

“Emulador de Escenarios de Demanda de Potencia Eléctrica para el Estudio de Viabilidad de las Pilas de Combustible Polimérica en Aplicaciones Estacionarias”

Roberto Iván Silva Villamar(1)
Gaston Enrique Mendoza Contreras(2)
Wilton Edixon Agila Gálvez Ph.D.(3)
(1)(2) Estudiantes de la FIEC
(3) Profesor FIEC

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

(1) risv0583@hotmail.com, (2) gastonmendozaec@gmail.com, (3) wagila@fiec.espol.edu.ec

Resumen

El presente artículo muestra el procedimiento de diseño, análisis y evaluación que se llevó a cabo mediante la herramienta de programación gráfica SIMULINK de MATLAB, de un emulador de carga para una pila de combustible.

Se realizó el análisis y caracterización de la evolución temporal de la respuesta eléctrica de la pila de combustible polimérica mediante variaciones periódicas de la demanda de potencia eléctrica, 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.

Palabras Claves: *emulador, pila, polimérica, demanda, escenario, carga*

Abstract

This article shows the procedure of design, analysis and evaluation that was performed by graphical programming tool MATLAB SIMULINK, load emulator for a fuel cell.

It was performed an analysis and characterization of the temporal evolution of the electrical response of the polymer fuel cell by periodic variations in the demand for electric power, load emulator evaluation scenario to facilitate the development in the field of research of these technologies.

They are simulated, using the proposed load emulator, behavior profiling real demand for electric power from a stationary housing application type, thereby facilitating research into new applications of fuel cells, one of the objectives of this work.

Keywords: *Emulator, cell, polymeric demand, scenario, load*

1. 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.

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.

2.- Descripción del Problema

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].

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 H_2O y calor. Durante el proceso de reacción electroquímica, no se emiten contaminantes que perjudiquen al ambiente.

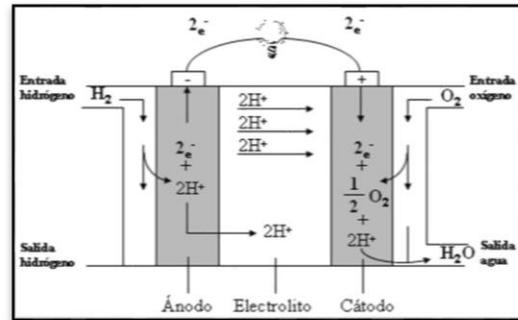


Figura 1. Principio de Funcionamiento de la pila de combustible tipo PEM

2.2. Curva de Polarización de una Pila 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), 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.

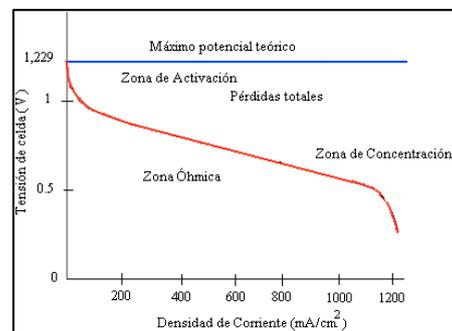


Figura 2. Curva de Polarización de una PEM.

2.3. La Potencia 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 3 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.

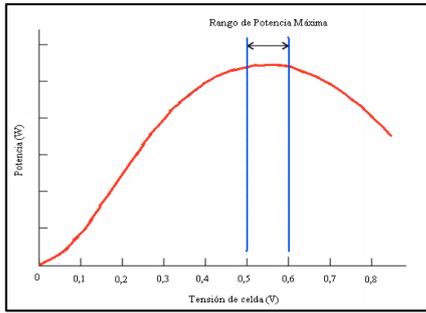


Figura 3. Curva de Potencia de una Celda de Combustible

2.4. 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.

2.5. Sistemas 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 frío”, “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.

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.

3.1 Diseño del Sistema

Como visión del proyecto se planea a futuro realizar la implementación física del sistema de control que conforma el emulador, en la **Figura 4** 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.

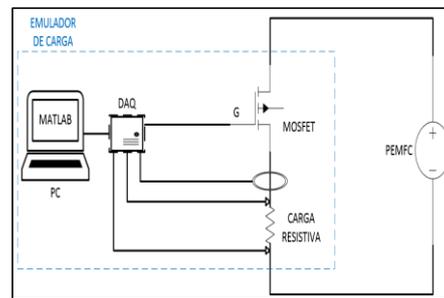


Figura 4. Esquema para implementación

El sistema eléctrico con el que se va a trabajar en la simulación se muestra resumido en la **Figura 5**, 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.

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.

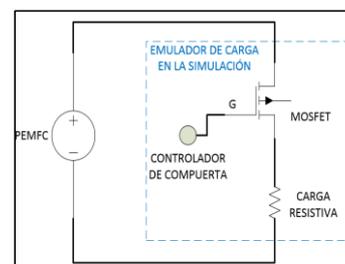


Figura 5. Esquema eléctrico general de la simulación

3.1. Pila de Combustible

La pila de combustible a utilizar será una fabricada por la empresa HORIZON, para aplicaciones estacionarias de 3KW.

3.2. 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.

3.2. 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.

3.3. Método de manejo de Compuerta

Mediante este sistema se permite manejar la compuerta del transistor mediante un 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.

4. Diseño y Desarrollo del Programa

En la **Figura 6.** 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.

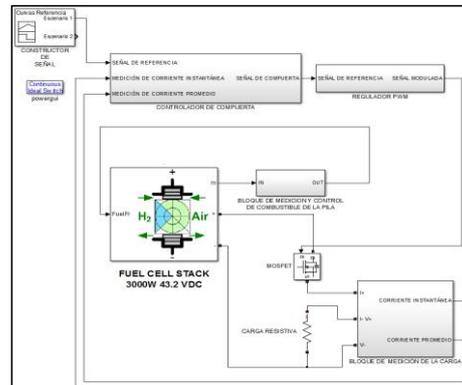


Figura 6. Modelo del Emulador de Carga en Simulink

4.1. Bloque Mosfet

El transistor de potencia Mosfet es el encargado de controlar la corriente que fluye por el circuito eléctrico.

4.2. 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.

4.3. 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.

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 7** se pueden almacenar varias señales, estas luego pueden ser seleccionadas usando el cursor en la ventana del programa.

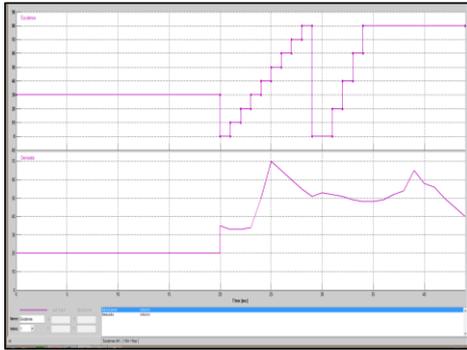


Figura 7. Bloque Constructor de Señal

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 8** se presenta el diagrama general del bloque de control.

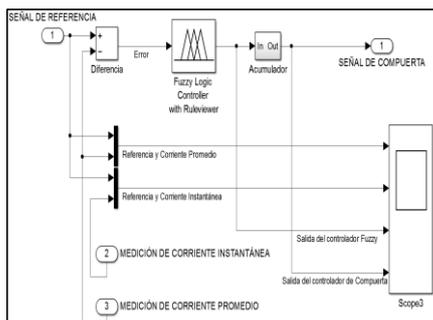


Figura 8. Bloque Controlador de Compuerta

4.7. Control Difuso

A continuación se procede a explicar los pasos para la configuración del bloque de control Difuso. En la **Figura 9** 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 artículo.

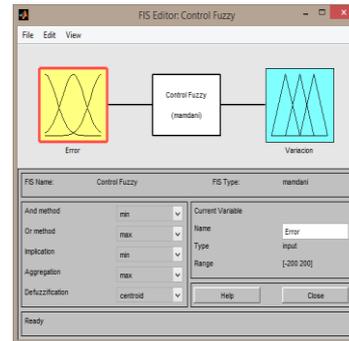


Figura 9. Estructura del Control Fuzzy

4.8. 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.

5. 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.

5.1. 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 10, 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.

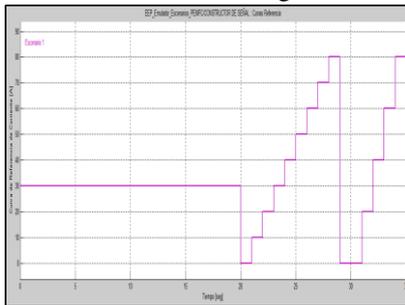


Figura 10. Señal en el bloque constructor de señal

Al comparar las señales de corriente referencia y la obtenida, ver Figura 11, 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.

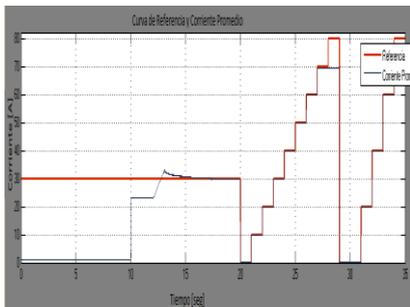


Figura 11. Respuesta de la señal de corriente del circuito

En el Figura 12 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.

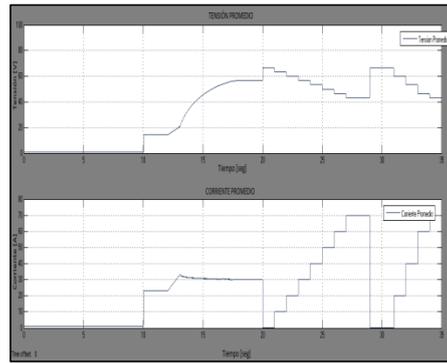


Figura 12. Corriente y Tensión Promedio de la Pila

5.2. Curva característica P. vs. I.

En la figura 13 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.

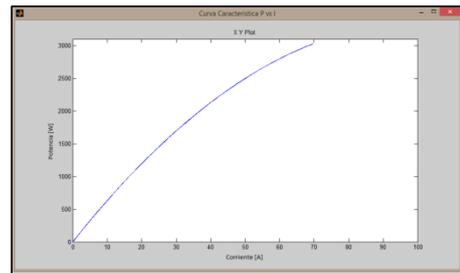


Figura 13. Curva Característica P vs I

5.3. 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.



Figura 14. Curva Comparativa de Señales de Corriente

Como podemos observar en la **Figura 14 y 15**, 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.

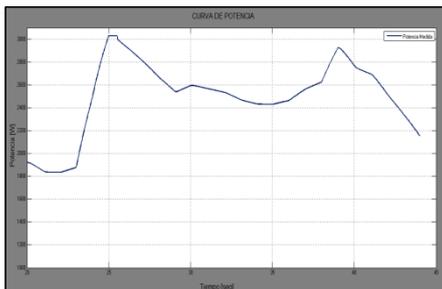


Figura 15. Curva de Potencia Medida

6. Conclusiones y Recomendaciones

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.

Dentro de las recomendaciones planteadas tenemos las siguientes:

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.
- [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

7. Referencias

- [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.