

# Análisis del Comportamiento Eléctrico de un Sistema Conformado por un Módulo de Celda de Combustible y un Convertidor Elevador

L. H. Díaz-Saldierna, E. I. Vázquez-Nava, M. G. Ortiz-López y J. Leyva-Ramos  
División de Matemáticas Aplicadas-IPICYT  
San Luis Potosí 78216, México  
[ldiaz, erick.vazquez, gortiz, jleyva}@ipicyt.edu.mx  
Teléfono: (52)-444-8342000

**Resumen**—Los módulos de celdas de combustible tienen las desventajas de generar niveles de voltaje bajos y no regulados. Debido a lo anterior, es necesario utilizar convertidores electrónicos para elevar y regular el voltaje generado por las celdas de combustible. En este trabajo, se propone un modelo para el sistema módulo de celda de combustible/convertidor conmutado. Este modelo se compara experimentalmente en el laboratorio utilizando un convertidor elevador diseñado para entregar una potencia máxima de 730 W. El módulo de celda de combustible es de tipo PEM (Proton Exchange Membrane) en el cual el voltaje de salida varía desde 41.7 V hasta 26 V a una corriente máxima de 46 A.

**Palabras clave:** Convertidores CD-CD, sistemas no lineales, celdas de combustible.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran cantidad de trabajos de investigación enfocados en el desarrollo de nuevas tecnologías en sistemas de energías renovables. Los sistemas de tipo fotovoltaico o de módulos de celdas de combustible generan voltajes de salida pequeños y no regulados; por lo tanto, es esencial conocer el comportamiento de dichos sistemas e incorporar la dinámica de dicho voltaje al momento de diseñar el regulador conmutado para alguna aplicación en específico.

Las celdas de combustible son una alternativa interesante para la generación energía eléctrica (Jensen, S. H., 2007). Una celda de combustible utiliza el hidrógeno como fuente de energía, al igual que una batería, la reacción electro-química es directamente convertida en energía eléctrica sin el proceso ineficiente de combustión. Existen varios tipos de celdas de combustible que se caracterizan por los electrolitos que utilizan como combustible, como son las que utilizan gasolina, gas natural, metanol, gras propano e hidrógeno.

Una de las celdas de combustible más prácticas a utilizar en aplicaciones móviles y estacionarias es la tipo PEM (Polymer Electrolyte Membrane, de sus siglas en inglés). Este tipo de celda utiliza el hidrógeno como combustible y se caracteriza por tener un diseño de área pequeño, opera a bajas temperaturas y su peso es reducido (Meiler, M., 2012). Por otra parte, presenta la desventaja que el voltaje de salida varía con la corriente generada. El voltaje típico de una celda individual que genera una corriente de 0.4-0.8 A/cm<sup>2</sup> es de aproximadamente 0.7 V, este voltaje se decrecienta conforme

se incrementa el valor de la corriente hasta llegar a un nivel de 0.4 V; por lo tanto, es necesario hacer arreglos en serie para lograr niveles de voltajes arriba de 0.7 V. Otra desventaja importante en este tipo de celda es que la constante de tiempo depende directamente del sistema de suministro de combustible (bombas, válvulas, etc.). Debido a lo anterior, una demanda rápida de carga provocará una caída de voltaje de gran magnitud en un lapso corto de tiempo.

Se han propuesto diversas configuraciones de convertidores electrónicos para elevar y regular el voltaje generado por los módulos de celdas de combustible; sin embargo, en el presente trabajo se utiliza el convertidor elevador convencional para generar un modelo dinámico del sistema módulo de celda de combustible/convertidor elevador. Para este tipo de convertidor, la relación de conversión de voltaje depende de la señal de modulación que controla el interruptor activo (Narjiss, A., 2008, Yang, L.-S., 2009, Changchien, S.-K., 2010). Para el caso de que sea necesaria una relación de conversión de voltaje amplia, varios convertidores elevadores pueden ser conectados en cascada (Ortiz-Lopez, M. G., 2008).

El trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se muestra del comportamiento eléctrico del módulo de celda de combustible. En la Sección III se deriva un modelo que combina el módulo y el convertidor elevador. En la Sección IV se muestran resultados experimentales utilizando la celda de combustible como entrada del convertidor. En esta sección se compara el modelo dinámico combinado obtenido de manera teórica y el comportamiento obtenido en el laboratorio. En la Sección V se presentan los comentarios finales del trabajo.

## II. MODELADO DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE DE TIPO PEM

Existe una gran cantidad de modelos que representan el comportamiento en la dinámica electro-química de la celda de combustible de tipo PEM; sin embargo, en este trabajo se estudia un modelo eléctrico estático con características de continuidad en grandes rangos de corrientes, incluyendo el comportamiento con corriente cero (Shahin, A., 2010). Este modelo requiere solamente tres parámetros:

$$E_f(i_f) = \frac{E_o}{1 + \left(\frac{i_f}{I_h}\right)^\delta} \quad (1)$$

donde  $E_f$  es el voltaje de salida del módulo de celda de combustible,  $E_o$  es el voltaje a circuito abierto e  $i_f$  es la corriente generada por el módulo de celda de combustible. Los valores de los parámetros  $\delta$  y  $I_h$  dependen de la humedad del gas de entrada y la temperatura interna de la celda, respectivamente. Estos parámetros junto con  $E_o$  deben ser calculados para cada módulo de celda de combustible en específico. En la Figura 1 se muestra el módulo de celda combustible Nexa de Heliocentrics y de dimensión reducida. Otro punto a considerar es que el mantenimiento es mínimo y está completamente automatizado. Este módulo de celda de combustible produce una potencia de 1.2 kW a voltaje nominal de 26 V, sin embargo, el módulo entrega una potencia de 1.04 kW debido a que la potencia restante es disipada principalmente en el diodo de protección.

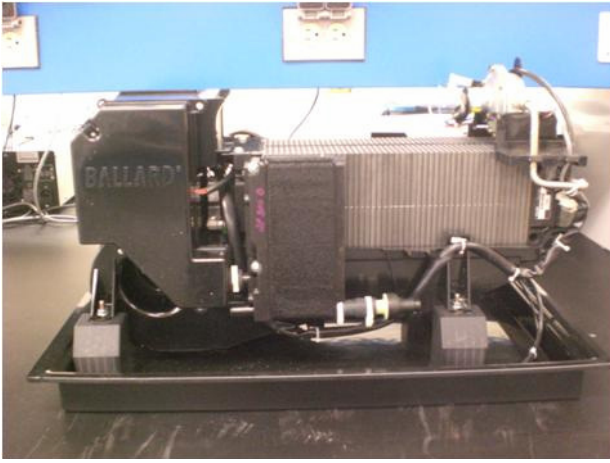


Figura 1. Módulo Nexa.

Datos experimentales del voltaje de salida y corriente generada tomados del módulo Nexa son presentados en la Figura 2.

Debido a los errores de modelado, ruido, instrumentación, etc., la expresión (1) no generará los valores individuales de  $\delta$  y  $I_h$ , además de todos los datos experimentales. Debido a lo anterior, el problema es reformulado como una solución de mínimos cuadrados, esto es, la minimización de:

$$E^2(I_h, \delta) = \sum_{k=1}^N |e_f(k) - E_f(i_f(k))|^2 \quad (2)$$

donde  $e_f$ ,  $i_f$  (para  $k = 1, 2, \dots, N$ ) es el conjunto de datos experimentales y  $E_f(i_f(k))$  es la expresión dada en (1) que depende de los datos de la corriente generada por el módulo. Una aproximación de primer orden de (1) se puede obtener a través de:

$$e_f(k) - E_f(i_f(k)) = \frac{\partial E_f}{\partial I_h} \Delta I_h + \frac{\partial E_f}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (3)$$

donde  $\Delta I_h$  y  $\Delta \delta$  son los errores entre el modelo y los datos experimentales.

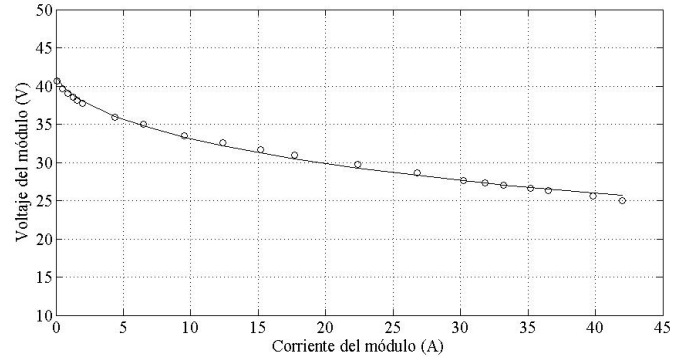


Figura 2. Comportamiento estático del módulo Nexa. Datos experimentales (trazo de puntos) y modelo (línea continua).

Ahora, la obtención de la solución a través de mínimos cuadrados es realizada de manera iterativa, de tal manera que  $I_h(j+1) = I_h(j) + \Delta I_h$  y  $\delta(j+1) = \delta(j) + \Delta \delta$ , para  $j = 1, 2, \dots$ , hasta que los errores sean suficientemente pequeños. Al aplicar el procedimiento anterior usando los datos experimentales, se obtienen los valores de 90.52 A y 0.613 para  $I_h$  y  $\delta$  respectivamente. Estos datos dependen de parámetros como la humedad del ambiente y la temperatura del módulo; por otra parte, el valor de  $E_o$  es de 41.7 V. La comparación entre el modelo y los datos experimentales mostrados en la Figura 2 confirman la precisión del modelo descrito.

### III. SISTEMA MÓDULO DE CELDA DE COMBUSTIBLE-CONVERTIDOR ELEVADOR

De acuerdo a lo comentado en la sección anterior, el módulo Nexa tiene un voltaje de salida máximo (sin carga) de 41.7 V; sin embargo, existe una caída en el voltaje de salida dependiente de la corriente generada (ver Figura 2). Por lo tanto, para suministrar un voltaje deseado es necesario elevar y mantener en un nivel fijo en el voltaje de salida del módulo a través de un convertidor elevador, la Figura 3 muestra el convertidor propuesto. Se observa que se agrega un capacitor entre la salida de la celda y la entrada del convertidor, esta técnica se utiliza para evitar posibles daños al módulo de celda de combustible cuando existan cambios rápidos de carga. El valor promedio de voltaje de salida del convertidor propuesto es  $V_o = E_f / (1 - U)$ , donde  $U$  es el ciclo de trabajo que controla al interruptor activo y está comprendido entre cero y uno. Esta señal se obtiene a través de un generador PWM (Pulse Wide Modulation, de sus siglas en inglés). La frecuencia de conmutación es  $f_s$  y tiene un periodo de  $T = 1/f_s$ . La carga es modelada por  $R$  y la corriente promedio del inductor se obtiene de acuerdo a  $I_L = I_o / (1 - U)$ . Se asume que el convertidor opera en modo de conducción continua (MCC) y por lo tanto, el nivel de corriente en el inductor nunca llega a cero.

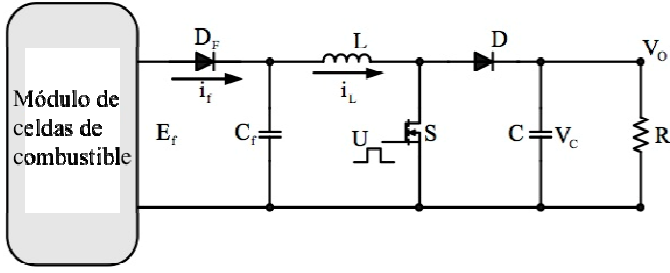


Figura 3. Módulo de celdas de combustible-convertidor elevador.

Utilizando el concepto de modelo promedio, se puede obtener el modelo continuo de baja frecuencia para el convertidor elevador. La linealización del modelo no lineal promedio se puede llevar a cabo separando en dos partes las variables de estado (corriente de inductor, voltaje en el capacitor de entrada, señal de control y voltaje de entrada). La primera parte de la descomposición contiene los valores nominales denotados por letras mayúsculas, la segunda parte contiene las variaciones del valor nominal de operación y se denotan por  $\sim$ . De esta manera, la descomposición del voltaje de salida del módulo es  $e_f(t) = E_f + \tilde{e}_f(t)$ , la descomposición de la señal de control es  $u(t) = U + \tilde{u}(t)$ .

Asumiendo que las variaciones son suficientemente pequeñas tal que los términos cuadráticos y los no lineales son despreciables, resulta un modelo lineal promedio de la forma:

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{u} \quad (4)$$

donde  $\tilde{x} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_L & \tilde{v}_o \end{bmatrix}^T$  es el vector de estados y  $\tilde{u} \in \mathcal{R}$  es la señal de control para la modulación. Al incluir las matrices A y B del convertidor en la expresión (4), se obtiene:

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} 0 & -(1-U)/L \\ (1-U)/C & -1/RC \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} V_o/L & 1/L \\ -V_o/(1-U)RC & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{e}_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

Este modelo lineal e invariante en el tiempo describe el comportamiento aproximado del convertidor elevador para valores por debajo de la mitad de la frecuencia de conmutación, aunque no es adecuado para predecir oscilaciones sub-armónicas debidas a inestabilidades de rizo.

Por otra parte, la expresión que describe el voltaje del capacitor de acoplamiento entre el módulo y el convertidor  $C_f$  es:

$$C_f \dot{\tilde{e}}_f = I_h \left( \frac{E_o}{e_f} - 1 \right)^{1/\delta} - i_L \quad (6)$$

donde  $i_L$  es la corriente de inductor y  $e_f$  es el voltaje de salida del módulo. Se puede observar que la corriente promedio en estado estable que genera el módulo es la misma que la corriente en estado estable del inductor del convertidor.

Para un voltaje de salida del convertidor fijo ( $V_o$ ), los valores en estado estable de la corriente y el voltaje del módulo están dados por:

$$I_f = I_L = \frac{V_o}{(1-U)R} \quad (7a)$$

$$E_f = \frac{E_o}{1 + \left( \frac{V_o}{(1-U)RI_h} \right)^\delta} \quad (7b)$$

se puede notar que los valores anteriores dependen del valor de la carga R y del ciclo de trabajo U.

La linealización se obtiene a partir de la expresión (1) y  $\tilde{e}_f = -\kappa \tilde{i}_f$  donde:

$$\kappa = \frac{E_o \delta I_h^\delta I_f^{\delta-1}}{(I_h^\delta + I_f^\delta)^2} \quad (8)$$

La ecuación del voltaje de salida del módulo se puede expresar como:

$$\tilde{e}_f = -\frac{\tilde{e}_f}{C_f \kappa} - \frac{\tilde{i}_L}{C_f} \quad (9)$$

Al combinar las expresiones (5) y (9) se obtiene el modelo para el sistema módulo de celda de combustible-convertidor elevador como se muestra en la expresión (10).

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{e}}_f \\ \dot{\tilde{i}}_L \\ \dot{\tilde{v}}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/C_f \kappa & -1/C_f & 0 \\ 1/L & 0 & -(1-U)/L \\ 0 & (1-U)/C & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{e}_f \\ \tilde{i}_L \\ \tilde{v}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ V_o/L \\ -V_o/(1-U)RC \end{bmatrix} \tilde{u} \quad (10)$$

Este modelo puede ser utilizado con fines de análisis y diseño de controladores para regulación de voltaje en la salida del convertidor.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se describe el diseño de un convertidor elevador para realizar pruebas experimentales a lazo abierto, utilizando como fuente de energía el módulo de celda de combustible. El convertidor elevador se diseña para entregar una potencia máxima de 730 W a un voltaje de salida de 48 V; por lo tanto, la corriente máxima que puede entregar el convertidor será de 15.20 A para un valor de carga nominal de 3.15  $\Omega$ . Se observa en la Figura 2 que al demandar una corriente de 15.20 A al módulo, el voltaje de salida es de aproximadamente 31 V, de acuerdo a la relación  $V_o = E_f/(1-U)$  se obtiene un ciclo de trabajo de 0.36. La frecuencia de conmutación utilizada es de 100 kHz, el valor del capacitor se puede obtener a través de la expresión  $C = (U i_0)/(f_{sw} \Delta V_c)$  donde  $f_{sw}$  es la frecuencia de

conmutación y  $\Delta V_c$  es el rizo de voltaje. El valor del inductor se obtiene utilizando la relación  $L = (UE_f)/(f_{sw}\Delta i_L)$  donde  $\Delta i_L$  es el rizo de corriente.

Para los valores de los elementos del convertidor se utiliza el criterio del 1 % para el rizo del voltaje promedio del capacitor y un 15 % para el rizo de la corriente promedio en el inductor. Estos valores son recomendados por la industria de fuentes de poder.

La eficiencia del convertidor para distintos valores de carga se muestra en la Figura 4. El voltaje de salida del convertidor en mantiene en 48 V mientras que se varía la carga desde  $100 \Omega$  hasta  $2.56 \Omega$ .

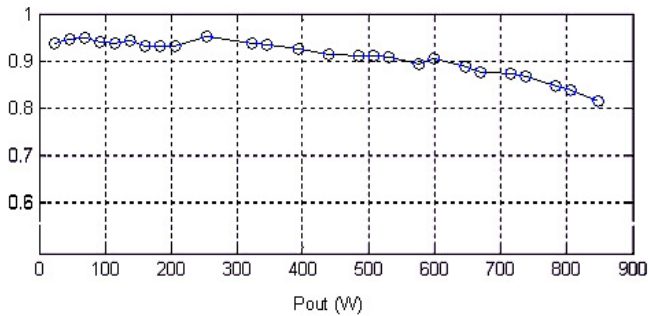


Figura 4. Eficiencia del convertidor.

Tabla 1. Parámetros del convertidor elevador.

Capacitor C	180 $\mu$ F
Capacitor C <sub>f</sub>	5600 $\mu$ F
Inductor L	80 $\mu$ H
Carga nominal R	3.15 $\Omega$
Diodo D	80EBU02
Diodo D <sub>f</sub>	T70HFL20502
MOSFET S <sub>1</sub>	IRFP4568
MOSFET S <sub>2</sub>	IRFP4668
Modulador	LM311
Driver MOSFET	IR2117

De acuerdo a la Figura 4, el convertidor presenta una eficiencia de aproximadamente el 86 % a una potencia de 730 W con una corriente demandada del módulo de 24.20 A. Al observar la Figura 2 se tiene que el módulo genera un voltaje de 27 V al demandarle una corriente de 24.20 A, al calcular nuevamente el ciclo de trabajo con la eficiencia del 86% se obtiene un valor de 0.45.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros del convertidor construido en el laboratorio, el valor del capacitor y del inductor se obtuvieron en base al nuevo ciclo de trabajo y los valores comerciales de capacitores existentes.

Ahora se realiza un análisis para describir el comportamiento dinámico del sistema módulo de celda de combustible-convertidor elevador, cabe mencionar que en este trabajo no se realiza el diseño de un controlador para regulación de voltaje en la salida del convertidor. La función de transferencia  $\tilde{v}_o(s)/\tilde{u}(s)$  es una función de tercer orden y de fase no mínima debido a que tiene un cero en el lado

derecho del semiplano complejo. Esta función tiene dos ceros localizados en  $\{9425.6, -1055\}$  y tres polos en  $\{-1379.3, -1324.5 \pm j5188\}$ . Una ganancia de  $-263800$  multiplica a la función de transferencia. Se puede observar que un polo y un cero se localizan a bajas frecuencias; por otra parte, existe un cero localizado en altas frecuencias y en el lado derecho del semiplano complejo. Este cero debe tomarse en cuenta al momento de diseñar un controlador debido a que puede ocasionar inestabilidad. También existe un pico de resonancia dependiente de los parámetros del convertidor. La función de transferencia  $\tilde{i}_L(s)/\tilde{u}(s)$  es de tercer orden y de fase mínima, contiene los mismos polos que  $\tilde{v}_o(s)/\tilde{u}(s)$  y sus ceros se localizan en  $\{-1257.7, -5541.1\}$ .

Las funciones de transferencia de  $\tilde{i}_L(s)/\tilde{u}(s)$  y  $\tilde{v}_o(s)/\tilde{u}(s)$  tanto teóricas como prácticas son mostradas en la Figura 5. Las funciones de transferencia fueron medidas en el sistema construido utilizando el analizador de respuesta en frecuencia modelo 300 de AP Instruments, Inc.

A la gráfica teórica se le multiplica la ganancia del modulador  $1/V_p$ , donde  $V_p = 5$  V es el valor pico de la señal diente de sierra. Se observa que la ganancia de CD es aproximadamente 45 dB y el pico de resonancia aparece a los 799 Hz.

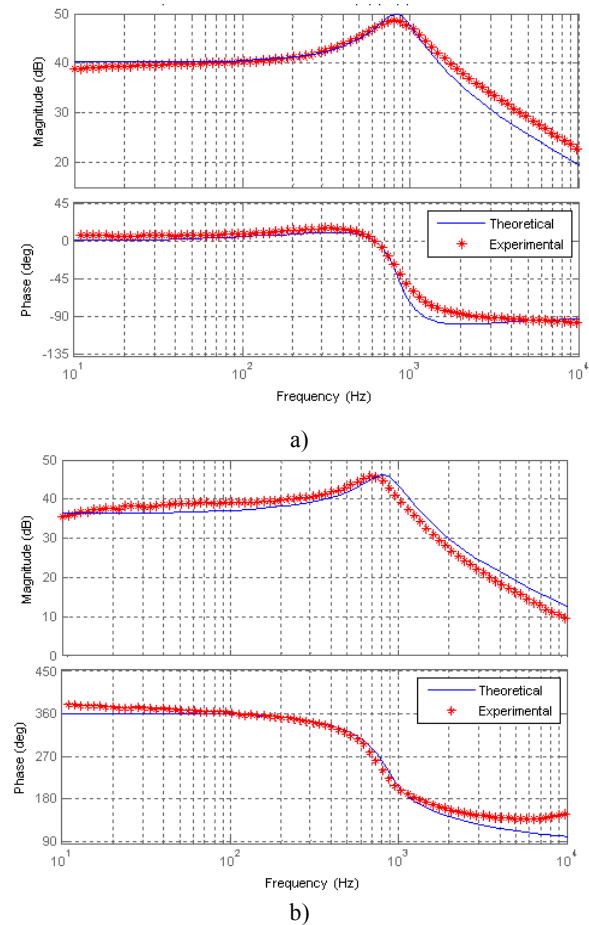


Figura 5. Respuesta en frecuencia para las funciones de transferencia: a)  $\tilde{i}_L(s)/\tilde{u}(s)$  y b)  $\tilde{v}_o(s)/\tilde{u}(s)$ , utilizando en

ambos casos una carga de  $3.15 \Omega$ .

En la Figura 6 se observa la operación del sistema módulo de celda de combustible/convertidor elevador en condiciones nominales. El convertidor elevador tiene un voltaje de salida de 48 V, la corriente del inductor tiene un nivel de corriente directa (CD) con un rizo de forma triangular debido al proceso de conmutación del convertidor elevador. El convertidor opera en modo de conducción continua (MCC).

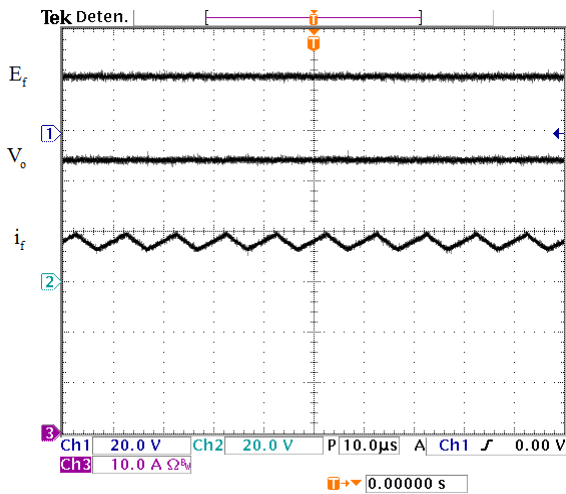


Figura 6. Operación del sistema a una carga nominal de  $3.15 \Omega$ . (De arriba hacia abajo) Voltaje de salida del módulo (20 V/div), voltaje de salida del convertidor (20 V/div) y corriente de inductor (25 A/div), (Tiempo: 10  $\mu$ s/div).

La Figura 7 muestra la operación de la celda entre puntos de carga A y B. Se utiliza un MOSFET para simular el cambio de carga a una frecuencia de 4 Hz. En la Figura 8 a) se observa la variación del voltaje de salida del módulo al aplicar el cambio de carga, cuyo valor es de 22.5 V hasta 34 V. En la Figura 8 b) se muestra la corriente de entrada del convertidor, la cual presenta un cambio en su valor de 7.5 A hasta 35 A.

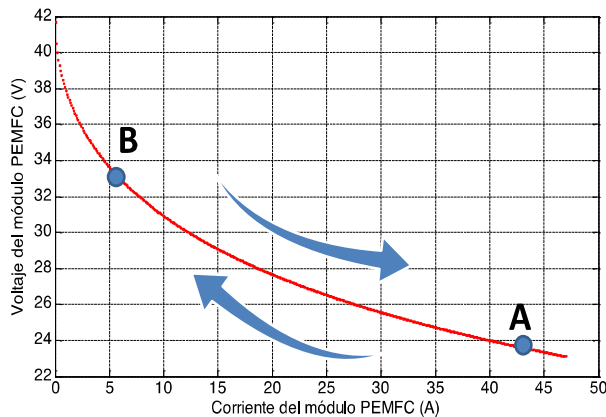
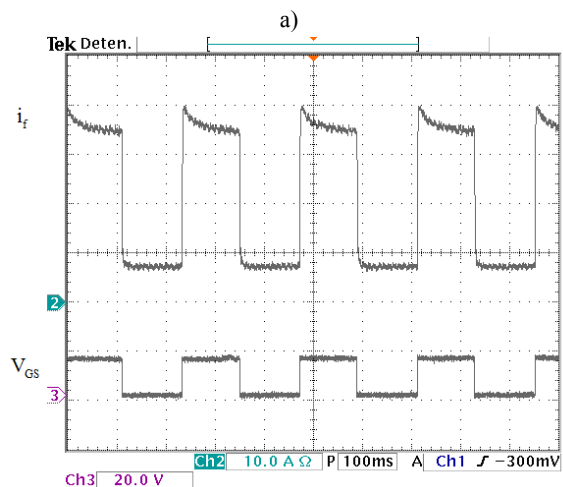
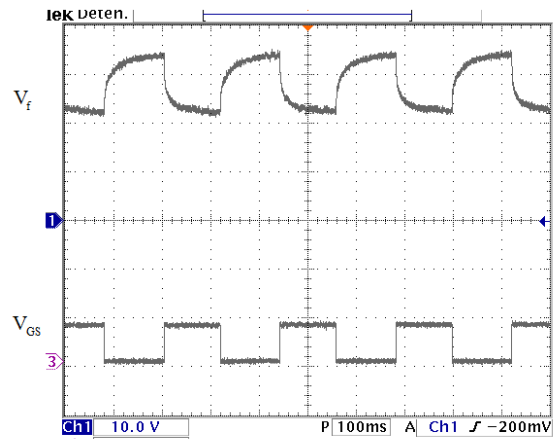


Figura 7. Operación del módulo de celdas de combustible entre puntos de carga A y B.



b)

Figura 8. Respuesta en el tiempo para cambios de carga de  $3.03 \Omega$  a  $33.33 \Omega$  (De arriba hacia abajo) a) Voltaje de salida del módulo (10 V/div) y señal de voltaje de la compuerta del MOSFET (20 V/div) y b) Corriente de salida del módulo (10 V/div) y señal de voltaje de la compuerta del MOSFET (20 V/div), (Tiempo: 100 ms/div).

La Figura 9 muestra la variación del voltaje de salida del convertidor ante los cambios de carga. El voltaje de salida del convertidor varía de 48 V hasta 77 V, mientras que la potencia de salida varía de aproximadamente 760 W hasta 178 W.

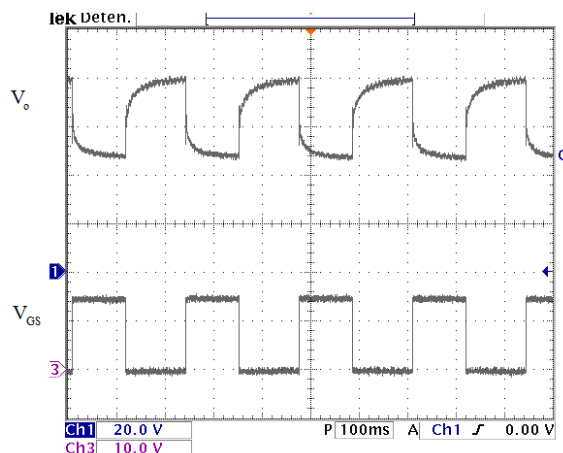


Figura 9. Respuesta en el tiempo para cambios de carga de  $3.03 \Omega$  a  $33.33 \Omega$

33.33  $\Omega$  (De arriba hacia abajo) Voltaje de salida del convertidor (20 V/div) y señal de voltaje de la compuerta del MOSFET (10 V/div), (Tiempo: 100 ms/div).

## V. COMENTARIOS FINALES

Las celdas de combustible son una opción viable para la generación de energía eléctrica; sin embargo, presentan la desventaja que producen voltajes bajos en su salida y es necesario elevar y regular dichos voltajes a través de un convertidor CD-CD. En la Figura 2 se muestra la curva  $I-V$  del módulo de celda de combustible modelo Nexa, se observa que es una relación no-lineal. Debido a lo anterior, es de suma importancia tomar en cuenta la dinámica de la celda como una entrada del convertidor elevador.

En este trabajo se describe el comportamiento eléctrico del sistema módulo de celda de combustible/convertidor elevador a través un modelo promedio de señal pequeña. El sistema combinado es de fase no mínima debido a la existencia de ceros en alta frecuencia del lado derecho del plano complejo. Se debe tomar en cuenta lo anterior al momento de diseñar un controlador. Los resultados experimentales muestran que el comportamiento desarrollado teóricamente es similar al comportamiento obtenido de manera experimental. Otro aspecto a considerar es que el procedimiento de modelado mostrado en este trabajo puede extenderse a otros tipos de convertidores.

## REFERENCIAS

- Jensen, S. H., Larsen, P. H. y Mogensen, M (2007). Hydrogen and synthetic fuel production from renewable energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy* 32, 3253-3257.
- Meiler, M., Hofer, E. P., Nuhic, A. and Schmid O (2012). An Empirical Stationary Fuel Cell Model Using Limited Experimental Data for Identification. *ASME J. Fuel Cell Sci. Technol*, 1001-1011.
- Narjiss, A., Depernet, D., Gustin, F., Hissel, D. and Berthon A (2008). Design of a High Efficiency Fuel Cell dc/dc Converter dedicated to Transportation Applications. *ASME J. Fuel Cell Sci. Technol* 5(4), 1004-1015.
- Yang, L.-S., Liang, T.-J. and Chen, J.-F (2009). Transformerless DC-DC converters with high step-up voltage gain. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 56 (8), 3144-3152.
- Changchien, S.-K., Liang, T.-J., Chen, J.-F. and Yang L.-S (2010). Novel high step-up DC-DC converter for fuel cell energy conversion system. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 57(6), 2007-2017.
- Ortiz-Lopez, M. G., Leyva-Ramos, J., Carbajal-Gutierrez, E. E. and Morales-Saldaña, J. A (2008). Modelling and analysis of switch-mode cascade converters with a single active switch. *IET Power Elect.* 1(4), 478-487.
- Shahin, A., Hinaje, M., Martin, J.-P., Pierfederici, S., Rael, S. and Daval, B (2010). High voltage ratio DC-DC converter for fuel-cell applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 57 (12), 3944-3955.
- Kassakian, J. G., Schlecht, M. F. and Verghese G. C (1991). *Principles of Power Electronics*. Addison Wesley.