

DIAGNOSTIC SYSTEM FAILURE FUNCTIONAL FUEL CELLS THROUGH VIRTUAL INSTRUMENTATION AND SIGNAL PROCESSING

*Contreras Emilio, Master in Science; Rivera Yrvin, Master in Science; Rodríguez Cuevas Alvin, PhD
Universidad APEC, Dominican Republic, econtreras@unapec.edu.do; arodriguez@adm.unapec.edu.do
Universidad APEC, Dominican Republic, yriviera@adm.unapec.edu.do*

Abstract– This research project is based on fuel cells (FC) of proton exchange membrane (PEM), as an element of production of clean renewable energy. In this research is expected to develop algorithms and techniques to make diagnoses on the failures that occur in the cells operation, which are not predictable. It is stated that by using software and hardware, can be characterized and generate a model that can simulate the electrochemical behavior of the fuel cell. To achieve these objectives formulated a cell of 4.5 kw will be installed on a dedicated exclusively to study the behavior under controlled conditions of the operating parameters of the cell area. The test results will be captured using virtual instrumentation and recorded in a database integrated with a computer system which will be used to design and validate the model that defines the cell. As a strategy this research methodology is divided into three stages, this paper addresses the first two stages with their results and the third is planned as a future expansion. Expected results at this stage are: the establishment of a Renewable Energy Center located on the campus of Engineering at the University APEC, the installation of the fuel cell, the design and installation of virtual instrumentation to capture information to validate the findings of studies on the functional failures of the PEM cell.

RESUMEN

Este proyecto de investigación se fundamenta en las Celdas de Combustibles (CC) de membrana de intercambio protónico (PEM), como elemento de producción de energía renovable limpia. En este trabajo de investigación se espera desarrollar algoritmos y técnicas que permitan hacer diagnósticos sobre los fallos que presentan en su funcionamiento las celdas, los cuales no son predecibles. Se plantea que, mediante el uso de software y hardware, se puede caracterizar y generar un modelo capaz de simular el comportamiento electroquímico de la celda de combustible. Para lograr estos objetivos formulados se instalará una celda de 4.5 kw en un área dedicada exclusivamente para estudiar el comportamiento bajo condiciones controlables de los parámetros de funcionamiento de la celda. Los resultados de las pruebas serán capturados utilizando instrumentación virtual y registrada en una base de datos integrada a un sistema computacional, los cuales servirán para diseñar y validar el modelo que define la celda. Como estrategia metodológica esta investigación se divide en tres etapas; de las cuales, este trabajo aborda las dos primeras etapas con sus resultados y se plantea la tercera como una expansión futura. Los resultados esperados son: la creación de

un Centro de energía renovable localizado en el Campus de Ingeniería de la Universidad APEC, la instalación de la celda de combustible instalada y el diseño de la instrumentación virtual para la captura de información que permitan validar los hallazgos de los estudios sobre las fallas funcionales de la celda PEM.

INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico en la República Dominicana ha enfrentado, durante más de 85 años, múltiples desafíos. En la actualidad uno de los grandes retos que enfrenta este sector es satisfacer de manera sostenible, la demanda energética actual y futura.

Según el Organismo Coordinador (OC) del Sistema Eléctrico Nacional Interconectado (SENI), la operación del sistema nacional se ha caracterizado por una situación de déficit de suministro, agudizada por la creciente demanda y las inherentes limitaciones para ejecutar un plan agresivo de renovación de unidades que desplace las plantas obsoletas basadas en combustibles de alto costo. De acuerdo a datos de la Superintendencia de Electricidad (SIE) de finales del 2007, el 86% de la demanda eléctrica suplida en el país proviene de fuentes fósiles (61% petróleo, 16% gas natural, 9% carbón). Por lo que, nuestro país se convierte en un importador de petróleo, siendo esta dependencia la base del problema energético.

A pesar de las circunstancias agravantes que tiene este problema en la República Dominicana, sus raíces y efectos no son exclusivos al país. Para finales del mismo año el 84% de la producción energética en los EEUU provenía de fuentes fósiles (37% petróleo, 23% carbón y 24% gas natural) [2] y un 55.3% en la Unión Europea (3.3% petróleo, 29.4% carbón y 22.6% gas natural) [3]. Considerando las proyecciones de crecimiento en demanda, el auge de crecimiento en los países asiáticos, el impacto ambiental y que las reservas fósiles del planeta son finitas, puede entenderse el por qué a nivel global, la dependencia de la generación energética en combustibles fósiles se ha convertido en una de las preocupaciones primordiales de la humanidad.

Dentro de esta problemática energética global, la República Dominicana no puede quedarse rezagada y debe tomar pasos tempranos que le permita desarrollar una cultura de conocimiento, cimentada en la investigación y educación que forme toda una generación de individuos cualificados para enfrentar los retos inherentes a la diversificación energética.

La temática de la investigación se enmarca en una estructura de estudio de Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (PEM). Esta plataforma creará la posibilidad de desarrollar estudios sobre el comportamiento de celdas de combustibles, mediante la visualización de los parámetros de operaciones y visualizar los datos en tiempo real. De esta manera, se podrá tener un panorama más claro sobre las fallas funcionales que experimentan las celdas de combustibles y así, anticiparlas.

A la misma vez, se potenciará una estructura académica en UNAPEC para la enseñanza de disciplinas en torno al uso de celdas de combustible como fuentes alternas de generación energética, reforzadas por actividades prácticas alrededor de la infraestructura experimental en el Centro de Investigación.

La propuesta de investigación presentada, abrirá las puertas para que, en una fase ulterior de expansión, se puedan incorporar técnicas fotovoltaicas que habilitará a la infraestructura que se creará como producto de esta propuesta de investigación, para la incursión en el campo investigativo en las áreas de eficiencia fotovoltaica, generación de hidrógeno y técnicas de modelaje dinámico del sistema generativo. De esta manera se aprovechará de forma eficiente la radiación solar para producir hidrógeno en un ciclo cerrado de agua.

ANTECEDENTES

La generación de energía para el desarrollo de los países es una temática importante, y más cuando hay una dependencia de los combustibles fósiles. Con esta realidad, se ha realizado investigaciones sobre alternativas energéticas, que permitan una generación más limpia y amigable al medio ambiente. No obstante, la literatura presenta muchas investigaciones sobre la creación de tecnología para el desarrollo de energías renovables. En ese sentido, el aprovechamiento de nuevas tecnologías permitirá tener un mejor sistema de gestión energético, de manera que sea sostenible en cuanto a su funcionamiento.

La demanda energética mundial está siendo suplida en más de un 87% por combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural [10]. Esto obviamente impacta sensiblemente el medioambiente, acelerando el calentamiento global, responsable entre otras cosas, del incremento del poder devastador de los fenómenos naturales. Desde el punto de vista económico, las mayores zonas de producción mundial de estos combustibles se mantienen constantemente afectadas por problemáticas geopolíticas, lo que contribuye a precios volátiles y elevados. Sumando a esto las proyecciones iniciadas hace unos 6 años, acerca de que el agotamiento de las reservas de petróleo se estimaba en no más de 40 años [4], se vislumbra la urgencia de búsqueda de otras opciones

energéticas para satisfacer la demanda creciente y mantener el desarrollo económico global.

En la República Dominicana, la Ley de incentivo a las Energías Renovables, es un paso de avance del Estado Dominicano para ir revirtiendo la gran dependencia en la matriz energética de los combustibles fósiles, que en nuestro caso particular, se ve agravada por la condición doméstica de la insostenibilidad del Sector Energético debido al alto nivel de pérdidas.

Dentro de la canasta de posibilidades que se han estado estudiando para satisfacer la demanda futura de energía y disminuir la dependencia de combustibles fósiles, está el uso del hidrógeno como medio para transformarlo en electricidad por medio de las celdas combustibles, cuyo único residuo generado en la transformación es agua.

Múltiples investigaciones han sido realizadas en los últimos años en torno a varios aspectos de las celdas de combustibles; entre estas cabe señalar las siguientes:

N. Fouquet et al [22] desarrollaron un modelo para monitorear el nivel de agua que mantiene la membrana de intercambio de protones de la celda de combustible durante su operación. Esto así, debido a que exposiciones prolongadas a altos o bajos niveles de agua en dicha membrana puede ser muy dañino a la celda. El método se fundamenta en el monitoreo del contenido de agua de la membrana de intercambio de protones por medio de mediciones de corriente y voltaje bajo condiciones dinámicas.

D. Brunner et al [5] proponen un sistema de monitoreo de voltaje para los arreglos de celdas de combustible para propósitos de análisis y diagnóstico del sistema. El sistema consiste en adquirir la magnitud de voltaje de todas las celdas en un arreglo y compararla con valores mínimos y máximos establecidos, y activar una alarma en caso de voltajes fuera de rango. El sistema puede incluir medición del voltaje de cada celda con respecto a variables independientes como tiempo, corriente, flujo de aire o humedad. Este sistema resuelve el hecho de inadvertida variación del desempeño de celdas dentro de un arreglo, producto de la variabilidad de componentes de múltiples fabricantes, arquitectura del arreglo de celdas y degradación por el uso.

E. Ramschak et al [8] proponen un método de diagnóstico de bajo costo y drástica disminución de instrumentación, basado en la suma de voltaje de un arreglo de celdas de combustible, y no el monitoreo de cada celda de manera individual. La metodología basa su propuesta al hecho de que en condiciones de operación crítica, la celda de combustible presenta una drástica caída de voltaje a cierto nivel de corriente de la celda. Por ende, si se superpone a la señal de corriente, una pequeña señal con un patrón de frecuencia determinado, entonces el

sistema completo será distorsionado el dominio de la frecuencia, pudiéndose extraer de frecuencia distorsionada producto del fallo de una de sus celdas.

G. Mulder et al [15] presentan un trabajo en el cual comparan los resultados obtenidos con el método de monitorear el voltaje de las celdas de combustible que conforman un arreglo, con aquellos obtenidos con equipos de alto desempeño para pruebas de laboratorio. La investigación destaca no solo que el método de monitoreo de voltaje de cada celda de combustible en un arreglo es tan confiable como los resultados obtenidos con los equipos especializados de laboratorio, sino además que es el método más económico y seguro de operar celdas de combustibles y diagnosticar problemas de degradación y de pérdida de confiabilidad

H. Cao et al [16] presentan un modelo dinámico desarrollado a partir de las características eléctricas de la celda de combustible de óxido sólido (SOFC), utilizando derivadas fraccionarias. La contribución de desarrollar este modelo dinámico que permite predecir con un buen nivel de exactitud el comportamiento de la SOFC, es vital en el diseño de controladores eficientes; además de constituir como una herramienta que sirve como guía para el diseño de electrodos y electrólitos, así como para un mejor entendimiento de los procesos físicos y electroquímicos que ocurren en la pila.

J. O'Rourke et al [19] propone un método para detección de exceso de agua en la membrana de intercambio de protones, aun antes de que el voltaje comience a declinar. La propuesta se basa en inducir estrés al sistema mediante un breve pico súbito de corriente, medir los voltajes individuales de las celdas y compararlo con el voltaje medio. La desviación encontrada con respecto al voltaje medio es un indicativo de exceso de agua en la membrana. Este método se puede adaptar a monitores de degradación del sistema sin requerir infraestructura adicional, más que tarjeta de muestreo de voltajes, cálculo del voltaje medio y un circuito simple para producir el pico súbito de corriente.

K.A. Williams et al [20] presenta un trabajo de investigación sobre la respuesta dinámica de un sistema de celdas de combustible. El método consiste en inyectar pasos sinusoidales al sistema, para posteriormente obtener y analizar las respuestas transitorias del sistema, a los fines de determinar la factibilidad del uso de la celda de combustible en el modo de seguimiento de carga.

El sector energético representa suma importancia y un rol determinante para el desarrollo de un país. Por lo tanto, es pertinente conocer los cambios importantes que está experimentando el sector energético mundial, que nos permita ser más competitivo y ayude a garantizar el crecimiento y la eficiencia económica del país.

El escenario del sector energético en el marco de la oferta y la demanda del petróleo, el aumento de la explotación de petróleo, así como un manejo más eficiente de la energía son determinantes en este panorama mundial.

La perspectiva de EIA Internacional de Energía 2013 (IEA,2013) proyecta que el crecimiento en el uso de energía mundial proviene en gran parte de países de fuera de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Patrones de uso de la energía para los países dentro de la OCDE son relativamente estables entre 2010 y 2040, así como se prevé el uso de energía primaria crecerá un 0,5 % por año, más o menos al mismo ritmo que el crecimiento de la población en esos países. El uso de energía en los países no miembros de la OCDE se prevé que crezca un 2,2 % por año, y se espera que la proporción de uso de energía fuera de la OCDE aumentará de 54 % del consumo total de energía mundial en 2010 al 65% en 2040 (EIA, Dic. 2013). Por lo que, el uso de todas las fuentes de energía aumentará durante el mismo periodo. Por lo tanto, los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón), seguirán siendo los más utilizados en todo el mundo.

De acuerdo con las perspectivas de la Agencia Internacional de Energía (EIA), los recursos fósiles seguirán dominando la producción global; no obstante, el ascenso de la generación eléctrica a partir de fuentes renovables llevará hasta el 30% la producción de éstas en el mix eléctrico mundial, teniendo un adelanto del gas natural para los próximos años y alcanzando prácticamente al carbón como primera fuente para la producción de electricidad en 2035.

No obstante, hay otras opciones para la generación de energía que se han estado investigando para satisfacer la demanda futura de energía. Dentro de ellas, está la utilización del hidrogeno como insumo para transformarlo en energía a través de las celdas de combustibles, el cual no contamina el medio ambiente, debido a que su residuo generado de la transformación es agua.

El hidrogeno se viene utilizando desde hace años en la industria química y petroquímica para procesamiento y refinado de combustibles fósiles, así como para la síntesis del amoniaco. Aplicaciones como agente hidrogenante en alimentación, producción de diversos ácidos, agente reductor de metales y como escudo de gas en soldadura, son algunos ejemplos de su utilidad.

El hidrógeno constituye el elemento más abundante en el universo y su capacidad de liberar energía al reaccionar con el oxígeno lo convierte en un excelente combustible. Sin embargo, el hidrógeno no se encuentra en la Tierra en estado puro y para su obtención se hace necesaria la aplicación de energía hacia una fuente contenedora de este elemento como

son los hidrocarburos y el agua. Debido a esto, el hidrógeno no se considera como una fuente de energía, sino como un vector energético útil para la generación de ésta. Tamayo C., Ozuna M. [4]

No obstante, a principios de los años 60 fue cuando se volvió a dar una mirada a la práctica de las celdas de combustible, durante el programa espacial de los EE.UU., los cuales seleccionaron a las celdas como generadores de energía y agua en sus naves espaciales Gemini y Apolo. López [14]

Las investigaciones realizadas sobre el modelamiento de las celdas de combustible han tomado gran importancia en los últimos años, específicamente en la búsqueda óptima del manejo de parámetros como voltaje e intensidad, y otros, que permitan que las celdas sea una forma viable de generar energía eléctrica. Los modelos matemáticos permiten prever las condiciones de operación que se pueden establecer en el funcionamiento de una celda de combustible real, de manera que se pueda avanzar con mayor rapidez en el estudio e implementación de estos equipos como fuentes generadoras de energía y combustible. Tamayo C., Ozuna M. [4]

A. Doddathimmaiah y J. Andrews [6] trabajaron en el modelamiento de una celda de combustible en modo reversible donde se efectuaron una relación entre la densidad de corriente usada para la producción de hidrógeno en el modo electrolizador y la densidad de corriente generada en la producción de energía en el modo celda.

En el mismo año, F. Marangio, M. Santarelli y M. Calli [21], desarrollaron un modelo matemático de celda regenerativa unificada (URFC) para PEM que permitió determinar el voltaje teórico del circuito abierto a través de un análisis termodinámico de las propiedades de la membrana polimérica.

ESTADO DEL ARTE

Una Celda Combustible (CC) es un dispositivo que realiza una conversión directa de energía química en eléctrica a través de una reacción electroquímica. Dicha reacción se realiza entre el hidrógeno y el oxígeno, cuyo subproducto es agua. Pueden funcionar como catalizadores para la producción de hidrógeno, es decir, su funcionamiento en forma reversible los convierte en una especie de electrolizador..

Las baterías contienen compuestos como plomo, litio, estaño, mercurio, níquel, etc. Al igual que las baterías, las celdas de combustible tienen electrodos (ánodo y cátodo) y electrolitos. Los electrodos contienen pequeñas cantidades de platino. En el ánodo se generan los electrones que producen la corriente mientras que en el cátodo los recibe estableciendo un circuito eléctrico.

En adición, son completamente silenciosas y no producen contaminantes como el monóxido de carbono y los óxidos nítricos producidos en generadores eléctricos que utilizan combustibles fósiles. El diagrama de más arriba ilustra los componentes de una celda de combustible de una CC de intercambio de protones por membrana (PEM). Componentes adicionales incluyen sistemas de calentamiento, enfriamiento, alimentación de aire y tanques de almacenamiento de hidrógeno. El sistema propuesto para el Centro consiste de una pila de celdas con capacidad aproximada de 5 KW de potencia. En términos de energía tiene capacidad para 50 kWh. Esto sería equivalente a proveerle energía a una residencia promedio por 50 horas @ 1.0 kW de potencia lo cual es típico. Como mencionamos anteriormente, estos sistemas generan calor además de electricidad. El calor puede utilizarse para calentamiento de agua en residencias. Otra aplicación de este calor es en sistemas de absorción para aire acondicionados. Esto sería para sistemas de más capacidad. De recuperarse el calor, las celdas de combustible pueden operar a eficiencias energéticas entre 60 y 80%. Esto sobrepasa las eficiencias energéticas de sistemas de combustión que son entre 35 y 50%.

La estructura de una celda de combustible (FC) consiste de un electrolito con un par de electrodos, uno en cada lado (ánodo y cátodo). En la siguiente figura 1 se muestra la representación esquemática de una FC.

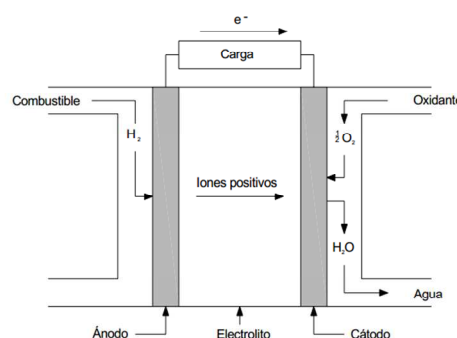
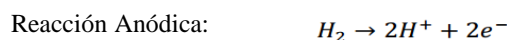


Figura 1: Representación Esquemática de una FC. Fuente: APPICE

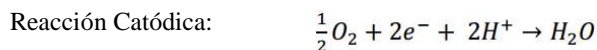
Entre los electrodos se genera una corriente eléctrica que, a diferencia de lo que ocurre en una celda o batería convencional, no se agota con el tiempo de funcionamiento, sino que se prolonga mientras continúe el suministro de los reactivos.

Las reacciones que ocurren en las celdas de combustible son las siguientes: García [13]



Donde el combustible (hidrógeno) se suministra al interior de la celda a través de ductos y canales hasta el ánodo, al contacto con éste y en presencia de un catalizador se produce

una reacción que separa los electrones (oxidación) y los iones positivos o protones.



En este caso, los protones fluyen a través del electrolito desde el ánodo hasta el cátodo, mientras que los electrones fluyen a través de un circuito externo de carga. El oxidante (oxígeno) reacciona con los protones y electrones (reducción) en el cátodo, produciendo agua, y como esta reacción es exotérmica, genera calor.

Los electrolitos se encargan de aportar los iones encargados de la conducción en el interior de la celda electrolítica o la celda de combustible.

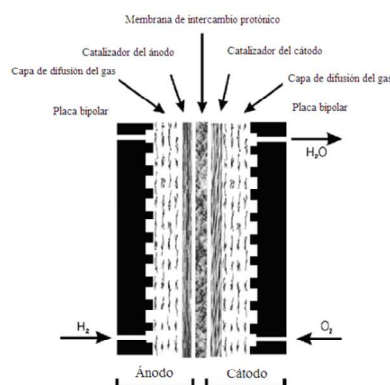
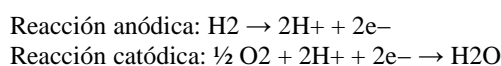


Figura 2: Estructura de PEM.
Fuente: Tibarqira y Posner, (2009).

Tipos de Celda de Combustible

Las celdas de combustible se clasifican preferentemente en función del electrolito utilizado. Se construyen con distintos materiales y se caracterizan por un rango de temperatura y de operación distinto, aunque presentan la misma reacción básica de oxidación de hidrógeno. Escobedo [9]



Estas pilas emplean hidrógeno como combustible y oxígeno como oxidante pero dado que el dióxido de carbono no representa peligro de envenenamiento para la membrana se puede utilizar aire para alimentar el cátodo y combustible reformado para alimentar el ánodo. Debido a la necesidad de mantener húmeda la membrana la temperatura de operación está limitada a no más de 120 C, siendo un valor habitual 80°C. A estas temperaturas las reacciones en los electrodos son más lentas por lo que es necesario que éstos tengan un alto contenido de sustancias catalizadoras (fundamentalmente platino). Esto implica a su vez que el contenido de monóxido de carbono en el combustible tenga que ser prácticamente nulo (por debajo de 5 ppm) ya que cuando las temperaturas son bajas el monóxido de carbono actúa como veneno del catalizado. Almarza y Salueña [1]

Tipo de pila de combustible	Tipo de electrolito	Rendimiento	Temperatura de operación	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Pilas de Membrana Polimérica (PEMFC)	Polímero sólido.	60%	70-80 °C	Baja corrosión del electrolito y bajo mantenimiento de la pila. Rápido arranque y baja temperatura de operación. Acepta hidrocarburos ligeros reformados.	Catalizadores costosos y sensibles a impurezas.	Suministro energético para vehículos, máquinas portátiles y generación estacionaria.
Pilas de combustible Alcalinas (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio.	60%	90 - 100 °C	Reacción catódica rápida y alta eficiencia.	Alta sensibilidad a las impurezas. Necesita emplear hidrógeno puro.	Aplicaciones militares y espaciales.
Pilas de Ácido Fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido.	50-80 %	175 - 200 °C	Alta eficiencia en cogeneración de electricidad y calor. Acepta hidrógeno impuro.	Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen.	Aplicaciones de generación estacionaria. Aparatos portátiles.
Pilas de Carbonato Fundido (MCFC)	Solución líquida de litio, sodio y potasio.	60-90 %	600 -1000 °C	Alta eficiencia debido a la alta temperatura. Catalizadores relativamente baratos.	Baja vida útil por la corrosión a alta temperatura. Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre.	Generación estacionaria.
Pilas de Óxido Sólido (SOFC)	Óxido de zirconio sólido con adiciones de litio. Sólido.	60-90 %	600 - 1000 °C	Debido a la alta temperatura, tienen alta eficiencia y los catalizadores son relativamente baratos.	Baja vida útil por la corrosión a alta temperatura. Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre.	Generación estacionaria.

Características principales de celdas de combustible. Fuente: APPICE

Celdas de combustible de intercambio protónico (PEM por sus siglas en inglés). Las celdas de combustible tipo membrana de intercambio protónico, usan hidrógeno como combustible y una membrana polimérica como electrolito. El hidrógeno fluye por el ánodo y es dissociado en la capa catalizadora formando protones y electrones. Los protones pasan a través de la membrana la cual es diseñada para permitir el paso de cationes, pero es impermeable al paso de corriente eléctrica, gases y aniones. Así los electrones son obligados a pasar por el circuito externo generando energía eléctrica. Luego electrones y protones reaccionan en el cátodo con el oxígeno presente en el aire y con la ayuda de la capa catalizadora del cátodo forman agua. Tibarqira y Posner [24]

La gestión del agua y el calor son actualmente los principales problemas que presentan las celdas de combustible. Tanto un exceso como un defecto de agua o calor perjudican las propiedades de la membrana, afectando directamente el correcto funcionamiento de la pila. Debido a estas dificultades surge una nueva rama de investigación de pilas de combustible: las pilas PEM de alta temperatura. Félix [11]

El potencial real de una pila disminuye respecto de su valor teórico (ideal) debido a las pérdidas irreversibles que tienen lugar. Aunque los ingenieros mecánicos y eléctricos prefieren usar el término de pérdidas de voltaje, los ingenieros electroquímicos usan términos como polarización o sobre potencial. Todas ellas tienen el mismo significado: la diferencia entre el potencial del electrodo y el potencial de equilibrio. Félix [11]

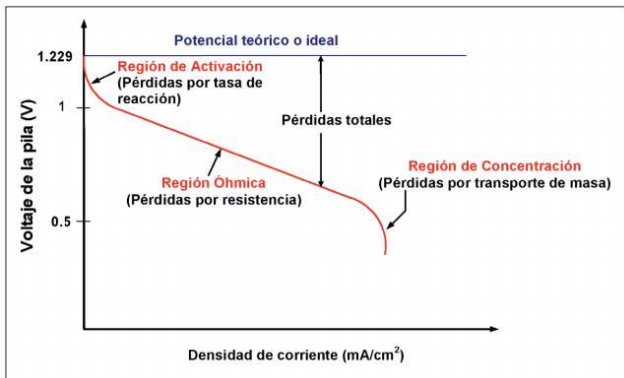


Figura 3: Curva típica de polarización (funcionamiento real) de una pila tipo PEM Fuente: Félix (2012)

Componentes de una pila PEM

Una pila de combustible tipo PEM está compuesta por varios elementos, los cuales deben de estar diseñados y optimizados para que se favorezca el desarrollo de los fenómenos físicos y químicos en el sistema. Félix [11]

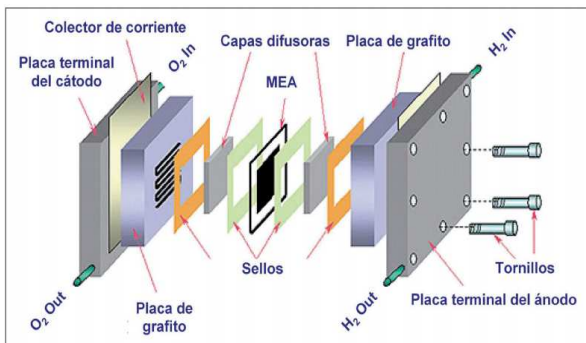


Figura 4: Elementos que componen una monocelda de una pila de tipo PEM Fuente: Félix (2012)

Electrolito

Las pilas PEM se caracterizan precisamente por la naturaleza polimérica de su electrolito. Se trata de una membrana sólida compuesta por un polímero sulfonado de politetrafluoroetileno (PTFE). Estas membranas se caracterizan por poseer un alto grado de conducción protónica a través de ellas, ser impermeables a los gases y aislantes eléctricos. Félix [11]

Capas catalíticas

Básicamente el electrodo es una delgada capa catalítica localizada entre la membrana y las capas difusoras, tanto en el ánodo como en el cátodo. Los electrodos están formados por un

material carbonoso altamente poroso (alta superficie específica) en el cual se soportan las moléculas de catalizador homogéneamente distribuidas. Es en estos centros activos donde se producen las reacciones electroquímicas del ánodo y del cátodo. En general, cuanto mayor sea el número de estos puntos de contacto, mayor número de reacciones podrán producirse simultáneamente, siendo el voltaje efectivo obtenido también más alto. Félix [11]

Capas difusoras

Las capas difusoras sirven de soporte mecánico a los electrodos. Están formadas por materiales porosos buenos conductores de la electricidad, de forma que distribuyan los gases uniformemente sobre las capas catalíticas, favorezcan la extracción del agua líquida de la capa catalítica catódica y sirvan de conexión eléctrica entre las capas catalíticas y las placas bipolares. Félix [11]

La característica principal de la celda PEM, es que tiene electrolito sólido, y por esto exhibe una excelente resistencia al cruce y fuga de gas, opera a baja temperatura, típicamente 80°C, esto resulta de llevar a la celda a su punto de temperatura de operación rápidamente, pero el calor que genera no puede ser usado para propósitos de cogeneración. Aunque la celda puede operar a altas densidades de corriente comparadas con otras, sin embargo, el manejo del calor y agua generados limitan su operación.

PROBLEMÁTICA DE INVESTIGACION Y DESARROLLO

La tecnología de celdas de combustible consiste en la generación de energía mediante el proceso de transformación electroquímica del hidrógeno y el oxígeno a través de un medio transductor electrolítico. Unos de los problemas comunes que enfrenta la tecnología de celdas de combustible es la súbita e imprevista falla del transductor electrolítico el cual se construye comúnmente, de una membrana eléctrica polimérica. Varios esfuerzos se han realizado en la comunidad científica con el objetivo de encontrar métodos de monitoreo para la predicción de fallas en esta parte del sistema, basados en extracciones puntuales de señales de voltaje y corriente, que de forma indirecta, permiten inferir el estado de la membrana. La carencia fundamental de estas investigaciones se centra en intentar buscar una mejora del desempeño global del sistema, basado en datos obtenidos con monitoreo puntual y su posterior inferencia. El espacio que viene a llenar esta investigación consiste en crear una novedosa infraestructura de investigación integral, con la intención de buscar una solución al problema de desempeño de las celdas de combustible. El sistema propuesto se compone de monitoreo, modelado, y procesamiento de datos para transformarlos en información útil a la toma de decisiones.

En esta investigación se utilizarán la novedosa modalidad de modelación, en la cual se tratará la celda como un sistema básico de comunicación, caracterizado por tres componentes fundamentales, a saber: el transmisor o fuente de información, el canal o medio de comunicación y el receptor o destino de la información. En el modelo propuesto, el transmisor modela al electrodo asociado con la generación de hidrógeno, el canal de comunicación modela el electrólito transductor o membrana eléctrica y el receptor modela al electrodo asociado con la generación de oxígeno. El sistema a desarrollar tiene como propósito fundamental estudiar el comportamiento del canal de comunicación, el cual tiene atributos y características desconocidas que se desean conocer. El hidrógeno ionizado, señal de información que es emitida por el transmisor, pasa a través del canal de comunicación, en este caso una membrana eléctrica polimérica, y llega a su destino o receptor, que es el electrodo asociado con la generación del oxígeno.

Dos áreas de investigación serán privilegiadas, la primera área trata sobre el estudio de canales de comunicación que modelan membranas eléctricas poliméricas y sobre la caracterización de dichos canales de comunicación. La segunda área trata sobre el estudio de formulaciones de instrumentación virtual para, integrar de manera coherente, datos provenientes de diferentes elementos en un sistema de celdas de combustible y procesarlos con el objetivo de producir información útil a un usuario.

El objetivo de esta investigación es diagnosticar fallas funcionales en celdas de combustible a través del desarrollo de un sistema de instrumentación virtual y procesamiento de señales. Para esto se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Instalar un sistema de celdas de combustible para efectos de investigación científica en el área de generación distribuida de energía renovable
- Establecer una infraestructura basada en tecnología de información (TI) para generar data mediante un sistema de celdas de combustible a usuarios interesados en la extracción y tratamiento de información de forma remota.
- Desarrollar un sistema computación y de visualización basada en MATLAB, para el tratamiento de datos extraídos del sistema de celdas de combustible, con la finalidad obtener información.

METODOLOGÍA

La metodología consistirá en los siguientes pasos:

1. Selección de una celda de combustible comercial que permita la colocación de sensores y transductores para captar y procesar información operacional del sistema, que pueda ser accedido tanto de manera local como de forma remota.
2. Identificación de los elementos de la dinámica operacional de las celdas de combustible que deben ser incorporados a un modelo que permita estudiar su aplicabilidad en un sistema eléctrico de potencia con esquema de generación distribuida.
3. Aplicación de Matlab al sistema de la Celda de Combustible un “toolbox” de MATLAB para el procesamiento de datos obtenidos de la misma.
4. Búsqueda de criterios para seleccionar los parámetros de operación de la celda de combustible.
5. Establecimiento de lineamientos de instrumentación para el análisis de los datos extraídos de las operaciones de la celda de combustible a través del estudio del espectro de impedancia.

En la figura 5 se muestran las diferentes etapas en que fue concebida la investigación

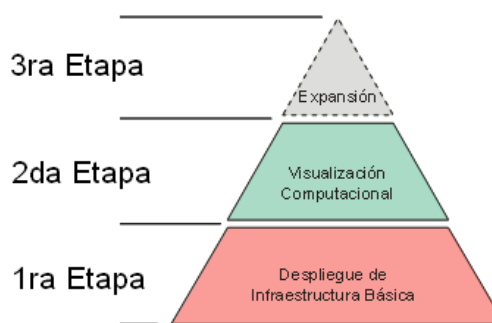


Figura 5: Etapas de la investigación

Etapa 1: Despliegue Básico

Establecimiento de Infraestructura Básica

- Celda de Combustible
- Sistema Inversor o carga electrónica
- Suministro de Hidrógeno
- Nodo Computacional para Instrumentación Virtual
- Sistema de Comunicación de Información

Resultados al final de la etapa:

- Despliegue de infraestructura básica
- Demostración funcional parametrizada por segmentos

Etapa 2: Visualización Computacional

Desarrollo de Instrumentación, Visualización e Instrucción

- Sistema de Instrumentación Virtual para extracción de datos
- Establecimiento de un mímico gráfico del estado del sistema
- Sistema de visualización de datos operacionales
- Análisis funcional de régimen permanente controlado a partir del estudio del espectro de impedancias
- Patrones de instrucción en sistema de AC con celdas de combustible
- Lineamientos de mantenimiento de sistemas de CC

Resultados al final de la etapa:

- Trabajos de investigación en instrumentación y visualización de datos en sistemas de CC
- Módulos educativos preparados

Etapa 3: Expansión y Afianzamiento

La etapa 3 de expansión consistirá en el diseño de un sistema aislado de suministro de energía continuo, el cual incluye celda de combustible, inversores, paneles solares, generador de hidrógeno, equipo de instrumentación y sistema de almacenamiento de hidrógeno.

Expansión y Afianzamiento.

- Caracterización de las fallas funcionales de la CC.
- Mecanismos de diagnóstico en la CC.
- Algoritmos del sistema de compensación
- Diseño de sistema de compensación

Objetivos:

- Diagnosticar los fallos que se producen en las celdas de combustible mediante los datos capturados por los sensores que integran el sistema de Instrumentación Virtual a través de LabView.
- Determinar el modelo matemático para la caracterización del funcionamiento de la membrana de la celda de combustible “First Element Energy 4.5 kW rated” usando herramientas de Matlab.

- Diseñar un sistema de compensación acorde a los resultados obtenidos del modelo matemático según la caracterización de la celda de combustible.

Resultados al final de la etapa:

- Algoritmos del modelo que caracteriza la celda.
- Sistema de compensación diseñado

RESULTADOS DE LAS DOS PRIMERAS ETAPAS.

Las autoridades de UNAPEC autorizaron que, para la implementación de este proyecto, un espacio con un área aproximada de 50 metros cuadrados, para que se iniciaran los trabajos del Centro de Investigación de Energías renovables. A continuación, se describen las actividades realizadas:

- a. Instalación electromecánica de la celda combustible y periféricos.

Se realizaron todas las instalaciones electromecánicas y de periféricos computacionales del equipo. Las imágenes a continuación resumen estas actividades:





Imágenes: Instalación de Celda de combustible

b. Puesta en marcha del equipo

Se procedió a realizar la puesta en marcha de las operaciones del equipo. Para eso, nos acompañó Mike Harvell, técnico especializado enviado para tales fines por Fuel Cell Solutions y Fist Element Energy.



Imágenes: Puesta en marcha de las operaciones del equipo

c. Desarrollo plataforma de instrumentación virtual

Se desarrolló la plataforma de captura y almacenamiento de datos sobre el comportamiento funcional del equipo.

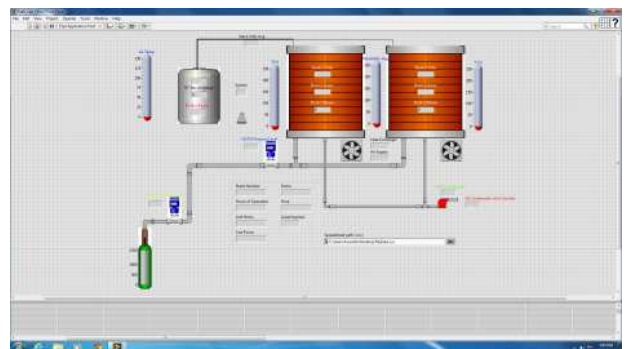
La plataforma puede ser accedida vía Web bajo políticas de acceso preestablecidas.

La plataforma es lo suficientemente flexible para permitir en un futuro la incorporación de módulos de adquisición de datos utilizando microcontroladores (Microchip, Atmel, Texas Instrument, etc.) o utilizando módulos como el Arduino, o bien utilizando micro módulos computarizados como el raspberry pi, Beaglebone, etc.

La celda dispone de una serie de elemento auxiliares que permiten capturar determinados parámetros de operación del sistema, tales como la presión de los tanques de hidrógeno, así como la presión de entrada de hidrógeno al sistema, las temperaturas en cada celda, los voltajes por celda, las corrientes por celdas, así como la tensión de bus de las celdas en conjunto, como la corriente en ese mismo punto, también se puede adquirir las tensiones del banco de carga, al igual que el módulo de regulación de tensión de carga. Por otro lado, se puede conocer las velocidades de los ventiladores para extraer el calor de las celdas, así como de la bomba que extrae la condensación y también la producción de agua que se genera luego de la conversión del hidrógeno al pasar por las celdas.

Toda la información que se registra del funcionamiento del sistema, se almacena en un sistema de archivo, que posteriormente es abierto para estudios futuros del funcionamiento del sistema, este archivo es procesado mediante la herramienta de Labview, el cual permite poder comparar los diferentes datos capturados por el sistema dentro del archivo.

En la siguiente gráfica 1, se muestra el panel frontal del sistema realizado en Labview para la simulación de los parámetros almacenados.



Gráfica 1: Panel frontal

En el siguiente diagrama en bloque se muestra la lógica que examina los parámetros del archivo de registro y luego los despliega en cada posición asignada en el panel frontal.

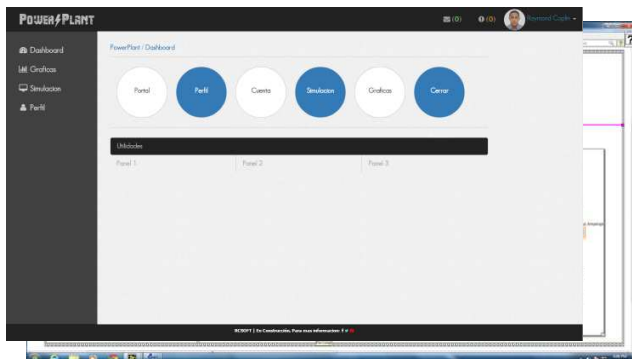
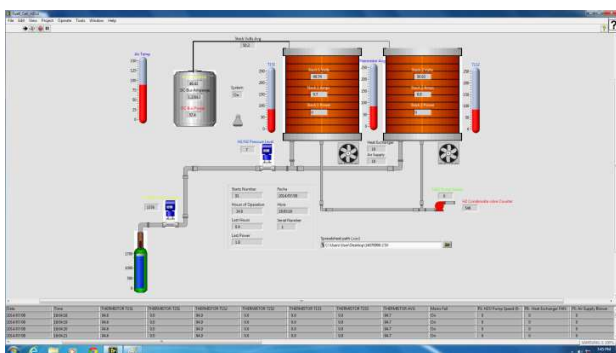


Diagrama en bloque: Lógica de parámetros

El sistema en Labview, abre el archivo que contiene la información de los parámetros adquiridos durante la operación del sistema de la celda de hidrógeno, y luego de ejecutarse el sistema en Labview, reproduce cada parámetro de la celda de forma virtual.

En la gráfica 2 se muestra una porción del sistema ejecutado, donde se aprecia algunos valores de los parámetros adquiridos y leídos del archivo de registro.



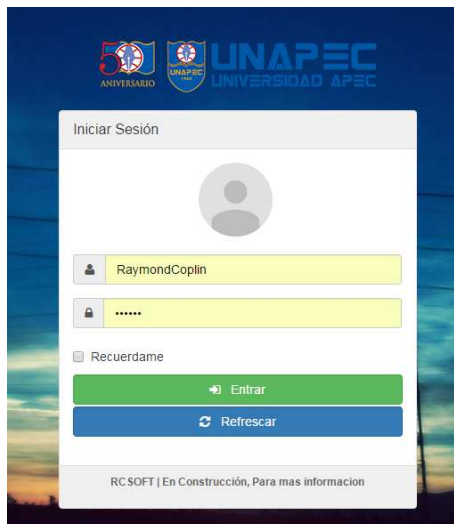
Gráfica 2: Sistema Ejecutado

En la pantalla del sistema basado en Labview, se muestra un mímico del sistema de monitoreo de la celda, donde se aprecia lo que sería cada bloque o sección de la celda de combustible para un mejor entendimiento de las diferentes etapas durante el proceso conversión de la energía por la celda

Además, el sistema desarrollado en Labview puede ser visible vía Web, para permitir la realización de talleres educativos virtuales a estudiantes que deseen conocer todo el proceso de conversión del hidrógeno en energía eléctrica y el funcionamiento del equipo.

A continuación, se detalla los puntos más relevantes de la aplicación Web del sistema de la celda de combustible.

1. Panel inicio de sesión:



2. Dashboard: En el cual el usuario tendrá acceso rápido a todas las funcionalidades de la aplicación Web. Este dashboard contiene iconos de fácil acceso los cuales llevaran al usuario a la funcionalidad que seleccione.

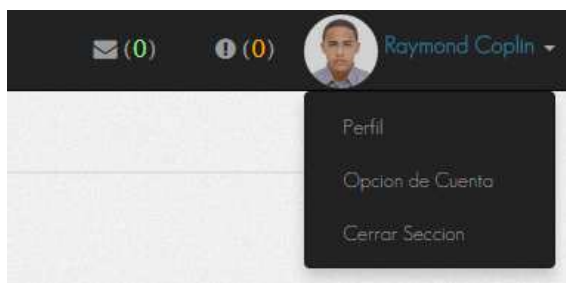


Imagen: Dashboard

3. Barra Horizontal la cual contiene los mensajes, alertas y opciones del usuario.



Imagen: Barra Horizontal

Esta barra se adapta a cualquier resolución y desde un dispositivo móvil se vería de la siguiente forma:



Imagen: Visualización en móvil

En la primera fase, cuenta con dos gráficas que son:

- Temperatura de las celdas y el promedio
- Voltaje de las celdas y el promedio



Imagen: Temperatura

4. El Menú Vertical, que será visible desde cualquier vista de la aplicación, este contendrá acceso a DashBoard, Gráficas, Simulación y Opciones de Usuario.



Imagen: Menú Vertical

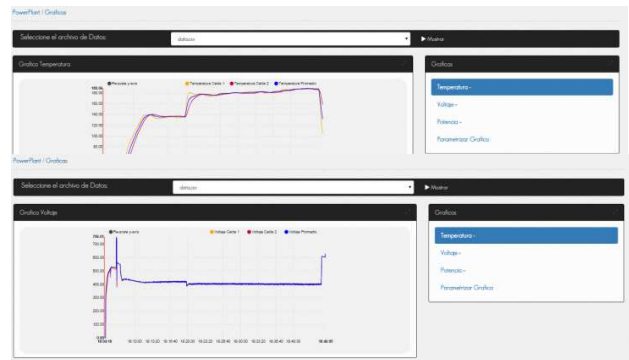


Imagen: Voltaje y promedio

5. Generador de Gráficos: Como se ve en la imagen inferior se selecciona el archivo de datos que queremos graficar. El panel de Gráficas los tipos de gráficas están agrupadas, esto significa que si pulsamos en un grupo se despliegan las gráficas disponibles.

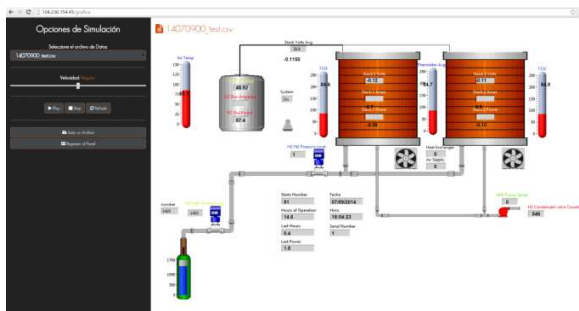


Imagen: Generador de gráficos

6. Simulación de la planta con los valores respeto al tiempo que transcurre.

La simulación cuenta con un panel en el cual los usuarios podrán seleccionar el archivo CSV que quieran visualizar en la simulación, elegir la velocidad de simulación, botones para darle inicio, pausar, refrescar. Tiene una funcionalidad para subir un archivo CSV para que pueda ser visualizado en la gráfica o simplemente para almacenarlo en la cola de documentos.

Contiene una barra de progreso la cual indica lo que tarda en generarse el archivo CSV para ser visualizado en la simulación.



Imagen: Simulación

7. Opciones de Perfil

En las opciones de perfil el usuario podrá visualizar y modificar su información personal, como nombre, correo, foto de perfil, etc.

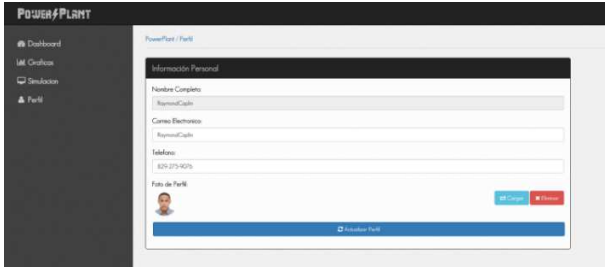


Imagen: Opciones de perfil

Dentro de las opciones de usuario también tenemos las opciones de cuenta en la cual se podrán hacer modificaciones referentes a la información de inicio de sección.

CONCLUSION

La importancia de desarrollar nuevas tecnologías en el área de generación de energía es una necesidad latente en los países subdesarrollados. Por lo que, la utilización de celda de combustible podría ser una alternativa eficiente para la generación de energía limpia y amigable con el medio ambiente.

No obstante, la utilización de Membrana de Intercambio protónico (PEM) presenta el problema de que no se puede predecir cuándo fallarán. Esto implica que su desarrollo como una alternativa de energía renovable no tenga el alcance y crecimiento esperado. Se ha realizado investigaciones sobre esta limitante, pero solo se ha tenido resultados puntuales y preliminares de señales de voltaje y corriente.

La iniciativa de esta investigación parte desde la Escuela de Ingeniería de la Universidad APEC enfocada a la búsqueda de solución a través de energías renovables. En ese sentido, se ha elaborado una estrategia para desarrollar investigaciones que permitan la conformación de una unidad de innovación y desarrollo para la creación de un sistema de energía aislado sostenible.

La primera y segunda etapa de este proyecto se enmarca en la instalación y creación de la infraestructura de la celda de combustibles en el campus de ingeniería, así como la visualización y computación de los datos generados por la celda de combustible utilizando instrumentación virtual, la cual se apoya en aplicaciones de LabView con interfaces de Arduino. Estas herramientas permitieron la generación de una base de datos, que proporciona valores precisos de los parámetros de funcionamiento de la celda.

En ese sentido, la tercera etapa de expansión se iniciará con la investigación de un modelo matemático para simular el comportamiento de la membrana PEM y así poder establecer algoritmos de anticipación a las fallas funcionales de la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. **Almarza, Javier; Salueña, Xavier;** *Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia*, Universidad Politécnica de Catalunya, 2010.
- [2]. **BP.** *Statistical Review of World Energy*. London. 2004
- [3]. **Renewable Energy Consumption and Electricity**
- [4]. **Castellanos Tamayo, Sebastián; Molina Ozuna Michel;** *Modelado y simulación de una celda de combustible reversible de Membrana Polimérica para producción de hidrogeno*, Universidad de Cartagena, 2013
- [5]. **D. Brunner et al.** "A Robust Cell Voltage Monitoring System for Analysis and Diagnosis of Fuel Cell or

- Battery Systems." *Journal of Power Sources*, vol 54, pp 7, Jun, 2010
- [6]. **Doddathimmaiah A, Andrews J.** *Theory, modelling and performance measurement of unitized regenerative fuel cells*, International journal of hydrogen energy 34 (2009), Pág. 8157-8170
- [7]. **Europe's Energy Position: Markets and Supply Report 2009**, Directorado General de Energía de la Unión Europea, Disponible en <http://www.energy.eu/>, January 2010.
- [8]. **E. Ramschak et al.** "Detection of Fuel Cell Critical Status by Stack Voltage Analysis." *Journal of Power Sources*, vol. 157, pp 837-840, Feb, 2006
- [9]. **Escobedo Hernández, Enrique;** Tesis "Modelado dinámico de celdas de combustible" Cuernavaca, México, 2006
- [10]. **Executive Summary 2014**, World Energy Outlook. Agencia Internacional de Energía (EIA), disponible en www.iea.org
- [11]. **Félix Barreras, Antonio L.;** *Hidrogeno. Pilas de combustible de tipo PEM*; Año Internacional de la Energía Sostenible para todos, Universidad de Zaragoza, 2012
- [12]. **Future world energy demand driven by trends in developing countries**, Reporte del Departamento de Energía de los Estados Unidos , disponible en <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=14011>, Diciembre 2013
- [13]. **García Díaz Francisco.** *Estudio de reversibilidad para almacenamiento de energía en una pila de combustible polimérica*, Madrid 2005, Trabajo de grado, Ingeniero Industrial, Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería
- [14]. **G. Luna-Sandoval, G. Urriolagoitia-Sosa, G. Urriolagoitia- Calderón, L. H. Hernández-Gómez, y J. P. Campos-López,** "Fuel cells using urine as a natural electrolyte; Clean energy alternative's new way for Hydrogen fuel", International Material Research Congress IMRC XX, pp. 101, 2011.
- [15]. **G. Mulder et al.** " Evaluation of an On-Site Cell Voltage Monitor for Fuel Cell Systems." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp 5728-5737, Sep, 2008
- [16]. **H. Cao et al.** "Dynamic Modeling of Electrical Characteristics of Solid Oxide Fuel Cells Using Fractional Derivatives." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, pp 1749-1758, Jan, 2010
- [17]. Informe de la empresa Bellona sobre el Hidrógeno, disponible en <http://www.bellona.org>
- [18]. **J.A. Botas et al.** La Economía del Hidrógeno. Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología (ESCET), Universidad Rey Juan Carlos. Disponible en: <http://www.aecientificos.es/empresas/aecientificos/documentos/LAECONOMIADELHIDROGENO.pdf>
- [19]. **J. O'Rourke et al.** "In Situ Detection of Anode Flooding of a PEM Fuel Cell." *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, pp 6765-6770, Jul, 2009
- [20]. **K.A. Williams et al.** "Experimental Investigation of Fuel Cell Dynamic Response and Control." *Journal of Power Sources*, vol. 163, pp 971-985, Nov, 2006
- [21]. **Marangio F, Santarelli M, Cali M.** *Theoretical model and experimental analysis of a high Pressure PEM water electrolyser for hydrogen production*, International Journal of Hydrogen 34, (2009)
- [22]. **N. Fouquet et al.** "Model Based PEM Fuel Cell State-of-Health Monitoring Via AC Impedance Measurements". *Journal of Power Sources*, vol 159, pp 905-913, Dec, 2005.
- [23]. **Preliminary Statistics 2008**, Reporte del Departamento de Energía de los Estados Unidos, disponible en <http://www.eia.doe.gov/fuelrenewable.html>, Julio de 2009
- [24]. **Tibarquirá Juan; Posner Jonathan;** *Diseño y Construcción de una celda de combustible tipo Membrana de Intercambio Protónico*, Scientia et Technica Año XV, No 42 Agosto de 2009. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122- 1701