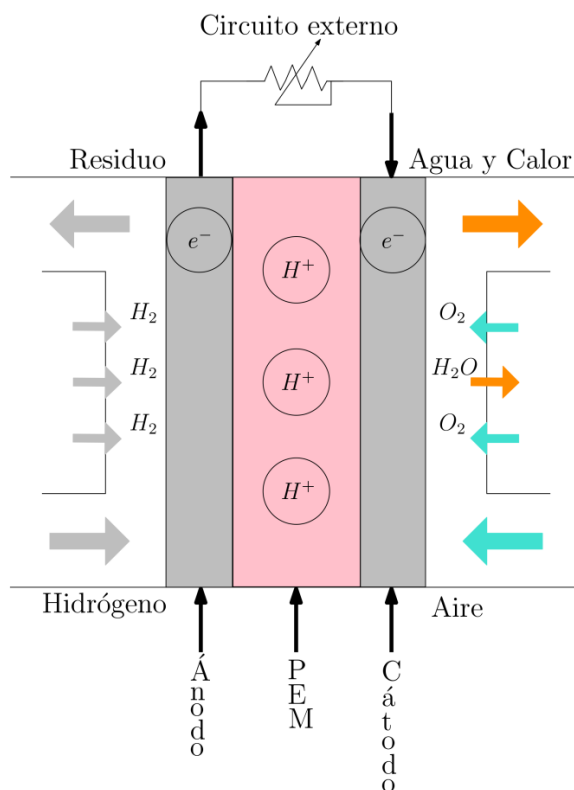


Figura 2.1 Circuito esquemático de una FC tipo PEM

2.2.1 Elementos que conforman una PEMFC

A continuación se describen los elementos que conforman una FC tipo PEM [5].

2.2.1.1 Membrana de Intercambio Protónico (PEM)

La membrana de intercambio protónico usualmente suele ser de NAFIÓN. El NAFIÓN es una marca comercial de la compañía Chemours (anteriormente DuPont), y se trata de un copolímero de tetrafluoretileno sulfonado. Es el primero de una clase de polímeros sintéticos con propiedades iónicas que se llaman ionómeros. Presenta una dimensión de entre 75 y 150 micras. Algunas de las propiedades de este material es que posee una buena estabilidad química y térmica. Así mismo soporta numerosos agentes oxidantes o reductores y temperaturas elevadas relativamente.

La estructura química de la PEM la convierte en un excelente material conductor iónico, es decir, permite que los iones negativos (electrones) queden retenidos en su interior, en tanto que los iones positivos (protones) sean móviles para llevar carga positiva del ánodo al cátodo. De igual manera son efectivas para mantener una correcta separación de gases reactantes, pueden mantener el hidrógeno separado del oxígeno.

La conductividad iónica de la membrana, dependerá de múltiples variables como lo son:

- Temperatura y presión de operación. El rango de temperatura al que suelen operar es de 60-90 °C, a temperaturas superiores la PEM no retiene agua, lo que hace difícil el transporte de protones. En el rango de presiones, el ideal es de 0-5 bares.
- Concentración del grupo ácido.
- Hidratación de la membrana, debe estar saturada de agua para permitir el desplazamiento de protones.

Como se mencionó anteriormente, esta membrana polimérica constituye un buen conductor iónico, pero no así de electrones, debido a que por su naturaleza orgánica, ésta se convierte en un aislante eléctrico. Debido a esta propiedad aislante, los electrones producidos en el ánodo se desplazan a través del circuito externo para llegar al cátodo y alimentar así la carga necesaria.

En condiciones estables, la vida útil de la membrana puede llegar a ser de 4,000 horas de operación. La correcta hidratación de la membrana será un factor influyente y visible para densidades de corriente elevadas, donde el voltaje suele bajar considerablemente.

2.2.1.2 Placas Catalizadoras

Como ya se mencionó anteriormente, la reacción electroquímica en la cual las FCs tipo PEM basan su funcionamiento está conformada por dos reacciones, (i) la reacción de oxidación en el ánodo (reacción anódica) y (ii) la reacción de reducción en el cátodo (reacción catódica). Esta reacción reducción-oxidación entre el hidrógeno y el oxígeno, ocurre lentamente por lo cual es necesario el aceleramiento del proceso para garantizar el funcionamiento y la generación de energía de una PEMFC. De acuerdo a la química básica la utilización de catalizadores es una posible solución para acelerar el ritmo de la reacción.

Un catalizador no es más que una sustancia que incrementa la velocidad de la reacción, pero la misma no es consumida ni sufre ningún tipo de alteración química. El catalizador que mejor funciona en una PEM es el platino, extremadamente costoso y el cual hace que el costo de este tipo de FCs se eleve.

2.2.1.3 Placas Difusoras

Las placas difusoras, están situadas junto al ánodo y al cátodo. Éstas están hechas de un material poroso de tela de grafito, con la finalidad que sean capaces de conducir los

electrones a través del circuito externo. Las placas difusoras son indispensables para el funcionamiento de este tipo de FC, estas placas cumplen funciones específicas:

- Facilitar la difusión de gas hacia los electrodos.
- Soportar mecánicamente la PEM y los catalizadores.
- Encaminar a los electrones hacia la salida del ánodo y la entrada de cátodo.
- Extraer el agua (producto de la reacción de reducción en el cátodo).

2.2.1.4 Placas Bipolares

Las placas bipolares son las placas situadas a cada uno de los extremos de la FC y son fabricadas de un material ligero, fuerte, buen conductor de electrones e impermeable al gas. Habitualmente están hechas de grafito y algunos otros metales. La cara interna de cada placa bipolar está dotada de unos canales en la superficie. Esto con la finalidad de transportar el hidrógeno y el oxígeno a las placas difusoras. Las placas bipolares cumplen básicamente dos funciones:

- Proporcionar a las placas difusoras el gas reactante.
- Servir de colectores de corriente.

2.2.2 Características eléctricas de una PEMFC

Una FC constituye una unidad mínima necesaria para transformar energía química en energía eléctrica. La corriente eléctrica producida por una FC dependerá del área activa de la membrana, donde tendrá lugar la reacción electroquímica. Para garantizar que esta área activa se maximice, las FC se conectan en serie o paralelo formando los llamados “stack” de FC.

Ha quedado claro que la función principal que ejerce una FC es la de extraer la energía contenida en un combustible y convertirla directamente en electricidad. Pero, hablando en términos de la cantidad máxima de energía que se puede extraer de una FC, se deben de

considerar ciertas características eléctricas que éstas presentan, de las cuales se hablará en este apartado.

2.2.2.1 Potencial Eléctrico Reversible de una PEMFC o Potencial de Nernst

En condiciones estándares, la porción de energía contenida en un combustible que se puede transformar en electricidad, viene determinada por la ecuación de la Energía Libre de Gibbs [3]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4)$$

donde: ΔH es el incremento de entalpía o trabajo del sistema, T es la temperatura constante y ΔS es el incremento de entropía entre productos y reactantes. La ecuación anterior, representa el contenido energético neto del sistema a temperatura (T) y volumen (V) constantes.

En general el potencial eléctrico reversible de una PEMFC viene dado por:

$$P_{el} = nF \quad (5)$$

donde: n es el número de electrones por molécula de hidrógeno y F es conocida como la Constante de Faraday.

Por lo tanto, tomando en cuenta (4) y (5), el potencial eléctrico o voltaje de Nernst de una FC tipo PEM se describe de la siguiente manera:

$$E = \frac{-\Delta G}{nF} \quad (6)$$

El potencial real de una FC tipo PEM disminuye respecto a su valor teórico esto debido a de que durante el proceso de generación de energía se presentan pérdidas irreversibles de voltaje. Estas pérdidas se representadas a través de la denominada curva de polarización (V-I), la cual describe el modelo experimental de generación de voltaje en función de la corriente.

2.2.2.2. Curva Característica Voltaje-Corriente.

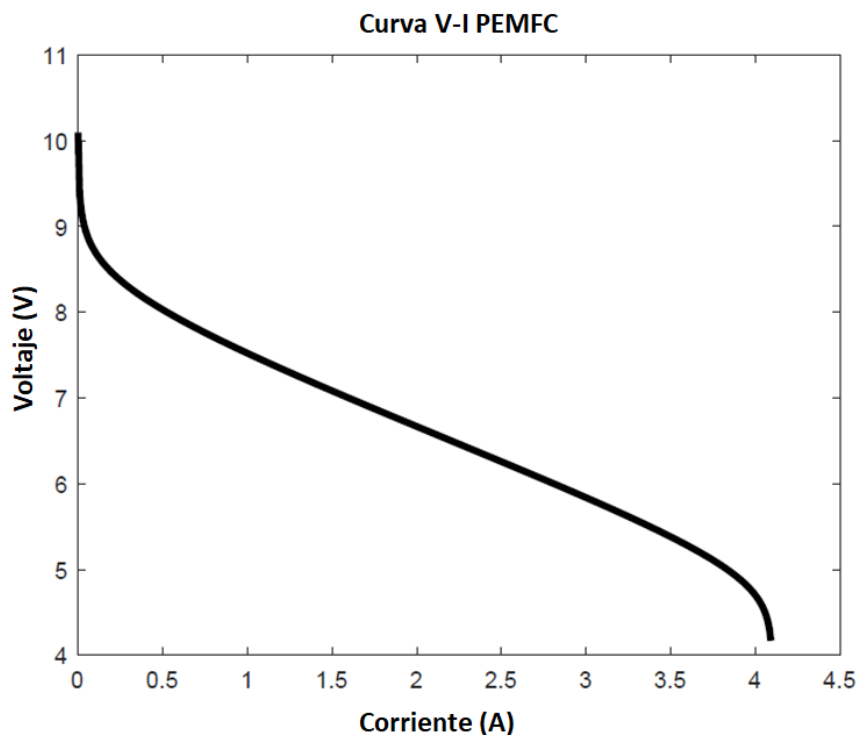


Figura 2.2 Curva característica I-V de una FC tipo PEM

La Figura 2.2 muestra la curva de operación de una FC tipo PEM, de acuerdo a esta se puede describir lo siguiente [6]:

- Se produce una rápida caída de tensión al comienzo de su funcionamiento.
- Una vez estabilizado, el voltaje cae lentamente y de forma lineal.
- Al demandar una gran cantidad de corriente, el voltaje tiende a caer abruptamente.

En la curva de polarización se presentan tres tipos de pérdidas irreversibles relacionadas con lo anterior, éstas suelen denominarse de igual manera, sobre voltajes o polarizaciones.

- Pérdidas por activación (ΔV_{act}).
- Pérdidas Óhmicas (ΔV_{ohm}).
- Pérdidas de conducción o transferencia de masa (ΔV_{tran}).

Más adelante en este mismo apartado, se describirán cada una de las tres polarizaciones.

2.2.2.3 Densidad de Corriente.

Teóricamente en una PEMFC, la membrana de intercambio protónico es utilizada como electrolito, ésta evita la combinación de gases reactantes y únicamente permite la conducción de protones. Sin embargo, dependiendo de las propiedades del material de la membrana ésta es capaz de soportar una pequeña cantidad de electrones, generándose lo que se conoce como corrientes internas [7].

Por otra parte, debido a los procesos electroquímicos que se producen en la superficie del electrodo, es costumbre dentro del estudio de las FC, utilizar densidades de corriente en lugar de simples corrientes. De este modo, la expresión de la corriente según la ley de Faraday quedaría de la siguiente manera:

$$i = nFj \quad (7)$$

Donde: nF es la carga eléctrica transferida y j es el flujo de reactante por unidad de área.

Para entender el significado de estos dos términos, hay que tener en cuenta las reacciones anódica (ecuación 1) y catódica (ecuación 2) descritas en el apartado 2.2. En estas reacciones existe una corriente de ida y vuelta de electrones, esta densidad neta de corriente se denomina *densidad de corriente de intercambio* (j), en otras palabras, es la corriente por unidad de área que se produce y que se debe a los fenómenos de conducción de electrones. Debido a que el flujo de electrones a través de la membrana es pequeño, la magnitud de la densidad de corriente es equivalente a mA/cm^2 [8].

En definitiva, se puede concluir que la densidad de corriente es una medida de disponibilidad de un electrodo para que produzca la reacción electroquímica. Si esta corriente es elevada, la superficie será más activa. En otras palabras, cuanto mayor sea la densidad de corriente, mayor potencia se podrá generar.

2.2.2.4 Pérdidas Irreversibles

Se han explicado anteriormente las consecuencias de una serie de fenómenos llamados pérdidas irreversibles o polarizaciones, desde el punto de vista electroquímico, presentes durante la operación de una FC tipo PEM [6]. Este tipo de pérdidas se pueden definir como la desviación del potencial de la celda respecto al potencial teórico ideal. A continuación, se explica el porqué de cada una de ellas.

2.2.2.4.1 Pérdidas por Activación

Este tipo de pérdidas están relacionadas con la lentitud de las reacciones electroquímicas que tiene lugar tanto en el ánodo como en el cátodo y a su vez, están ligadas con la barrera de potencial que tiene que superar todas estas reacciones para iniciarse. El cálculo de estas pérdidas viene dado por:

$$\Delta V_{act} = A \ln \left(\frac{j}{j_0} \right) \quad (8)$$

En la cual, A es la constante de Tafel, la cual se expresa de la siguiente manera $\frac{RT}{2\alpha F}$ en donde, R es la constante universal de los gases, T es la temperatura de operación, F es la constante de Faraday y α es el coeficiente de transferencia de carga, el cual básicamente determina la cantidad de electricidad empleada en cambiar la velocidad de la reacción electroquímica. Este valor depende del material del electrodo y de la reacción involucrada, sin embargo para el electrodo del hidrógeno el valor es de 0.5. Así mismo, j es la densidad de corriente producida y j_0 es la densidad de corriente máxima que se puede extraer de la FC sin apreciar caída de tensión

Cuanto mayor sea la densidad de corriente, menores serán las pérdidas por activación.

2.2.2.4.2 Pérdidas Óhmicas

El transporte de carga es un fenómeno que describe el modo en que las cargas eléctricas se desplazan a través de un FC y a la larga las imperfecciones de los materiales conductores presentan ciertas resistencias intrínsecas al flujo de cargas.

Los dos tipos de principales de cargas que participan durante el funcionamiento de una FC son los electrones y los iones, cuyo movimiento a través de la FC está asociado a lo que se conoce como pérdidas óhmicas o resistivas.

Este tipo de pérdidas están relacionadas a la resistencia eléctrica, por lo cual contribuyen tanto a la parte eléctrica como a la parte iónica. El cálculo de estas pérdidas viene dado por:

$$\Delta V_{ohm} = j \cdot r \quad (9)$$

Donde, j es la densidad de corriente demandada por la carga y r es la resistencia de área específica de la celda y su magnitud esta expresada en $k\Omega/cm^2$.

Para poder evaluar correctamente las pérdidas óhmicas, hay que tener en cuenta la conductividad de los materiales. Como se mencionó en el apartado 2.2.1.1, en el caso de la PEMFC la conductividad iónica de la membrana de intercambio protónico dependerá del contenido de agua.

2.2.2.4.3 Pérdidas de Transferencia de Masa.

Para poder generar potencia una FC tiene que estar continuamente alimentándose de reactantes. Del mismo modo, los productos resultantes o residuos de las reacciones electroquímicas que ocurren en su interior tienen que eliminarse para evitar el colapso de todo el sistema. Este proceso de suministro de reactantes y eliminación de residuos se conoce con el nombre de transferencia de masa. Como tal, este proceso está asociado con las pérdidas por transferencia de masa o pérdidas por concentración.

Por lo tanto, las pérdidas por transferencia de masa se pueden considerar como aquellas que están asociadas a la no capacidad de la FC para suministrar la potencia necesaria a una carga, todo esto relacionado con posibles fallos en los sistemas de combustible y oxidante.

Se puede evaluar este tipo de pérdidas como se expresa en (10):

$$\Delta V_{tran} = -\frac{RT}{zF} \ln \left(1 - \frac{j}{j_l} \right) \quad (10)$$

Donde: R es la constante universal de los gases, T es la temperatura de operación, j es la densidad de corriente producida, F es la constante de Faraday, j_l es la densidad de corriente límite y z es el número de electrones móviles implicados en la reacción.

En el caso de una FC tipo PEM, considerando que son dos reacciones las implicadas, la reducción del oxígeno y la oxidación del hidrógeno, la pérdida por transferencia de masa deberá ser calculada para cada una de estas reacciones.

La ecuación (10) puede encontrarse de la siguiente manera:

$$\Delta V_{tran} = -B \ln \left(1 - \frac{j}{j_l} \right) \quad (11)$$

Este tipo de pérdidas dependen estrictamente de la densidad de corriente, la activación de los reactantes y la estructura de los electrodos. Así mismo, se pueden minimizar mediante la variación en la concentración y presión de suministro de los reactantes.

2.2.2.5 Sumatoria de Pérdidas Irreversibles.

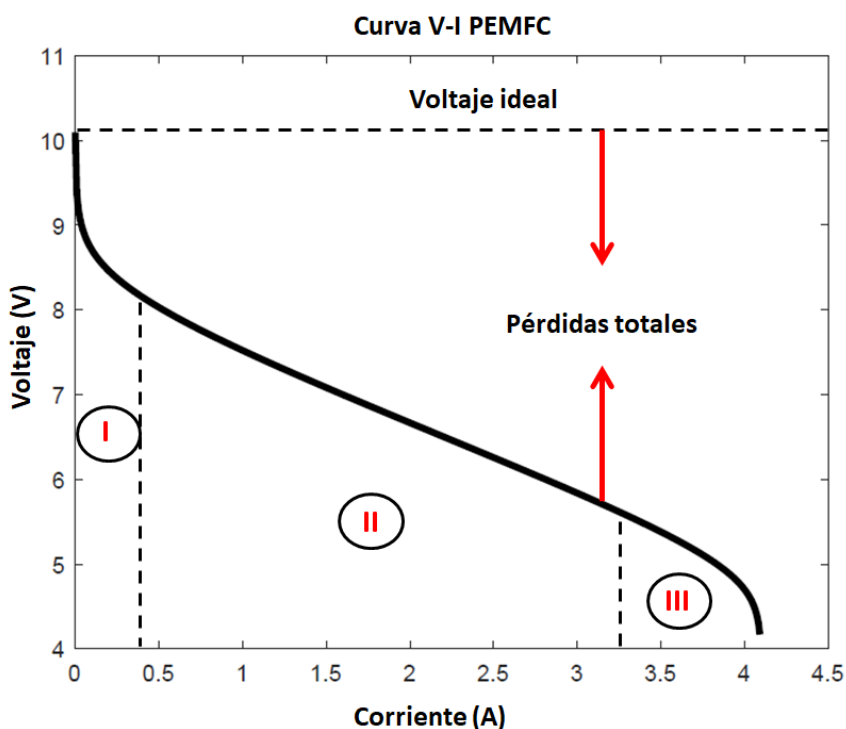


Figura 2.3 Pérdidas irreversibles de una FC tipo PEM.

La Figura 2.3 muestra los tres tipos de pérdidas que intervienen en el funcionamiento de una FC tipo PEM la pérdida por activación (I), la pérdida óhmica (II) y la pérdida por transferencia de masa (III) [6]. La pérdida por activación es la que más influye de las tres para

cualquier valor de densidad de corriente. Como se describió anteriormente, las pérdidas de activación y de transferencia de masa se presentan tanto en el ánodo como en el cátodo. Considerando el análisis de cada una de ellas se puede describir el funcionamiento de una FC tipo PEM con la siguiente expresión:

$$V_{celda} = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{tran} \quad (12)$$

Ahora bien, si se introduce en esta expresión las ecuaciones (6), (8), (9) y (11), se obtiene la relación entre el voltaje de la celda y la densidad de corriente o dicho de otra manera, el voltaje final de una FC tipo PEM:

$$V_{celda} = E - A \ln(j) - j \cdot r + B_{H_2} \ln\left(1 - \frac{j}{j_l}\right) + B_{O_2} \ln\left(1 - \frac{j}{j_l}\right) \quad (13)$$

2.3 MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA (MAXIMUM POWER POINT)

La generación de energía de una FC tipo PEM está condicionada a muchos parámetros de funcionamiento, principalmente la temperatura, la humedad de la membrana y la presión. A consecuencia de esto, la relación entre voltaje y corriente presenta un comportamiento no lineal. En la curva V-I de una FC existe un punto operativo específico correspondiente a la máxima generación de potencia, este punto es denominado como máximo punto de potencia (MPP, del inglés Maximum Power Point).

Para optimizar y lograr la máxima extracción de energía de una PEMFC, es necesario un seguidor de máximo punto de potencia (MPPT, del inglés Maximum Power Point Tracking). La función de un MPPT es mantener a la FC funcionando en el MPP utilizando un algoritmo MPPT implementado en un convertidor CD-CD cambiando su ciclo de trabajo para extraer la máxima potencia de salida de la PEMFC [9].

2.3.1 Algoritmos MPPT

En la actualidad existen múltiples métodos MPPT [1], algunos de los más populares son P&O (Perturb and Observe), Voltaje Fraccional de Circuito Abierto FOCV (Fractional Open Circuit Voltage), Corriente Fraccional de Corto Circuito FSCC (Fractional Short Circuit Current), Lógica Difusa FL (Fuzzy Logic), redes neuronales NN (Neural Networks), entre otros. (Referencias de estos). Sin embargo no existe un acuerdo respecto a cuál algoritmo es el más apropiado para implementar en una FC.

Tabla 2.2 Características de los principales algoritmos.

Algoritmo	Complejidad	Tipo de Implementación	Velocidad de Convergencia	Sensores Utilizados
P&O	Baja	Analógica/Digital	Baja	Voltaje/Corriente
FOCV	Baja	Analógica/Digital	Media	Voltaje
FSCC	Baja	Analógica/Digital	Media	Corriente
FL	Alta	Digital	Alta	Múltiples
NN	Alta	Digital	Alta	Múltiples

Los métodos MPPT varían entre sí por su complejidad, hardware de implementación, popularidad, velocidad de convergencia, tipo de implementación, costo y parámetros detectados (voltaje, corriente, temperatura, etc.). La Tabla 2.2 presenta algunas características de los algoritmos MPPT más populares.

2.4 CONVERTIDORES ESTATICOS DE POTENCIA (CEPS)

Como se mencionó anteriormente para el MPPT, un convertidor de potencia CD-CD es un elemento esencial. Éste permite que la FC tipo PEM se sitúe siempre en su máximo punto de potencia. Un convertidor de potencia CD-CD es un dispositivo conmutado que tiene como función alterar las características de voltaje y corriente que reciben transformándolas óptimamente en otras reguladas.

El convertidor de potencia presenta en su entrada una impedancia la cual se describe en función del ciclo de trabajo y la resistencia de carga. Según el Teorema de la Máxima Transferencia de Potencia [10], se sabe que cuando las impedancias de la fuente y del convertidor sean iguales, se extraerá la máxima potencia. El ajuste del ciclo de trabajo del convertidor permite modificar la impedancia equivalente de la FC tipo PEM. El MPPT controla y modifica el ciclo de trabajo hasta alcanzar el valor máximo.

Algunos de los convertidores de potencia más populares que pueden emplearse en aplicaciones MPPT son el convertidor buck, el convertidor boost y el convertidos buck boost, debido a su simplicidad y eficiencia son ampliamente utilizados en sistemas de energías renovables. A continuación se presenta en la Figura 2.4 la topología de estos convertidores.

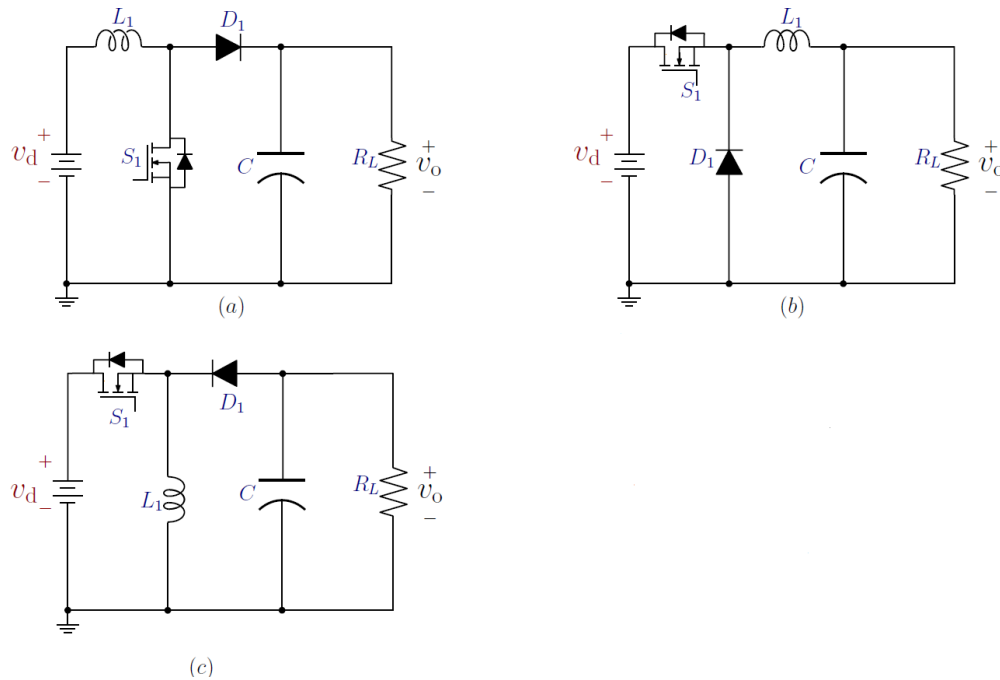


Figura 2.4 Topología de convertidores de potencia (a)boost, (b)buck, y (c)buck-boost

El convertidor boost o elevador presentado en la Figura 2.4 (a) proporciona un voltaje de salida mayor o igual al voltaje de entrada. El convertidor buck o reductor indicado en la

Figura 2.4 (b) presenta un voltaje de salida menor o igual al voltaje de entrada. Y por último, el convertidor buck-boost, Figura 2.4 (c) reúne las características eléctricas de los dos anteriores permitiendo obtener un voltaje de salida menor o mayor que el voltaje de entrada [11].

2.5 CONCLUSIONES

Para la emulación de una FC tipo PEM es de suma importancia la evaluación y comprensión del comportamiento de la misma. El modelo matemático es el que permitirá la imitación y/o reproducción correcta, precisa y exacta de la FC tipo PEM. Durante la operación de una FC tipo PEM se presentan varias pérdidas de voltaje, como ya se analizó en este capítulo, estos tipos de pérdidas están directamente relacionadas con las reacciones que ocurren dentro la FC tipo PEM y las mismas influyen en gran medida en la curva característica voltaje-corriente. Es importante tener en cuenta estas pérdidas al momento de seleccionar un modelo matemático, esto para que sea más fácil la obtención de la curva voltaje-corriente.

La generación de energía de una PEMFC se ve afectada por diversos parámetros como la temperatura, la presión y la humedad de la membrana. Por este motivo es necesaria la implementación de un convertidor de potencia aunado a una técnica de control basada en un algoritmo MMPT que permita el seguimiento y la extracción de la máxima potencia disponible.

La selección del convertidor de potencia y del algoritmo de control adecuados se realiza tomando en cuenta las características de la PEMFC y los requerimientos de la misma.

Capítulo

3

Simulación de una FC tipo PEM

Los sistemas de generación de energía basados en FCs tipo PEM son sistemas complejos y su operación está asociada simultáneamente con fenómenos de ocurrencia mecánicos, físicos y electroquímicos. La comprensión de éstos puede permitir una mejora efectiva en el rendimiento y la eficiencia de dichos sistemas y por lo tanto los costos podrían reducirse. En el caso de las pruebas experimentales con estos sistemas, es posible obtener la curva característica V-I. Sin embargo, es extremadamente difícil controlar las condiciones de operación [12]. El modelado de sistemas FCs tipo PEM tiene una gran ventaja ya que en éste se consideran variables y parámetros presentes en la puesta en operación del sistema. A su vez y en conjunto con alguna técnica de simulación, estos representan una herramienta de gran utilidad para el diseño, desarrollo y operación de un sistema PEMFC. El presente capítulo desarrolla un modelo matemático simplificado de una FC tipo PEM y posteriormente se valida mediante simulación en el software MATLAB/SIMULNK. Esto con la finalidad de evaluar la precisión y exactitud de mismo respecto al comportamiento de una PEMFC.

3.1 MODELADO DE UNA PEMFC.

Se puede considerar como modelo matemático o modelo electroquímico al conjunto reacciones químicas que tienen lugar en un conductor eléctrico y un conductor iónico. En el caso particular de una PEMFC, se consideran a los electrodos como conductor eléctrico y a la membrana polimérica como conductor iónico [13]. En la actualidad varios modelos matemáticos que imitan el comportamiento de una PEMFC han aparecido, esto debido a la complejidad que conlleva la operación este tipo de FC. En general, existen varios modelos los cuales para su desarrollo utilizan circuitos eléctricos equivalentes [14][15]. Así mismo modelos más complejos que tienen en cuenta los fenómenos físicos-químicos que tienen lugar dentro de la PEMFC también se han propuesto [16][17]. Otras investigaciones se centran en la detección específica de fallas ocurridas en la FC durante su operación [18]. Sin embargo, de manera simplificada pero representativa se puede considerar como modelo matemático de una PEMFC las ecuaciones (8), (9), (11) y (13) descritas en el apartado 2.2.2. Los parámetros necesarios para la determinación de estas ecuaciones se pueden consultar en el Apéndice A.

La operación de la PEM está en función de la densidad de corriente de salida (j) por lo cual para el desarrollo del modelo electroquímico es indispensable el cálculo de la densidad de corriente. La curva característica voltaje-corriente proporcionada se encuentra expresada en términos de corriente, por lo que es necesaria la transformación a densidad de corriente (j).

Para transformar la corriente (A) a densidad de corriente (mA/cm^2) es necesario el cálculo mediante.

$$j = \frac{1000 \cdot I_{max}}{A_e} \quad (14)$$

Donde I_{max} es la corriente máxima de la celda expresada en la curva voltaje-corriente y A_e es el área específica de la celda.

Para el cálculo de la resistencia del área específica explícita en (4) referente a la caída de voltaje debido a las pérdidas óhmicas, la expresión a desarrollar es la siguiente.

$$r = -\frac{r_{stack}}{N_{fc}} \quad (15)$$

En donde N_{fc} es el número de celdas que conforman el stack y r_{stack} es la resistencia de área específica total del stack, esta misma es calculable mediante:

$$r_{stack} = \frac{v_2 - v_1}{i_2 - i_1} \quad (16)$$

En la cual i_1 y v_1 son la corriente y el voltaje en el inicio de la región de pérdidas óhmicas, respectivamente. E i_2 y v_2 son la corriente y el voltaje en el final de la misma región. Dichos valores se encuentran explícitos en la curva característica voltaje-corriente de la FC tipo PEM.

Adicionalmente, en (13) el voltaje de Nersnt (E) es considerado como el voltaje de circuito abierto real de la celda y está calculado de la forma siguiente:

$$E = \frac{E_{oc}}{N_{fc}} \quad (17)$$

Donde E_{oc} es el voltaje de circuito abierto real de la celda y N_{fc} es el número de celdas que conforman el stack.

Tomando en cuenta lo antes descrito, se puede expresar el funcionamiento del stack tipo PEM de 20 Watts mediante.

$$V_{stack} = N_{fc} \left[E - A \ln(i) - ir + B_{H_2} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) + B_{O_2} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) \right] \quad (18)$$

Considerando (18) como el voltaje de salida del Stack de 20 W y con el objetivo de obtener la curva característica del mismo, se procedió a la simulación.

3.2 SIMULACIÓN DE UNA PEMFC

Una vez desarrollado el modelo matemático, se procedió con la simulación del mismo en el software MATLAB/SIMULINK. Para que una simulación represente el comportamiento preciso de una FC tipo PEM es necesario un modelo matemático exacto. Actualmente, se cuenta con simulaciones de sistemas FC tipo PEM considerando uno o varios subsistemas como: suministro de combustible, humidificador, control de sistema de presión y temperatura y control de flujo de combustibles [19][20]. De igual manera se han desarrollado simulaciones que integran diferentes fuentes de energía renovable. Dichos sistemas llamados híbridos incluyen sistemas FC, sistemas fotovoltaicos, sistemas eólicos y dispositivos de almacenamiento de energía[21]. En esta ocasión, se consideró para la simulación el modelo matemático descrito con anterioridad. Se simuló un Stack de FC tipo PEM de 20 W de potencia presentado en [22]. Los parámetros de éste así como su curva característica voltaje-corriente pueden ser consultados en el Apéndice B. Se realizaron dos simulaciones, la primera en MATLAB y la segunda en SIMULINK. Ambas simulaciones permiten la codificación y variación de parámetros importantes durante la operación de una FC tipo PEM. Las simulaciones realizadas arrojaron como resultado la curva característica voltaje-corriente de una FC tipo PEM en función de la corriente y de la densidad de corriente. Adicional a estos resultados, se realizó la comparación de la curva característica obtenida mediante la simulación y la curva característica teórica

3.3.1 Simulación en MATLAB

La primera simulación en MATLAB consistió en la codificación de las constantes explícitas, así como de los parámetros del stack de 20 W indispensables para el desarrollo del modelo electroquímico. Se codificaron las ecuaciones (8), (9) y (11) las cuales representan los tres tipos de pérdidas irreversibles, por activación, óhmica y por transferencia de masa, respectivamente. Finalmente se codificó (18), que corresponde al voltaje de salida del stack, la misma depende de la codificación de todas las ecuaciones descritas anteriormente. Cabe hacer

mención que durante esta primera codificación se consideró al stack de 20 W en condiciones estándares, esto quiere decir a una temperatura de operación a 25 °C. El objetivo de esta primera simulación es el de obtener la curva característica voltaje-corriente del stack de 20 W en función de la corriente y de la densidad de corriente.

3.3.2 Simulación en SIMULINK.

Con el objetivo de obtener la curva característica voltaje-corriente en función de la corriente del stack de 20 W mediante la variación de una resistencia de carga, se realizó una codificación en SIMULINK mediante la implementación de bloques pertenecientes a diferentes librerías como lo son Simulink y Simscape. Los bloques fueron implementados y codificados con la finalidad de realizar el cálculo de las expresiones (8), (9) y (11), y posteriormente reconstruir la ecuación (18) y obtener el voltaje de salida del stack de 20 watts.

En la codificación se consideraron 20 puntos de evaluación y la variación de la resistencia osciló entre los 0.01 Ω como resistencia mínima y 75 Ω como resistencia máxima

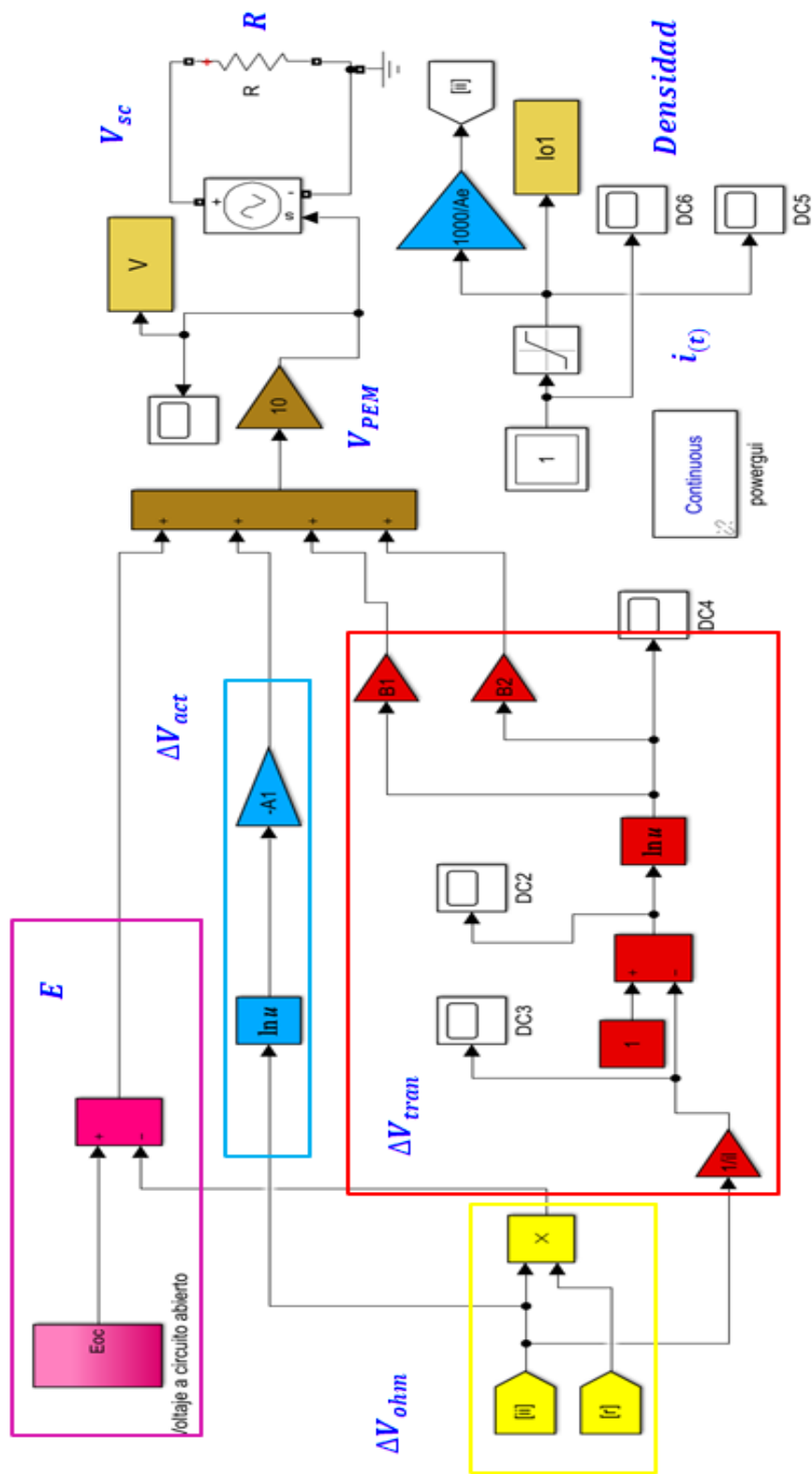


Figura 3.1 Esquema de bloques SIMULINK.

La Figura 3.1 muestra el esquema de bloques codificado en SIMULINK. Pueden observarse los bloques que conforman las pérdidas de activación dentro de un recuadro azul (ΔV_{act}), las pérdidas óhmicas en un recuadro amarillo (ΔV_{ohm}) y las pérdidas por transferencia de masa en el recuadro rojo (ΔV_{tran}). Los bloques rosas representan el voltaje de Nernst (E). El voltaje de salida del stack (V_{PEM}) es dirigido a una fuente controlada por voltaje (V_{sc}) esto con la finalidad de realizar una interfaz entre el modelo electroquímico y la parte de potencia, de igual manera el voltaje entregado por la fuente es direccionado a una resistencia de carga variable (R).

Como V_{PEM} está en función de la densidad de corriente medida esta es retroalimentada. Es importante mencionar que el bloque de saturación que se empleó para el cálculo de la densidad de corriente es debido a que el stack presenta una corriente de máxima de operación, la cual se encuentra expresada en la curva voltaje-corriente del Apéndice B.

3.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

3.4.1 Obtención de la Curva Característica Voltaje-Corriente

A continuación se presentan los resultados obtenidos al simular el stack de 20 W en MATLAB. Primeramente, se obtuvieron las siguientes curvas características

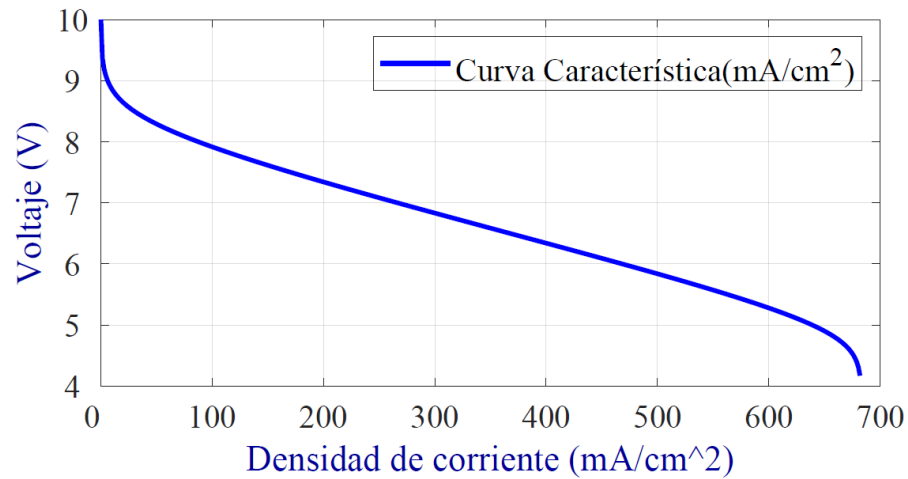


Figura 3.2 Curva característica V-I en función de la densidad de corriente.

En la Figura 3.2 puede observarse la curva característica V-I en términos de la densidad de corriente. Si bien es posible observar en la curva los tres tipos de pérdidas irreversibles no es probable determinar si corresponde con la proporcionada por el fabricante. Por lo anterior, se simuló una segunda curva V-I, la Figura 3.3 muestra la misma curva V-I solo que en esta ocasión en términos de corriente. En comparación con la curva V-I proporcionada por el fabricante (Apéndice B) se puede observar una gran similitud entre ambas. Esta curva en función de la corriente facilitó la validación de las simulaciones y la obtención de datos para comparación de resultados.

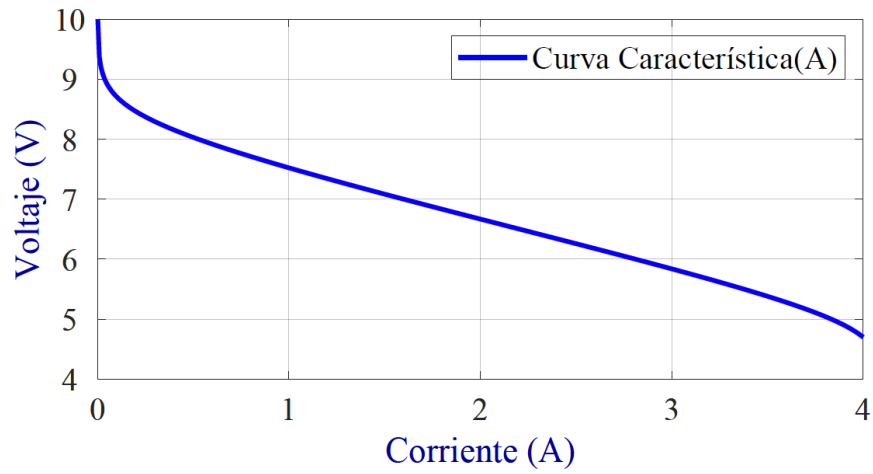


Figura 3.3 Curva V-I en función de la corriente

3.4.2 Comparación de la Curva Obtenida Contra la Curva Analítica

Los resultados obtenidos durante la simulación mediante bloques en simulink se muestran a continuación.

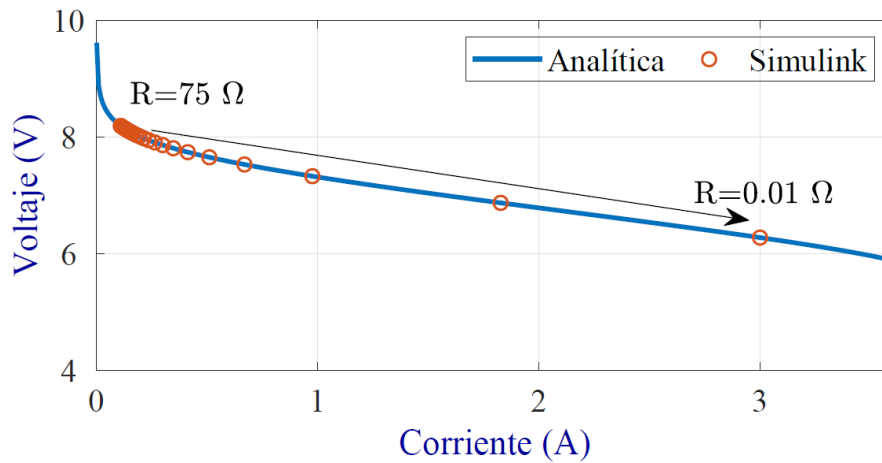


Figura 3.4 Curva I-V obtenida mediante SIMULINK en función de la corriente

La Figura 3.4 muestra la comparación de los resultados los resultados obtenidos mediante simulación contra los datos teóricos. La curva azul representa la curva voltaje-corriente analítica de un stack de 20 W en función de la corriente y los puntos naranjas son los obtenidos en la simulación mediante bloques en SIMULINK con una variación de resistencia entre los 0.01Ω y los 75Ω . Se puede observar que ambos presentan el mismo comportamiento y siguen la misma tendencia.

Analizando el comportamiento de ambas curvas se pudo determinar que el modelo matemático simplificado implementado en simulación representa o imita de manera correcta y puntal el comportamiento de un FC stack de 20 W.

A diferencia del modelo matemático de un panel fotovoltaico, cuya solución involucra funciones recursivas [23], el modelo de una FC tipo PEM puede resolverse directamente [24]. Esa es una ventaja sobre el emulador del panel PV, por lo tanto, el voltaje de salida del FC tipo PEM (V_{stack}) se obtiene fácilmente una vez que se mide la corriente. Y en consecuencia la densidad de corriente (j) también se conoce.

3.5 CONCLUSIONES

Los resultados de simulación presentados en este capítulo mostraron el correcto y preciso funcionamiento del modelo matemático simplificado utilizado para la descripción de una FC tipo PEM.

Así mismo, permitió la variación de parámetros como lo son la resistencia de carga con la finalidad de seguir en comportamiento de una PEMFC. Se pudo confirmar que el modelo sigue la curva característica de una PEMFC de manera exacta. Con los resultados obtenidos se puede considerar que el modelo matemático es adecuado para la emulación de una FC tipo PEM.

Capítulo

4

Emulación de una FC tipo PEM

Para la validación del modelado y la simulación de sistemas de generación de energía basados en FCs, es necesario realizar pruebas experimentales. Estas pruebas se llevan a cabo utilizando sistemas auxiliares complejos y costosos, los cuales requieren condiciones ideales de operación. Dichas condiciones no siempre son posibles de generar en un laboratorio. Una solución atractiva a estas dificultades es la utilización de sistemas emuladores [25]. Un emulador permite reproducir el comportamiento de un dispositivo con alta precisión y exactitud, sin dejar a un lado que reemplaza el costo efectivo del sistema de generación de energía y proporciona resultados de alto grado de precisión [26]. En el presente capítulo se analiza, propone e implementa un sistema emulador digital que es capaz de calcular el voltaje de salida de un FC stack en función de la corriente medida en la carga. Adicionalmente, éste posee una programación flexible con la finalidad de perturbar las condiciones de operación del sistema.

4.1 EMULACIÓN DE UNA PEMFC

Se han desarrollado varios trabajos de emulación de FCs tipo PEM con diferentes propósitos. Por ejemplo, la variación del suministro de combustible [26][27], la manipulación de la pureza y el flujo de aire que ingresa al sistema [28]. Sin embargo este tipo emulaciones requieren de pruebas experimentales que implican riesgos y costos. Así mismo se han desarrollado otro tipo de sistemas emuladores, los cuales generalmente se basan en la utilización de fuentes controlables de CD [29], FPGAs [30] o por DSPs [4]. Mientras que otros están basados en convertidores CD-CD [31]. Por tal motivo, se realizó la implementación de un sistema digital emulador capaz de calcular el voltaje de salida de una FC tipo PEM en función de la corriente medida en la carga. Adicionalmente, ha sido diseñado para permitir una rápida y fácil modificación de las condiciones de operación y modelo matemático.

4.2 GENERALIDADES DEL SISTEMA DIGITAL EMULADOR

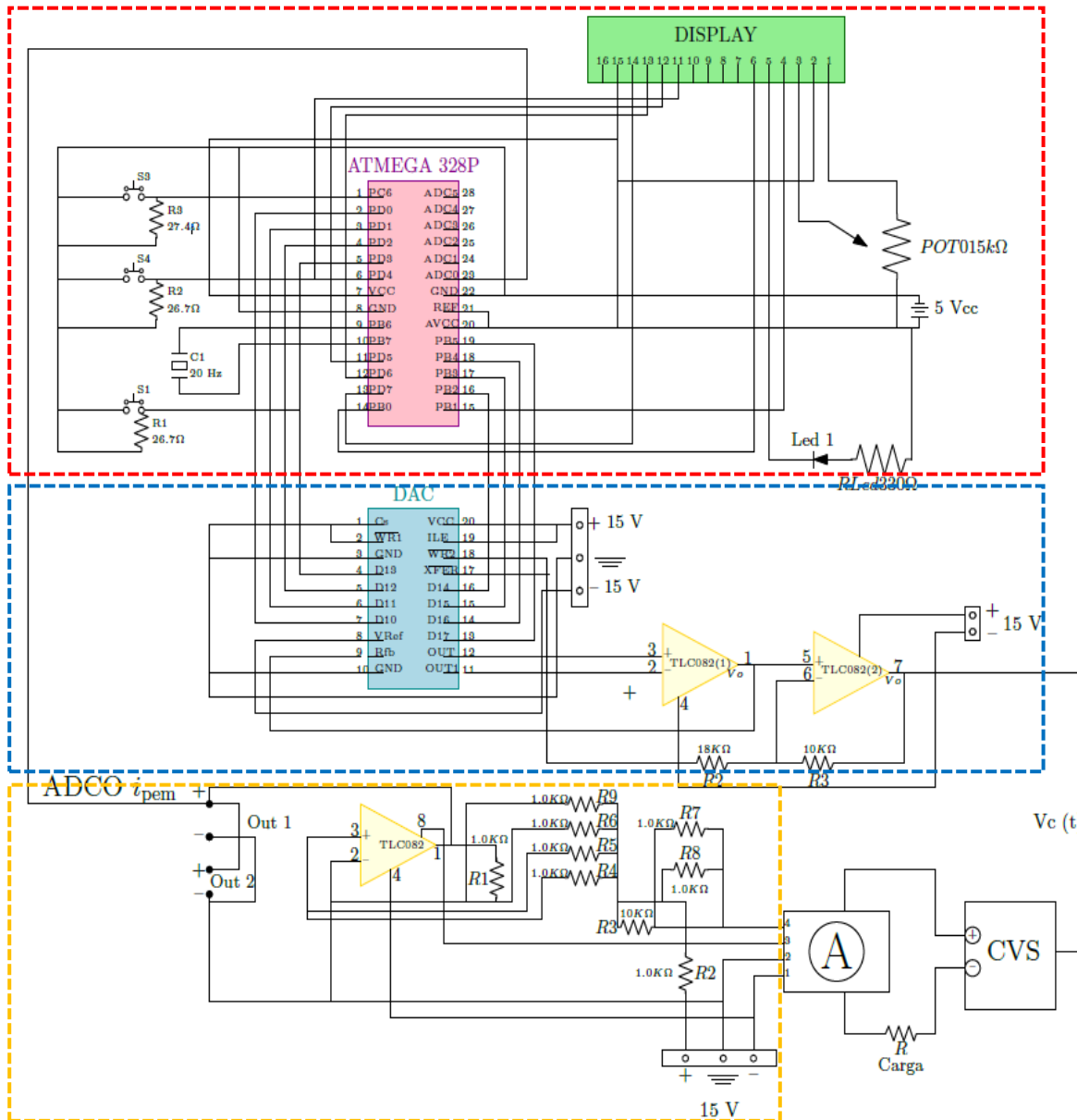


Figura 4.1 Sistema emulador digital.

El sistema emulador digital de la Figura 4.1 está compuesto por los siguientes elementos: un microcontrolador (*MCU*), un convertidor digital-analógico (*DAC*), una fuente de voltaje controlada por voltaje (*CVSS*), un sistema de adquisición de datos, integrado por un sensor de corriente (*I*) y una resistencia de carga (*R*).

El sistema implementado consiste en la programación de un microcontrolador (*MCU*) de 8 bits. El cual entrega como señal de salida el voltaje de una FC tipo PEM, denominado voltaje de control (V_{ctrl}). Dicho voltaje de control es enviado a un convertidor digital-analógico(*DAC*). Posteriormente, la señal analógica de salida de *DAC* es considerada como voltaje continuo [$V_c(t)$] y es direccionado a una fuente controlada por voltaje (*CVS*) y ésta alimenta una resistencia de carga (*R*).

En *R* se acopló un sistema de adquisición de datos, integrado por dos sensores, uno de corriente (*I*) y otro de voltaje (*II*), éstos se encargan de medir el voltaje y la corriente de salida, respectivamente, presentes en la carga (*R*) del circuito. El valor del V_{ctrl} está en función de la corriente medida en el sistema, por lo cual la corriente medida en (*I*) y el voltaje medido en (*II*), estas señales son adquiridas y procesadas por el *ADC* del *MCU* y de esta manera se cierra el lazo del sistema propuesto. Los valores convertidos son mostrados en el *DISPLAY* con fines ilustrativos y analíticos.

En las siguientes secciones se describen detalladamente las funciones que desempeñan cada uno de los componentes del sistema digital emulador implementado en este trabajo. Se proporcionan especificaciones técnicas de los dispositivos empleados así como los criterios contemplados para el diseño del sistema.

4.2.1 Microcontrolador (MCU)

Se puede considerar al microcontrolador (*MCU*), como núcleo del sistema digital emulador. Se trata de un microcontrolador ATmega328P de 8 bits, el cual funciona a una frecuencia de operación de 20 Mhz lo cual permite ejecutar las instrucciones con una velocidad adecuada y con voltaje aislado de 5 V. Dentro del *MCU* se codificaron las ecuaciones del modelo matemático de una FC tipo PEM desarrollado en el Capítulo 2 y se obtiene como señal de control (V_{ctrl}) el voltaje de salida de una FC tipo PEM. En el recuadro rojo de la Figura 4.1 se muestra el diagrama esquemático del *MCU*, en el mismo se puede identificar los 8 puertos habilitados como bites de salida.

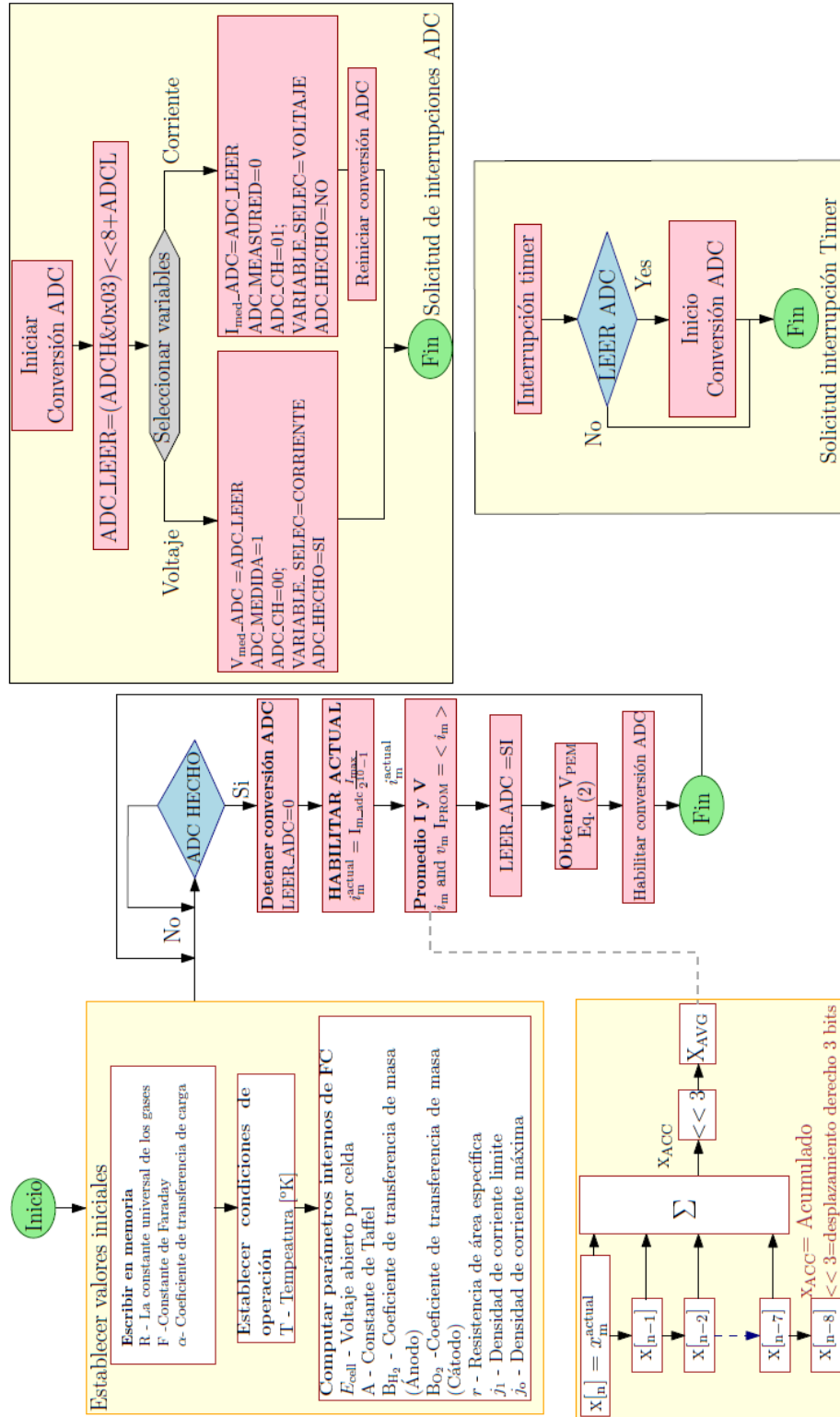


Figura 4.2 Diagrama de flujo de la programación en el MCU.

La Figura 4.2 muestra el diagrama de flujo de la codificación y cálculo de las ecuaciones o pérdidas de voltaje que integran el modelo matemático de la FC tipo PEM. La codificación del *MCU* es llevada a cabo en lenguaje C utilizando el software Atmel Studio versión 7.0.

Otra actividad importante que se desarrolla dentro del *MCU* es la de adquirir y procesar las magnitudes medidas por el sistema de adquisición de datos. Las señales analógicas correspondientes a los valores de corriente medidos son acondicionadas a niveles adecuados para su procesamiento, estas señales requieren ser convertidas a un nivel digital. Dicha tarea es efectuada utilizando el *ADC* del microcontrolador ATmega328P. Además, con la finalidad de monitorear los valores convertidos, se conecta una pantalla LCD (*DISPLAY*) que muestra las mediciones realizadas.

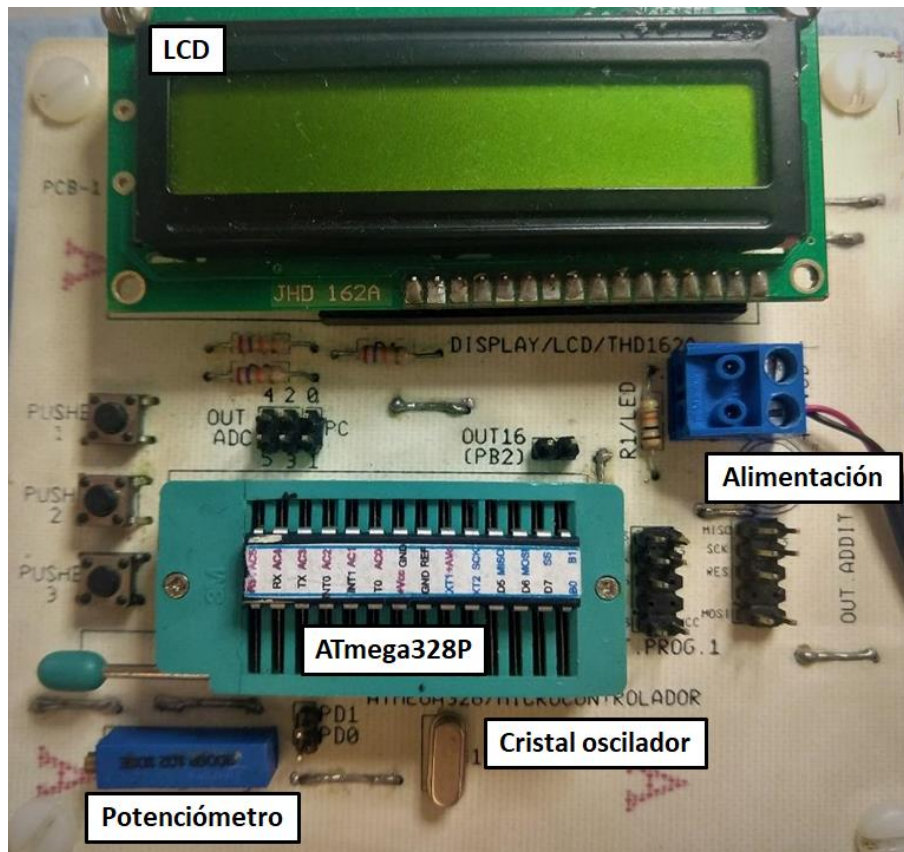


Figura 4.3 Configuración del ATmega328P.

En la Figura 4.3 se muestra el sistema implementado mediante el cual se realiza la codificación del modelo matemático y la conversión analógica-digital. Dicho sistema está formado por el MCU y el *DISPLAY*. La Tabla 4.3 muestra los componentes utilizados para el circuito del MCU.

Tabla 4.3 Parámetros del circuito del ATmega328P

Componente	Valor
Microcontrolador	ATmega328P
Potenciómetro	1 k Ω
Cristal oscilador	20 MHz
R_1	27 k Ω
R_2	27 k Ω
R_3	27 k Ω
R_4	10 k Ω

4.2.2 Convertidor Digital-Analógico (DAC)

El voltaje (V_{ctrl}) es obtenido del *MCU* es considerado como señal digital de 8 bits y es necesario la conversión de la misma a analógica. Por tal motivo, un convertidor digital analógico (DAC) y el mismo a su vez entrega como salida una señal analógica denominada un voltaje continuo [$V_c(t)$].

Para llevar a cabo esta conversión se utilizó un convertidor DAC0830 de 8 bites con voltaje alimentación de ± 15 V. Adicionalmente, a la salida del *DAC* se ha incorporado un amplificador operacional TL082 con una configuración no inversora con una ganancia unitaria, esto con la finalidad de amplificar el voltaje de salida del *DAC* [$V_c(t)$]. En la Figura 4.1 dentro de un recuadro azul se muestra el diagrama esquemático del *DAC*, el mismo se puede identificar los 8 puertos declarados como bits de entrada.

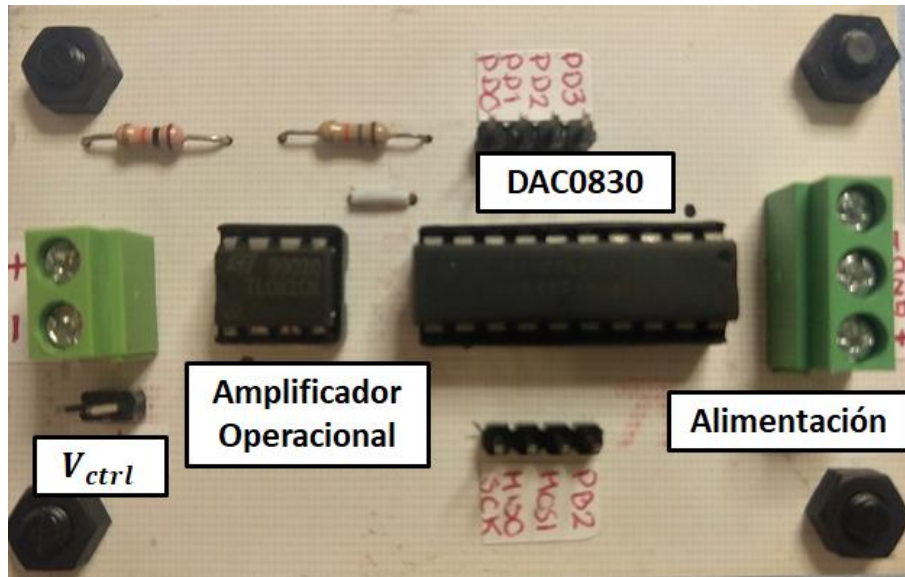


Figura 4.4 Configuración del DAC0830.

La Figura 4.4 presenta el módulo utilizado para la conversión de la señal digital a analógica mediante del DAC0830 para su aplicación a la fuente de voltaje controlada por voltaje. La Tabla 4.4 muestra los componentes necesarios para la implementación de circuito del convertidor digital-analógico.

Tabla 4.4 Parámetros del circuito DAC0830

Componente	Valor
Convertidor digital-analógico	DAC0830
Amplificador operacional	TL082
R_1	4.7 k Ω
R_2	10 k Ω
R_3	19 k Ω

4.2.2 Fuente de Voltaje Controlada por Voltaje (CVS)

El voltaje continuo [$V_c(t)$] que es entregado a la salida del DAC es direccionado a una fuente de voltaje controlada por voltaje (CVS), esto quiere decir que el voltaje de salida que sea

entregado por la fuente será controlado mediante $[V_c(t)]$. La finalidad de la utilización de esta fuente es la de crear una interfaz que proporcione adecuados niveles de potencia para alimentar la resistencia de carga.

En esta investigación se utilizó la fuente INSTEK modelo PS-1830.

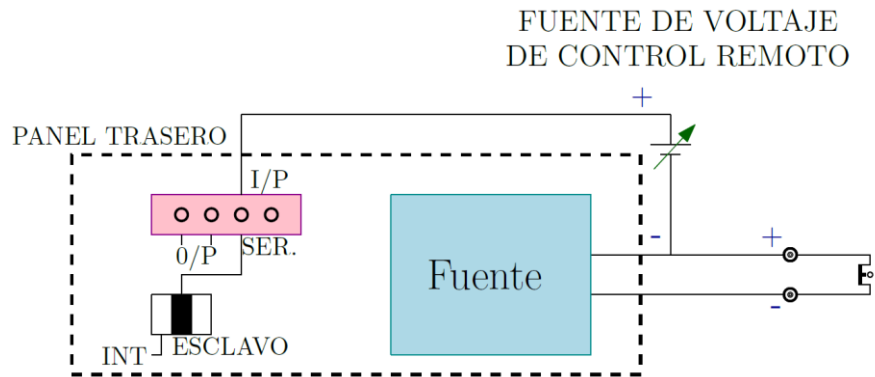


Figura 4.5 Esquema de conexión de la fuente INSTEK PS-1830.

La Figura 4.5 muestra el diagrama de conexión con el cual, la fuente INSTEK PS-1830 sigue un voltaje de referencia aplicado. Primeramente se ajusta el interruptor a la posición SER-SLAVE. El $[V_c(t)]$ se conecta a la entrada SER. Con la terminal positiva de CVS se conecta la terminal positiva del sensor de corriente, a su vez la terminal negativa del sensor de corriente alimenta un extremo de la resistencia y el otro extremo de la resistencia se conecta a la terminal negativa de la CVS , cerrando así el lazo del sistema implementado.



Figura 4.6 Fuente INSTECK PS-1830 utilizada.

La Figura 4.6 muestra la fuente implementada para el funcionamiento del sistema emulador digital.

4.2.3 Sistema de Adquisición de Datos (Sensor de Corriente).

El sistema de adquisición de datos está integrado por un sensor de corriente (I), éste mide constantemente la corriente en la resistencia de carga (R).

La magnitud requerida para la correcta operación del sistema digital emulador es la corriente. Para ello es necesario utilizar la instrumentación adecuada que permita una medición precisa y útil.

Para llevar a cabo la medición de corriente se utilizó el sensor de efecto Hall L18P005D15 el cual mide la corriente de manera precisa y lineal. Se han agregado 2.5 V en el

acondicionamiento de señal para que sea posible medir valores AC. Adicional a esto, la sensibilidad ha sido aumentada de 4 a 5 V al valor de corriente nominal. Por lo tanto, una ganancia de $\frac{6}{5}$ fue requerida para la obtención 3 V de valor de corriente nominal.

Por lo tanto, se puede encontrar la relación anterior en (19).

$$i_{adc} = \frac{6}{5} (i_{med} - V_{off}) \quad (19)$$

Donde i_{med} representa el voltaje medido en la resistencia de carga con un valor entre 0 y 5 V.

Fue necesario implementar un circuito acondicionador de señal a la salida del sensor de corriente que convirtiera la magnitud medida en un nivel de voltaje óptimo para su procesamiento. Este circuito consistió en la utilización de un amplificador operacional TL082 configurado como divisor de voltaje para disminuir la amplitud de la señal y posteriormente mediante una configuración sumadora no inversora de ganancia unitaria se efectuó el ajuste a cero. El diagrama esquemático del circuito se muestra en el recuadro amarillo de la Figura 4.1.

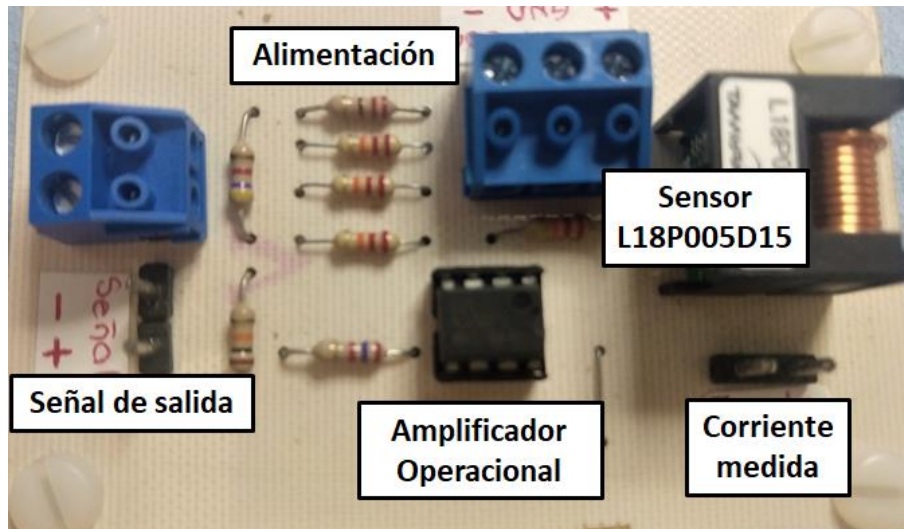


Figura 4.7 Circuito de medición de corriente.

La Figura 4.7 presenta el módulo utilizado para la medición de la corriente, está compuesto por el sensor L18P005D15 y el circuito acondicionador de señal. Es posible estimar la corriente medida, una vez que se conoce el voltaje de salida del módulo de medición de corriente. Así mismo, la Tabla 4.5 muestra los parámetros utilizados para la implementación de circuito acondicionador de señales.

Tabla 4.5 Parámetros del sensor L18P005D15

Componente	Valor
Sensor de corriente	L18P005D15
Amplificador operacional	TL082
R_1	4.7 k Ω
R_2	10 k Ω
R_3	22 k Ω
R_4	22 k Ω
R_5	220 Ω
R_6	2.7 k Ω
R_7	1.2 k Ω
R_8	22 k Ω

Finalmente, se lleva a cabo la conversión de la corriente medida de tipo analógica a su equivalente a nivel digital. Para ello se emplea el *ADC* del microcontrolador ATmega328P.

4.3 VALIDACIÓN DE SISTEMA DIGITAL EMULADOR

Considerando el modelo matemático que comprenden las ecuaciones (8), (9), (11) y (18) así como los parámetros y características específicas del stack de 20 W presentado en [22], mismos que pueden consultarse en el Apéndice A y B se procedió a la validación del sistema digital emulador.

En primer lugar el funcionamiento del sistema digital emulador se determina mediante los parámetros programado en el *MCU*. En segundo lugar, es determinado por la resistencia

de carga, esto quiere decir que al hacer variable la carga, el punto de operación de la FC tipo PEM será diferente.

4.3.1 Variación de Temperatura

La primera prueba de validación a la que se sometió el sistema emulador digital fue a la variación de parámetros importantes para la operación de la FC tipo PEM. Se consideró una variación regular de temperatura en el rango de $T_i = 25^\circ\text{C}$ a $T_f = 85^\circ\text{C}$, estas mismas dentro del rango de operación de cualquier FC tipo PEM. La resistencia de carga en esta ocasión presentó una variación de $\frac{4}{3} < R < \infty\Omega$. Este rango de valores se consideró tomando en cuenta que valores menores de $\frac{4}{3}$ saturan el sistema digital emulador.

En la Figura 4.8 se muestran las diferentes curvas obtenidas mediante la variación de carga lineal de la carga. Se realizaron mediciones de voltaje y corriente de salida registrados para diferentes valores de temperaturas. De la misma forma, en la Figura 4.9 se muestra la curva de potencia-voltaje, ésta se obtuvo mediante los datos registrados de voltaje y corriente de salida.

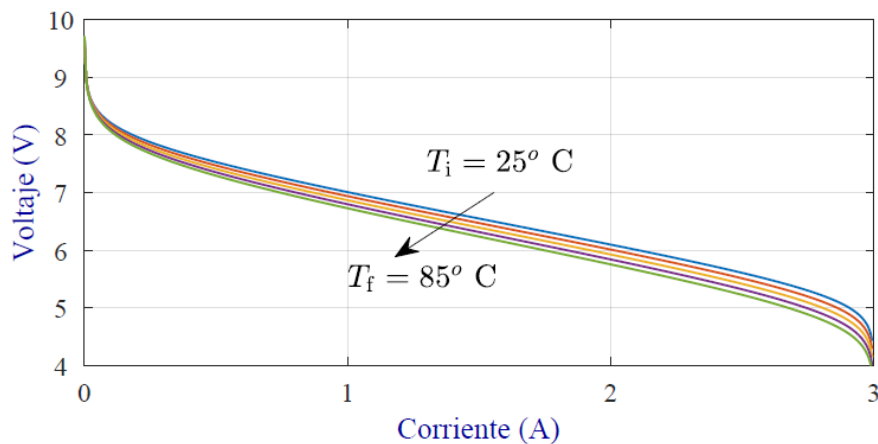


Figura 4.8 Curva voltaje-corriente variando la temperatura.

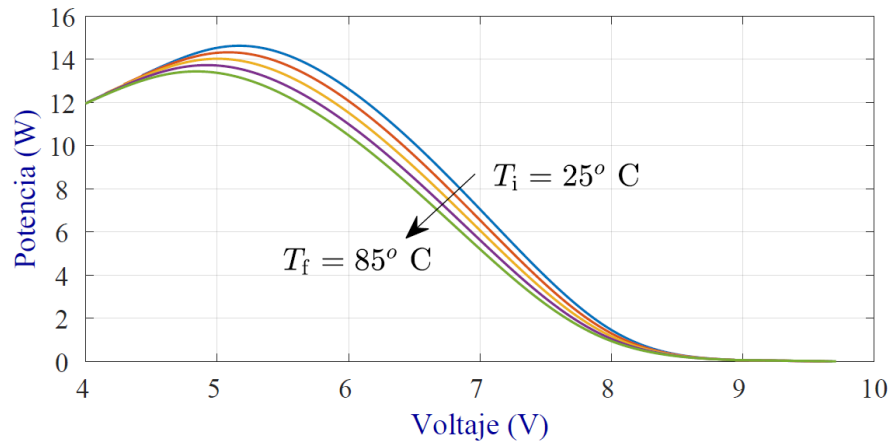


Figura 4.9 Curva potencia-voltaje variando la temperatura.

En ambas curvas es posible identificar las tres regiones de polarización presentes en la operación de una FC tipo PEM.

Eventualmente sin considerar los elementos parásitos, podemos deducir que el punto óptimo para la extracción de máxima potencia es cuando la resistencia de carga es igual a 1.5Ω y la temperatura de 25°C .

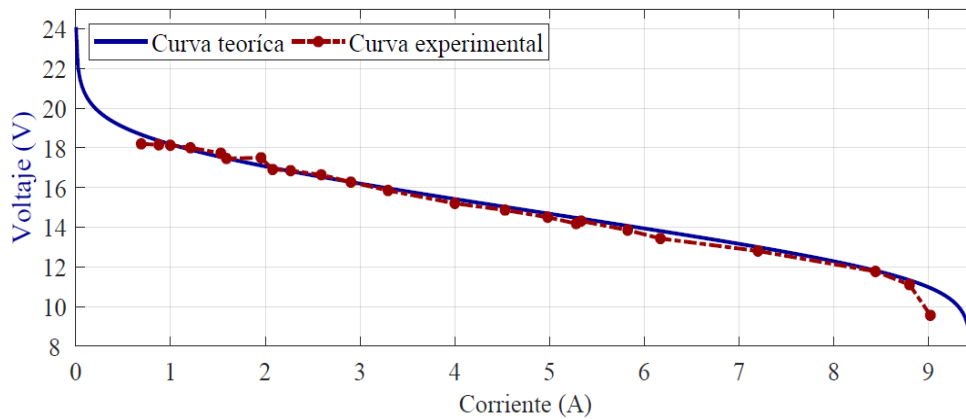
4.3.1 Variación de Parámetros

Hasta el momento se trabajó con los parámetros y características específicas del stack de 20 watts, explícitos en los apéndices A y B. Sin embargo en esta ocasión para realizar una segunda prueba de validación, se han codificado diferentes parámetros en el *MCU*; esto con la finalidad de comprobar la flexibilidad del sistema digital emulador.

Tabla 4.6 Parámetros FC tipo PEM de 100 W.

Parámetro	Valor
Potencia nominal	100 W
Densidad de corriente (j_o)	9.45 A/cm^2
Área específica (A_e)	25 cm^2
Resistencia de área específica (r)	$10.06 \text{ m}\Omega$
Voltaje de circuito abierto (E_{oc})	22 V
Voltaje circuito abierto por celda (E_{cell})	0.6285 V

La Tabla 4.6 muestra los parámetros de una FC tipo PEM de 100 W de potencia nominal, los mismos han sido codificados en el *MCU* para la modificación las ecuaciones (8), (9), (11) y realizar nuevamente el cálculo de la ecuación (18), esto se realizó con la finalidad de obtener su curva característica de forma experimental.

**Figura 4.10** Curva potencia-voltaje de una FC tipo PEM de 100 W.

La Figura 4.10 muestra los resultados experimentales. Las muestras obtenidas por el sistema digital emulador siguen la curva característica voltaje-corriente teórica de una FC tipo PEM. Se puede observar que el comportamiento es muy similar al que presentan las FC tipo PEM en su operación.

4.4 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentó la descripción del sistema digital emulador cuyo principal objetivo es el de imitar el comportamiento de una FC tipo PEM. Así mismo se analizó el funcionamiento de cada una de las partes que componen el sistema y se proporcionaron las especificaciones técnicas y consideraciones tomadas para el desarrollo del mismo.

Adicionalmente, se describió la operación del sistema digital emulador y a su vez describieron las pruebas realizadas para la validación del mismo. Se pudo observar que la operación del sistema propuesto presenta una operación muy similar a la que presentan las FC tipo PEM.

Capítulo

5

Pruebas y Resultados Experimentales

En las pruebas experimentales se trata de manipular y controlar variables en un ambiente controlado, esto con el fin de obtener los resultados deseados. Las mismas son de suma importancia durante la investigación. En el presente capítulo se describen detalladamente las pruebas experimentales realizadas con el sistema emulador digital de FC tipo PEM. Se exponen los diseños de los prototipos así como las metodologías empleadas. El desarrollo del capítulo se divide en dos pruebas principales, éstas se realizaron con diferentes prototipos y/o dispositivos electrónicos. De igual manera, se presentan los resultados. Los experimentos realizados se llevaron a cabo considerando ciertos criterios esenciales para el correcto desarrollo de la experimentación.

5.1 OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE UNA FC TIPO PEM

El correcto funcionamiento del emulador así como la obtención de la curva característica de la FC tipo PEM son unos de los objetivos principales de este trabajo. La finalidad de la emulación es la de imitar el comportamiento de una PEMFC mediante la implementación de un modelo matemático simplificado conociendo los principales parámetros eléctricos de una PEMFC. La información proporcionada por el fabricante contiene especificaciones técnicas de una PEMFC y éstas estarán condicionadas por la potencia nominal del Stack. Sin embargo, la programación realizada tiene como ventaja la variación de parámetros importantes para la obtención de la curva característica de una PEMFC.

En la Figura 5.1 se describen los elementos que conforman el circuito propuesto para la obtención de la curva característica de la PEMFC. Las etapas del mismo se describen a continuación.

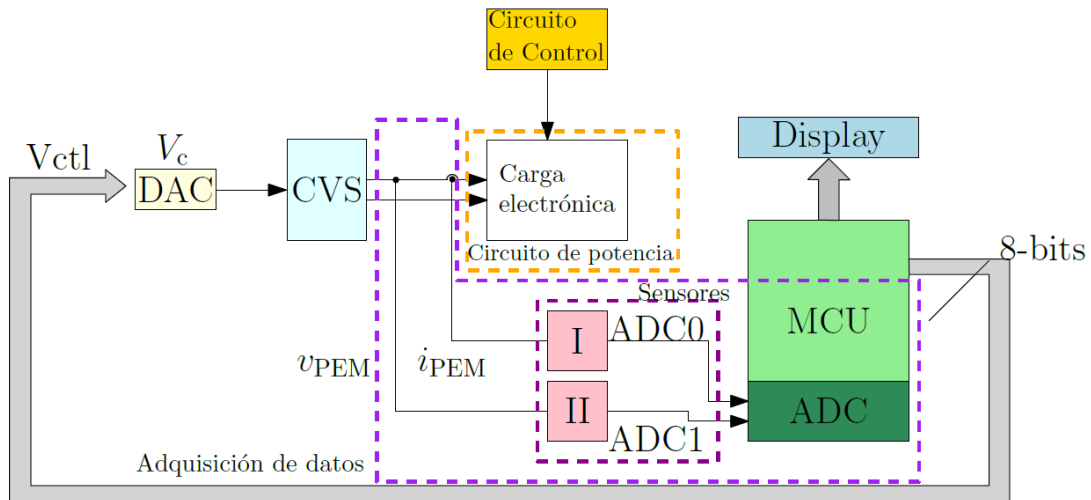


Figura 5.1 Diagrama de bloques del sistema para la obtención de la curva característica de la PEMFC.

- **Circuito de control** consiste en un acondicionador de señal que proporciona niveles de voltaje apropiados para suministrar la corriente de base del transistor con la función que éste opere en su región activa comportándose como una carga lineal.
- **Circuito de potencia** es el circuito principal, es capaz de emular la carga electrónica. Está compuesto por una serie de dos transistores bipolares operados en zona activa.
- **Sensor** proveen valores proporcionales de corriente.
- **Adquisición de datos** se realiza mediante el sensor de corriente. Los valores proporcionales son cuantificados y retroalimentados al MCU mediante el ADC 0

El circuito de potencia emula una carga conectada a una PEMFC capaz de cubrir el rango de valores necesarios para obtener la curva de potencia. Consiste en una serie de transistores operados en la zona lineal [32].

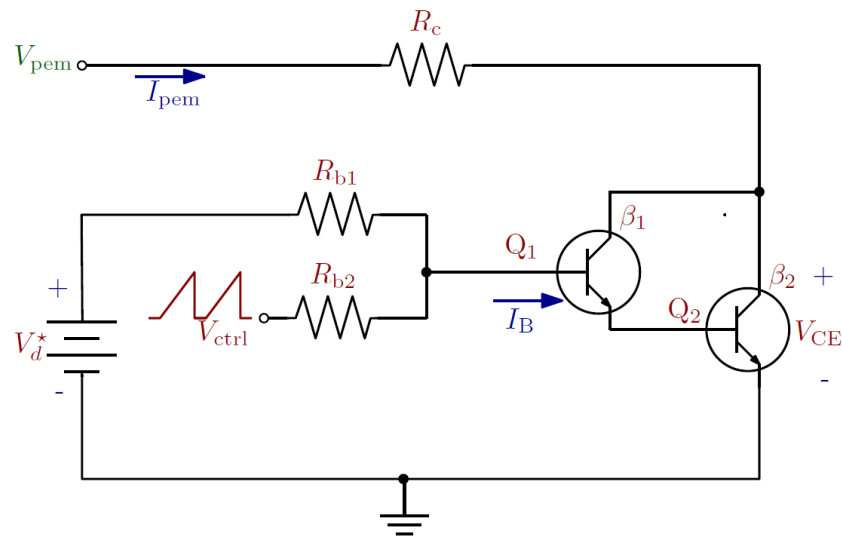


Figura 5.2 Diagrama esquemático de la carga electrónica.

En la Figura 5.2 se muestra el diagrama esquemático del circuito de potencia, consiste en una conexión Darlington de dos transistores cuya ganancia es el producto de las ganancias de los elementos individuales como se expresa en (20).

$$\beta_T = \beta_{Q1} \cdot \beta_{Q2} \quad (20)$$

Considerando la manera de operar del arreglo utilizado y tomando en cuenta que la corriente del colector i_c de Q_2 esta denotada por i_{PEM} , por consiguiente podemos definirla como en (21).

$$I_{PEM} = i_c = \beta_T \cdot i_B \quad (21)$$

La corriente de base (i_B) de Q_1 es controlada mediante el voltaje de control (V_{ctrl}) que proviene del circuito acondicionador de señales. La configuración antes descrita permite al circuito operar a lo largo de la región activa y cuyos límites son la región de corte y saturación. Se puede determinar el comportamiento lineal del sistema implementado de acuerdo al análisis de la corriente de colector (i_c) en contraste con el V_{ctrl} y el voltaje en la carga electrónica (V_{CE}). En el primer análisis, i_c permanece constante después de sobrepasar la región de saturación presente debido a las características de los transistores. En el segundo análisis, i_c se comporta puramente lineal respecto a V_{CE} .

La Tabla 5.7 presenta los valores de los componentes utilizados en la implementación del circuito.

Tabla 5.7 *Parámetro del circuito carga electrónica*

Parámetro	Valor
V_{bb}	12 V
R_{b1}	100 Ω
R_{b2}	10 k Ω
R_c	1.5 Ω
Q_1	TIP41
Q_2	2N3055

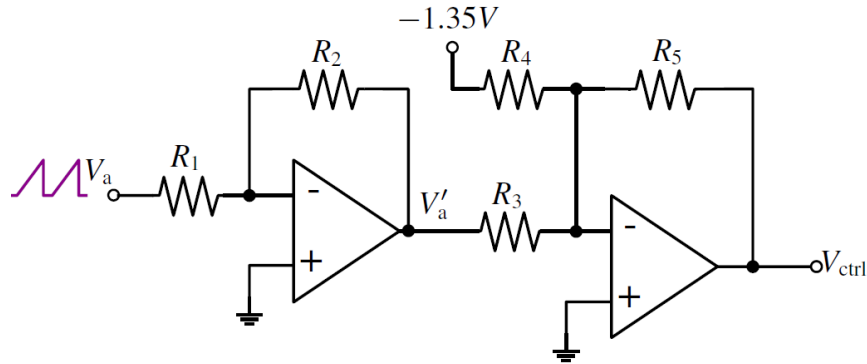


Figura 5.3 Diagrama esquemático del circuito de control.

La Figura 5.3 describe el diagrama esquemático del circuito de control implementado, éste permite ajustar el nivel de voltaje aplicado al circuito de potencia. La configuración consiste en un amplificador inversor con una ganancia de 0.22, donde el voltaje V_a' está dado por (22).

$$V_a' = \frac{R_2}{R_1} V_a \quad (22)$$

Posteriormente, se implementó un sumador inversor con ganancia unitaria, el voltaje V_{ctrl} es calculado mediante (23).

$$V_{ctrl} = -\frac{R_5}{R_3} (V_a' - 1.35) \quad (23)$$

La señal diente de sierra V_a se establece a una frecuencia de 165 mHz y una amplitud de 5 V. El voltaje de salida V_{ctrl} delimita las regiones de operación del transistor.

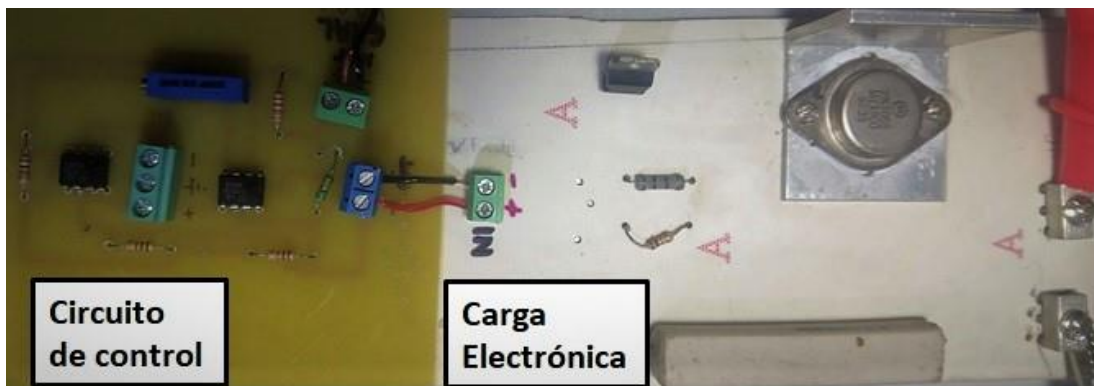
Tabla 5.8 *Parámetros de circuito de control.*

Parámetro	Valor
R_1	1.5 k Ω
R_2	330 Ω
R_3	1 k Ω
R_4	1 k Ω
R_5	1 k Ω

Una vez analizados los circuitos propuestos y habiendo comprobado la linealidad del sistema se determinó la utilidad del mismo y se interconectó al sistema emulador digital de la FC tipo PEM.

Las especificaciones técnicas del stack utilizado en la experimentación pueden consultarse en el Apéndice B.

La Figura 5.4 presenta las configuraciones del circuito de control y la carga electrónica descritas anteriormente y utilizadas para la obtención de la curva característica.

**Figura 5.4** *Configuración experimental para la obtención de la curva característica de la PEMFC.*

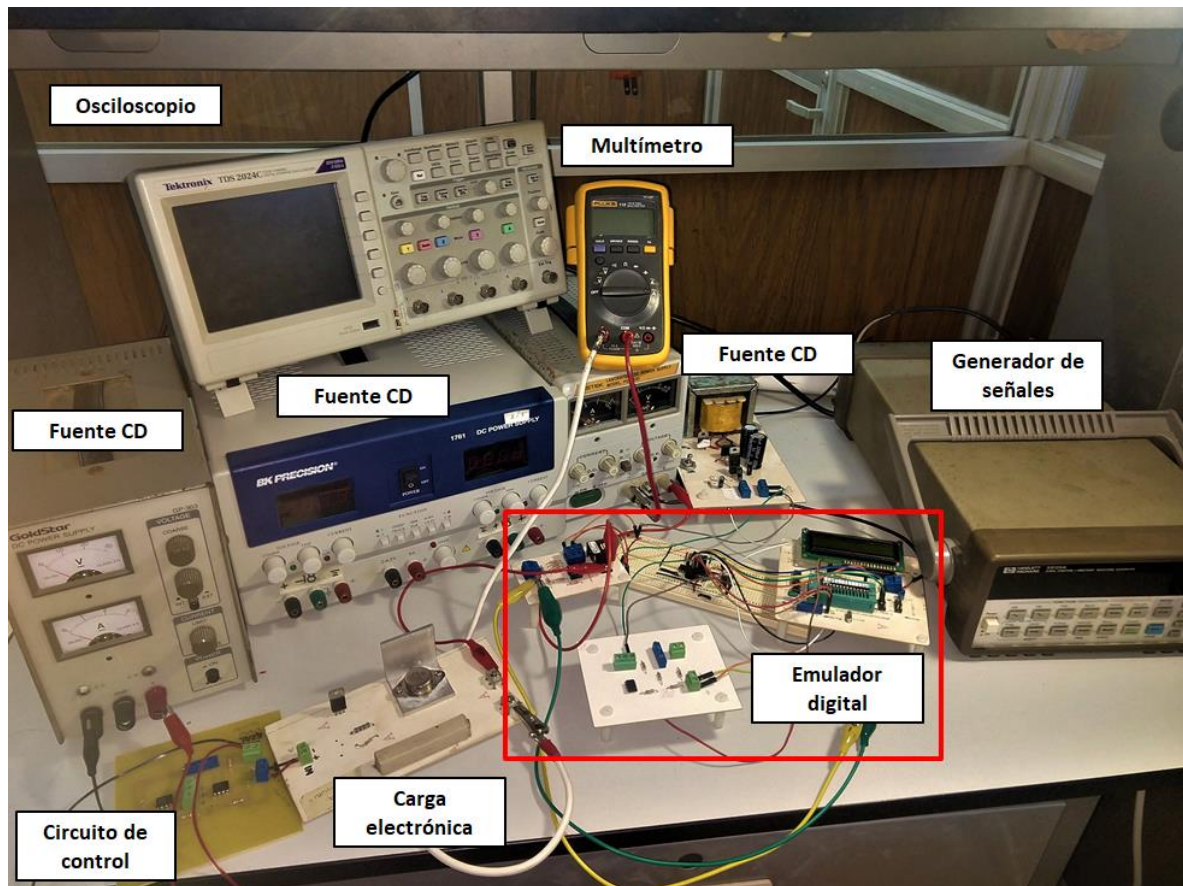


Figura 5.5 Instrumentación necesaria para la obtención de la curva característica de la PEMFC.

En la Figura 5.5 se presenta la instrumentación empleada así como la configuración experimental para la obtención de la curva característica. Una de las funciones de la instrumentación fue la de adquirir las señales de voltaje V_{PEM} y corriente i_{PEM} en tiempo real.

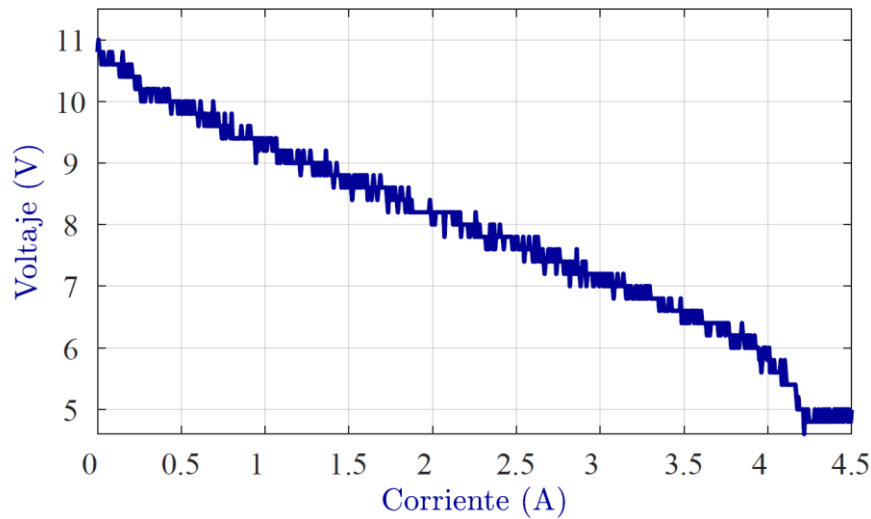


Figura 5.6 Curva característica voltaje-corriente de la PEMFC

La Figura 5.6 presenta la gráfica voltaje-corriente obtenida mediante el prototipo experimental de la Figura 5.4 empleado en esta experimentación. La curva obtenida va de acuerdo al comportamiento analítico de una PEM. Los datos necesarios para la realización de la gráfica han sido obtenidos mediante el osciloscopio Tektronix TDS2024C.

5.2 CONVERTIDOR DE POTENCIA CONECTADO A UNA FC TIPO PEM

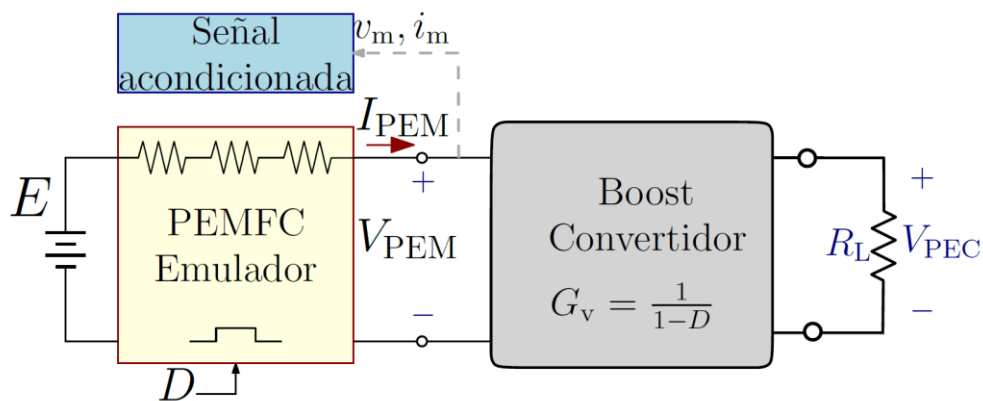


Figura 5.7 Convertidor de potencia interconectado al emulador digital.

Un convertidor de potencia (CEP) es un elemento capaz de alterar las características de corriente y de voltaje con la finalidad de que la PEMFC opere en mejores condiciones. La Figura 5.7 muestra el diagrama a bloques del sistema propuesto, el mismo consiste en un convertidor de potencia conectado al emulador digital de FC tipo PEM con una carga fija R_L .

La configuración del convertidor CD-CD debe seleccionarse de acuerdo a una serie de consideraciones, como por ejemplo, los requerimientos y los niveles de voltaje de la PEMFC. En el caso de que el voltaje generado por la PEMFC sea mayor al deseado, un convertidor tipo buck sería la mejor opción. O por el contrario si el voltaje necesario es mayor, un convertidor boost es el más conveniente. En cambio si la demanda de energía es ajustable a mayor o menor voltaje, el convertidor buck-boost es el más apropiado[11].

Para el desarrollo de esta experimentación se seleccionó un convertidor boost esto debido al voltaje limitado que alcanza el stack de FC tipo PEM. Además, que este tipo de convertidor presenta como característica una corriente de entrada continua, lo que representa una ventaja para la medición de dicho parámetro debido a que la operación y/o funcionamiento de una FC tipo PEM está en función de la corriente.

Al realizar un análisis e integrar los modelos matemáticos de la FC tipo PEM y del convertidor de potencia, se puede considerar lo siguiente:

$$V_{CEP} = V_{PEM} \frac{1}{(1 - D)} \quad (24)$$

$$V_{CEP} = (E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{tran}) \frac{1}{(1 - D)} \quad (25)$$

$$V_{CEP} = \left[E - A \ln(i) - ir + B_{H_2} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) + B_{O_2} \ln\left(1 - \frac{i}{i_l}\right) \right] \frac{1}{(1 - D)} \quad (26)$$

5.2.1 Diseño del Convertidor de Potencia

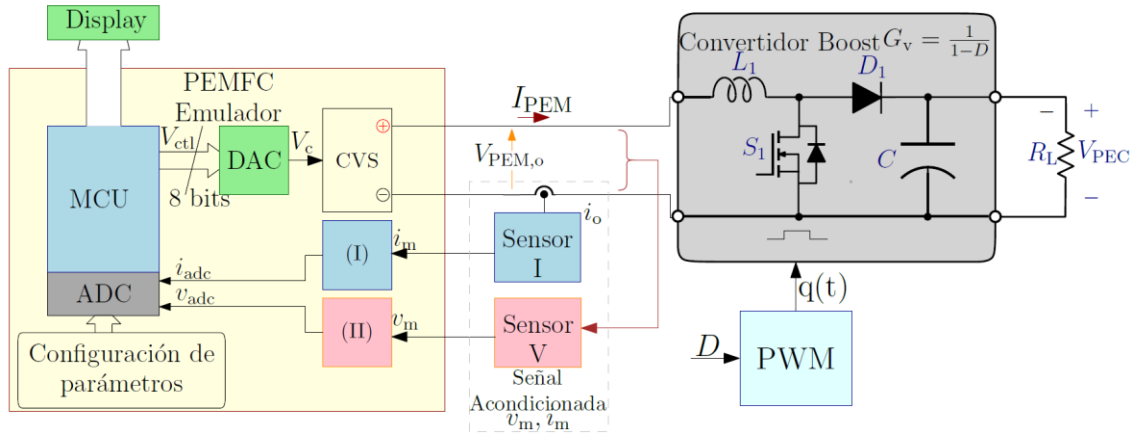


Figura 5.8 Diagrama esquemático del convertidor de potencia conectado al emulador digital.

El diseño del convertidor de potencia es esencial, la determinación de los parámetros debe ser precisa. La Figura 5.8 muestra el diagrama esquemático del convertidor tipo boost conectado al emulador digital de FC tipo PEM, a continuación se describen los criterios de diseño [33].

En un inicio, el valor del inductor (L) debe ser considerado de tal manera que el modo de operación del convertidor sea continuo, es decir, que siempre exista flujo de corriente mayor a cero a través del inductor. La capacitancia (C) debe ser grande esto con la finalidad de mantener el voltaje de salida constante con un rizo reducido.

En el caso de la resistencia de carga (R_L) apropiada es posible calcular su valor siguiendo la relación (27).

$$R_L = \frac{Z_{in}}{(1-D)^2} \quad (27)$$

El valor de la impedancia (Z_{in}) puede ser modificado mediante el control del ciclo de trabajo, el mismo es posible de calcular mediante la relación anterior.

Se propone como voltaje de entrada (V_d) el voltaje entregado por el emulador digital de PEMFC. Los componentes restantes se seleccionaron considerando las características eléctricas máximas a las cuales serán sometidas y la velocidad requerida.

La Tabla 5.9 muestra los parámetros utilizados para implementación del convertidor boost.

Tabla 5.9 Parámetros del convertidor de potencia boost.

Símbolo	Componente	Valor
R_L	Resistencia	5 Ω
L	Inductor	100 μ H
C	Capacitor	100 μ H
$q(t)$	Frecuencia de conmutación	40 kHz
D	Ciclo de trabajo	20 <D< 50

5.2.2 Generación de la Señal PWM

La modulación por ancho de pulso (por sus siglas en ingles PWM) está formada por una señal cuadrada que no siempre tiene la misma relación entre el tiempo que está en alto y el tiempo que está en bajo. El tiempo que la señal se encuentra en alto se denomina como T_{on} , mientras que el tiempo que está en bajo se denomina T_{off} . La suma de ambos tiempo es el periodo de la señal T . Y como en toda señal periódica, el inverso del periodo ($1/T$) es la frecuencia de la señal.

La modulación de ancho de pulso consiste en variar T_{on} y T_{off} , esta variación es conocida como ciclo de trabajo. Se puede considerar el ciclo de trabajo como en (28).

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (28)$$

Cuanto mayor sea el ciclo de trabajo, mayor tiempo estará la señal en alto. Normalmente el ciclo de trabajo se expresa en porcentaje (%).

Se puede considerar, que el ciclo de trabajo controla el tiempo en el que se encuentra activo el interruptor del convertidor de potencia.

Existen diferentes alternativas para la generación de una señal PWM, en esta ocasión la programación e implementación de un microcontrolador ATmega328P será la técnica utilizada para la conmutación del convertidor boost.

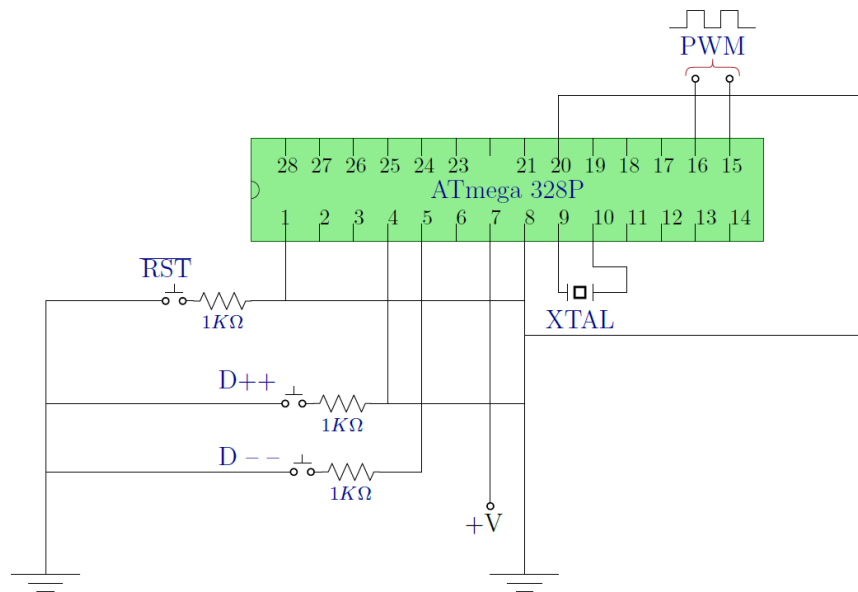


Figura 5.9 Configuración de la señal PWM.

La Figura 5.9 presenta el circuito utilizado para la generación de la señal PWM y la Tabla 5.10 se describen los componentes utilizados.

Tabla 5.10 Parámetros de la señal PWM.

Símbolo	Componente	Valor
R_r	Resistencia	1 k Ω
MCU	Microcontrolador	ATMEGA328P
XTAL	Cristal oscilador	20 kHz

5.2.3 Implementación del Convertidor Boost

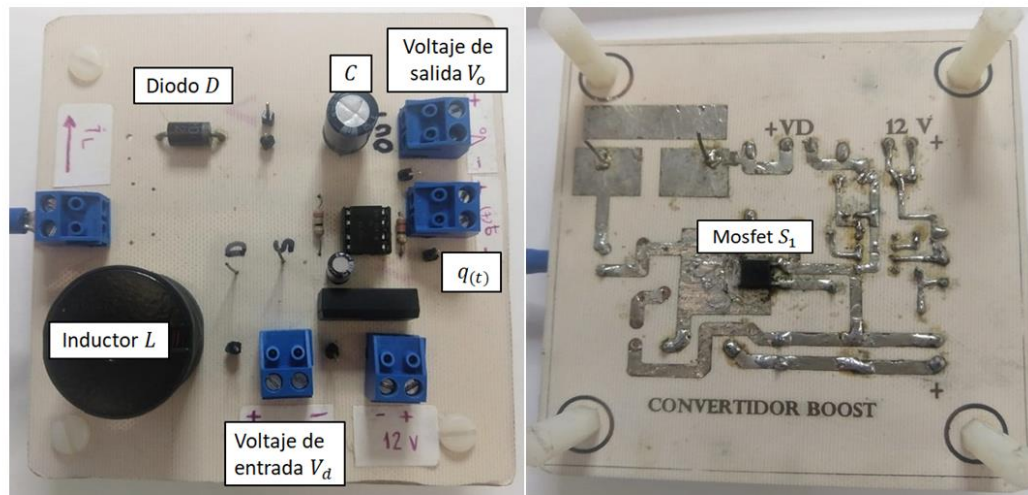


Figura 5.10 Convertidor boost utilizado.

La Figura 5.10 presenta el circuito del convertidor boost utilizado en las pruebas experimentales. La configuración del mismo puede consultarse en la Figura 2.4 (a).

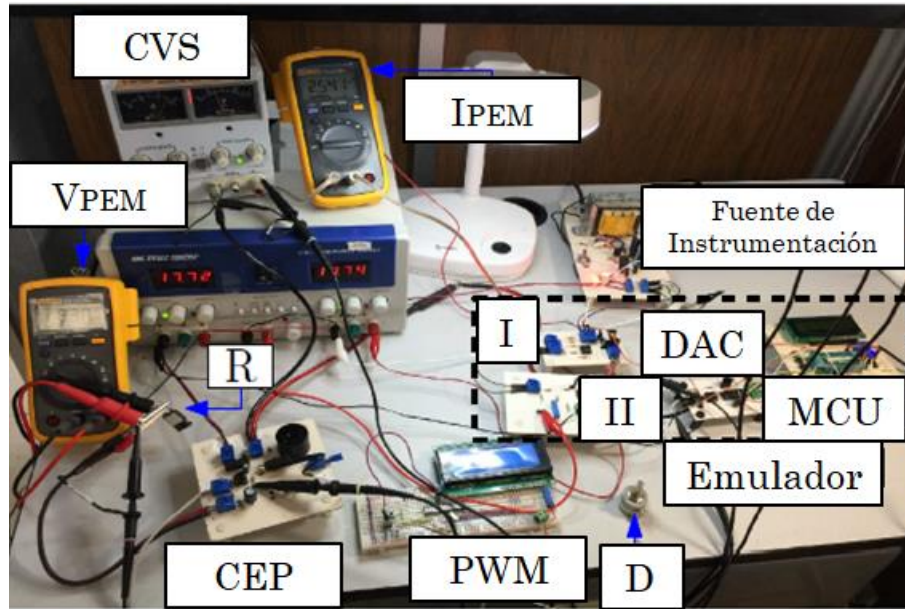


Figura 5.11 Convertidor boost implementado.

La Figura 5.11 muestra la implementación del convertidos de potencia boost junto con el sistema emulador digital de FC tipo PEM.

Una vez descrito el sistema propuesto, se procedió con la realización de varias pruebas.

Primeramente, considerando una resistencia de carga de 5Ω se realizó la variación del ciclo de trabajo, la Tabla 5.11 muestra los resultados de rendimiento del emulador digital al ser sometido a la variación del ciclo de trabajo.

Tabla 5.11 Rendimiento del emulador digital con diferentes valores de ciclo de trabajo

D (%)	V_{PEM} (V)	i_{PEM} (A)	P_{PEM} (W)	V_{CEP} (V)
20	7.02	2.19	15.37	7.18
25	6.83	2.36	16.11	7.25
30	6.55	2.60	17.03	7.46
35	6.35	2.84	18.03	7.59
40	6.05	3.14	18.99	7.66
45	5.79	3.42	19.80	7.71
50	5.43	3.77	20.47	7.60
55	5.11	4.08	20.84	7.43
60	4.64	4.41	20.46	7.11

Se puede observar que la FC tipo PEM alcanza su máxima potencia operando con un ciclo de trabajo del 55%.

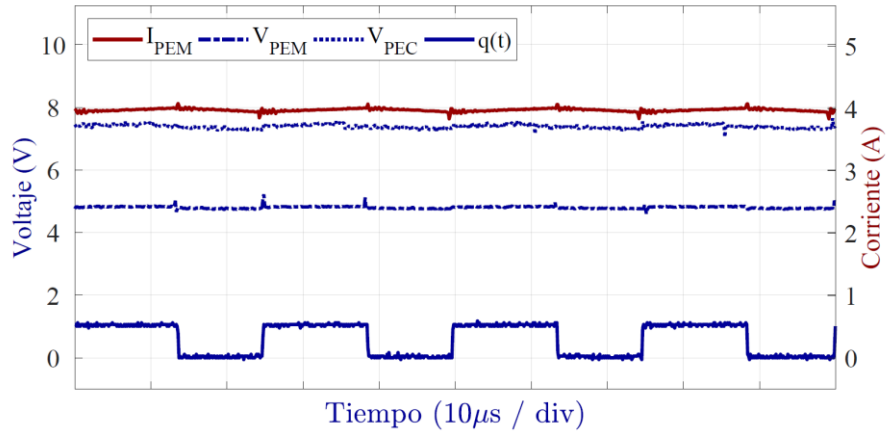


Figura 5.12 Resultados experimentales con 55% de ciclo de trabajo obtenidos mediante el osciloscopio Tektronix TDS2024C.

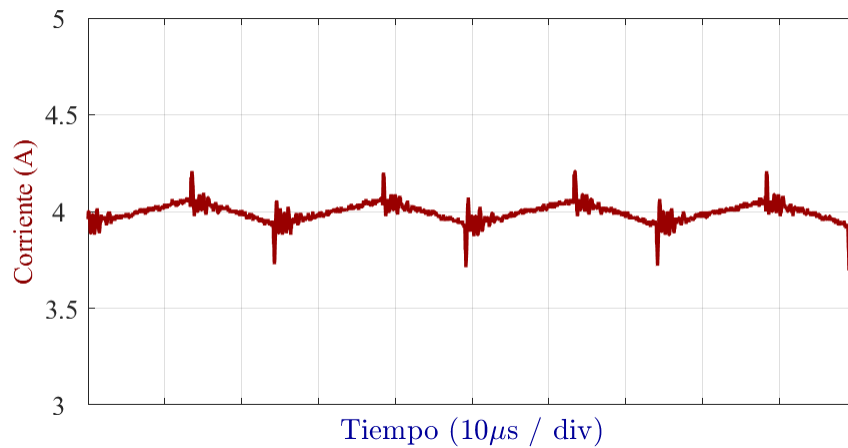


Figura 5.13 Valores de corriente de salida de la FC tipo PEM obtenidos mediante el osciloscopio Tektronix TDS2024C.

La Figura 5.12 muestra el voltaje (V_{PEM}) y la corriente (i_{PEM}) de la PEM, el voltaje de salida del convertidor (V_{PEC}), así como la señal del ciclo de trabajo aplicado al transistor para controlar el convertidor $q(t)$. Se puede observar que el voltaje de salida del convertidor (V_{PEC}) es aproximadamente 1.55 veces más el voltaje de entrada (V_{PEM}). De igual manera se observa que el voltaje de entrada (V_{PEM}) se mantiene constante a pesar de la ondulación de la corriente de entrada (i_{PEM}).

La Figura 5.13 muestra la corriente de entrada (i_{PEM}) de forma triangular cuyo valor promedio corresponde a lo predicho en las especificaciones técnicas de la misma.

5.3 CONCLUSIONES

En este capítulo se describió el desarrollo de las pruebas experimentales que se realizaron con el sistema emulador digital de la FC tipo PEM. Para la realización de las mismas se tomaron en cuenta ciertos criterios para el diseño del convertidor y para la implementación del mismo.

Los resultados experimentales obtenidos en este capítulo presentaron grandes similitudes con los análisis teóricos. Además, los resultados de simulación y emulación presentados en los Capítulos 3 y 4 mostraron gran similitud con los obtenidos mediante la experimentación.

Es posible concluir que el sistema emulador digital implementado, responde de forma adecuada al momento de implementar otros dispositivos electrónicos como lo es un convertidor de potencia.

Capítulo

6

Conclusiones Generales y Trabajos Futuros

Uno de los objetivos de la experimentación es la de obtener resultados que favorezcan u ofrezcan una conclusión para la solvencia de la problemática planteada. Durante el presente capítulo se encuentran las conclusiones generales y específicas del trabajo de investigación desarrollado y explicado en los anteriores 5 capítulos. De igual manera se presentan o exponen recomendaciones de trabajos futuros.

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

El desarrollo de este trabajo de investigación estuvo enfocado en la problemática que presenta la realización de pruebas experimentales para desarrollo y/o perfeccionamiento de sistemas de generación de energía basados en celdas de combustible tipo PEM.

La problemática de este tipo de sistemas es que los mismos necesitan sistemas auxiliares complejos y costosos para que su operación sea correcta y óptima, además de que es difícil controlarse las condiciones de operación. Con la finalidad de contar con un instrumento de laboratorio con la capacidad de imitar el funcionamiento de una PEMFC, un sistema digital emulador fue la alternativa de solución desarrollada durante la duración del proyecto.

El desarrollo del modelo matemático, la simulación y la implementación del sistema emulador fueron analizados para posteriormente ser validados experimentalmente tomando en cuenta varios puntos de operación y diferentes condiciones de operación.

La implementación del sistema emulador consistió en la programación y utilización de un microcontrolador como núcleo del sistema.

La utilización de una carga electrónica, como herramienta para la obtención de la curva característica voltaje-corriente, contribuyó con la validación del trabajo de simulación previo.

La adición de un convertidor de potencia tipo boost sirvió para corroborar el comportamiento del emulador. El sistema rastrea con precisión los puntos de operación de la curva característica.

En conclusión, la propuesta del sistema digital emulador desarrollada resulta una opción adecuada para llevar a cabo experimentos bajo diferentes condiciones preestablecidas.

6.2 CONTRIBUCIONES

- Simulación en el software MATLAB/SIMULINK del modelo matemático de una FC tipo PEM.
- Desarrollo del código de programación en lenguaje tipo C del software ATMEL STUDIO del modelo matemático de una FC tipo PEM.
- Implementación del prototipo experimental del sistema digital emulador: Microcontrolador ATmega 328P, sistema de adquisición de datos.
- Obtención experimental de la curva corriente-voltaje de una FC tipo PEM mediante la implementación de una carga electrónica.
- Implementación de un convertidor tipo boost, así como generador de PWM al sistema digital emulador.

6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS A FUTURO

Se proporcionan las siguientes recomendaciones en relación a los resultados expuestos en este trabajo de investigación:

- Desarrollo, codificación e implementación un modelo matemático de FC tipo PEM más elaborado.
- Implementación de un sistema de adquisición de señales correspondientes a la curva corriente-voltaje de una PEMFC.

- Implementación de una interfaz gráfica con algún protocolo de comunicación, con la finalidad de utilizar un instrumento de medición más especializado.
- Implementación del sistema digital emulador con convertidores de potencia de diferentes características y/o configuraciones.

6.4 ACTIVIDADES REALIZADAS

- Asistencia a la Reunión General de la Red de Sistemas Eléctricos de Potencia y Redes Inteligentes - CONACYT y Escuela de Verano de Potencia 2017. 4-6 Octubre de 2017, Zacatecas, Zac., México.
- Apoyo en el proyecto TecNM “Aplicaciones de las nuevas tecnologías de control y manejo de energías basadas en convertidores modulares multiniveles”, 2017 bajo el registro 6060.17-P.
- Apoyo en el proyecto TecNM “Implementación de convertidores de potencia para el control y manejo de una red inteligente a pequeña escala con fuentes renovables”, 2018 bajo el registro 6689.18-P.
- Asistencia al evento Expo Enertam Internacional 11-13 Abril de 2018, Tampico, Tamps., México.
- Apoyo en el proyecto PRODEP “Procesadores de Potencia para Aplicaciones de Fuentes Fotovoltaicas”, 2019.
- Asistencia al evento Expo Enertam Internacional 09-11 Abril de 2019, Tampico, Tamps., México.

- Participación como ponente en el XXXI Encuentro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica del Golfo De México con el tema “MODELADO Y EMULACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM” celebrado del 23 al 24 de mayo del 2019 en Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental, Altamira, Tamps., México.
- Participación como ponente en el Coloquio de Investigación Multidisciplinaria (Evento internacional), con el tema “IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO ELECTROQUÍMICO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM” celebrado del 16 al 18 de octubre del 2019 en Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Ver., México
- Participación en el 21° Certamen Estatal Creatividad e Innovación Tecnológica Expociencias Tamaulipas 2019 con el proyecto “H2US EMULADOR”, fase regional, celebrada el día 08 de octubre del 2019 en Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ciudad Madero, Tamps., México.
- Participación en el 21° Certamen Estatal Creatividad e Innovación Tecnológica Expociencias Tamaulipas 2019 con el proyecto “H2US EMULADOR”, fase estatal, celebrada del 29 al 31 de octubre del 2019 en Polyforum Victoria, Ciudad Victoria, Tamps., México.
- Participación como ponente en el 7° Encuentro de Jóvenes Investigadores de Tamaulipas, con el tema “EMULACIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM” celebrado del 13 al 14 de noviembre del 2019 en Polyforum Victoria, Ciudad Victoria, Tamps., México.

6.5 PUBLICACIONES

- Rosado González Jonathan Miguel, Reyes García Brenda Lizeth, **Valdez Hernandez Cynthia Lucero** y García Vite Pedro Martín, “*Desarrollo de un sistema inalámbrico para adquisición y monitoreo de datos en una Smart grid*”, Congreso Empréndete, 2019, artículo aceptado.
- **Cynthia Lucero Valdez Hernandez**, Brenda Lizeth Reyes García, Pedro Martín García Vite, Ana Lidia Martínez Salazar y Rafael Castillo Gutiérrez, “*Implementación del modelo electroquímico de una celda de combustible tipo PEM*”, Coloquio de Investigación Multidisciplinaria 2019, artículo aceptado.
- Pedro Martín García-Vite, Brenda Lizeth García-Reyes, **Cynthia Lucero Valdez-Hernandez** y A.L. Martínez Salazar, “*Microcontroller-based emulation of a PEM Fuel Cell*”, International Journal of Hydrogen Energy 2019, artículo aceptado.

Apéndice

A

Parámetros para el cálculo del modelo matemático de una FC tipo PEM

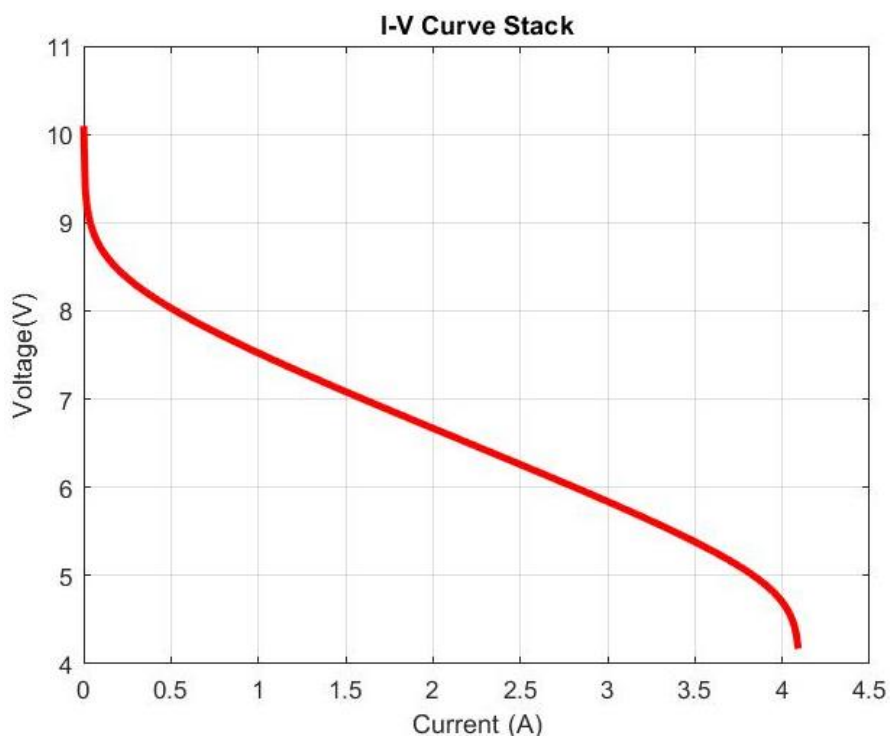
Símbolo	Unidades	Descripción
$A = \frac{R \cdot T}{2 \cdot \alpha \cdot F}$	V	Constante de Tafel
$R = 8.314472$	$\frac{J}{\text{mol} \cdot K}$	Constante Universal de los gases
T	K	Temperatura
$F = 96,485$	C	Constante de Faraday
α	-	Constante de transferencia de carga
j	$\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	Densidad de corriente
j_0	$\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	Densidad de corriente máxima
$B = -\frac{R \cdot T}{z \cdot F}$	V	Constante de transferencia de masa
z	-	Número de electrones móviles
BH ₂	V	B lado ánodo (z = 2)
BO ₂	V	B lado cátodo (z = 4)
j_l	$\frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	Densidad de corriente límite
r	$\frac{\text{k}\Omega}{\text{cm}^2}$	Resistencia de área específica

Apéndice

B

*Especificaciones técnicas y
curva voltaje-corriente de una
FC tipo PEM*

Parámetro	Valor
Tipo de celda	PEM
Número de celdas	10
Potencia nominal	20W
Rendimiento	6 V @ 3.4 A
Reactantes	Hidrógeno y oxígeno
Temperatura externa	5-40°C
Temperatura de operación	60°C
Presión del hidrógeno	0.45-0.55 bar
Presión del oxígeno	2.5 bar
Pureza del hidrógeno	100.00%
Flujo nominal de oxígeno	0.25 lpm
Eficiencia nominal	40%
Área específica	6 cm ²
Voltaje de circuito abierto real	9.5 V
Voltaje de inicio región óhmica	6.875 V
Corriente de inicio región óhmica	0.8 A
Voltaje final región óhmica	5 V
Corriente final región óhmica	4A



Referencias

- [1] Mohamed Derbeli, Lassaad Sbita, MAissa Farhat y Oscar Barambones. “*Proton Exchange MEmbrane Fuell Cell- A Smart Drive Algorithm*”, 2017 IEEE, International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), Hammamet, Octubre 2017.

- [2] EDIBON, PEM Fuel cell user manual, Model EC5B, URL: <http://www.edibon.com/es/> (2018).

- [3] A. Albarbar y M. Alrweq, “*Proton Exchange Membrane Fuel Cells*”, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. ISBN: 978-3-319-70726-6.

- [4] O’Hayre Ryan, Cha Suk Won, Colella Whitney y Prinz Fritz. “*Fuel Cell Fundamentals, 3rd. Edition*”, 2016. ISBN:978-1-119-11415-4.

- [5] Thomas Sharon y Zalowitz Marcia. “*Fuel Cell: Green Power*”, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, 2009.

- [6] Larminie James y Dicks Andrew. “*Fuel Cell Systems Explained, Second Edition*”, 2003, ISBN: 0-470-84857-X.

- [7] Barbir Frano. “*PEM, Fuel Cell. Theory and Practice*”, 2012, ISBN: 9780123877109.

- [8] Dilip Natarajan y Trung Van Nguyen. “*Current distribution in PEM fuel cells. Part 1: Oxygen and fuel flow rate effects*”, AIChE Journal, Vol. 51 N°.9, 2009.

-
- [9] Meng Hui Wang, Mei-Ling Huang, Wei-Jhe Jiang y Kang-Jian Liou. “*Maximum power point tracking control method for proton exchange membrane fuel cell*”, IET Renewable Power Generation Journal, 2015. ISSN:1752-1416.
- [10] Zapien Morales Guillermina. “*Ánalisis de circuitos eléctricos en DC*”, Limusa, 2005, ISBN: 968-18-6544-8.
- [11] Tore M. Undeland, William P. Robbins y Ned Mohan, “*Electrónica de Potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*”, 3rd ed. Mc Graw Hill, 2009.
- [12] V. Boscaino, G. Capponi y F. Marino, “*FPGA implementation of a fuel cell emulator*”, presentado en SPEEDAM, Italia, 2010.
- [13] Abdellah Beicha y Radia Zaamoucheb, “*Electrochemical model for proton exchange membrane fuel cell systems*”, Journal of Power Technologies, Vol. 93 N°. 1, 2013. Pag: 26-36.
- [14] A. Saadi, M. Becherif, D. Hissel y H. Ramadan, “*Dynamic modeling and experimental analysis of PEMFCs: A comparative study*”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, N°2, 2017, Pag:1544–1557.
- [15] A. A. Fardoun, H. A. Hejase, A. Al-Marzouqi y M. Nabag, “*Electric circuit modeling of fuel cell system including compressor effect and current ripples*”, International Journal of Hydrogen Energy Vol.42 N°2, 2017, Pag:1558–1564.
- [16] Z. Abdin, C. Webb y E. Gray, “*PEM fuel cell model and simulation in Matlab–Simulink based on physical parameters*”, Energy, Vol.116, 2016 Pag:1131–1144.

- [17] S. L. Chavan y D. B. Talange, “*Modeling and performance evaluation of PEM fuel cell by controlling its input parameters*”, Energy Vol.138, 2017, Pag:437-445.
- [18] A. Mohammadi, G. Cirrincione, A. Djerdir y D. Khaburi, “*A novel approach for modeling the internal behavior of a PEMFC by using electrical circuits*”, International Journal of Hydrogen, Energy Vol.43, N°25, 2018, Pag:11539-11549.
- [19] K. Nikiforow, P. Koski, H. Karim`aki, J. Ihonon y V. Alopaeus, “*Designing a hydrogen gas ejector for 5 kw stationary pemfc system—cfd-modeling and experimental validation*”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.41, N°33, 2016, Pag:14952-14970.
- [20] B. S. Machado, N. Chakraborty y P. K. Das, “*Influences of flow direction, temperature and relative humidity on the performance of a representative anion exchange membrane fuel cell: A computational analysis*”, International Journal of Hydrogen Energy Vol.42, N°9, 2017, Pag:6310–6323.
- [21] B. Madaci, R. Chenni, E. Kurt y K. E. Hemsas, “*Design and control of a stand-alone hybrid power system*”, International Journal of Hydrogen, Energy Vol.41 N°29, 2016, Pag:12485–12496.
- [22] N. I. Hernández, B. E. Graniel, G. Mino y E. Peralta, “*Emulación de un Stack de Celda de Combustible PEM a Partir de Su Modelo Electroquímico Simplificado Mediante una Fuente Programable*”, presentado en XIV Congreso Internancional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, Mexico, 2018.
- [23] M. Di Piazza y G. Vitale, “*Photovoltaic Sources Modeling and Emulation*”, Springer London, London, 2013.

- [24] C. Restrepo, T. Konjedic, A. Garces, J. Calvante y R. Grial, “*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°2, 2015. Pag:548-559.
- [25] D. Zhou, Y. Wu, F. Gao, E. Breaz, A. Ravey y A. Miraoui, “*Degradation prediction of PEM fuel cell stack based on multiphysical aging model with particle filter approach*”, IEEE Transactions on Industrial Applications, Vol.53, N°4, 2017, Pag:4041-4052.
- [26] H. Lee, J. Kim y S. Yoo, “*On-line and real-time diagnosis method for proton membrane fuel cell (PEMFC) stack by the superposition principle*”, Journal of Power Sources, Vol. 326, 2016, Pag: 264-269.
- [27] M. Sanchez, R. Barbosa, L. Arriaga y J. Ramirez, “*Real time control of air feed system in a pem fuel cell by means of an adaptive neural-network*”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, N° 29, 2014, Pag:16750-16762.
- [28] J. Liu, S. Laghrouche y M. Wack, “*Pem fuel cell air-feed-system observer design for automotive applications: An adaptive numerical differentiation approach*”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, N° 30, 2014, Pag:17210-17221.
- [29] Iman Soltani, Mohammad Sarvi y Haniyeh Marefatjou, “*An Intelligent, Fast and Robust Maximum Power Point Tracking for Proton Exchange Membrane Fuel Cell*”, World Applied Programming Journal, Vol. 3, N°7, 2013. Pag: 264-281.
- [30] V. Boscaino, G. Capponi y F. Marino, “*FPGA implementation of a fuel cell emulator*”, presentado en SPEEDAM, Italia, 2010
- [31] Safa Slouma, Khaled Charradi, Jean Christophe Olivier y Radhouane Chtourou, “*Command and control of a fuel cell emulator*”, presentado en International

Conference on Composite Materials & Renewable Energy Applications (ICCMREA), Tunisia, SN: 978-1-4799-2516-2, 2015.

[32] M. del Rosario Rivera-Espinosa, P. M. García-Vite, Yadira Salazar González, I. Guadalupe Bautista Amador y J. José Sánchez Palomo, “*Carga electrónica para la obtención experimental de curvas características de paneles solares*”, Coloquio de Investigación Multidisciplinaria (CIM), México, Vol. 6, N° 1, 2018, Pag:366-372, ISSN 2007-8102.

[33] D. W. Hart, “*Electrónica de Potencia*”, 3rd edition, Prentice Hall, 2001.