



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“EMULADOR DE ESCENARIOS DE DEMANDA DE POTENCIA
ELÉCTRICA PARA EL ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LAS PILAS
DE COMBUSTIBLE POLIMÉRICA EN APLICACIONES
ESTACIONARIAS”

TESINA DE SEMINARIO

Previa a la Obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Presentado por:

ROBERTO IVÁN SILVA VILLAMAR

GASTON ENRIQUE MENDOZA CONTRERAS

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO 2015

AGRADECIMIENTO

A Dios, a nuestro Director de Tesis Dr. Wilton Agila, A mi madre Dorita por su apoyo incondicional para seguir mi vida profesional, a mi compañero de Tesis.

Roberto Silva Villamar.

A Dios,

Al Dr. Wilton Agila por su guía, a mis padres que siempre estuvieron a mi lado, a mis amigos y compañeros que me ayudaron a concluir este trabajo.

Gaston Mendoza Contreras.

DEDICATORIA

El presente trabajo de Tesis va dedicado a mi madre, quien ha sido pilar fundamental en cada etapa de mi vida, y que gracias a su amor he llegado a cumplir este gran sueño.

Roberto Silva Villamar.

A Silvita, mi novia, mi inspiración y soporte.

A mi familia, por quienes me convertí en quien soy ahora.

Gaston Mendoza Contreras.

TRIBUNAL DE SUSTENTACION



Dr. Wilton Agila Gálvez
PROFESOR DEL SEMINARIO DE
GRADUACIÓN



Ing. Fernando Vaca
PROFESOR DELEGADO POR LA
UNIDAD ACADÉMICA

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesina, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”



Roberto Silva V.



Gaston Mendoza C.

RESUMEN

La presente Tesina tiene por objetivo modelar y determinar un diseño de carga electrónica o emulador de carga que permita analizar la respuesta eléctrica temporal de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico (Proton Exchange Membrane o Polymer Electrolyte Membrane, PEM) en diferentes escenarios.

El procedimiento de diseño, análisis y evaluación se llevó a cabo mediante la herramienta SIMULINK de MATLAB. Se analiza a través de simulación la mejor configuración de elementos (dispositivos electrónicos de potencia) que garanticen el correcto diseño del emulador de carga a fin de obtener los resultados esperados durante el funcionamiento de la pila de combustible.

La frecuencia de conmutación del dispositivo electrónico de potencia se realiza mediante modulación de ancho de pulso y cuya frecuencia es gestionado por el controlador diseñado para el caso.

Se realiza el análisis y caracterización de la evolución temporal de la respuesta eléctrica de la pila de combustible polimérica mediante incrementos periódicos de la demanda de potencia eléctrica a la pila, escenario de evaluación del

emulador de carga útil para facilitar el desarrollo en el campo de la investigación en este tipo de tecnologías.

Se simulan, haciendo uso del emulador de carga propuesto, comportamientos reales de perfiles de demanda de potencia eléctrica de una aplicación estacionaria tipo vivienda, facilitando con ello la investigación hacia nuevas aplicaciones de las pilas de combustible, uno de los objetivos del presente trabajo.

En el presente trabajo se ha implementado el método de Control Difuso, se lo utilizó para modificar el ciclo de trabajo del dispositivo electrónico de potencia y con esto manejar la corriente promedio que fluye por el circuito eléctrico.

El análisis económico del emulador de carga indica la factibilidad de implementar este sistema para aplicaciones tanto de laboratorio y caracterización como de aplicación real de las pilas de combustible.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
TRIBUNAL DE SUSTENTACION	iii
DECLARACIÓN EXPRESA	iv
RESUMEN.....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii
CAPÍTULO 1	1
1. ANÁLISIS PRELIMINAR.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5

1.4 Resultados Esperados	6
CAPÍTULO 2.....	8
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Funcionamiento general de la Pila de Combustible	9
2.2 Curva de Polarización de la celda de combustible.....	12
2.2.1 Pérdidas de Potencial por Activación.....	13
2.2.2 Pérdidas por Corrientes internas o “Crossover”	14
2.2.3 Pérdidas de Potencial Óhmico.....	15
2.2.4 Pérdidas de Potencial por Concentración de masa	15
2.3. El Potencial de la Celda	16
2.4. Eficiencia de las Pilas de Combustible.....	18
2.5. Los Sistemas de Pilas de Combustible.	19
2.6. Sistema pila de combustible para alimentar cargas estacionarias.	20
2.7. Aspectos termodinámicos.	21
2.8 Sistemas de Control Difuso.....	24
2.8.1 Fundamentos de Control Difuso	24
2.8.2 Conjuntos Difusos.....	24

2.8.3 Operaciones borrosas.....	26
2.8.4 Fuzzificación	28
2.8.5 Reglas Difusas.....	28
2.8.6 Reglas difusas de Mamdani.....	29
2.8.7 Defusificación	29
CAPÍTULO 3.....	31
3. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO	31
3.1 Diseño General	32
3.2 Pila de Combustible	33
3.2.1 Modelos Matemáticos	36
3.2.2 Parámetros de la Pila Polimérica.....	41
3.3 Aspectos generales de comportamiento	44
3.3.1 Dinámica Lenta de la Pila	44
3.3.2 Variaciones de Voltaje de Salida en la Celda	45
3.3.3 Sensibilidad a los Pulsos de la Corriente de Entrada	45
3.3.4 Los sobre picos de tensión en la Pila de Combustible.....	46
3.4 Emulador de Carga	47

3.4.1 Transistor MOSFET como encargado de manejar la corriente	47
3.4.2 Método de manejo de Compuerta	48
3.5 Lazo de Control con Lógica Difusa.....	48
CAPÍTULO 4.....	50
4. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROGRAMA.....	50
4.1 Esquema general del sistema	51
4.2 Bloque Mosfet	52
4.3 Bloque de Carga	53
4.4 Bloque medición y control de combustible de la pila	53
4.5 Bloque Constructor de Señal.....	55
4.6 Bloque de Controlador de Compuerta	56
4.6.1 Cálculo del Error	57
4.6.2 Control Difuso	58
4.6.3 Acumulador.....	63
4.7 Bloque Regulador PWM.....	65
4.8 Bloque de medición de la Carga	66
CAPÍTULO 5.....	67

5. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL EMULADOR	67
5.1 Lista general de elementos	67
5.2 Pila PEM.....	68
5.3 Tarjeta de Adquisición de Datos.....	69
5.4 Tarjeta de circuito de fuerza	69
5.5 Tarjeta de medición y acondicionamiento	71
5.6 Carga.....	74
5.7 Lista detallada y precios de materiales	74
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
6.1 Escenario 1: Caracterización de una pila PEMFC.....	77
6.1.1 Curva característica V. vs. I.....	80
6.1.2 Curva característica P. vs. I.....	81
6.2 Escenario 2: Curva de Demanda de Carga Típica Estacionaria.	82
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	92

ABREVIATURAS

PEM	Proton exchange membrane - Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico
MOSFET	Metal oxide semiconductor Field effect transistor - Transistor de efecto de campo metal óxido semiconductor
AC	Altern Current - Corriente Alterna
DC	Direct Current - Corriente Directa
THD	Total Harmonic Distortion - Distorsión total de Armónicos
RMS	Root Mean Square - valor cuadrático medio
PFC_{max}	Potencia Máxima de la Pila de Combustible
PFC_{min}	Potencia Mínima de la Pila de Combustible
P_{min}	Potencia mínima demandada
LHV	Lower heating value - valor calorífico inferior.
AirFr	Caudal de aire

Fuel Fr	Caudal de combustible
VI	Característica Tensión vs. Intensidad
PID	Control Proporcional Integral Derivativo
FLC	Fuzzy Logic Controller
T_{On}	Tiempo de Encendido de un transistor
T_{Off}	Tiempo de Apagado de un transistor
TD	Delay Time – Tiempo de retardo
TR	Rise Time – Tiempo de Subida
TS	Storage Time – Tiempo de Almacenamiento
TF	Fall Time – Tiempo de Caída
VG	Tensión de compuerta del transistor de potencia
IL	Corriente de la Carga
MFs	Membership Functions o Funciones de Pertenencia

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE TIPO PEM. [1].....	10
FIGURA 2.2 CURVA DE POLARIZACIÓN DE UNA PEM.[23].....	13
FIGURA 2.3 CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE LA PILA DE COMBUSTIBLE. [33].....	16
FIGURA 2.4 CURVA DE POTENCIA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE. [34]	18
FIGURA 2.5 LÓGICA DIFUSA VS LÓGICA COMÚN. [35].....	26
FIGURA 2.6 EJEMPLOS DE OPERACIONES LÓGICAS BORROSAS. [36]	27
FIGURA 2.7 EJEMPLO DE FUZZIFICACIÓN DE UNA VARIABLE. [37].....	28
FIGURA 3.1 ESQUEMA PARA IMPLEMENTACIÓN A FUTURO	32
FIGURA 3.2 ESQUEMA ELÉCTRICO GENERAL DE LA SIMULACIÓN	33
FIGURA 3.3 MODELO MATEMÁTICO DE LA PILA DE COMBUSTIBLE. [38].	39
FIGURA 3.4 CUADRO DE PARÁMETROS: PILA DE COMBUSTIBLE.....	42
FIGURA 3.5 MAGNITUD DE LOS SOBRETIROS DE TENSIÓN PRESENTES EN UNA CELDA DE COMBUSTIBLE DE ACUERDO A LA CORRIENTE DEMANDADA EN LOS ELECTRODOS. [39]	46
FIGURA 4.1 MODELO DEL EMULADOR DE CARGA EN SIMULINK.....	51
FIGURA 4.2 PARÁMETROS DEL BLOQUE MOSFET.....	52

FIGURA 4.3 PARÁMETROS DEL BLOQUE DE CARGA.....	53
FIGURA 4.4 BLOQUE DE MEDICIÓN Y CONTROL DE COMBUSTIBLE DE LA PILA.....	54
FIGURA 4.5 BLOQUE DE MEDICIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS	55
FIGURA 4.6 BLOQUE CONSTRUCTOR DE SEÑAL	56
FIGURA 4.7 BLOQUE CONTROLADOR DE COMPUERTA.....	57
FIGURA 4.8 ESTRUCTURA DEL CONTROL FUZZY	59
FIGURA 4.9 VENTANA DE VARIABLES DE ENTRADA EN EL CONTROL FUZZY	60
FIGURA 4.10 VENTANA DE VARIABLES DE SALIDA EN EL CONTROL FUZZY	60
FIGURA 4.11 CUADRO EDITOR DE REGLAS.....	61
FIGURA 4.12 CUADRO VISOR DE REGLAS	62
FIGURA 4.13 PARÁMETROS DEL CONTROL FUZZY	63
FIGURA 4.14 BLOQUE ACUMULADOR.....	63
FIGURA 4.15 PARÁMETROS DE BLOQUE MEMORY	64
FIGURA 4.16 PARÁMETROS DE BLOQUE SATURATION	65
FIGURA 4.17 BLOQUE REGULADOR PWM.....	66
FIGURA 4.18 BLOQUE DE MEDICIÓN DE LA CARGA.....	66
FIGURA 5.1 PILA PEM 3KW HORIZON H3000. [40]	68

FIGURA 5.2 TARJETA NI USB-6009. [41]	69
FIGURA 5.3 CIRCUITO DE FUERZA.....	70
FIGURA 5.4 VISTA 3D DE LA TARJETA DE CIRCUITO DE FUERZA.....	70
FIGURA 5.5 SENSOR DE EFECTO HALL. [42].....	72
FIGURA 5.6 CIRCUITO PARA MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	73
FIGURA 5.7 VISTA 3D DEL CIRCUITO IMPRESO DE MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	73
FIGURA 5.8 REÓSTATO DE 3000W. [43]	74
FIGURA 6.1 SEÑAL EN EL BLOQUE CONSTRUCTOR DE SEÑAL	77
FIGURA 6.2 RESPUESTA DE LA SEÑAL DE CORRIENTE DEL CIRCUITO..	78
FIGURA 6.3 CORRIENTE Y TENSIÓN PROMEDIO DE LA PILA.....	79
FIGURA 6.4 CURVA CARACTERÍSTICA V VS I.....	81
FIGURA 6.5 CURVA CARACTERÍSTICA P VS I.....	82
FIGURA 6.6 CURVA DE REFERENCIA DE UNA CARGA DOMICILIARIA	84
FIGURA 6.7 CURVA COMPARATIVA DE SEÑALES DE CORRIENTE	85
FIGURA 6.8 CURVA REFERENCIAL DE POTENCIA.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PILA DE COMBUSTIBLE	35
TABLA 5.1 TABLA GENERAL DE ELEMENTOS A IMPLEMENTARSE	68
TABLA 5.2 TABLA CON MATERIALES Y PRECIOS	75

INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de tecnologías de fuentes alternativas de generación de energía eléctrica se han realizado esfuerzos en una tecnología que promete ser clave en los próximos años: las Celdas de Combustible. En el desarrollo de sistemas de generación de energía eléctrica basados en Celdas de Combustible participan muchas disciplinas, como: la Electroquímica, la Ingeniería de Procesos, la Electrónica de Potencia, Ingeniería de Materiales, Ingeniería Eléctrica, entre otras. Estas disciplinas hacen uso de herramientas de simulación y emulación para el diseño de componentes y sistemas, tales como el balance de planta, estrategias de control, electrónica de potencia, entre otros elementos que componen un sistema de generación eléctrica basado en esta tecnología.

Esta Tesina presenta un emulador de escenarios de demanda de potencia eléctrica de Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico, formado por un bloque que corresponde a la pila de combustible, el cual a través de la conmutación del dispositivo electrónico de potencia Mosfet se controla el flujo de corriente que será consumida por la carga. Para la realización del control de la compuerta del transistor, se empleó el método de control Difuso

junto la técnica de modulación de ancho de pulso, teniendo como plataforma de programación a MATLAB-SIMULINK.

Para afrontar la tarea de diseño y posterior implementación física del sistema, es necesario disponer principalmente de un modelo del sistema de pila de combustible con el cual realizar simulaciones. La herramienta de programación gráfica utilizada, nos provee un modelo completo y apto para el control.

La elección de cada uno de los componentes reales se hace en base al dimensionado que se realiza de acuerdo al perfil de carga para el que se proyecta el sistema. A continuación se diseñan y construyen las distintas etapas de acondicionamiento de potencia, así como los sistemas de control encargados de garantizar los niveles de corriente requeridos.

CAPÍTULO 1

1. ANÁLISIS PRELIMINAR

1.1 Descripción del problema

La demanda de energía actual va creciendo, y el uso de los combustibles fósiles tales como el petróleo son en cierto modo limitadas. Por tal motivo el deseo de crear sistemas energéticos que permitan, con resultados más óptimos utilizar medios de energía más sostenibles. En este contexto, se presenta dos Tecnologías limpias que juntas están atrayendo al sector energético tanto público como privado: el Hidrogeno como vector de energía, el cual se puede

producir a partir de cualquier sustancia hidrogenada y las pilas de combustibles que son excelentes dispositivos de conversión de energía química en eléctrica.

El hidrogeno y las pilas de combustibles, hacen posible la denominada energía del hidrogeno, que en un futuro no muy lejano podrá ser una solución eficaz a la inminente demanda energética mundial, y a los constantes problemas climáticos que sufre el planeta. **[32]**

Las pilas de combustibles son dispositivos electroquímicos que se encargan de la conversión en corriente eléctrica la energía química de un combustible, lo mismo que hace una batería, a excepción de una diferencia, esta última solo puede suministrar energía mientras no se agoten los reactivos que se encuentran en su interior, previamente cargados; las pilas de combustibles pueden suministrar energía sin limitaciones, siempre y cuando le sea proporcionado combustible desde el exterior, normalmente hidrógeno.

En las pilas de combustibles, como resultado del proceso electroquímico, únicamente se produce electricidad, agua y calor, agentes residuales no perjudiciales para el ambiente, lo que hace su utilización una manera de ayudar a contrarrestar el impacto ambiental que producen los combustibles fósiles, mayoritariamente usados para obtener energía eléctrica.

Sin embargo, la utilización de las pilas de combustible a pesar de sus grandes ventajas frente a sus competidores homólogos no se ha generalizado, lo que obliga a investigar en nuevos usos y análisis de viabilidad para su implementación. Para ello, se hace necesario disponer de un sistema compuesto por cargas variables, cuya activación facilite el estudio de la respuesta eléctrica de la pila de combustible en diferentes escenarios de aplicación.

1.2 Justificación

Los rendimientos de una pila de combustible, esclarecen un futuro prometedor, así de esta manera se puede hablar de diferentes motivos que justifican la investigación y el desarrollo en esta tecnología. La disponibilidad cada vez menor de fuentes de energías no renovables y el impacto ambiental que han provocado tanto en su uso como en su manera de obtenerlo, en contraposición del bajo impacto provocado por este tipo de pilas de combustible, es un justificativo a favor de su fabricación.

Otro de los motivos clave para justificar su uso, es la versatilidad que presentan las pilas de combustibles en cuanto a aplicaciones estacionarias se refiere. Las pilas de combustibles pueden ser instaladas en un sinnúmero de lugares dadas sus características inherentes: operatividad sin ruido, emisión cero y requerimientos mínimos.

Por tanto, los estudios adecuados para conocer el alcance de las celdas de combustible de hidrógeno que permitan determinar las ventajas y desventajas de su implementación como un sistema de suministro de energía es la principal motivación, además del actual interés de cambiar la forma de generar electricidad a nuevas técnicas que sea más amigables con el medio ambiente, más eficientes y por ende rentables.

El presente documento está enfocado en conocer el comportamiento eléctrico en el tiempo de una pila de combustible polimérica (PEM) ante cualquier circunstancia que se presente durante su funcionamiento, en cuanto a suministro de energía eléctrica se refiere.

Se realizará un emulador de escenarios de demanda de potencia eléctrica para el estudio y caracterización de viabilidad de uso en diferentes escenarios de pilas de combustible, a través de la herramienta Simulink del software especializado en programación gráfica Matlab.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar y verificar, mediante simulación, el comportamiento de las variables eléctricas una pila polimérica, con la utilización de un emulador de perfiles de carga que funciona por medio de un transistor Mosfet de potencia.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar la pila de combustible polimérica idónea para suministrar energía eléctrica a una carga eléctrica variable y estacionaria, tipo vivienda.

- Diseñar las estrategias del controlador que cumpla con las condiciones establecidas para el correcto funcionamiento de la pila de combustible y del emulador de carga en el suministro de energía a la carga.

- Implementar y analizar mediante simulación, con la ayuda de lenguajes de programación grafica como Simulink, el emulador de perfiles de carga junto a la pila de combustible.

- Determinar los distintos bloques que forman el emulador de perfiles de carga para asegurar el cumplimiento de las especificaciones técnicas requeridas en el funcionamiento de la pila de combustible.
- Describir de manera detallada, los cambios que experimenta la respuesta eléctrica de la pila de combustible una vez controlado el flujo de corriente a través del emulador de carga, con el fin de optimizar su comportamiento y comprobar que estén regidos a las necesidades de la aplicación (escenarios: caracterización y utilización de la pila).

1.4 Resultados Esperados

Diseño funcional y sencillo del emulador de perfiles de carga que permita analizar diferentes escenarios de aplicación de las pilas de combustible como suministro de energía.

El emulador de carga debe permitir realizar estudios y análisis de como diseñar un sistema de suministro de energía lo suficientemente sustentable a una carga eléctrica variable en el cual la pila de combustible es su principal componente.

Obtener a partir del emulador de escenarios de carga, las Curvas características Tensión vs. Intensidad y Potencia vs. Intensidad de la pila de combustible polimérica.

Analizar el comportamiento de la pila en un escenario de demanda típica de una carga estacionaria.

Informe de detalle para la adquisición de los dispositivos electrónicos de potencia necesarios para la implementación real del emulador de perfiles de carga.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

Las Pilas de combustibles son dispositivos que, mediante un proceso electroquímico, pueden convertir la energía química en eléctrica. El proceso es similar al de una batería, pero con una gran diferencia, la pila permite el reabastecimiento de manera continua de los reactivos que se han consumido (no requieren recarga), es decir que se producirá electricidad a través del combustible que en este caso es el hidrogeno y el Oxígeno, fuentes externas de

energía, en contraposición del sistema limitado en cuanto al almacenamiento de energía de las baterías. Se puede salidas aún mayores en cuanto a voltaje y potencia se refiere, de acuerdo al arreglo de celdas. En una celda común el combustible gaseoso que en este caso es el hidrogeno se suministrara continuamente en el ánodo, en el cátodo se suministrara el oxidante (oxígeno), lo cual, se producirá la reacción electroquímica que dará como resultado la obtención de corriente eléctrica.

Las pilas de combustibles tipo PEM trabajan a temperaturas relativamente bajas y tienen la característica de poseer una alta densidad de potencia y la capacidad para variar rápidamente su salida al momento de atender cambios en la demanda de la misma

2.1 Funcionamiento general de la Pila de Combustible

Estimulado por un catalizador como el platino, el átomo de Hidrogeno se dividirá en un ion y un electrón, los cuales tomaran rumbos diferentes hacia el cátodo: los iones H^+ , se dirigen a través del electrolito, mientras que los electrones e^- , viajan a través de un circuito externo ocurrirá el nacimiento de una corriente que puede ser utilizada para suministrar energía a dispositivos eléctricos. En el cátodo las moléculas de oxigeno se rompen en átomos, y se mezclan con los

iones de hidrogeno y los electrones para formar con la ayuda del catalizador, moléculas de H₂O y calor. Durante el proceso de reacción electroquímica, no se emiten contaminantes que perjudiquen al ambiente.

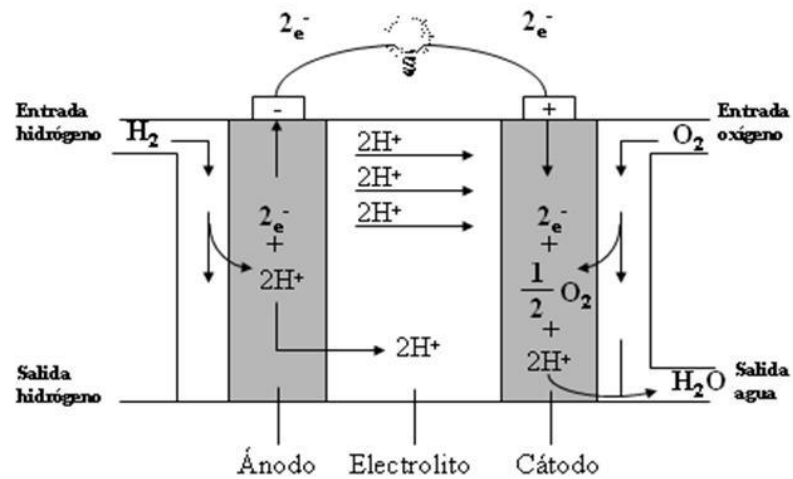


Figura 2.1 Principio de Funcionamiento de la pila de combustible tipo PEM. [1]

La energía en las pilas de combustible es generada, por una reducción de Oxígeno, como se describe en la ecuación (2.2), en el cátodo y una oxidación del hidrógeno en el ánodo, como se indica en la ecuación (2.1).



Como la reacción Redox que se presenta es de carácter exotérmico, uno de los subproductos que se han generado, además del agua y la electricidad, será el calor, como indica la ecuación (2.3).

Cada celda en las pilas de combustibles produce alrededor y de manera teórica 1.3 V. La tensión real variará en un rango de 0.6 V a 0.85 V a causa de las pérdidas generadas en su interior. Para aplicaciones de potencia será necesario apilar un número determinado de celdas para formar la pila, el cual el voltaje aumentará en proporción al número de celdas apiladas. [1], [2].

Para que la pila trabaje de manera correcta, es necesaria de un sistema de control para proporcionar aire y el combustible necesario para suministrar la potencia requerida, eliminar los subproductos y el calor producidos en las células y convertir la potencia C.C. no regulada en regulada o en C.A. de buena calidad para la inyección en la red.

El sistema de control de la pila de combustible consta de los siguientes subsistemas:

Control de caudal de los reactivos: Esta parte del proceso actúa mediante una válvula (Hidrógeno) y un compresor (Oxígeno), el cual se proporcionan de manera ágil los caudales de los reactivos necesarios, asegurando una respuesta transitoria rápida y una operación segura minimizando el consumo auxiliar.

Gestión de las variables a controlar: Es de gran utilidad que variables tales como los gases, la temperatura, la potencia y la hidratación de la membrana de la pila de combustible, puedan estar todo momento para garantizar un adecuado accionar del dispositivo.

Para ello, el sistema de control cuenta con elementos de refrigeración (circuito de agua con ventilador), de humidificación (bomba) o para el control de la temperatura que garanticen se encuentren siempre dentro de los rangos idóneos de actuación.

2.2 Curva de Polarización de la celda de combustible.

Las pérdidas en el voltaje de la celda, bajo las condiciones de entrega de corriente se determinan por la cinética de las reacciones en los electrodos, por la forma de la celda y por el electrolito. El papel preponderante de la cinética de los electrodos en el desempeño de la C.C., puede ilustrarse mejor con una curva de polarización típica (**Figura 2.2**), en ella se ven tres distintas regiones, éstas se caracterizan por tener pérdidas por activación y por corrientes internas, pérdidas óhmicas y por concentración de masa.

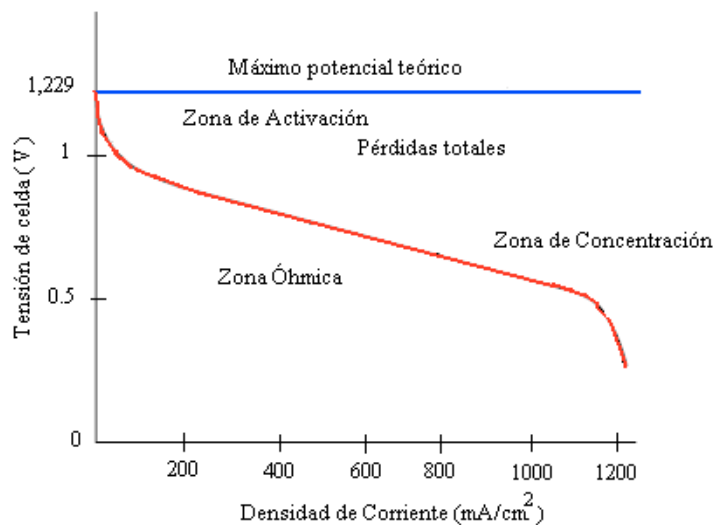


Figura 2.2 Curva de Polarización de una PEM.[23]

A una menor corriente, las pérdidas del potencial reversible de la PEM son debidas a las pérdidas por activación de las reacciones en el cátodo. Otro problema se encuentra cuando la PEM no alcanza el potencial reversible, aún a corriente cero, la densidad de corriente de intercambio en el cátodo es tan pequeña que no puede competir con las reacciones anódicas. Algunas de los motivos que juegan un papel importante son: la oxidación del platino, corrosión, oxidación de impurezas orgánicas, etc. [3, 6, 13,15, 16, 17, 18].

2.2.1 Pérdidas de Potencial por Activación

Las pérdidas por activación se dan por la baja velocidad de las reacciones que tienen lugar en la superficie de los electrodos; la reacción del cátodo por ser la

más lenta es la predominante en este tipo de pérdidas. Esta pérdida está dada por el hecho de que la transferencia de carga en cualquier proceso o material tiene una velocidad limitada; se pierde una porción de energía producida en la reacción química cuando se transfiere los electrones desde o hacia el electrodo. En las PEM, por operar en bajas temperaturas (aprox. 20-80°C), se presenta de forma importante esta irreversibilidad [3, 4, 6, 13 15].

2.2.2 Pérdidas por Corrientes internas o “Crossover”

Idealmente la membrana de electrolito no debería dejar pasar a los electrones, pero en la práctica algunos de ellos consiguen atravesarlo, con esto no fluyen por el circuito externo. Igual comportamiento tiene el hidrógeno utilizado como combustible, este tiene una enorme tendencia a filtrarse, ya que se trata de una molécula muy pequeña, por lo que éste también tiende a atravesar la membrana polimérica. De este modo, tanto los electrones como las moléculas de combustible pueden atravesar la membrana y llegar al cátodo, con lo que reaccionarían con el oxígeno allí presente sin producir ningún tipo de corriente eléctrica. La consecuencia de todo esto es que la tensión de cada célula a circuito abierto es inferior a la esperada, y ésta consumirá combustible sin estar produciendo electricidad.

2.2.3 Pérdidas de Potencial Óhmico

Las pérdidas de potencial óhmico no guardan relación directa con algún proceso químico, se deben a las caídas de voltaje generadas por los componentes resistivos de la celda. La resistencia óhmica de los electrodos presenta una parte de estas pérdidas, así como la resistencia del conductor iónico, en este caso el electrolito presenta la otra parte [3, 6, 10, 11].

2.2.4 Pérdidas de Potencial por Concentración de masa

Las pérdidas que se mencionan representan la diferencia de potencial causada por los procesos de difusión en los electrodos. En la reacción electroquímica, la caída de la concentración de los gases y el crecimiento de los productos tienen relación directa con estas pérdidas.

Esto es causado cuando un reactante se consume en el electrodo (por la reacción electroquímica), hay una pérdida de potencial debido a la insuficiente concentración de gases reactantes, es decir, se forma un gradiente de concentración. Varios procesos en el sistema pueden contribuir a la polarización de la concentración: la difusión lenta en la fase del gas en los poros del electrodo, la disolución de reactantes y productos dentro y fuera del electrolito, entre otros.

Como se ha mencionado en la introducción de este capítulo, la pila de combustible tendrá que interactuar con sistemas electrónicos y eléctricos, por lo que el modelo realizado tiene como objeto representar las magnitudes eléctricas que intervienen en su funcionamiento. Esto no impide que cada uno de los fenómenos descritos se represente en el modelo con un componente o conjunto de componentes eléctricos, tal y como se muestra en la **Figura 2.3**

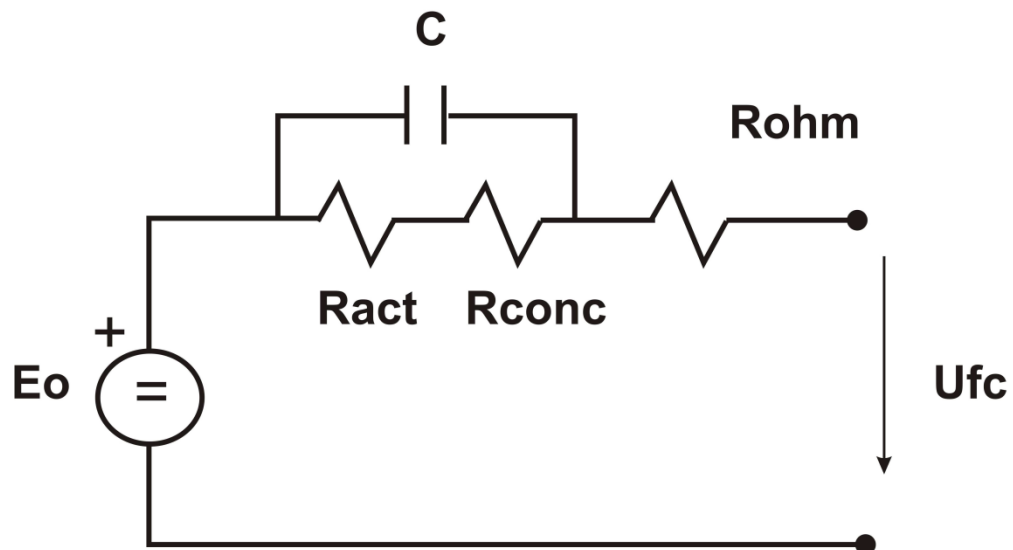


Figura 2.3 Circuito eléctrico equivalente de la Pila de Combustible. [33]

2.3. El Potencial de la Celda

La potencia eléctrica producida por una PEM es el producto de la tensión por la corriente que es capaz de entregar. A partir de la curva de polarización, es

posible obtener la correspondiente curva de potencia. La **Figura 2.4** representa la curva de potencia típica de una celda de combustible. Se puede ver que el valor máximo de potencia se alcanza cuando la tensión de la celda es 0,5 - 0,6 V, lo que corresponde con un valor alto de corriente.

En este tema, la resistencia interna de la celda es igual a la resistencia equivalente del circuito externo. Por ende, como ya se ha visto antes, la eficiencia de la celda disminuye cuando aumenta la corriente, por lo tanto, en el momento de seleccionar el punto de funcionamiento del sistema, existe un compromiso entre trabajar a alta eficiencia o a alta potencia.

Las variaciones de la temperatura y la presión de funcionamiento afectan de la misma forma a la curva de potencia y a la curva de polarización. Es decir, cuando la temperatura o la presión aumentan, la potencia producida por la celda es mayor.

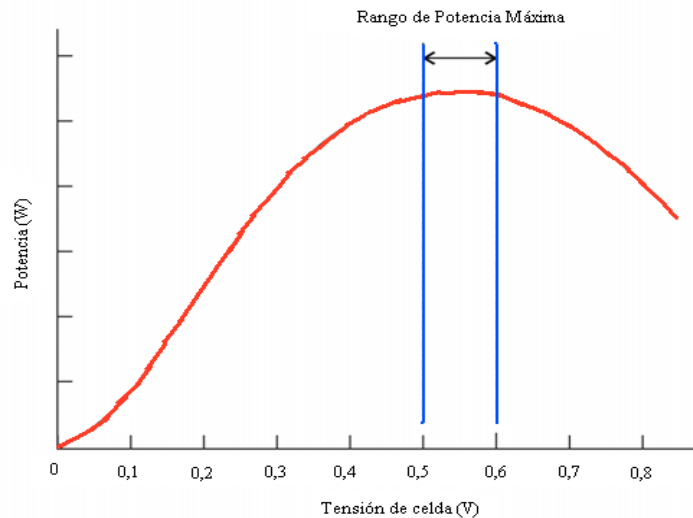


Figura 2.4 Curva de Potencia de una Celda de Combustible. [34]

2.4. Eficiencia de las Pilas de Combustible

Antes de comenzar con la explicación, se debería tomar en cuenta dos aspectos muy importantes relacionados con la eficiencia que cabe resaltar:

- La introducción de una pila de combustible en relación a su cogeneración, le permite competir con otras formas de energía y obtener altas eficiencias del orden del 80% al 85% y general energía eléctrica a nivel comercial.
- Los problemas que surgen cuando se compara la eficiencia de una pila de combustible con la de una maquina térmica.

En relación a la segunda observación, es relevante observar que la característica tensión- carga favorece a la pila de combustible al compararla con otras formas de conversión de la energía. La pila de combustible aumenta su eficiencia en condiciones de carga parcial.

Otras partes del sistema trabajan con eficiencias individuales de valor menor cuando la carga del sistema se vaya reduciendo. La mezcla de aumento de eficiencia de la pila y una menor eficiencia de componentes de segundo orden, podrán dar como resultado una eficiencia total del sistema sensiblemente de manera constante cuando la carga vaya reduciéndose.

2.5. Los Sistemas de Pilas de Combustible.

Debido diversos factores que limitan el trabajo de las pilas de combustible, un eficiente sistema en cuanto a generación de potencia eléctrica basado en pilas de combustible necesita la introducción de muchos otros componentes aparte de la propia pila, ya que, entre otros motivos, las pilas de combustible tienen una dinámica lenta y requieren una ignición inicial, producen potencia eléctrica en régimen continuo (DC) y sólo emplean determinados tipos de combustibles no convencionales.

Por este motivo, con objeto de que el sistema pueda ser puesto en marcha, funcione con combustibles convencionales, pueda alimentar cargas en corriente alterna y permita la reutilización del calor generado para aumentar la eficiencia total del sistema, a la pila de combustible se le añaden otros componentes o dispositivos, de forma que se le llama sistema pila de combustible al conjunto completo integrado por la propia pila más los dispositivos adicionales añadidos que consiguen los objetivos mencionados.

De esta forma, los sistemas de pila de combustible están conformados por un procesador de combustible, la propia pila de combustible, un sistema de acondicionamiento de potencia y ocasionalmente, dependiendo de la aplicación, un sistema de cogeneración para el aprovechamiento del calor residual. El combustible convencional (gas natural, carbón, derivados del petróleo) se pasa a través de una unidad de reformado para obtener gas rico en hidrógeno. Tal gas reacciona dentro de la pila de combustible y da como resultado electricidad.

2.6. Sistema pila de combustible para alimentar cargas estacionarias.

Un sistema de pila de combustible para proveer energía a cargas estacionarias es un ejemplo representativo de generación de potencia eléctrica distribuida. De

la curva de polarización de una celda de combustible (**Figura 2.2**) se deduce que la tensión de una celda varía de forma inversa a la corriente suministrada. En el caso de una pila de combustible, la curva de polarización es similar a la de una celda, pero escalada por el número de celdas que conforman el apilamiento, por tanto, la electrónica de acondicionamiento de potencia debe ser capaz de operar en todo el rango de potencia de la pila; en concreto, debe poder entregar la potencia nominal de la pila a la vez que regular la tensión de salida. Otra de las características que se le exigen al sistema de acondicionamiento de potencia es que la calidad de la potencia entregada sea alta menos del 5% de THD (parámetro que permite conocer la distorsión armónica de una señal). Además, debe soportar los picos de potencia típicos necesarios para el arranque de la propia carga.

2.7. Aspectos termodinámicos.

En las celdas de combustible la energía química se convierte directamente en energía eléctrica. La energía eléctrica máxima disponible para realizar trabajo está dada por el cambio de la energía libre de Gibbs en la reacción, como describe la ecuación (2.4). **[3, 4, 5, 6,7, 8, 9, 10].**

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.4)$$

Dónde:

ΔG = Cambio de Energía Libre de Gibbs

ΔH = Cambio en la entalpía de la reacción

ΔS = Cambio en la entropía de la reacción

T = Temperatura de la reacción

Con el propósito de conseguir energía del sistema, el cambio en la energía libre de Gibbs es negativo, y puede expresarse matemáticamente en la ecuación (2.5), cuando los reactantes y productos están en su estado estándar [11, 12].

$$-\Delta G^\circ = 2FE^\circ \quad (2.5)$$

Donde:

ΔG° = Cambio en la energía libre de Gibbs (con productos y reactantes en estado estándar).

E° = Potencial reversible de la celda (V).

F = Constante de Faraday (La carga presente en un mol de electrones).

La interacción de la temperatura y presión en el voltaje reversible, se muestra en la ecuación (2.6), también llamada ecuación de Nernst [3, 6, 9, 13].

$$E_{\text{NERNST}} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{\text{ref}}) + \frac{RT}{2F} \left[\ln(P_{\text{H}_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{\text{O}_2}) \right] \quad (2.6)$$

Donde:

ΔG = Cambio de la energía libre de Gibbs (J/mol).

ΔS = Cambio en la entropía (J/Kmol)

F = Constante de Faraday (96,487 C/mol).

P_{H_2} , P_{O_2} = Presión parcial de Hidrogeno y Oxigeno (atm).

R = Constante universal de los gases (8,314 J/mol K)

T = Temperatura de operación de la celda (K)

T = Temperatura de referencia (K).

Cuando en la reacción global de la C.C. se produce agua en estado gaseoso, el potencial reversible es menor (1.18 V), que cuando se produce agua en estado líquido (1.229 V), puesto que en la producción de vapor se necesita una mayor cantidad de energía, ya que la diferencia de potencial reversible descrita antes,

representa el calor latente de vaporización de agua a condiciones estándares [3, 6, 12, 10, 14].

2.8 Sistemas de Control Difuso.

2.8.1 Fundamentos de Control Difuso

El control difuso es basado en la relatividad de lo observado. Suministra una forma común de obtener una conclusión a partir de una información de entrada ambigua. Se adapta mejor al mundo real en el que vivimos, e incluso puede funcionar con expresiones cotidianas como las siguientes, del tipo “hace mucho frio”, “no es muy bajo”, “el ritmo del corazón está muy acelerado”, etc. “medio”, “bajo” y “muy bajo”. La lógica difusa puede entenderse como la posibilidad de asignar más valores de verdad o falsedad a los resultados de “falso” y “verdadero”. El objetivo de todo sistema manejador de una lógica difusa es describir los grados de los enunciados de salida en términos de los de entrada [27].

2.8.2 Conjuntos Difusos

Un conjunto clásico se define como una colección de elementos que existen dentro de un universo, cada uno de los elementos del universo pertenece o no a

un determinado conjunto. Por lo tanto, cada conjunto puede definirse completamente por una función de pertenencia, que opera sobre los elementos del universo, y que le asigna un valor de 1 si el elemento pertenece al conjunto y de 0 si no pertenece [28].

Ahora, un conjunto difuso se define de forma casi igual, con una diferencia en concepto importante: un elemento puede pertenecer parcialmente a un conjunto. De esta forma, un conjunto difuso que existe dentro del universo, se define como todos aquellos elementos que pueden ser calificados mediante un grado de pertenencia. Este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso.

Las primeras diferencias que se vuelven tan evidentes entre los conjuntos comunes y los conjuntos difusos son las siguientes:

- La función de pertenencia asociada a los conjuntos clásicos sólo pueden tener dos valores: 0 o 1, mientras que en los conjuntos difusos pueden tener cualquier valor entre 0 y 1.

Un elemento puede pertenecer (parcialmente) a un conjunto difuso y simultáneamente pertenecer (parcialmente) al complemento de dicho conjunto. Así pues los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos comunes, como se representa analíticamente en la **Figura 2.5**.

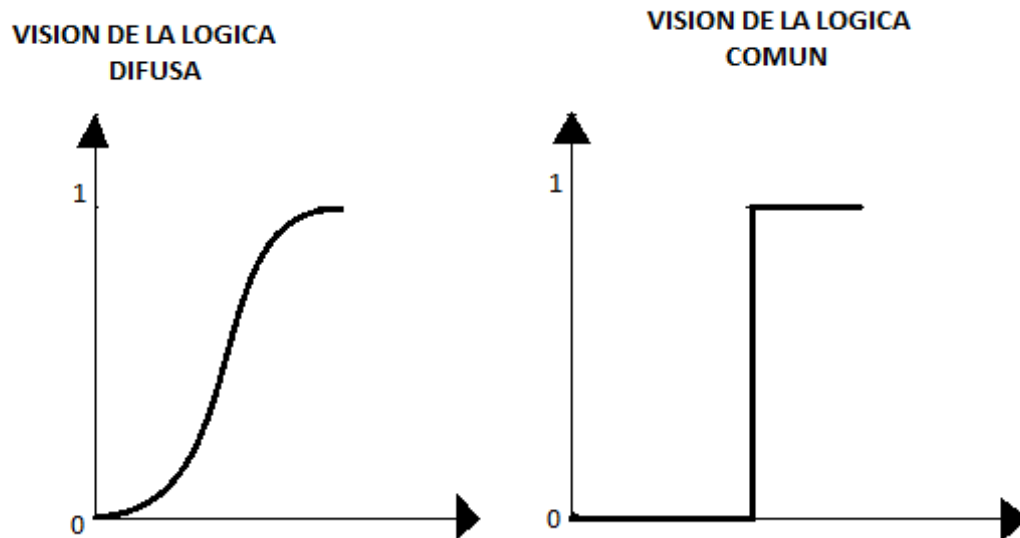


Figura 2.5 Lógica Difusa vs Lógica Común. [35]

2.8.3 Operaciones borrosas

A los subconjuntos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos.

Las operaciones lógicas se utilizan en controladores y modelos difusos, en nuestro caso y para el presente proyecto se lo utilizara para el control de corriente en la pila de combustible, son necesarias en la evaluación del antecedente de reglas (y otras etapas) que más adelante veremos.

Se definen a continuación 3 operaciones básicas a realizar sobre conjuntos, como se observa en la **Figura 2.6**, estas operaciones son: complemento, unión

e intersección. Sean las etiquetas A y B las que identifican a dos conjuntos borrosos asociados a una variable lingüística x , las operaciones se definen como:

- Complemento $\mu_{\bar{A}}(X) = 1 - \mu_A(X)$
- Unión Operador Lógico OR o de Zadeh (max)
 $\mu_{A \cup B}(X) = [\mu_A(X), \mu_B(X)]$
- Intersección. Operador Lógico AND de Zadeh (min) $\mu_{A \cap B}(X) = [\mu_A(X), \mu_B(X)]$

Hay muchas definiciones para las operaciones lógicas, existen otras definiciones que normalmente también se utilizan son:

Operador lógico AND del Producto $\mu_{A \cap B}(X) = [\mu_A(X) \times \mu_B(X)]$

Operador lógico OR de Lukasiewics $\mu_{A \cup B}(X) = [\mu_A(X) + \mu_B(X), 1]$

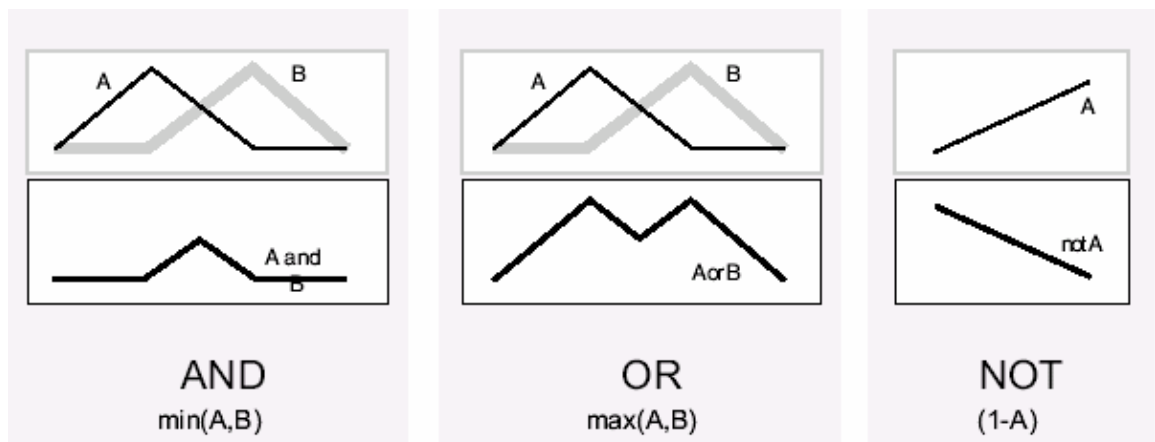


Figura 2.6 Ejemplos de Operaciones Lógicas Borrosas. [36]

2.8.4 Fuzzificación

En esta sección trataremos una parte esencial para el proyecto a realizar como lo es el control difuso el cual involucra este proceso de Fuzzificación, este tipo de trabajo se realiza en todo instante de tiempo, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa. Es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo de discurso (variable medida del proceso) en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece.

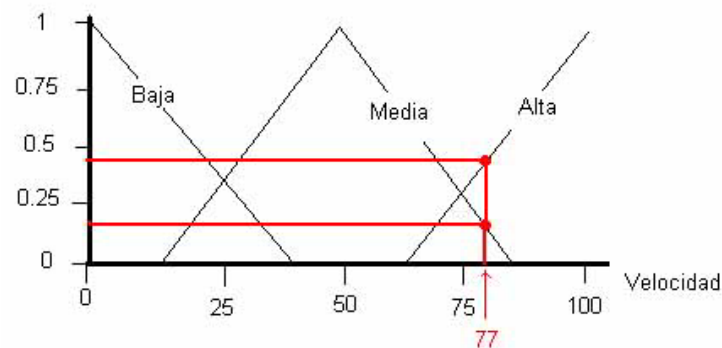


Figura 2.7 Ejemplo de Fuzzificación de una Variable. [37]

2.8.5 Reglas Difusas

Los controladores difusos utilizan normas, estas mezclan uno o más conjuntos difusos de entrada llamados **“antecedentes o premisas”** y le asocian un conjunto difuso de salida llamado **consecuente o consecuencia**. Involucran a conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa. A estas normas se les llama **reglas borrosas o difusas o Fuzzy rules**. Son afirmaciones del tipo SI-

ENTONCES. Los conjuntos difusos del antecedente se asocian mediante operaciones lógicas borrosas AND, OR, etc.

2.8.6 Reglas difusas de Mamdani

IF x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C THEN u_1 is D, u_2 is E

Donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de entrada (por ejemplo, error, derivada del error y derivada segunda del error), A, B y C son funciones de membresía de entrada (p.ej., alto, medio, bajo), u_1 y u_2 son las acciones de control (p.ej., apretura de válvulas) en sentido genérico son todavía variables lingüísticas (todavía no toman valores numéricos), D y E son las funciones de membresía de la salida, en general se emplean singleton por su facilidad computacional, y AND es un operador lógico difuso, podría ser otro. La primera parte de la sentencia “IF x_1 is A AND x_2 is B AND x_3 is C” es el antecedente y la restante es el consecuente.

2.8.7 Defusificación

La defusificación es un sistema matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene datos a partir de la información de la entrada, pero de manera difusa. Estos datos o salida difusa es generada por la etapa de inferencia difusa, esta proporciona un conjunto borroso pero el dato de salida del sistema debe ser un número real y debe ser representativo de todo el conjunto obtenido en la etapa de agregado,

es por eso que existen diferentes métodos de defusificación y arrojan resultados distintos, el “más común y ampliamente usado” es el centroide. Con el método de defusificación del centroide se convierte la salida difusa en un número real el cual es la coordenada equis (x) del centro de gravedad de tal conjunto difuso de salida.

CAPÍTULO 3

3. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO

Para implementar el equipo electrónico que controlará los flujos de energía en la carga estacionaria a fin de analizar el comportamiento de la pila de combustible polimérica a través de las curvas de las variables eléctricas, fue necesario definir una topología de potencia adecuada para la aplicación. El diseño del sistema, así como los criterios de selección de los distintos componentes y el proceso de fabricación del equipo son descritos en detalle en este capítulo.

3.1 Diseño General

Como visión del proyecto se planea a futuro realizar la implementación física del sistema de control que conforma el emulador, en la **Figura 3.1** se detallan sus partes, iniciando por una PC con el software de programación gráfica Matlab, que por medio de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) se conecta al circuito eléctrico y realiza las tareas de proveer la señal de compuerta al transistor de potencia y obtener las señales de tensiones y corrientes de la carga resistiva fija.

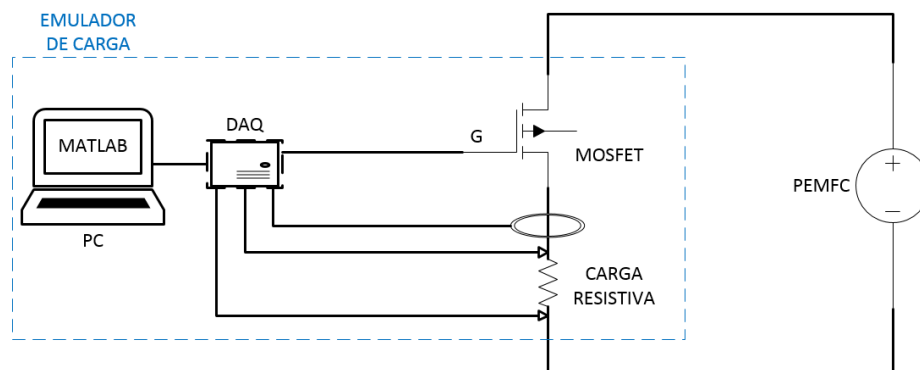


Figura 3.1 Esquema para implementación a futuro

El sistema eléctrico con el que se va a trabajar en la simulación se muestra resumido en la **Figura 3.2**, la pila de combustible es el elemento de generación eléctrica, la cual se conectará al emulador de carga conformada por un

MOSFET de potencia y una carga resistiva fija. La compuerta del transistor será manejada por un controlador que usa lógica difusa y un troceador.

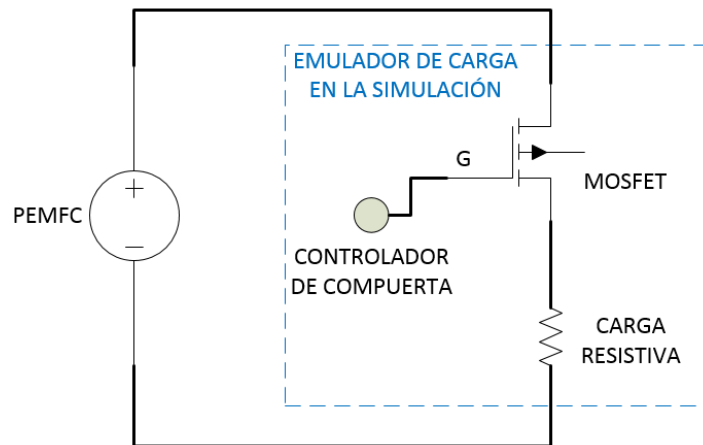


Figura 3.2 Esquema eléctrico general de la simulación

El controlador de Compuerta tomará las mediciones de tensiones y corrientes en la carga y las comparará con las señales de referencia de entrada, de esta forma usando lógica difusa y mediante modificación del ancho de pulso en la señal de la compuerta del MOSFET se troceará la corriente que consume la carga resistiva fija.

3.2 Pila de Combustible

La pila de combustible a utilizar será una fabricada por la empresa HORIZON, para aplicaciones estacionarias de 3KW. A continuación se presenta la **Tabla 3.1** la cual presenta las especificaciones técnicas del proveedor:

Tipo de pila de combustible	PEM
Número de celdas	72
Potencia nominal	3000 w
Rendimiento	43.2 v @ 70 a
Voltaje en suministro de válvula de hidrogeno	12 v
Voltaje en ventilador	12 v
Voltaje en válvula purgadora	12 v
Reactantes	Hidrogeno y aire
Temperatura externa	5 a 30 ⁰ c
Máxima temperatura de la pila	65 ⁰ c
Presión h2	0.45 – 0.55 bar
Pureza en hidrogeno	≥ 99.995 % dry h2
Humidificación	Auto humidificación
Enfriamiento	Aire (ventilador integrado)
Peso (con ventilador y cubierta)	15 kg (±200gr)
Controlador	2.5 kg (±100gr)
Dimensión	41.8cm x 35cm x 18.3 cm
Velocidad máxima de flujo a la salida	39 l/min

Tiempo de arranque	≤ 30 seg. a temperatura ambiente
Eficiencia de la pila	40 % a 43.2 v
Baja tensión de apagado	36 v
Sobre corriente de apagado	90 a
Sobre temperatura de apagado	65 ⁰ c
Fuente de alimentación externa	13v (±1v), 5a – 8a

Tabla 3.1 Especificaciones Técnicas de la Pila de Combustible

Con la elección de la tecnología de estas pilas se pierden prestaciones en cuanto a potencia (ya que las pilas PEM trabajan a potencias medias (1-10 kW) pero se consiguen mejoras en cuanto a rendimiento (eficacias superiores al 60%) y tiempo de encendido.

Un posible problema a tener en cuenta en el uso de esta tecnología es la alta calidad que requiere en el combustible. Para evitar el envenenamiento catalítico a bajas temperaturas de funcionamiento, las pilas PEM necesitan hidrogeno con alto grado de pureza.

Para el sistema que se describe en la presente tesis, se necesita una pila de combustible capaz de suministrar una potencia 3 KW. Este dispositivo operará como fuente principal de generación de energía del sistema y responderá, en la

medida de lo posible, ante variaciones en la carga. Por ello, es importante que la fiabilidad, el rendimiento y la durabilidad del dispositivo se tengan en cuenta a la hora de realizar la elección.

Ahora procederemos a realizar una explicación de los componentes del sistema para luego analizar los resultados esperados para el presente proyecto:

En primer lugar tenemos como pieza esencial a la pila de combustible, la cual nos ayudara para la generación de la energía eléctrica para alimentar a una carga.

3.2.1 Modelos Matemáticos

El bloque de pila de combustible implementa un modelo genérico parametrizado para representar más populares tipos de pilas de combustible alimentadas con hidrógeno y aire. El bloque representa dos versiones del modelo de pila: un modelo simplificado y un modelo detallado. Se puede seleccionar cualquiera de los dos modelos.

El modelo simplificado representa la pila de combustible en particular operando en condiciones nominales de temperatura y presión.

El modelo detallado representa a una pila de combustible cuando los parámetros de presiones, temperatura, composiciones y caudales de

combustible y aire varían. Estas variaciones afectan a la tensión de circuito abierto E_{oc} , como indica la ecuación (3.1), a la corriente de intercambio i_0 , como describe la ecuación (3.2) y la pendiente Tafel A , como indica la ecuación (3.3).

E_{oc} , i_0 y A son modificadas así:

$$E_{oc} = K_c E_n \quad (3.1)$$

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh} e^{\frac{-\Delta G}{RT}} \quad (3.2)$$

$$A = \frac{RT}{z\alpha F}, \quad (3.3)$$

Donde

$$R = 8.3145 \text{ J/(mol K)}$$

$$F = 96485 \text{ A s/mol}$$

z = Número de electrones moviéndose

E_n = Tensión Nernst, que es la tensión de la termodinámica de las células y depende de las temperaturas y las presiones parciales de los reactivos y productos dentro de la pila (V)

α = Coeficiente de transferencia de carga, que depende del tipo de electrodos y catalizadores utilizados

P_{H_2} = Presión parcial de hidrógeno dentro de la pila (atm)

P_{O_2} = Presión parcial de oxígeno en el interior de la pila (atm)

k = Constante de Boltzmann = 1.38×10^{-23} J/K

h = Constante de Planck = 6.626×10^{-34} J s

ΔG = Tamaño de la barrera de activación, que depende del tipo de electrodo y catalizador utilizado

T = Temperatura de operación (K)

K_c = Constante de tensión en condiciones nominales de funcionamiento

El circuito equivalente es el mismo que para el modelo simplificado, salvo que los parámetros E_{oc} , i_0 y A tienen que ser actualizadas como se muestra a continuación:

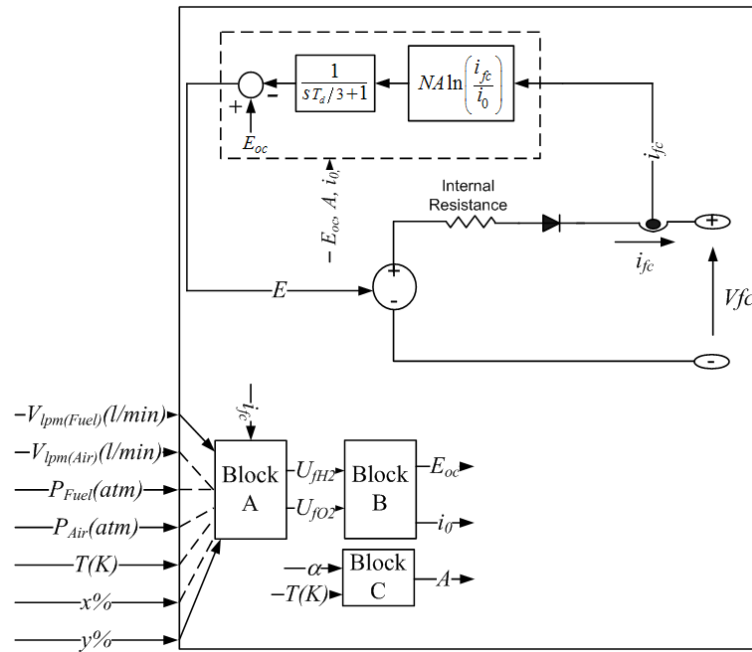


Figura 3.3 Modelo matemático de la pila de combustible. [38]

Las tasas de utilización de hidrógeno U_{fH_2} , indicado en la ecuación (2.4) y oxígeno U_{fO_2} que se describe en la ecuación (2.5) son determinados en el Bloque A de la siguiente forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{fH_2} = \frac{n_{H_2}^r}{n_{H_2}^{in}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{fuel}V_{lpm}(fuel)x\%} \quad (2.4) \\ U_{fO_2} = \frac{n_{O_2}^r}{n_{O_2}^{in}} = \frac{60000RTNi_{fc}}{2zFP_{air}V_{lpm}(air)y\%} \quad (2.5) \end{array} \right.$$

Donde

P_{fuel} = Presión absoluta de suministro de combustible (atm)

P_{air} = Presión absoluta de suministro de aire (atm)

$V_{lpm(fuel)}$ = Caudal de combustible (l/min)

$V_{lpm(air)}$ = Caudal de aire (l/min)

x = Porcentaje de hidrógeno en el combustible (%)

y = Porcentaje de oxígeno en el oxidante (%)

N = Número de celdas

Las presiones parciales de hidrógeno P_{H_2} , indicado en la ecuación (2.6), oxígeno P_{O_2} , indicado en la ecuación (2.7), P_{H_2O} vapor de agua, indicado en la ecuación (2.8) y la tensión Nernst E_n ecuación (2.9) son determinadas en el Bloque B como se muestra:

$$\begin{cases} P_{H_2} = (1 - U_{f_{H_2}}) x \% P_{fuel} & (2.6) \\ P_{H_2O} = (w + 2y \% U_{f_{O_2}}) P_{air} & (2.7) \\ P_{O_2} = (1 - U_{f_{O_2}}) y \% P_{air} & (2.8) \end{cases}$$

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}) & \text{when } T \leq 100^\circ C \\ 1.229 + (T - 298) \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln\left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) & \text{when } T > 100^\circ C \end{cases} \quad (2.9)$$

Donde

P_{H_2O} = presión parcial del vapor de agua dentro de la pila (atm)

w = Porcentaje de vapor de agua en el oxidante (%)

De las presiones parciales de los gases y la tensión de Nernst, los nuevos valores de la tensión de circuito abierto (E_{oc}) y la corriente de intercambio (i_0) se pueden calcular.

Bloque C calcula el nuevo valor de la pendiente de Tafel (A). Los parámetros α , ΔG y K_c se calculan en base a la curva de polarización en condiciones nominales de funcionamiento, junto con algunos parámetros adicionales, tales como la eficiencia bajo poder calorífico (LHV) de la pila, la composición del combustible y del aire, la presión de alimentación y temperaturas. Todos estos pueden ser fácilmente obtenidos a partir de la hoja de datos del fabricante.

3.2.2 Parámetros de la Pila Polimérica.

Los parámetros del circuito equivalente se pueden modificar en base a la curva de polarización generada a partir de la hoja de datos. A continuación en la **Figura 3.4** se especificarán las características técnicas, mediante el cuadro de dialogo del bloque de la pila.

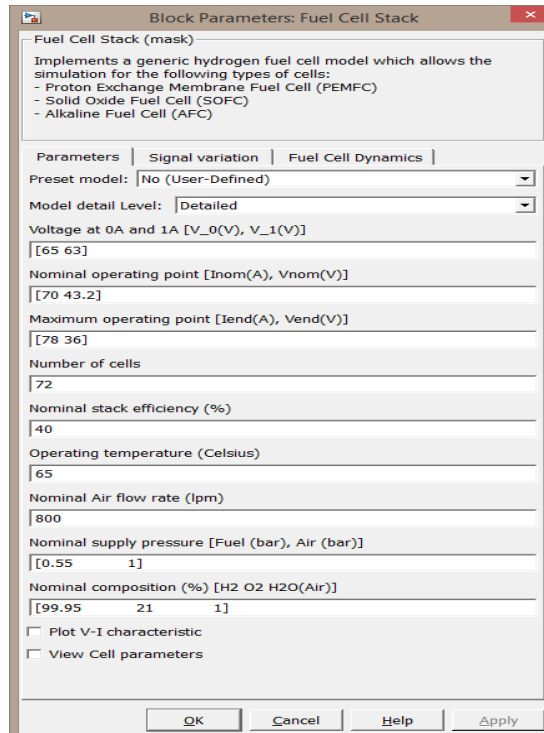


Figura 3.4 Cuadro de Parámetros: Pila de combustible

Todos los parámetros fueron ingresados según las especificaciones técnicas de la pila de combustible HORIZON.

Tensión a 0 A y 1 A

La tensión en 0 A y 1 A de la pila (Voltios). Suponiendo utilizaciones de gases nominales y constantes.

Punto de operación nominal

La corriente nominal (amperios) y la tensión nominal (voltios) de la pila. Suponiendo utilizaciones de gases nominales y constantes.

Punto de funcionamiento máximo

La corriente (amperios) y la tensión (voltios) de la pila a la máxima potencia. Suponiendo utilizaciones de gases nominales y constantes.

Número de celdas

El número de celdas en serie en la pila.

Eficiencia nominal pila

La eficiencia nominal de la pila en relación con el valor de calentamiento bajo (LHV) de agua.

Temperatura de funcionamiento

La temperatura nominal de funcionamiento en grados Celsius.

Caudal de aire nominal (AirFr)

La tasa nominal de aire de flujo (l / min).

Presión nominal de alimentación (Fuel Fr)

Presión nominal de alimentación (absoluta) de combustible y aire en bares.

Composición nominal

El porcentaje nominal de hidrógeno (x) en el combustible, el oxígeno (y) y agua (w) en el oxidante.

Curva V-I característica

Traza una figura que contiene dos gráficos. El primer gráfico representa la tensión de pila (Voltios) vs corriente (A) y el segundo gráfico representa la potencia de la pila (kW) vs actual (A).

Los parámetros de la célula

Presenta los parámetros generales de la pila.

3.3 Aspectos generales de comportamiento

En el funcionamiento de la pila existen algunos temas que se deben de tener a consideración para el diseño del sistema de control del Emulador de Carga, entre las cuales podemos citar las siguientes: mantener una tensión regulada en la carga, reafirmar un enlace entre la pila y la aplicación estacionaria, y minimizar las pérdidas. Los siguientes puntos muestran de una manera resumida, los requerimientos que se dan a conocer para la implementación de un sistema de acondicionamiento de energía en C.C [21]

3.3.1 Dinámica Lenta de la Pila

La dinámica lenta de la pila es una forma de operación, que se debe a la cinética de las reacciones electroquímicas en los electrodos, a la variación en la presión del flujo de combustible (hidrógeno) y medio oxidante (oxígeno).

Al momento de arrancar, la pila no tiene la capacidad de generar la energía de una forma óptima debido a que la velocidad de reacción es algo lenta y va en elevación hasta alcanzar un punto óptimo. Por tanto la respuesta en voltaje de la celda es lenta.

3.3.2 Variaciones de Voltaje de Salida en la Celda

La Pila de Combustible posee usual la característica de entregar un voltaje de CD variable y no regulado, lo que representa una desventaja frente a otras fuentes, y causa que la celda no sea apta para alimentar directamente a las aplicaciones, por eso es necesario implementar etapas de conversión (CD-CD, CA/CA) que cumplan la función de entregar un voltaje de salida regulado.

3.3.3 Sensibilidad a los Pulsos de la Corriente de Entrada

Los tipos de cargas que se alimentan es otro de los parámetros a tomar en cuenta en el diseño, las interfaces deben de considerar parámetros de carga críticos y cambios súbitos en corriente que deben de ser absorbidos por la interface para tener una respuesta favorable ante variaciones en demanda de corriente.

3.3.4 Los sobre picos de tensión en la Pila de Combustible

Los sobre picos de tensión son problemas que se suscitan en sistemas eléctricos y suceden cuando existe una bajón súbito en la demanda de corriente en la carga, lo que provoca que la tensión se incremente.

Cuando la demanda de carga disminuya de forma súbita en la fuente de poder, lo único que puede hacer el lazo de control es detener la acción de conmutación y entonces no será “tomada” más energía de la fuente. La energía que se almacena en el inductor del filtro de salida se descarga en el condensador de salida lo que causa un sobretiro de tensión. La magnitud del sobretiro de voltaje puede variar de acuerdo a los cambios bruscos de corriente como se observa en la **Figura 3.5**.

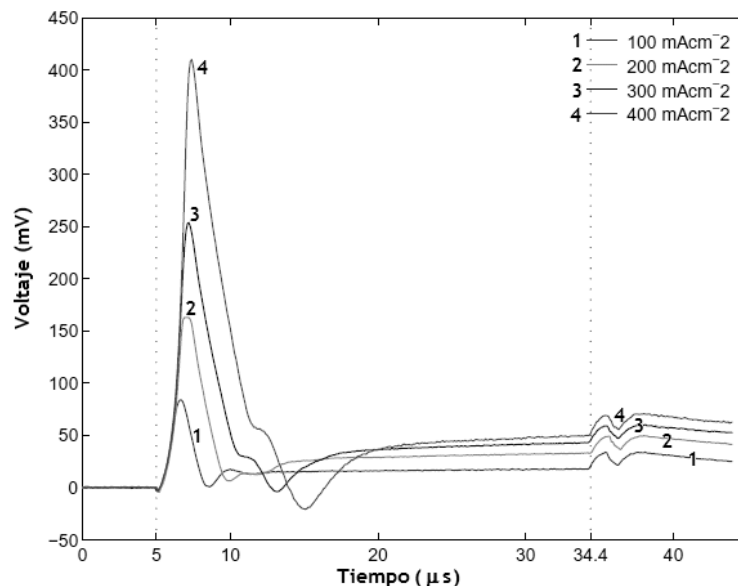


Figura 3.5 Magnitud de los sobretiros de tensión presentes en una celda de combustible de acuerdo a la corriente demandada en los electrodos. [39]

3.4 Emulador de Carga

La evolución de la electrónica de potencia ha hecho posible la aparición en los últimos años de cargas estacionarias controlados por transistores. Modificando adecuadamente la señal entrante de la tensión en la compuerta, es posible una rápida acción de regulación permitiendo la absorción de potencia reactiva según corresponda. En las instalaciones relativamente nuevas de los sistemas de aplicaciones estacionarias se están utilizando como componentes de regulación aquellos transistores de potencia, los cuales están prácticamente reemplazando a los relés. Esto se debe fundamentalmente a los beneficios que se aprecian en los costos, mantenimiento de las instalaciones y características de funcionamiento.

3.4.1 Transistor MOSFET como encargado de manejar la corriente

Para la realización del emulador de escenarios se escogió al transistor MOSFET para manejar la corriente del circuito. Se seleccionó este transistor debido a su muy alta impedancia de entrada en la compuerta, su capacidad de disipar potencias grandes y manejar corrientes elevadas.

3.4.2 Método de manejo de Compuerta

Como primera idea se tuvo de hacer operar al transistor MOSFET en su estado de conducción, usando un modelo Simscape de Simulink, variando su tensión de compuerta y de esta forma trabajar como si fuese un regulador de flujo de corriente, así tener cambios de corrientes más suaves en la carga. Pero al llevar ese modelo de MOSFET y conectarlos con los modelos SimPowerSystems de la pila polimérica, hubieron problemas de simulación entre las señales de SimPowerSystems y las de Simscape, a causa de esto se decidió usar un modelo de MOSFET de SimPowerSystems. La diferencia de este modelo es que solo permite manejar la compuerta del transistor mediante otro método que es el de troceadores, de esta forma lo que se realiza es la rápida conmutación entre los estados de corte (no conducción) y saturación (conducción), así usando un regulador de ancho de pulso (PWM) en la compuerta del transistor, se puede manejar la corriente promedio que fluye por el circuito eléctrico.

3.5 Lazo de Control con Lógica Difusa

El objetivo del controlador con lógica difusa es resolver problemas complejos de control a partir de soluciones simples o más simples que otras, a partir de la experiencia de trabajar con el proceso, convirtiéndose esta en la base de conocimiento requerida. Este tipo de controlador en ningún caso intenta

desplazar a las técnicas tradicionales de control, por ejemplo PID, se debe emplear control difuso cuando sea necesario, es decir cuando otras herramientas más simples no solucionen el problema de control de manera satisfactoria.

Para nuestro caso, el uso del controlador Difuso nos ayudara a controlar la respuesta de corriente a la salida de la Pila, desde el bloque Regulador.

El primer paso en el diseño del controlador es conocer el comportamiento del proceso a controlar, por lo tanto aquí se evalúa la necesidad de un FLC (Fuzzy Logic Controller). Contando con la base de conocimiento y con la estrategia de control, se procede al diseño del controlador.

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO Y DESARROLLO DEL PROGRAMA

En este capítulo se describe el diseño del sistema de generación energética basado en una pila de combustible y el emulador de carga que permite el estudio del comportamiento eléctrico del sistema de suministro. Además se explicará el programa realizado con todos sus bloques de subsistemas y lógica de funcionamiento.

4.1 Esquema general del sistema

En la **Figura 4.1** se encuentra el modelo en Simulink del Sistema Pila de combustible y Emulador de Carga, se puede observar el elemento generador eléctrico que es la pila y la carga resistiva fija que consume energía. Los Bloques de medición son los encargados de proveer los datos necesarios para el funcionamiento de los Bloques de control, y a la vez estos suministran la señal de compuerta al transistor de potencia MOSFET que es el componente que maneja la corriente.

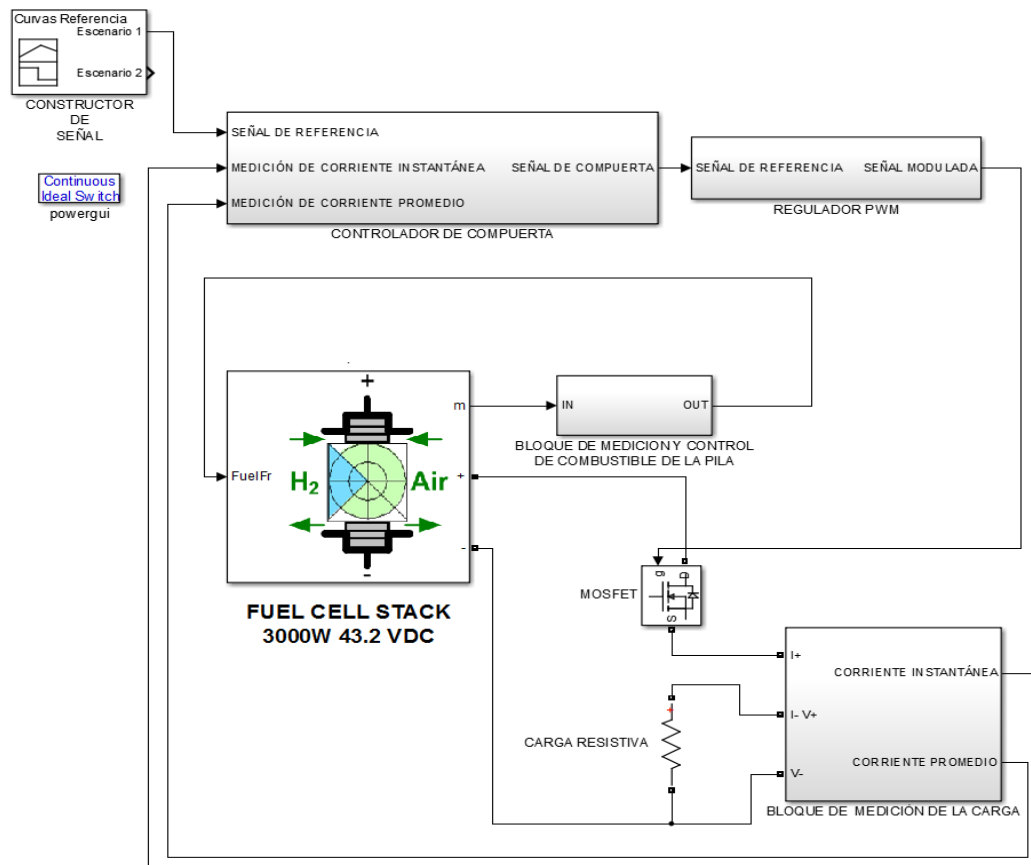


Figura 4.1 Modelo del Emulador de Carga en Simulink

4.2 Bloque Mosfet

El transistor de potencia Mosfet es el encargado de controlar la corriente que fluye por el circuito eléctrico, en la **Figura 4.2** se especifican los parámetros del bloque.

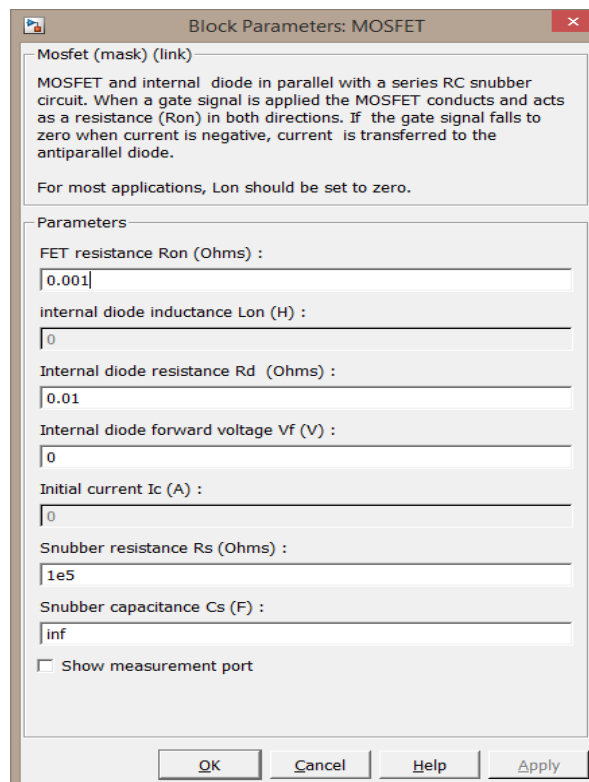


Figura 4.2 Parámetros del Bloque MOSFET

4.3 Bloque de Carga

El bloque de carga está parametrizado como una carga resistiva pura con una resistividad dada en términos de la tensión y corriente nominal de la pila.

La **Figura 4.3** nos presenta los parámetros del bloque.

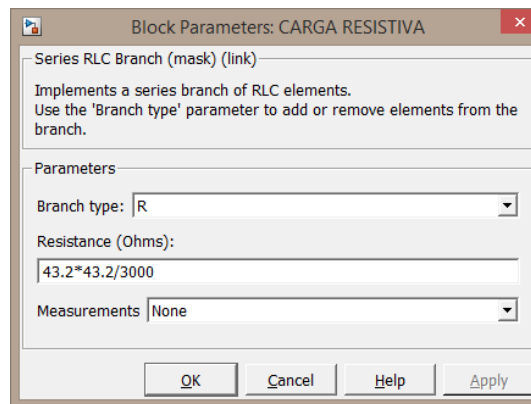


Figura 4.3 Parámetros del Bloque de Carga

4.4 Bloque medición y control de combustible de la pila

Este bloque aloja al controlador de Flujo de combustible, el cual regula la magnitud del caudal de combustible que necesita la pila, mediante la medición de la corriente generada. Además éste toma datos como son la utilización nominal y composición del hidrógeno, número de celdas de la pila, temperaturas de operación y presión de combustible. El análisis de este controlador se omitirá ya que el estudio de este proyecto no va enfocado a temas de control de la pila.

La **Figura 4.4** detalla lo que contiene el bloque de control de medición y control de combustible de la pila. Se pueden observar las gráficas de utilización de oxígeno e hidrógeno, consumo de la pila de aire y combustible, eficiencia de la pila, tensión instantánea y promedio, corriente instantánea y promedio de la pila.

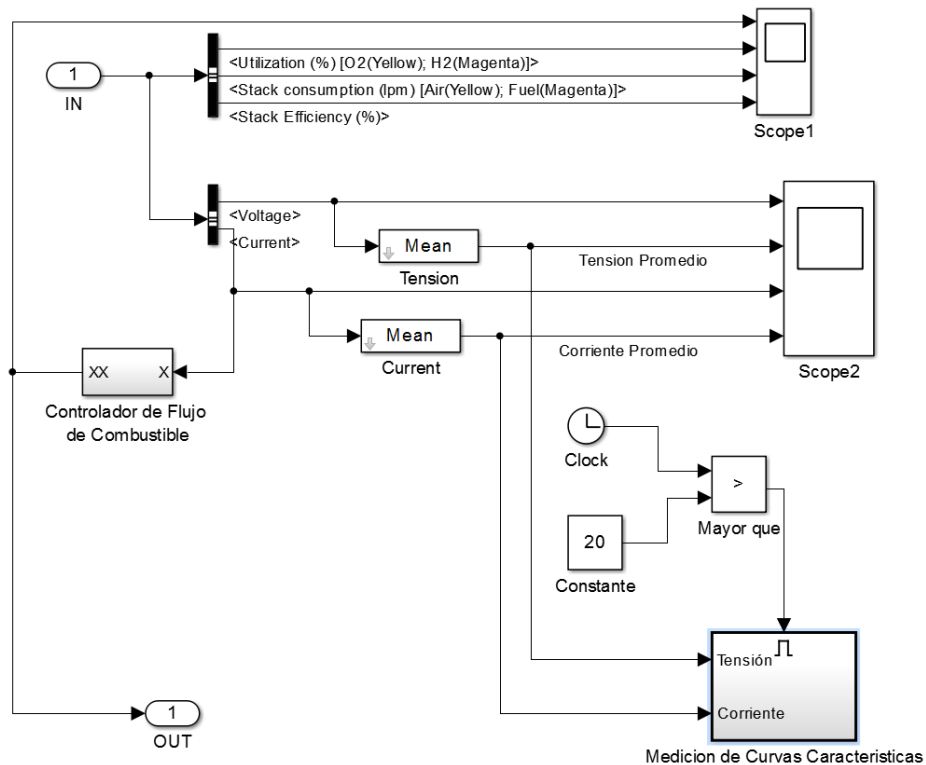


Figura 4.4 Bloque de medición y control de combustible de la pila

También se tiene un bloque de medición de Curvas Características, el cual posee un terminal de habilitación debido a que las señales de la pila demoran en estabilizarse luego de un tiempo determinado. En este caso se fija en 20 segundos para asegurar el correcto trazo de las curvas características.

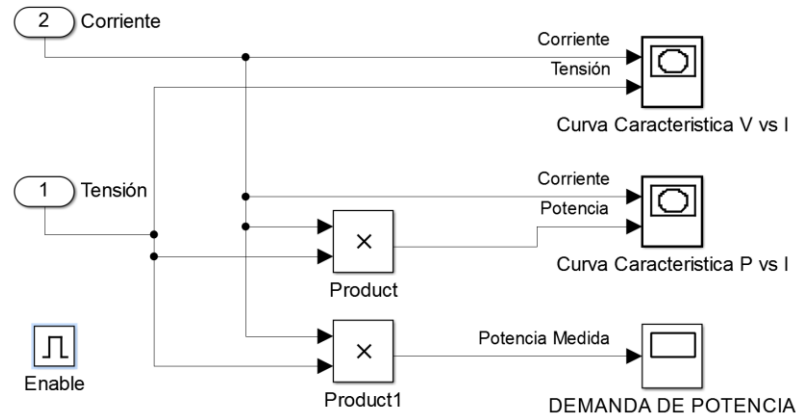


Figura 4.5 Bloque de medición de Curvas Características

En la **Figura 4.5** se observa el contenido del bloque de medición de curvas características. Este bloque toma como entrada las señales de tensión y corriente promedio generadas por la pila de combustible. Con el uso de estas señales se grafican las curvas características de Tensión vs. Corriente y Potencia vs. Corriente. Además se grafica la curva de demanda de potencia.

4.5 Bloque Constructor de Señal

En este bloque se ingresan las señales de referencia que van al controlador con lógica difusa, como se observa en la **Figura 4.6** se pueden almacenar varias señales, estas luego pueden ser seleccionadas usando el cursor en la ventana del programa.

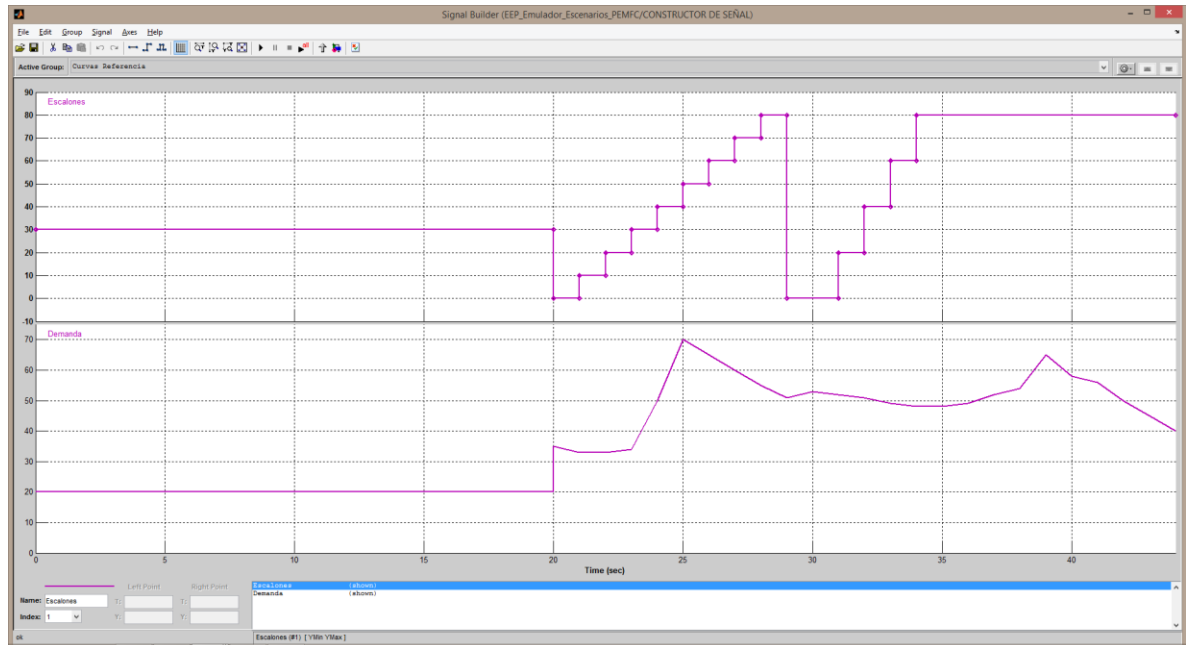


Figura 4.6 Bloque Constructor de Señal

4.6 Bloque de Controlador de Compuerta

La lógica general a usarse en el control respeta las siguientes condiciones: Si la señal medida es menor a la de referencia, entonces la salida del controlador deberá ir aumentando su magnitud. Al contrario, si la señal medida es mayor a la referencia, entonces la salida del controlador deberá ir disminuyendo su magnitud. Y cuando la señal medida sea igual a la de referencia, la salida del controlador debe de mantener una magnitud tal que el sistema continúe en ese estado. De esta forma trabaja el Control Difuso, variando progresivamente su salida dependiendo del valor de la entrada. El cambio en la señal de salida

ocurrirá luego de cada paso de tiempo de muestreo del sistema. Para un mejor análisis del funcionamiento del bloque se lo dividirá en tres subsecciones: cálculo del error, Control Difuso y acumulador. En la **Figura 4.7** se presenta el diagrama general del bloque de control.

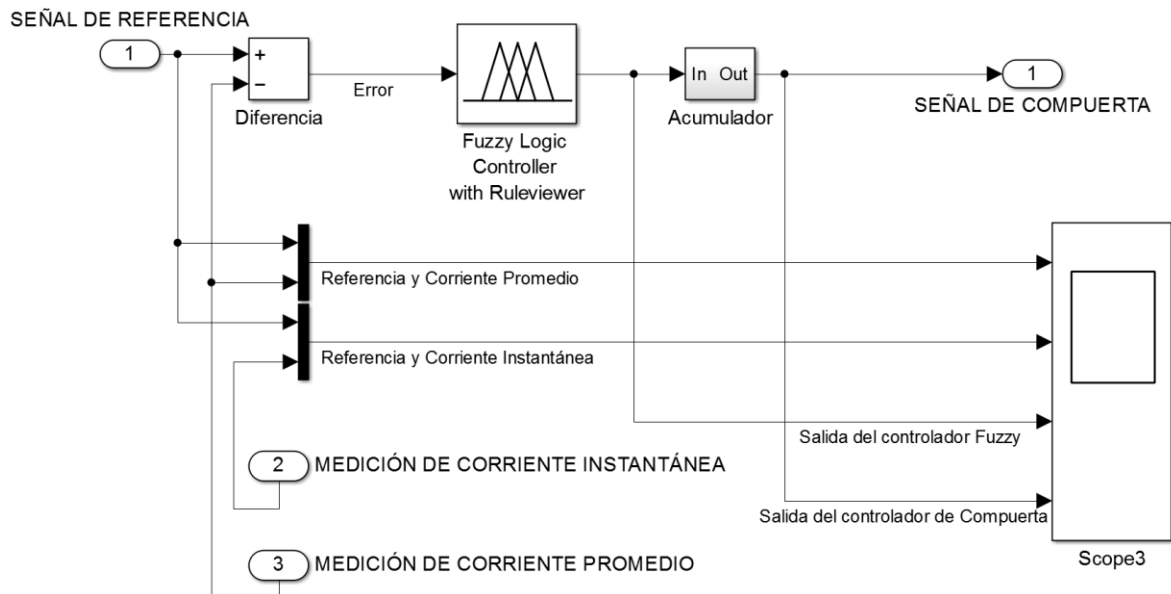


Figura 4.7 Bloque Controlador de Compuerta

4.6.1 Cálculo del Error

El bloque toma las señales de medición de corriente promedio y la señal de referencia como entradas, luego con ayuda del bloque Diferencia se calcula el error entre ellas.

4.6.2 Control Difuso

A continuación se procede a explicar los pasos para la configuración del bloque de control Difuso. En la **Figura 4.8** se detalla su estructura, de una entrada y una salida. Se define el tipo de controlador, es decir Mamdani o TS. Lo más intuitivo es Mamdani, TS es muy bueno para estructuras con optimización, las cuales no se ven en este proyecto. Para dimensionar el controlador se usa el rango de las variables de entrada y de salida, puede ser necesario pesar las entradas y la salida, principalmente para hacer un ajuste fino. La elección de las funciones de pertenencia no es tan crítica como su rango de representación, con esto se representa el conocimiento de las variables. Obviamente, en la edición de la base de reglas se representa la estrategia de control. La elección de los métodos de inferencia, agregado, defusificación y las definiciones en las operaciones entre conjuntos son un procedimiento de prueba y error evaluando el desempeño del controlador, aquí se adoptará la información presentada en la literatura.

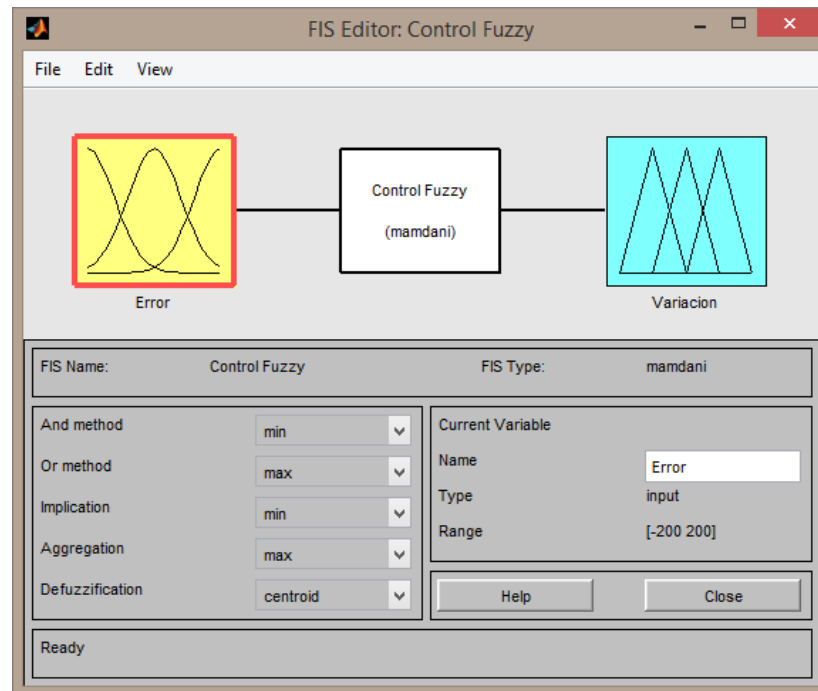


Figura 4.8 Estructura del Control Fuzzy

A continuación se muestran las **Figura 4.9** y **Figura 4.10**, ventanas donde se definen los rangos de las entradas y salidas del control Fuzzy. Así mismo se configuran los nombres, tipos y parámetros de las Membership Functions o funciones de pertenencia.

Para la definición del tipo de MFs, no existe un método o protocolos a seguir para escoger el tipo de MF óptimo para cada aplicación. Luego de realizar múltiples pruebas de tipos de MFs y combinaciones, para las variables del sistema, se escogieron MFs de tipo gaussmf, se determinaron tres variables de entrada y tres de salida.

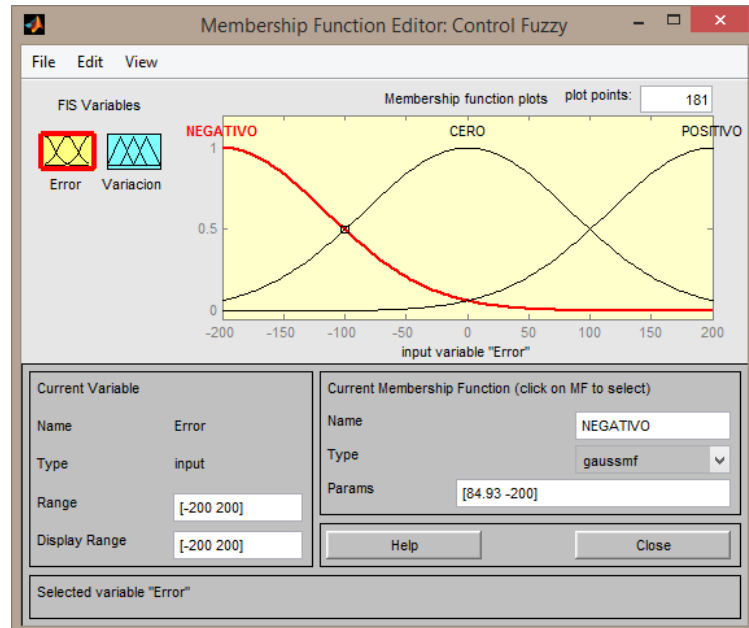


Figura 4.9 Ventana de Variables de Entrada en el Control Fuzzy

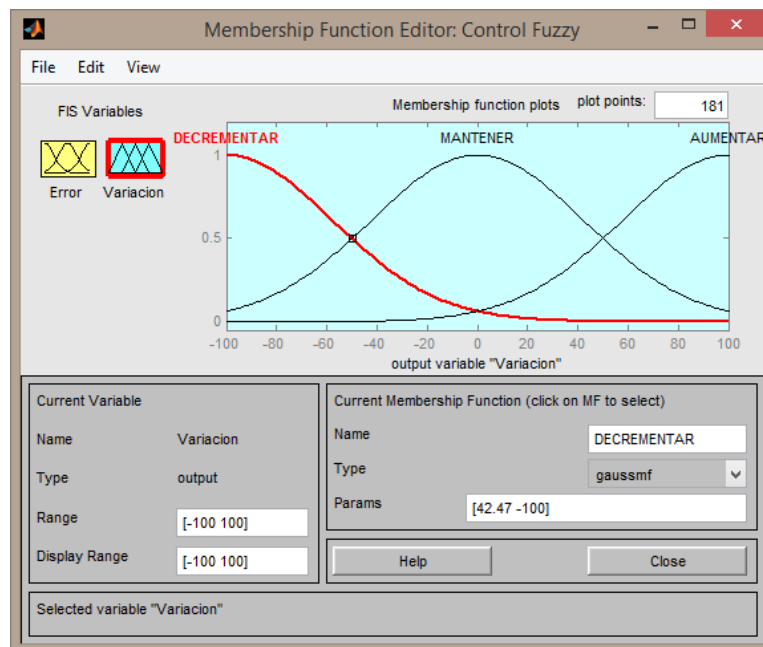


Figura 4.10 Ventana de Variables de Salida en el Control Fuzzy

Para las variables de entrada se definió el rango de $[-200,200]$ ya que éstos son los límites de la señal de error del sistema.

Para las variables de salida se definió el rango de $[-100,100]$ ya que éstos son los límites de la señal de variación deseada.

Una vez obtenidas las variables de entrada y salida, procedemos a definir las respectivas reglas de inferencia a través de la interfaz del bloque Fuzzy, como se observa en la **Figura 4.11**.

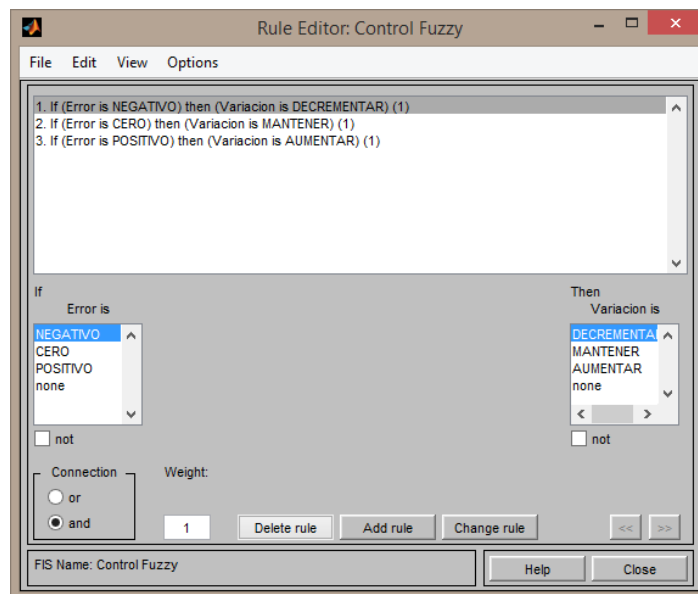


Figura 4.11 Cuadro Editor de Reglas

Para el proceso hemos creado 3 reglas, las cuales son las siguientes:

- 1. If (Error is NEGATIVO) then (Variacion is DECREMENTAR) (1)

- 2. If (Error is CERO) then (Variacion is MANTENER) (1)
- 3. If (Error is POSITIVO) then (Variacion is AUMENTAR) (1)

En este tipo de conexión hemos utilizado como operación, la conjunción and, a fin de obtener un control sencillo que satisfaga los requerimientos.

Al momento de la simulación se presenta El Visor de Reglas o Rule Viewer, el cual nos permite observar el comportamiento del controlador con lógica difusa, éste presenta la salida generada a causa de la señal de entrada recibida, como se observa en la **Figura 4.12**.

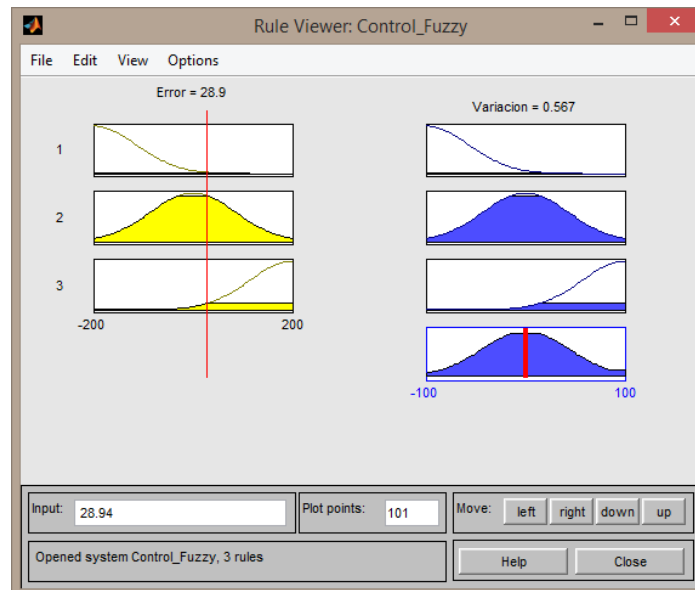


Figura 4.12 Cuadro Visor de Reglas

A continuación en la **Figura 4.13** se detallan los parámetros del bloque Fuzzy Logic Controller with RuleViewer, se define el nombre del FIS y su frecuencia de muestreo.

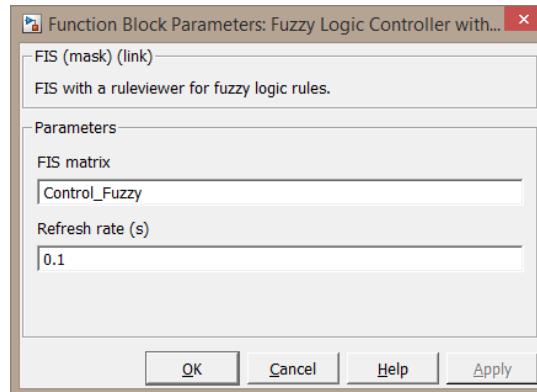


Figura 4.13 Parámetros del Control Fuzzy

4.6.3 Acumulador

Este bloque se encarga de ir sumando las salidas del controlador difuso, a continuación en la **Figura 4.14** presenta como se conforma el bloque acumulador.

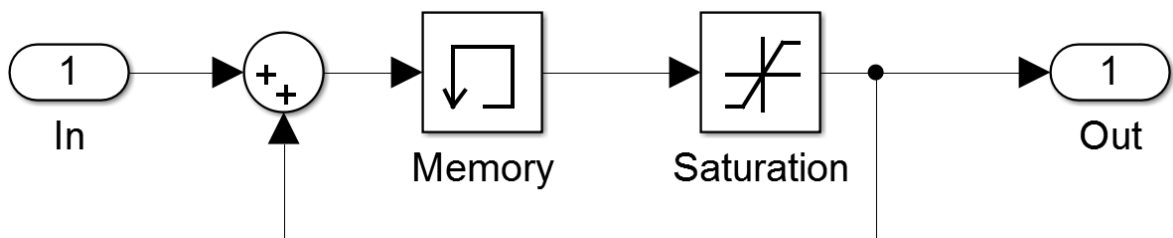


Figura 4.14 Bloque Acumulador

Al recibir la salida del controlador difuso, se procede a sumarla con un valor anterior generado y que se encuentra almacenado en el bloque Memory. Así estos valores que toma la variable Variacion se van sumando o acumulando. En la **Figura 4.15** se muestran los parámetros del bloque Memory.

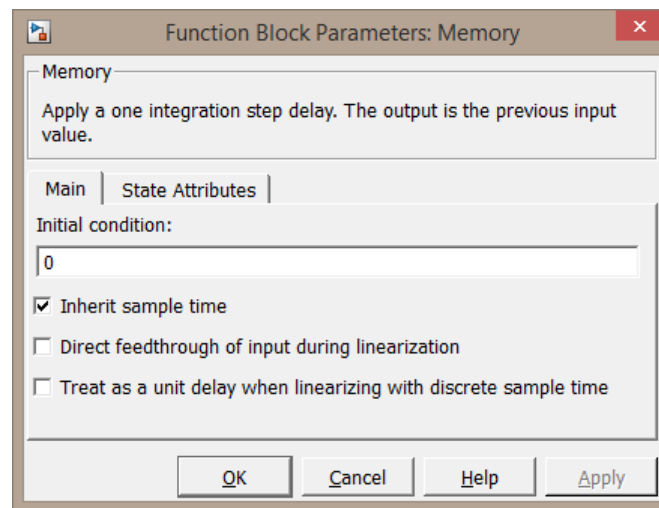


Figura 4.15 Parámetros de bloque Memory

Luego para asegurar que la salida del controlador no sea mayor a cien o menor a cero, que son los límites de los porcentajes de los ciclos de trabajo en un control PWM, se utiliza el bloque Saturation, el cual establece los límites máximos y mínimos de la señal que recibe como entrada. Estos parámetros del bloque Saturation se presentan en la **Figura 4.16**.

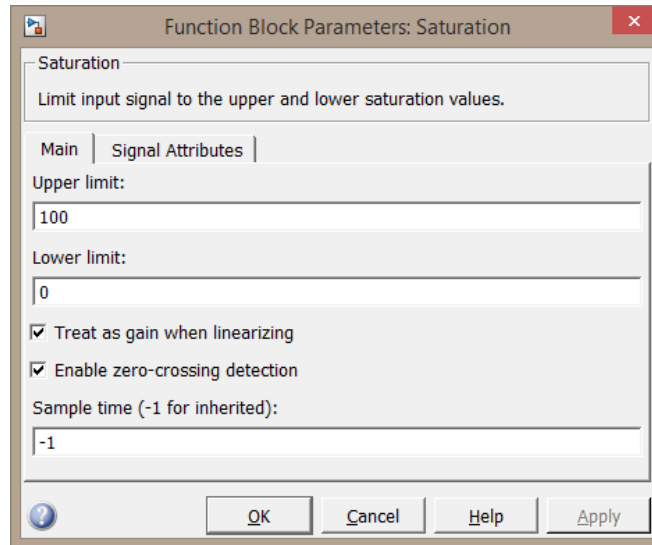


Figura 4.16 Parámetros de bloque Saturation

4.7 Bloque Regulador PWM

Este bloque de control se encarga de generar una señal de compuerta, modificando el ciclo de trabajo en el transistor MOSFET. Para realizar el control por la modificación de ancho de pulso en la compuerta del MOSFET, se comparó la señal a la salida del Controlador de Compuerta con una señal de tren tipo diente de sierra. Así solo cuando la señal de referencia sea mayor la señal diente de sierra se obtendrá un verdadero lógico, de esta forma se traduce la señal del Controlador de compuerta que está en un rango de cero a cien, a un porcentaje del ciclo de trabajo del MOSFET.

En la **Figura 4.17** se presenta el bloque Regulador PWM.

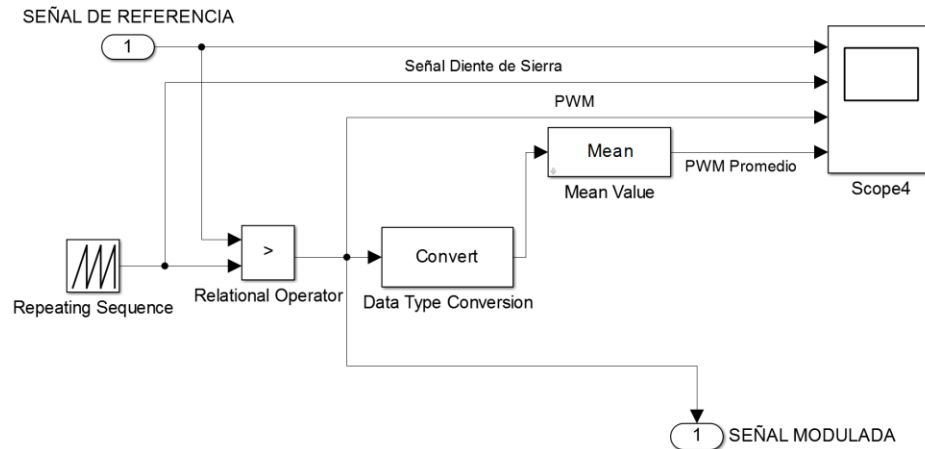


Figura 4.17 Bloque Regulador PWM

4.8 Bloque de medición de la Carga

La siguiente **Figura 4.18** muestra el bloque de medición de Carga, aquí se realizan las mediciones de tensiones y corrientes de la carga resistiva, realizando las respectivas operaciones para el cálculo de los valores promedios.

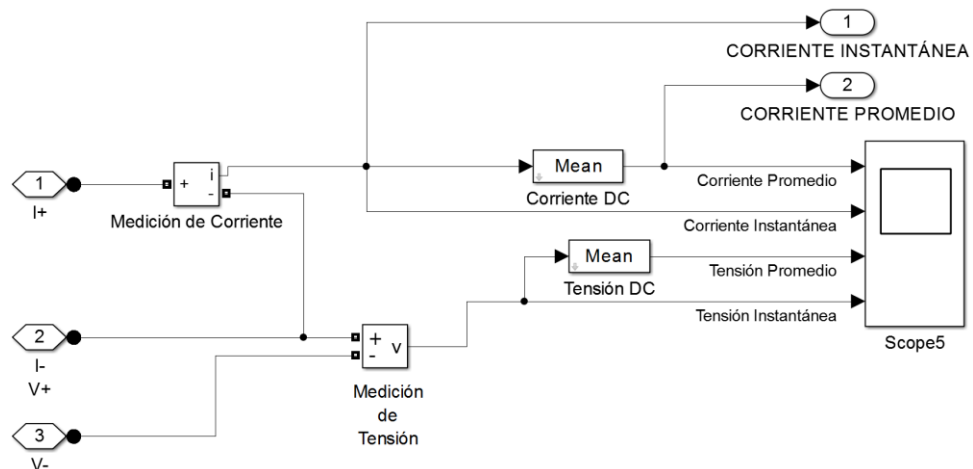


Figura 4.18 Bloque de Medición de la Carga

CAPÍTULO 5

5. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL EMULADOR

Como se había indicado en el capítulo 3, a futuro se planea realizar la implementación física de este trabajo, por tanto se describen los diferentes dispositivos que se deben considerar para su correcta implementación.

5.1 Lista general de elementos

En la **Tabla 5.1** se indica la lista general de elementos del emulador de carga a implementarse, que serán detallados en los próximos subcapítulos.

Emulador de Escenarios
Pila PEM 3KW HORIZON H3000
Tarjeta de Adquisición de datos NI USB-6008
Tarjeta de circuito de fuerza
Tarjeta de medición y acondicionamiento
Carga Resistiva

Tabla 5.1 Tabla General de elementos a implementarse

5.2 Pila PEM

Como elemento a analizar se tiene a la pila polimérica, el trabajo se lo va a realizar utilizando una pila de 3KW fabricada por la empresa HORIZON, el modelo es H3000. La **Figura 5.1** presenta a la pila de combustible.



Figura 5.1 Pila PEM 3KW HORIZON H3000. [40]

5.3 Tarjeta de Adquisición de Datos

Para la interfaz entre el PC y el circuito eléctrico se recomienda la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 fabricada por National Instruments. La **Figura 5.2** presenta la tarjeta.



Figura 5.2 Tarjeta NI USB-6009. [41]

A continuación se detallan algunas características técnicas de la NI USB-6009:

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s)
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s)
- 12 E/S digitales
- contador de 32 bits

5.4 Tarjeta de circuito de fuerza

La **Figura 5.3** muestra el circuito eléctrico de fuerza del Emulador de Escenarios y en la **Figura 5.4** se observa la vista en 3D del circuito impreso, este comprende principalmente al Mosfet de potencia con su respectivo disipador de

calor, los bloques terminales para las conexiones de la pila polimérica, la carga, la tierra, la señal de compuerta y un fusible para la protección por sobre corriente de los componentes.

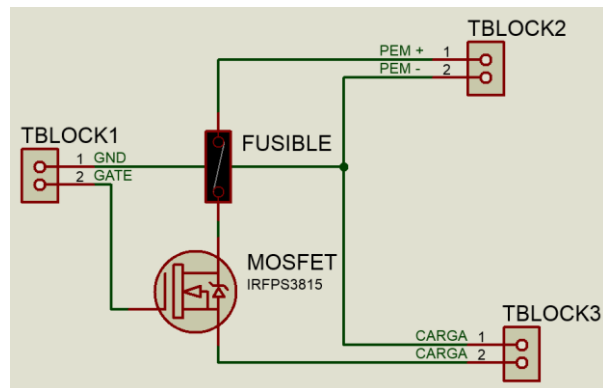


Figura 5.3 Circuito de fuerza



Figura 5.4 Vista 3D de la tarjeta de circuito de fuerza

5.5 Tarjeta de medición y acondicionamiento

Para cerrar el lazo de control entre el circuito de fuerza y la DAQ se necesita acondicionar y manipular las señales de entrada-salida de tal forma que se pueda utilizar todos los elementos en conjunto.

A continuación se detallan las principales funciones del circuito de medición y acondicionamiento de señales:

- Se aísla la salida de la DAQ que se encarga de manejar la señal de compuerta del Mosfet, el cual se encuentra en el circuito eléctrico de fuerza, por medio de un opto-acoplador 4N35.
- Las mediciones de tensión se las manipula, reduciendo su magnitud, por medio de un divisor de tensión, asegurando que hayan máximo 5 voltios en las entradas en la DAQ.
- La medición de la corriente del circuito eléctrico de fuerza se la realiza por medio de un sensor efecto Hall. Se hace pasar a través del sensor un conductor que sale de la pila polimérica y se va a conectar al circuito impreso de fuerza, de esta manera el dispositivo transforma proporcionalmente la corriente sensada en tensión. El sensor a utilizarse es de 100A a 4V, así que aproximadamente este sensor va a inducir entre sus terminales 0.04V por cada amperio que pase.

La **Figura 5.5** muestra al sensor de corriente efecto Hall, con sus terminales y el indicativo de dirección de corriente a sensar.



Figura 5.5 Sensor de efecto Hall. [42]

- Se utilizan operadores operacionales como seguidores de tensión para aprovechar sus altas impedancias a la entrada y su baja impedancia en la salida, de esta forma se eliminan efectos de carga.

En la **Figura 5.6** se observa el circuito eléctrico de medición y acondicionamiento. Y en la **Figura 5.7** muestra la vista de la implementación del circuito de medición y acondicionamiento de señales, nótese que solo se dejaron terminales espadas para la conexión del sensor efecto Hall, ya que no se disponía del modelo de uno de estos sensores en el software de impresión de circuitos impresos utilizado.

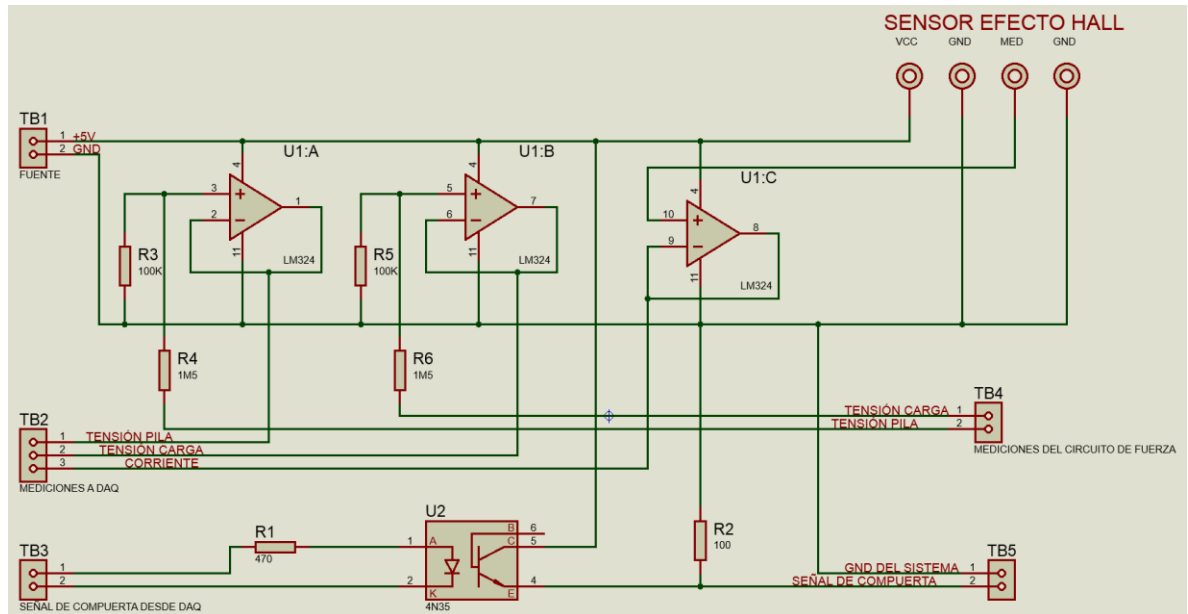


Figura 5.6 Circuito para medición y acondicionamiento de señales

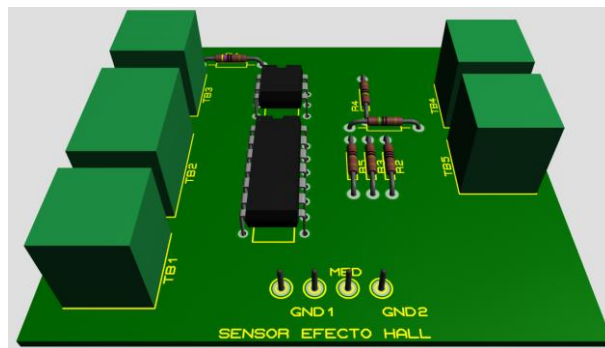


Figura 5.7 Vista 3D del circuito impreso de medición y acondicionamiento de señales

5.6 Carga

Como elemento que va a consumir energía, se planea utilizar una carga resistiva fija, la **Figura 5.8** muestra un modelo de reóstato, el cual puede ser calibrado con el valor de resistencia deseado.



Figura 5.8 Reóstato de 3000W. [43]

5.7 Lista detallada y precios de materiales

En la **Tabla 5.2** se detallan todos los elementos necesarios para implementar el emulador de escenarios para una pila polimérica.

Emulador de Escenarios			
Elemento	Cantidad[u]	PU[\$]	PT[\$]
PILA HORIZON H3000	1	1.00	4500.00
Tarjeta NI USB-6009	1	1.00	370.00

Reóstato 3000W	1	1.00	750.00
MOSFET IRFPS3815	1	15.00	15.00
Disipador de calor Mosfet	1	5.00	5.00
Fusible 80 A	1	5.00	5.00
Base Fusible	1	1.00	3.00
Bloque terminal x2	7	1.50	4.20
Circuito Impreso Fuerza	1	20.00	20.00
CI LM324	1	0.80	0.80
CI Opto acoplador 4N35	1	2.00	2.00
Resistencias	6	0.05	0.30
Bloque terminal x3	1	4.50	4.50
Espadines	4	0.10	0.40
Circuito Impreso Medición y acondicionamiento	1	8.00	8.00
Sensor efecto Hall 100A/4V +-15V	1	20.00	20.00
TOTAL			\$5708.20

Tabla 5.2 Tabla con materiales y precios

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A lo largo de este capítulo se revisarán los datos obtenidos de las simulaciones realizadas con ayuda de la herramienta SIMULINK del programa MATLAB, estas simulaciones servirán para conocer el comportamiento de las pilas de combustible poliméricas en distintos escenarios de demanda de carga. Usando el controlador de compuerta del Mosfet se conseguirá manejar la corriente promedio que fluirá a través del circuito eléctrico, de esta forma se obtendrán las curvas características de la pila y se validará el emulador de carga.

6.1 Escenario 1: Caracterización de una pila PEMFC

Para obtener las curvas características de la pila de membrana polimérica ingresamos al bloque constructor de señal una referencia como muestra la **Figura 6.1**, de esta forma el controlador manejará la compuerta del transistor de potencia Mosfet y éste a la vez conmutará para que la corriente del circuito se comporte igual a la señal de referencia ingresada.

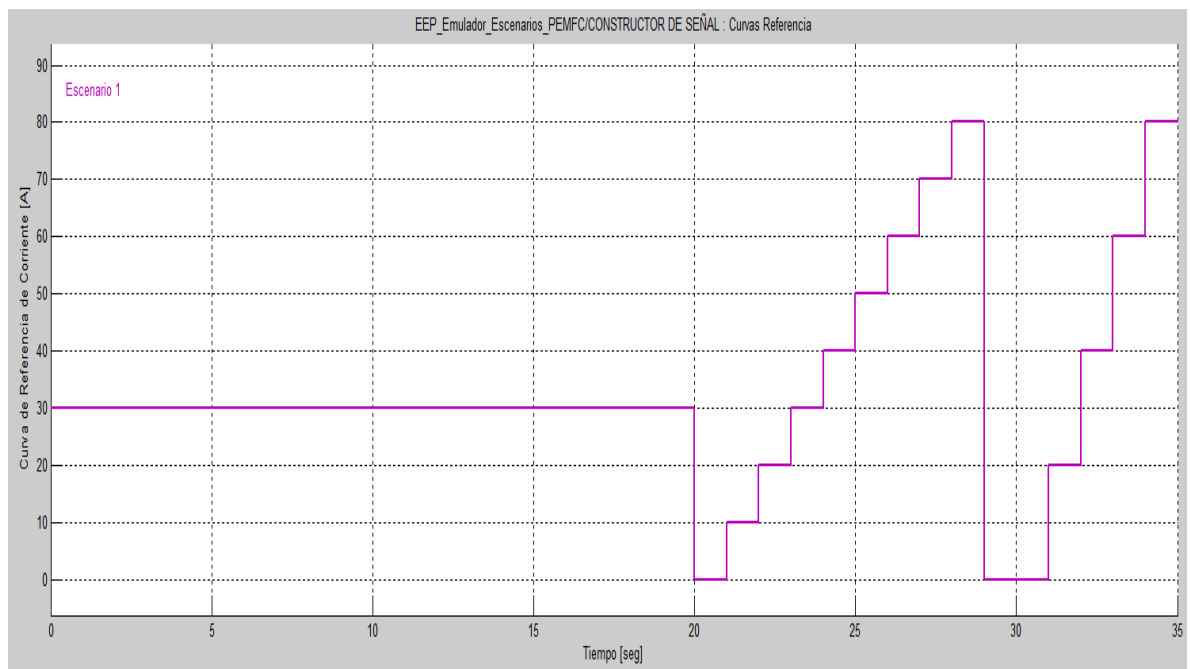


Figura 6.1 Señal en el bloque constructor de señal

Al comparar las señales de corriente referencia y la obtenida, ver **Figura 6.2**, nos podemos dar cuenta que la pila se toma aproximadamente 16 segundos en

estabilizarse, es por esto que la señal de referencia se la deja fija durante un tiempo mayor al de estabilización, luego de que haya pasado este tiempo, se empiezan a variar los valores de referencia de la corriente.

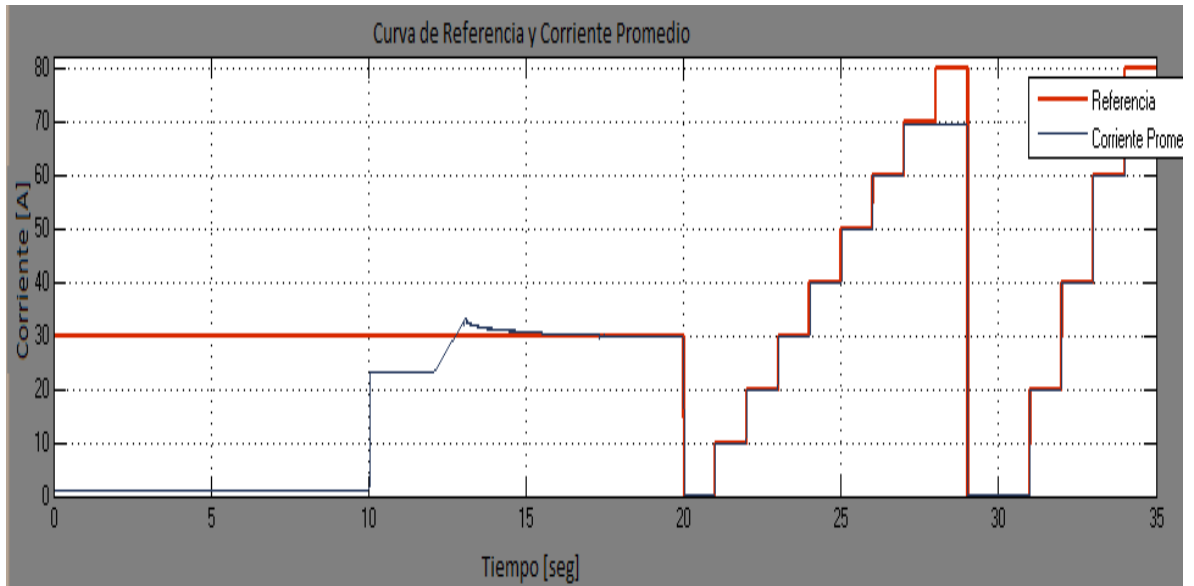


Figura 6.2 Respuesta de la señal de corriente del circuito

Luego de que corriente de la pila se estabilizó, la señal de referencia de corriente se varió de cero a ochenta, en pasos de diez y veinte amperios. Se puede observar que la corriente se eleva hasta setenta amperios debido a que la carga resistiva que se está utilizando consume máximo esa corriente, así que no puede seguir a la señal de referencia hasta los ochenta amperios.

En el **Figura 6.3** podemos observar el comportamiento de la corriente y el tensión promedio que fluye por el circuito, cuando la corriente es cero, la tensión se eleva hasta su máximo en sesenta y cinco voltios, también podemos ver que mientras se exige más corriente a la pila, la tensión de ésta va disminuyendo. Con estas gráficas se comprueba que a corriente nominal, se generan en los terminales de la pila cuarenta y tres voltios nominales.

Podemos observar que las señales presentan un comportamiento estable en todo momento luego de haber pasado el tiempo de estabilización de la pila.

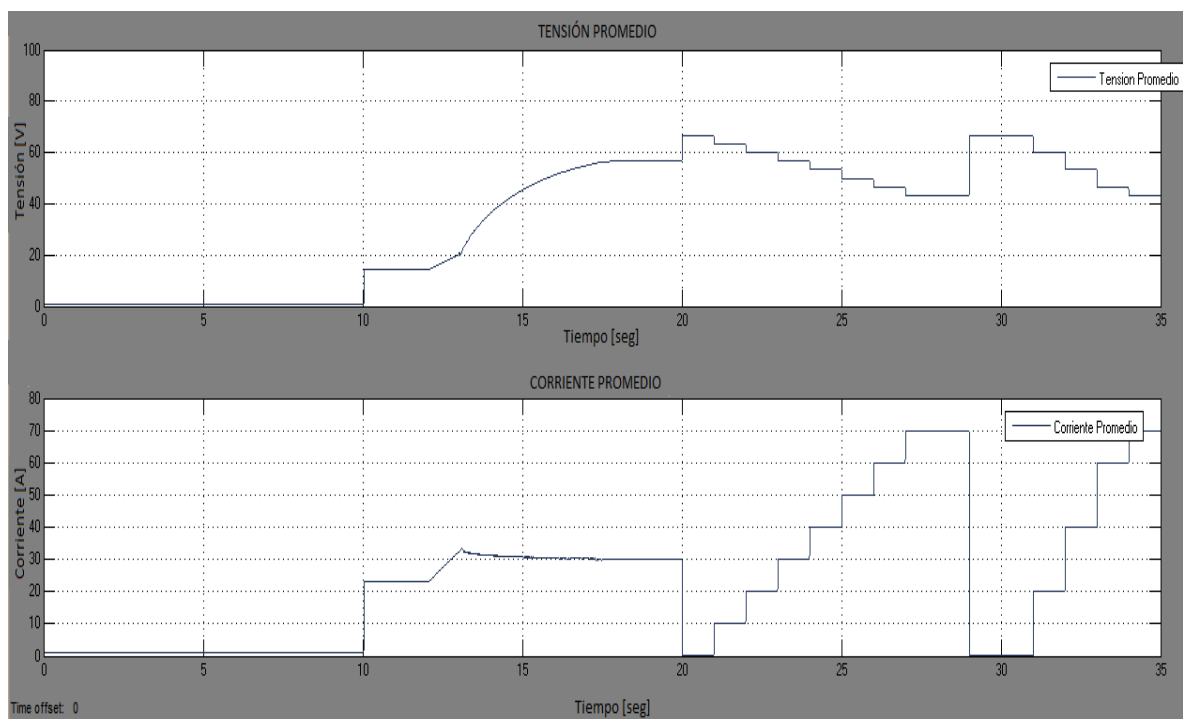


Figura 6.3 Corriente y Tensión Promedio de la Pila

6.1.1 Curva característica V. vs. I.

Luego de haber verificado el comportamiento de la pila con los gráficos anteriores, podemos observar la curva característica de Tensión contra Corriente en el **Figura 6.4**, que nos ayudará a comprobar las características de la pila en varios casos, como por ejemplo condiciones iniciales, nominales y finales.

Como observamos, el modelo de Simulink presenta un comportamiento prácticamente lineal. Al usarse un controlador de compuerta para trocear la corriente del circuito, la corriente varía de cero al máximo valor y dependiendo del ciclo de trabajo del troceo varía la corriente promedio, así podemos ver que mientras se exige más corriente a la pila, la tensión de ésta va disminuyendo.

La curva respeta las condiciones iniciales de tensión a corriente nula, el punto de operación nominal así mismo como la corriente y tensión máxima de trabajo.

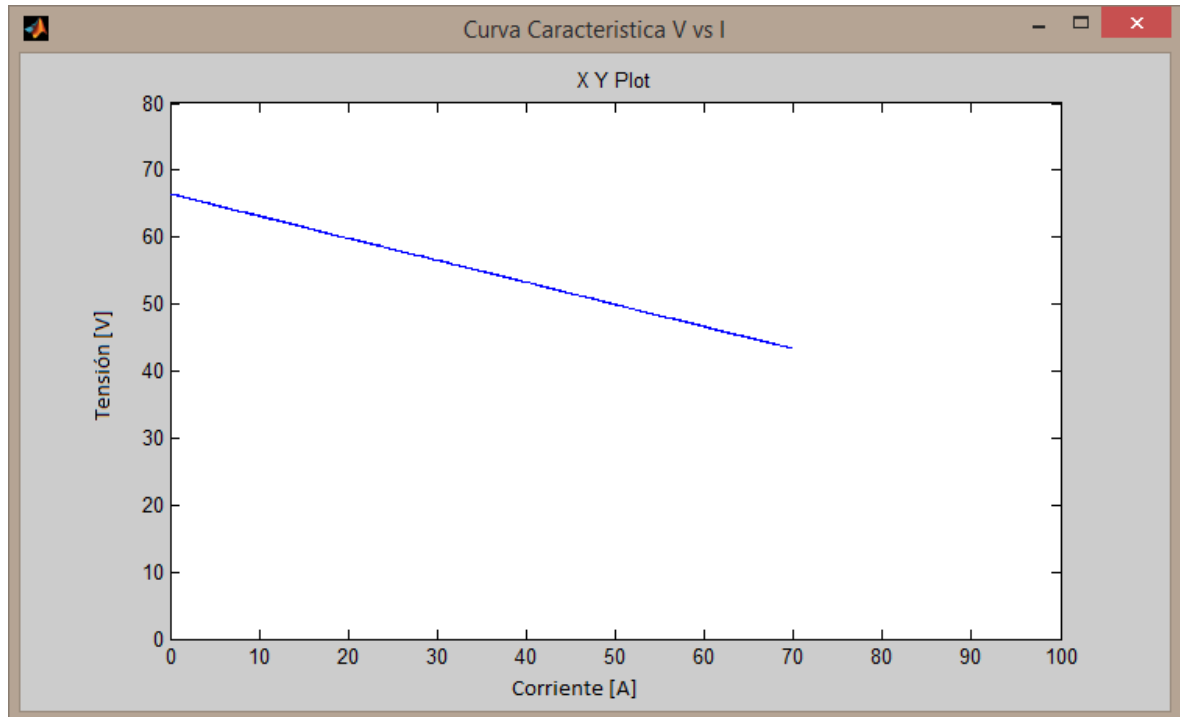


Figura 6.4 Curva Característica V vs I

6.1.2 Curva característica P. vs. I.

En la **figura 6.5** se muestra el comportamiento potencia contra corriente generada por la pila. Las curvas halladas son típicas del comportamiento de una celda de combustible. Podemos observar que a la corriente nominal de setenta amperios se genera la máxima potencia de la pila polimérica.

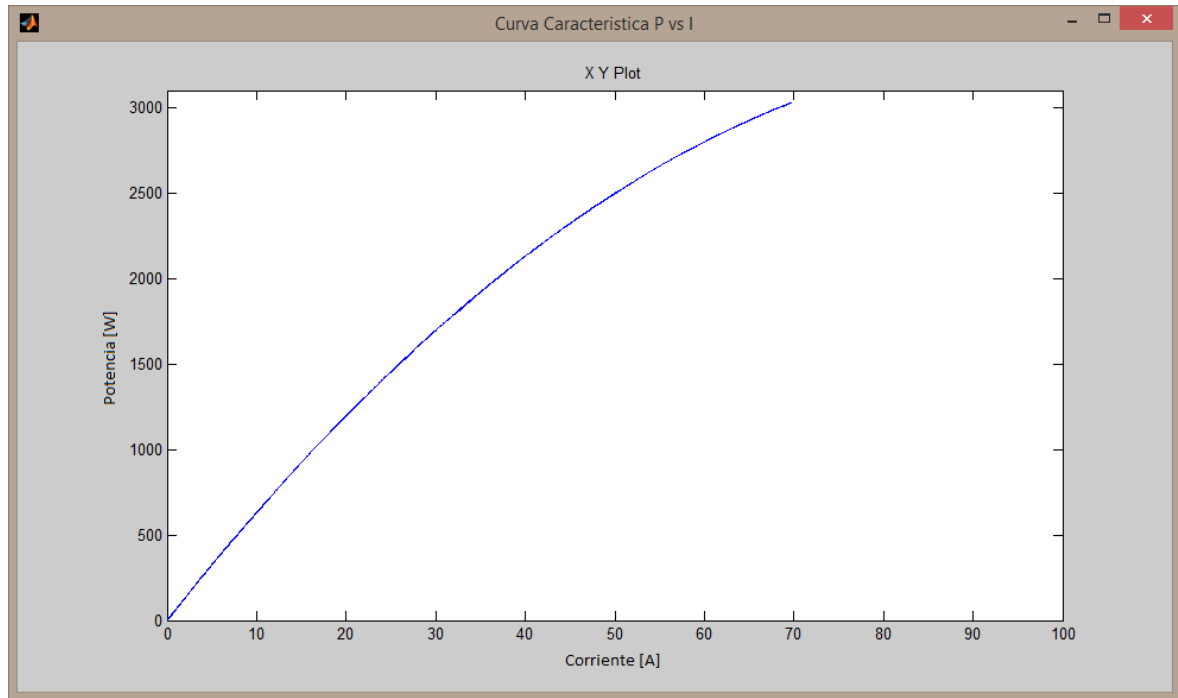


Figura 6.5 Curva Característica P vs I

6.2 Escenario 2: Curva de Demanda de Carga Típica

Estacionaria.

La siguiente parte del proyecto es la obtención de la demanda de potencia eléctrica que se consume en la carga (aplicación estacionaria), y su estudio de viabilidad para proyectos subsiguientes.

A continuación, por medio del controlador de compuerta, se emulará a una carga típica domiciliar de una ciudad y obtendremos su respectiva curva de demanda.

Para empezar con la emulación, el primer paso que se debe tener en cuenta es el perfil de carga, para el que se van a dimensionar cada uno de los componentes que integran el sistema completo. Por ende, la generación de potencia que se va a considerar para la pila de combustible es la siguiente:

1. La potencia máxima de la pila de combustible PFC_{max} debe ser mayor que el valor medio de la potencia demandada en el intervalo de tiempo considerado ($t = 24$ horas).
2. La potencia mínima de la pila de combustible PFC_{min} , de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes, por las bajas eficiencias que tienen para valores muy bajos de potencia, debe ser inferior al valor mínimo de la potencia demandada P_{min} .
3. Para una potencia a suministrar dada, cuanto más se cubra con la pila de combustible menor será el banco de baterías necesario. Sin embargo, es inevitable un justo compromiso, ya que el coste de la pila es mucho más elevado.

En la ventana del bloque Signal Builder ingresamos los datos de la curva de referencia como se muestra en la **Figura 6.6**, dando su respectivo tiempo de estabilización a la pila,

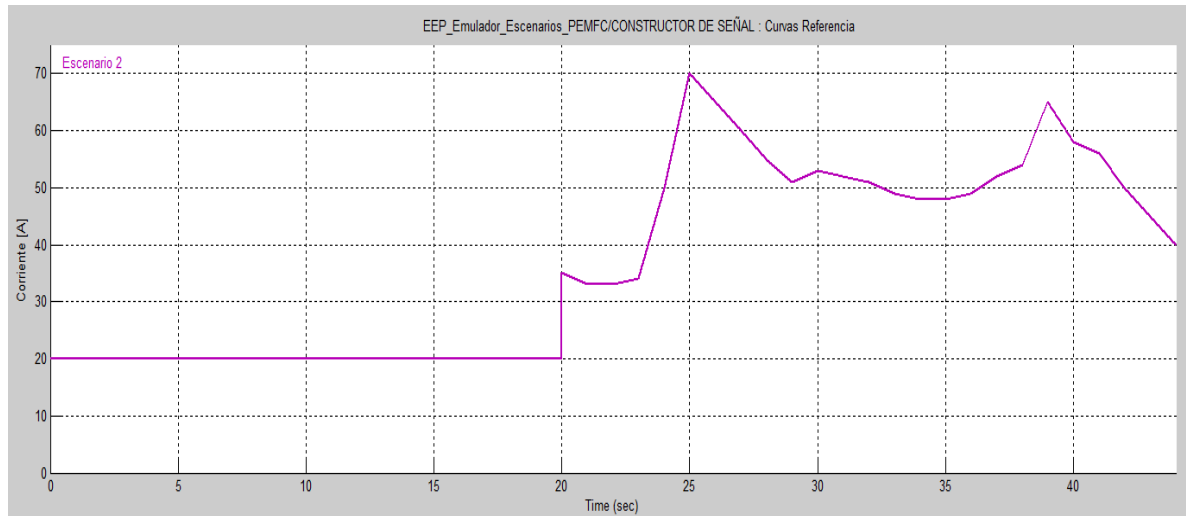


Figura 6.6 Curva de Referencia de una Carga Domiciliar

Luego de terminada la simulación revisamos y comparamos las curvas de referencia y la medida, podemos observar que el controlador trabaja con muy poco margen de error, en la **Figura 6.7** comparamos las señales de corriente y en la **Figura 6.8** se nos muestra la señal similar de potencia, la cual fue obtenida calculando el producto entre la corriente promedio y la tensión promedio.

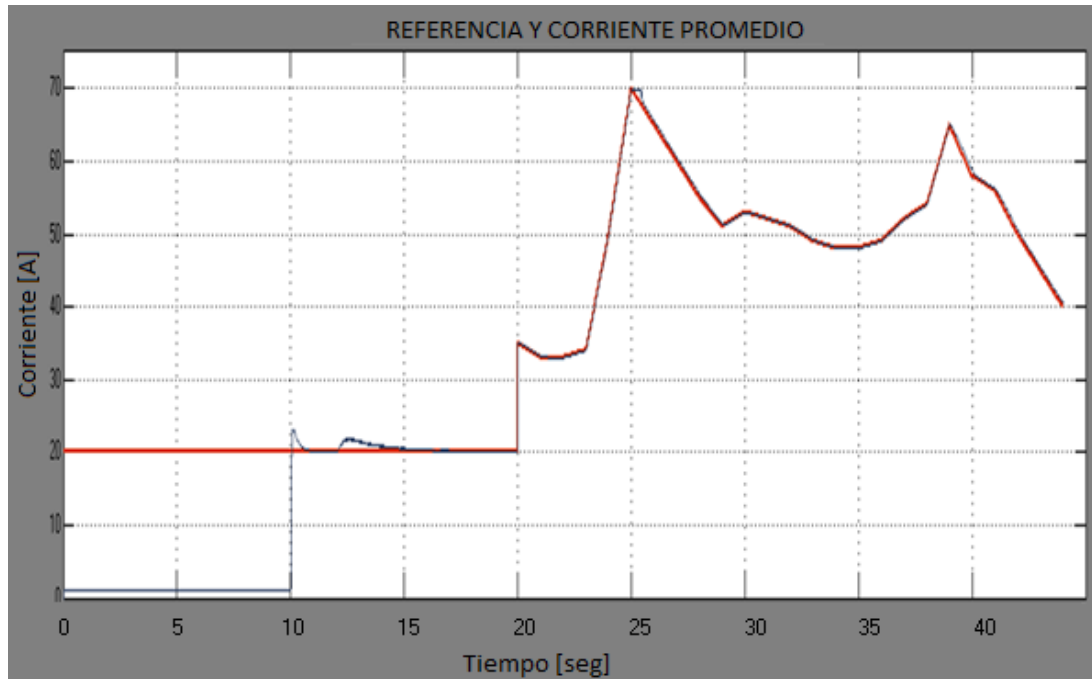


Figura 6.7 Curva Comparativa de Señales de Corriente

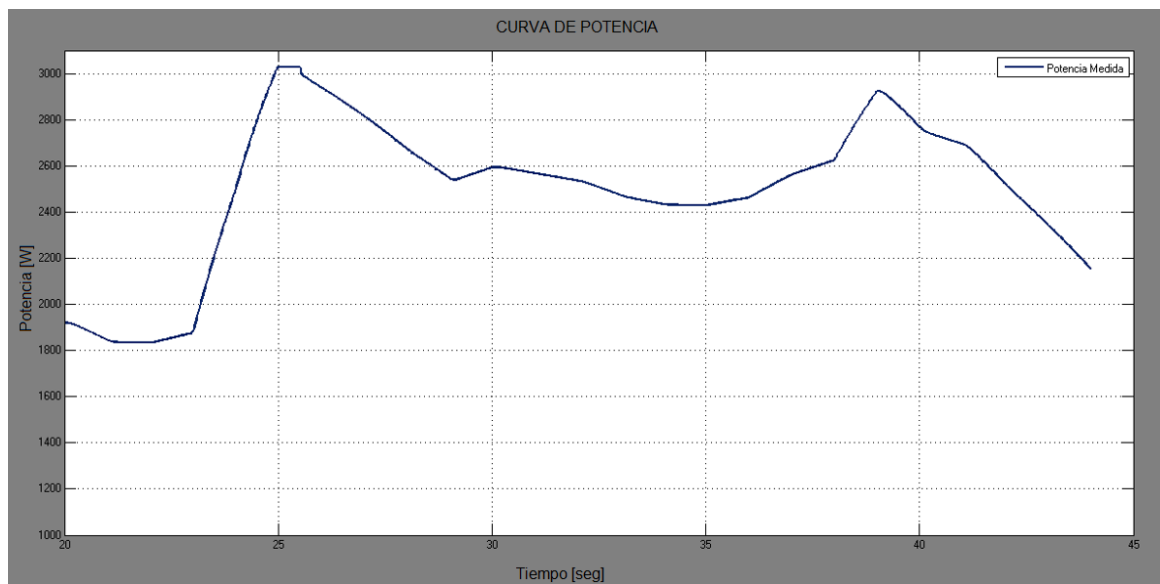


Figura 6.8 Curva de Potencia Medida

Como podemos observar en la **Figura 6.8**, en el segundo 25 aproximadamente, existe un pico de demanda de corriente que sobrepasa la capacidad de la pila de combustible, la pila sigue funcionando y entregando su potencia máxima.

Para aplicaciones estacionarias como lo es una carga domiciliaria, el comportamiento que tiene la pila polimérica de su variación de Tensión con respecto a la demanda de corriente, es notable y sería un inconveniente, debido a esto se deben usar elementos que regulen o fijen el nivel de tensión a fin de proteger las cargas.

CONCLUSIONES

1. Se realizó el diseño y simulación, en la herramienta de programación gráfica Matlab-Simulink, del emulador de demanda de potencia eléctrica de una pila de combustible de membrana polimérica, basado en el control del ciclo de servicio de un transistor de potencia Mosfet para regular la corriente generada por el sistema de suministro de energía.
2. Se utilizó herramientas de Simulink amigables con el usuario, como el bloque constructor de señal, para simplificar el ingreso de las curvas de referencia de corriente y así facilitar el manejo del programa.

3. Se diseñó el controlador de compuerta utilizando control Difuso, este tipo de control tiene la ventaja de proporcionar una eficiente y efectiva metodología de control para sistemas no lineales como es la pila de combustible, con complejidad en el uso de matemática avanzada. Diseñar un controlador difuso requiere el conocimiento del experto en el manejo de la planta, que lo transmite a través de una descripción lingüística como ley de control.
4. Se logró la regulación continua de la corriente, controlando la magnitud de flujo de corriente que circula a través del circuito eléctrico, gracias a la facilidad de conmutación de los transistores de potencia MOSFET.
5. Se obtuvo las curvas características de Tensión vs. Corriente y Potencia vs. Corriente de la pila polimérica, comprobando el comportamiento y los puntos de operación según se había ingresado los datos de la pila polimérica de 3KW que se tenía de referencia.
6. Se obtuvo la curva de demanda de potencia típica de una aplicación estacionaria por medio de la emulación de una carga residencial y se comprobó el control continuo durante toda la simulación.

7. Se comprobó el correcto funcionamiento del emulador de demanda de carga, el cual podrá colaborar en el estudio y análisis de resultados en laboratorio de las pilas poliméricas y así al implementarlo físicamente garantizará la inclusión de los sistemas de pilas de combustible para uso práctico.

8. Con ayuda del sistema propuesto se podrá analizar el comportamiento de otros tipos de pilas de combustible, otros convertidores, diferentes sistemas de control, facilitando así el camino hacia la implementación física de estas tecnologías.

RECOMENDACIONES

1. A partir de lo ya realizado, en los Sistemas de Pilas de Combustible, se puede recomendar la profundización en el análisis del principio de operación y características eléctricas de otros tipos de pilas de combustible diferente a las PEM.
2. Al implementar el emulador de demanda de potencia se recomienda operar al transistor MOSFET en su estado de conducción, variando su tensión de compuerta y de esta forma trabajar como si fuese un regulador de flujo de corriente, así tener cambios de corrientes más suaves en la carga.

3. Con el sistema de control utilizado se motiva a extender el estudio teórico de los sistemas de generación con otros tipos de cargas con diferentes restricciones.
4. Se sugiere el uso de Convertidores DC/DC a la salida de la pila, ya que éstos garantizan una tensión regulada a ser usada por la carga, esto puede ser estudiado a partir de modelos previamente desarrollados.
5. Se recomienda además, el diseño de un completo sistema de adquisición y monitorización de datos. Resulta de gran ayuda disponer de un sistema que permita adquirir y visualizar en tiempo real y mediante una interfaz sencilla, variables que describan el funcionamiento del mismo: tensión y corriente de cada uno de bloques que integran el sistema, valores de potencia demandada y suministrada.
6. El desarrollo de la electrónica de potencia aplicada a Pilas de combustible, tiene un importante crecimiento, que de acuerdo a las normativas y a la forma de operar de la pila, se recomienda el diseño de sistemas de alta densidad de potencia, con buena respuesta dinámica ante cambios súbitos en corriente y controlar la respuesta dinámica de la Pila de combustible.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Pedro Gómez Romero, “Pilas de Combustible. Energía sin Humos” , Mundo científico, p.66, 2002., Disponible [En Línea]: <http://www.cienciateca.com/fuelcells.html>.

[2] P.J.H. Wingelaar, J.L. Duarte and M.A.M., “Dynamic characteristics of PEM fuel cells. Hendrix. Eindhoven University of Technology” Electrical Engineering, 2006.

[3] James Larminie, Andrew Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, Ed. Wiley; 1999.

[4] Leo J. M. Blomen et. al., *Fuel Cell Systems*, Ed. Wiley; 1998.

[5] Karl Kordesch et. al., *Fuel cell and Their Applications*, Ed. VCH; 1996.

[6] Ulises Cano C. et al; “*Diseño, construcción y determinación del desempeño de electrodos sustitutos para una celda de combustible tipo PEM*”, reporte técnico, IIE, 2000.

- [7] Mahesh Murthy et. al; *The performance of a PEM fuel cell exposed to transient CO concentrations*; Electrochemical and Solid State Letters; 2001.
- [8] Jeferson M. Corrêa et. al; *An analysis of the dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells using electrochemical model*; IEEE; 2001.
- [9] Sampath Yerramalla, et. al; *Dynamic Modeling And Analysis of polymer Electrolyte Fuel Cell*; IEEE, 2002.
- [10] F. Laurencelle et al, *Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack*; Fuel Cells 2001, 2001.
- [11] EG&G Technical Services, Inc. Science Applications Internacional Corporation; *Fuel Cell Handbook 6th Ed*; U.S. Department of Energy of Fossil Energy- Energy Technology Laboratory; 2002.
- [12] G. Maggio et. al; *Modeling polymer electrolyte fuel cells: an innovative approach*; Journal of power sources; 2001; pp. 275-286.

[13] Jeferson M. Corrêa et. al; *An analysis of the dynamic performance of proton exchange membrane fuel cells using electrochemical model*; IEEE; 2001.

[14] J. Padullés,et. al; *An approach to the Dynamic Modelling of Fuel Cell Characteristics for distributed Generation Operation*; IEEE, 2000.

[15] Willies J. Thompkins, *Interfacing Sensors to the IBM PC*, Ed. Prentice Hall, 1992.

[16] Jay T. Pukrushpan et. al; *Modeling and control for PEM fuel cell stack system*; Anchorage American Control Conference; 2002;

[17] J. C. Amphlett et. al; *Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell*; Journal of Electrochemical Society; 1995;

[18] Averill M. Law, et. al.; *Simulation Modeling and Analysis*; Ed. McGraw-Hill, 2000.

[19] Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory. *Fuel Cell Handbook- Seveth Edition*. U.S. Department of Energy, 2004.

[20] D.K. Choi, B. K. Lee, S. W. Choi, C. Y. Won, D. W. Yoo. "A novel power conversion circuit for cost-effective battery-fuel cell hybrid system ". *Journal of Power Sources*, Vol.152 (1), pp. 245-255, 2005.

[21] SANTI E., FRANZONI D., MONTI A., PATTERSON D., PONCI F., BARRY N. "A Fuel Cell Based Domestic Uninterruptible Power Supply". Artículo publicado por el IEEE. Pág. 605-613.

[22]. RASHID Muhammad "Electrónica de potencia, circuitos dispositivos y aplicaciones". Segunda edición. Editorial Pearson Education.

[23]. P. C. Buddingh, V. Scaini, L. F. Casey. "Utilizing waste hydrogen for energy recovery using fuel cells and associated technologies ". *IEEE Transactions on Industry Applications* , Vol. 42 (1), pp. 186 - 194, 2006.

[24]. LAURENCELLE F., CHAHINE R., HAMELIN J., AGBOSSOU K., FOURNIER M.

BOSE T. K., LAPERRI A. **“Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange**

Membrane Fuel Cell Stack”. Revista Fuel Cells 2001 No. 1. Pág. 70

[25]. LAI, Jhi-Sheng. **“Virginia Tech research on Power Electronics for Fuel Cells”**.

Power Electronics for Fuel Cells Workshop, National Fuel Cell Research Center, University of California Irvine, California, 2002, Estados Unidos. Pág. 1-28.

[26]. SANTI E., FRANZONI D., MONTI A., PATTERSON D., PONCI F., BARRY N. **“A**

Fuel Cell Based Domestic Uninterruptible Power Supply”. Artículo publicado por el IEEE. Pág. 605-613.

[27]. Bonifacio Martínez del Brío, Alfredo Sanz Molina; Redes Neuronales y Sistemas Borrosos; Alfaomega, Tercera edición, 2007.

[28]. Pineda Cando Marco Antonio, Vivas Paspuel Atal Kumar, Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos; Escuela Politécnica Nacional de Quito; Tesis de Ingeniería; Noviembre 2008.

[29]. Floriberto Ortiz Rodríguez, Modelado y control PD-difuso en tiempo real para el sistema barraesfera; CINVESTAV; Tesis de Maestría; Octubre 2004.

[30]. M J. Vasallo, F. Segura, E. Durán, J. M. Andújar. "Sizing of fuel cell based power backup systems using homer tool" *Proceedings of International Youth Conference on Energetics (IYCE ' 07)*, Vol. 1, pp. 215 – 224, 2007.

[31]. M. H. Rashid. Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson Educación, 2004.

[32]. Artículo sobre energías renovables, Disponible [En Línea]: <http://www.agenergia.org>.

[33]. Modelado y simulación HIL (hardware-in-the-loop) de un sistema pila de combustible – batería, Gauchía Babé Lucia, Tesis de Maestría, pag 33, Julio 2008.

[34]. Prototipo experimental de sistema híbrido basado en pila de combustible: diseño, modelado, implementación y testeo, Segura Manzano Francisca, Tesis Doctoral, pag. 46, Julio 2009.

[35]. Pineda Cando Marco Antonio, Vivas Paspuel Atal Kumar, Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos; Escuela Politécnica Nacional de Quito; Tesis de Ingeniería, pág. 54, Noviembre 2008.

[36]. Lógica Difusa y Sistema de Control, Capitulo 1, pág. 6, Disponible [En Línea]: www.edep.edu.pe/.

[37]. Lógica Difusa y Sistema de Control, Capitulo 1, pág. 7, Disponible [En Línea]: www.edep.edu.pe/.

[38]. Referencias de ayuda de MathWorks, Disponible [En Línea]: http://es.mathworks.com/help/releases/R2015a/phismod/sps/powersys/ref/fcmo_del_detailed.gif.

[39]. Nestor Ramirez Morales, La tecnología de Celdas de Combustibles y su interfase electrónica de Potencia para aplicaciones domésticas estacionarias; Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Tesis de Maestría, pág 62, Julio 2004

[40]. Manual_H-3000_V1.2_EN, Manual de especificaciones técnicas de la Pila de combustible fabricada por la empresa HORIZON, modelo H3000.

[41]. National Instruments, «National Instruments: Test, Measurement, and Embedded Systems,» 06 Febrero 2015. Disponible [En Línea]:
<http://www.ni.com>.

[42]. HST21 Hall Open Loop Split-Core Current Sensor 200A/4V $\pm 15V$,
Disponible [En Línea]: <http://www.ebay.com>

[43]. Reóstato de Laboratorio, Disponible [En Línea]: <http://www.mf-powerresistor.com/rheostat.htm>