

# Control System for Alkaline Electrolyser Focused to Enrichment of Dual Fuel

C. Cedano, V. M. Sánchez-Huerta, G. Becerra, E. Osorio, R. Barbosa and R. G. González-Huerta

**Abstract**—This paper presents the design of a DC-DC reduction converter, as well as the control system for it. With the aim of feeding an alkaline electrolyser that generates oxyhydrogen gas, which is supplied in a dual way to the fuel (gasoline) for enrichment in combustion engines. Gasoline, like other fossil fuels, is a non-renewable resource whose reserves are constantly declining. Due to this reason, to improve the efficiency and to reduce emissions is of great importance for energy reserves and environmental protection. This work proposes to enrich gasoline by adding hydrogen to the mixture of fuel and oxygen in order to improve combustion and reduce pollutants. Hydrogen is regarded as a promising alternative fuel for internal combustion engines, which unlike fossil fuels, it can be generated by renewable energy. On the internet there is a set of experiments with alkaline electrolyser, generating oxyhydrogen for fuel enrichment. However, the design and development of a control system, specifically designed for the dynamic performance of an electrolyser, is not commonly found in the scientific literature. The main approach of this paper is to design and build a power conditioning stage based on synchronous buck converter is used to provide supply power to an alkaline electrolyzer that produces hydrogen and oxygen with up to 99 % purify.

**Index Terms**—DC converter, PI controller, alkaline electrolyzer.

## I. INTRODUCTION

El traslado de personas, alimentos, plantas o mercancías se ha vuelto una práctica esencial en la economía actual, sin embargo, el uso de energía utilizada para movilidad está cambiando para armonizar la convivencia de la humanidad con el planeta.

Actualmente la gran mayoría de los vehículos que circulan a nivel mundial utilizan combustibles fósiles, los cuales son recursos no renovables y al detonarse generan gases contaminantes tales como; monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre. Esos gases contaminantes al liberarse al medio ambiente contribuyen en el incremento de los problemas ambientales como cambio climático y contaminación urbana global [1-3].

Debido a esto, varias investigaciones se han enfocado en disminuir el consumo de combustible a base de gasolina en

automóviles, mediante el enriquecimiento del combustible con la incorporación de mezclas adicionales en la combustión [2-4]. Se ha encontrado que la mezcla compuesta por hidrógeno ( $H_2$ ) es la más promisorio como aditivo; debido a su baja emisión tóxica y por mantener la potencia del motor. El hidrógeno puede ser obtenido mediante la técnica de electrólisis [5-6] y ser producido mediante fuentes de energías renovables [7-8]. Sin embargo, para el uso de  $H_2$  como combustible en motores de combustión interna (MCI), es necesario tener algunas consideraciones, tales como, la capacidad de explosión y el diseño del motor.

De los trabajos para motores de combustión con enriquecimiento de combustible y uso en modo dual se pueden mencionar [9-14] donde se aplica un porcentaje de gas oxihidrógeno, producido mediante un electrolizador y se analiza como respuesta la potencia incrementada y los principales gases contaminantes.

Por otro lado, la cantidad de hidrógeno generado por el electrolizador depende de la potencia eléctrica suministrada al mismo, en el vehículo se tiene una batería, por lo que la energía eléctrica debe controlarse mediante un convertidor de electrónica de potencia de corriente directa a corriente directa (CD-CD) [15]. Los convertidores tienen diferentes aplicaciones y por lo mismo, diferentes topologías que se adaptan a las necesidades particulares [16-19], además de oportunidades de investigación, y desarrollos [20-23].

En los últimos años se han difundido en internet una gran variedad de experimentos con electrolizadores alcalinos para el enriquecimiento de combustible. Sin embargo, estos experimentos carecen de un diseño metodológico y científico. En estos experimentos, por ejemplo, no se analiza y evalúa la eficiencia energética en la generación de oxihidrógeno, ya que no existe un diseño de la etapa de conversión de potencia al electrolizador. Además, en los diseños de los prototipos de estos experimentos no se toman en cuenta el principio de funcionamiento, la dinámica, y los puntos de operación de un electrolizador alcalino. Por otra parte, en la literatura científica no se encontraron estudios formales sobre el diseño del sistema de control y etapa de potencia acoplados a un electrolizador alcalino. Debido a esta problemática, la aportación del presente

C. Cedano, V. M. Sánchez-Huerta and R. Barbosa, Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México, c.cedano@gmail.com, vicsan.huerta@gmail.com, romelix@gmail.com.

G. Becerra and E. Osorio, CONACYT – Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México, guillermobec@gmail.com, osoriodelarosa@gmail.com  
R.G. González-Huerta Instituto Politécnico Nacional – ESQUIE,

Laboratorio de Electroquímica y Corrosión UPALM, Ciudad de México, México, rosgonzalez\_h@yahoo.com.mx

Corresponding authors: V. M. Sánchez-Huerta, G. Becerra

trabajo consiste en generar conocimiento en el desarrollo de un sistema de control diseñado específicamente para el desempeño dinámico de un electrolizador alcalino de bajo costo, de siete celdas a partir de su caracterización y de los resultados experimentales obtenidos.

El resto del documento está organizado de la siguiente forma: en la sección II se detalla el principio de operación de un electrolizador alcalino. La sección III contiene el diseño del convertidor CD-CD y su etapa de control. Los resultados experimentales del sistema de control para el electrolizador alcalino se muestran en la sección IV. Y finalmente se presentan las conclusiones en la sección V.

## II. EL ELECTROLIZADOR ALCALINO

Los electrolizadores alcalinos [5] se utilizan ampliamente para la producción de hidrógeno, son económicos en su manufactura, ya que no utiliza metales nobles en los electrodos, están diseñados y fabricados con el fin de generar hidrógeno y oxígeno con una pureza nominal de 99.8%. Por otro lado, con el fin de mejorar la conductividad de la solución, en el electrolizador se usan los electrolitos que generalmente se componen de iones con alta movilidad. Como los electrolitos ácidos causan problemas de corrosión, se utilizan comúnmente como electrolitos bases fuertes tales como hidróxido de sodio (NaOH).

Para la producción de  $H_2$ , es necesario aplicar una corriente directa a los electrodos y para mantener la carga eléctrica y de valencia en equilibrio, los iones de hidróxido (aniones) se transfieren a través de la solución de electrolito al ánodo, en la que los iones del hidróxido donan electrones y vuelven a la terminal positiva de la fuente de CD.

Durante el proceso de electrólisis del agua, los iones de hidrógeno se mueven hacia el cátodo, y los iones hidróxido se mueven hacia el ánodo. Usando un diafragma, los receptores de gas pueden recoger el hidrógeno y el oxígeno que se forman en el cátodo y el ánodo respectivamente. Un electrolizador de dos celdas se muestra en la Fig. 1.

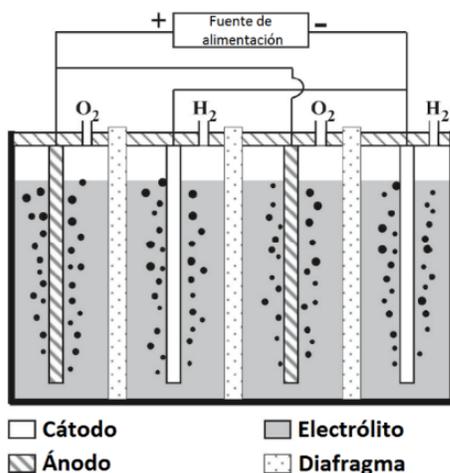
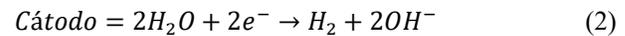
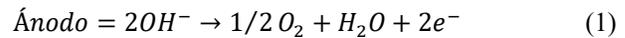


Fig. 1. Electrolizador alcalino de dos celdas.

El electrolizador alcalino que se muestra en la Fig. 1 tiene una configuración tipo tanque unipolar de dos celdas. En esta configuración cada electrodo tiene una sola polaridad y todos los electrodos de la misma polaridad están conectados en paralelo. Los ánodos y cátodos están conectados alternativamente, con los electrodos y los diafragmas se mantienen sumergidos dentro de un electrolito que contiene tanque.

La reacción en el ánodo, cátodo y la reacción química global de la electrólisis del agua se puede escribir con (1), (2) y (3) respectivamente.



Donde (OH<sup>-</sup>) es hidróxido, (H<sub>2</sub>O) agua, (e<sup>-</sup>) pérdida de electrones.

El electrolizador utilizado y caracterizado en este trabajo está integrado por siete celdas conectadas en serie con 5 mm de espaciamiento entre electrodos, en el espacio contiene una solución electrolítica total de 288 ml con NaOH al 5 %. Las celdas están formadas por ocho placas de acero inoxidable (304) de dimensiones de 7.5 X 10.97 cm cada una. El área reactiva total es 1,151.85 cm<sup>2</sup>. El electrolizador no tiene un diafragma que mantenga separados los gases producidos en los electrodos por lo que se obtiene una mezcla de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> que se denomina oxihidrógeno.

El sistema descrito en la presente sección debe ser alimentado mediante energía eléctrica que se controla por el convertidor reductor que se detalla a continuación.

## III. CONVERTIDOR CD/CD

La generación de oxihidrógeno mediante el electrolizador alcalino se obtendrá a partir de sus voltajes de operación mínimo y máximo. La caracterización experimental del electrolizador determinó que el voltaje mínimo requerido para romper la molécula de agua y que se inicie el proceso de generación de oxihidrógeno es de 14 V, lo que corresponde a un voltaje por celda del electrolizador de 2 V. Por otra parte, el voltaje máximo de operación del electrolizador se estableció en 16 V para evitar la generación de subproductos químicos no deseados. La caracterización experimental del electrolizador alcalino determinó que la potencia mínima de operación del electrolizador es de 5 W y potencia máxima de 240 W. Con base en estos requerimientos de potencia eléctrica demandada por el electrolizador alcalino en este trabajo se utilizó un convertidor reductor síncrono. La Fig.2 muestra la topología del convertidor CD/CD propuesto, donde la carga representa al electrolizador alcalino,  $V_{in}$  el voltaje de entrada (fuente de alimentación),  $i_o$  la corriente que circula por el inductor (L), y proporciona la energía al capacitor (C) y a la carga respectiva.

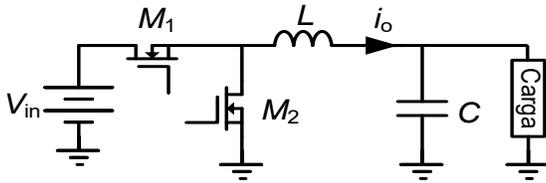


Fig. 2. Convertidor reductor síncrono.

El convertidor reductor síncrono tiene dos configuraciones acordes a los estados de conducción y no conducción de los interruptores controlados M1 y M2. Los interruptores operan de forma excluyente; así cuando el interruptor M1 está en estado de conducción, el interruptor M2 está en estado de no conducción y viceversa. La Fig. 3 muestra los circuitos equivalentes del convertidor reductor síncrono.

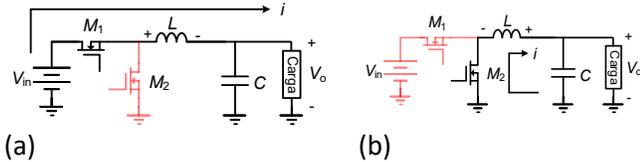


Fig. 3. Circuitos equivalentes del convertidor reductor síncrono. (a) M1 conduce, M2 no conduce. (b) M1 no conduce, M2 conduce.

Como se observa en la Fig. 3 (a), al conducir el interruptor M1 existe una corriente que circula de la fuente de entrada hacia las terminales de salida del convertidor, esta corriente circula a través del inductor el cual almacena energía en su campo magnético. Cuando el interruptor M1 deja de conducir M2 conduce, Fig. 3 (b), durante este estado la energía almacenada en el inductor mantiene la corriente hacia el capacitor de salida y la carga. La Fig. 4 muestra las principales formas de onda que se producen en el convertidor reductor síncrono.

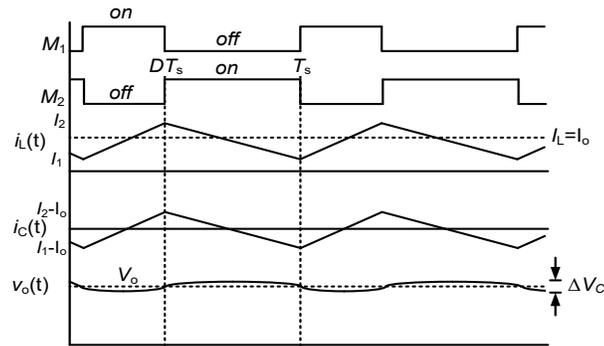


Fig. 4. Formas de onda de voltaje y corriente en el convertidor reductor síncrono.

La Tabla I se presentan las condiciones de diseño para el convertidor reductor síncrono.

TABLA I.  
PARÁMETROS DE DISEÑO DEL CONVERTIDOR REDUCTOR

Voltaje de entrada (Vin)	24 V
Voltaje de salida máximo (Vout)	16 V
Corriente máxima de salida (Iout)	15 A
Frecuencia de conmutación (f)	100 kHz
Rizo de voltaje de salida (%) (ΔI)	1 %
Rizo de corriente de salida (%) (ΔV)	5 %

Con base en la metodología de diseño de [7], el valor del inductor y capacitor del convertidor reductor se obtuvo a partir de (4) y (5).

$$L = \frac{V_{out} * K * (1-K)}{f * \Delta I} \tag{4}$$

$$C = \frac{V_{out} * K * (1-K)}{8 * L * f^2 * \Delta V} \tag{5}$$

donde K es el ciclo de trabajo del convertidor reductor.

En la Tabla II se muestran los dispositivos semiconductores seleccionados y los valores de los componentes pasivos del convertidor obtenidos con base en (4) y (5).

TABLA II.  
VALORES Y COMPONENTES SELECCIONADOS PARA EL CONVERTIDOR REDUCTOR SINCRONO

Componente	Modelo	Fabricante	Valor
Inductor	60B683C	MURATA	68 μH - 10 A
Capacitor	50ZLH1000	RUBYCON	1 mF - 50 V
MOSFET	IRFIZ44NP	International Rectifier	

#### A. Etapa de Control del Convertidor CD/CD

La regulación del voltaje aplicado al electrolizador alcalino que corresponde al voltaje de salida del convertidor reductor se realizó mediante un controlador Proporcional-Integral. Para tal efecto se requiere inicialmente de obtener la función de transferencia que relaciona el voltaje de salida del convertidor CD-CD con respecto al ciclo de trabajo de los interruptores controlados. En este trabajo se consideran los efectos ocasionados por las resistencias series asociada del inductor y el capacitor en la obtención de la función de transferencia del convertidor. La Fig. 5 muestra el circuito del convertidor reductor síncrono que incluye las resistencias parásitas del inductor (RL) y capacitor de salida (RC) considerando una carga resistiva (R).

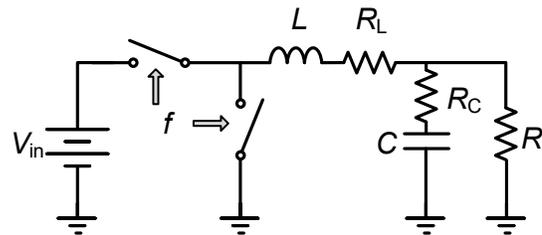


Fig. 5. Circuito del convertidor reductor síncrono incluyendo resistencias parásitas del inductor y capacitor de salida.

La función de transferencia del convertidor síncrono se obtuvo mediante uso del modelo del interruptor PWM [24]. El modelo del interruptor PWM es una red de 3 puertos que consta de tres terminales denominadas entrada activa (a), pasiva (p) y común (c). La Fig. 6 muestra el modelo del interruptor PWM.

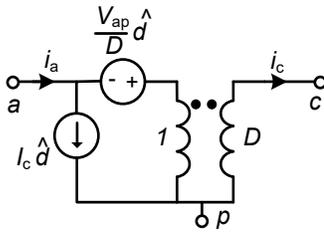


Fig. 6. Modelo del interruptor PWM.A.

La Fig. 7 muestra el circuito equivalente del convertidor reductor síncrono al sustituir el modelo del interruptor PWM, donde la fuente de entrada es cortocircuitada para realizar el análisis de pequeña señal del convertidor.

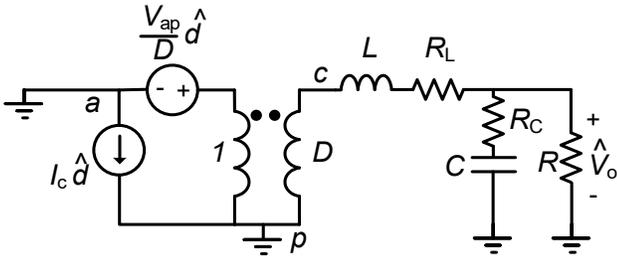


Fig. 7. Circuito equivalente del convertidor reductor síncrono incluyendo el modelo del interruptor PWM.

Analizando el circuito de la Fig. 7 se observa que en el lado del devanado primario del modelo del interruptor PWM, la fuente de corriente queda en corto-circuito mientras que la fuente de voltaje queda conectada en paralelo con este devanado. De esta forma el circuito equivalente de pequeña señal se muestra en la Fig. 8.

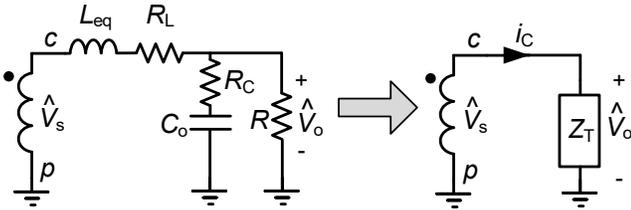


Fig. 8. Reducción del circuito equivalente del convertidor reductor síncrono.

Donde el voltaje del devanado secundario ( $V_s$ ) del modelo del interruptor PWM es descrito por:

$$\hat{V}_s = D \frac{V_{ap}}{D} \hat{d} = V_{ap} \hat{d} \quad (6)$$

donde  $D$  es la relación de transformación,  $V_{ap}$  el voltaje aplicado,  $\hat{d}$  la relación del modelo en pequeña señal.

La impedancia  $Z_T$  se obtiene a partir de:

$$Z_T = Z_1 + Z_2 \quad (7)$$

$$Z_1 = sL_{eq} + R_L \quad (8)$$

$$Z_2 = (R_C + C_O) // R = \frac{R(1+sC_O R_C)}{1+sC_O(R+R_C)} \quad (9)$$

con  $s$  el operador de Laplace,  $L=L_{eq}$  la inductancia equivalente, y  $Z_2$  la impedancia en paralelo de capacitor y carga.

Por lo que aplicando Ley de voltajes de Kirchoff se obtiene que:

$$\hat{V}_s = i_c * Z_1 + \hat{V}_O = \frac{\hat{V}_s * Z_1}{Z_T} + \hat{V}_O \quad (10)$$

Considerando que  $V_{ap} = V_{in}$ , se obtiene que la función de transferencia del convertidor reductor síncrono es:

$$\frac{\hat{V}_O}{\hat{d}} = V_i \left[ \frac{1+sR_C C_O}{s^2 \left[ \frac{L_{eq} C_O (R+R_C)}{R} \right] + s \frac{L_{eq} + C_O [R_L (R+R_C) + R R_C]}{R} + \frac{R+R_L}{R}} \right] \quad (11)$$

Debido a los rangos de operación (14 V a 16 V) así como los parámetros de seguridad requeridos, se desarrolló un control modo tensión para el convertidor, también conocido como modo voltaje. El controlador determina el valor del ciclo de trabajo para mantener regulada la tensión de salida deseada. En el diseño del convertidor se considera la influencia de la resistencia parásita del capacitor de salida por lo que la función de transferencia del convertidor presenta un doble polo [26]. La frecuencia del doble polo del convertidor queda determinada por la ecuación (12), que se obtiene a partir de las raíces del denominador de la ecuación (11), además de tomar  $s = 2\pi f_p$ .

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} C_O}} \sqrt{\frac{R+R_L}{R+R_C}} \quad (12)$$

Por su parte, la frecuencia del cero de la función de transferencia del convertidor, obtenido de igualar a cero el numerador de la ecuación (11) y  $s = 2\pi f_z$ , queda determinado por:

$$f_z = \frac{1}{2\pi R_C C_O} \quad (13)$$

El control del convertidor reductor síncrono consiste en una red de compensación Proporcional-Integral (PI Fig.9), cuya función de transferencia ( $FT_{PI}$ ) es descrita en (14). Donde la salida ( $V_{out}$ ) del convertidor se compara con la referencia deseada ( $V_{ref}$ ), para que el compensador regule la señal a generar de PWM.

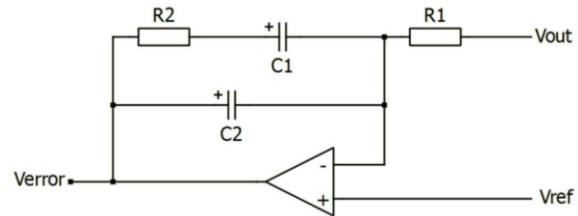


Fig. 9. Red de compensación PI.

La función de transferencia del control PI contiene dos polos y un cero.

$$FT_{PI} = \frac{(1+sC_1 R_2)}{sC_1 R_1 (1+sC_2 R_2)} \quad (14)$$

La ubicación de los polos del controlador, uno está en el origen y el otro con la frecuencia determinada mediante la ecuación (15). Además, la frecuencia del cero del controlador PI se calcula con la ecuación (16).

$$f_{pcomp} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} \quad (15)$$

$$f_{zcomp} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (16)$$

Los valores obtenidos de los componentes del control PI se muestran en la Tabla III.

TABLA III.  
VALORES DE LOS COMPONENTES DEL CONTROL PI

Componente	Modelo
R1	1.8 k $\Omega$
R2	100 k $\Omega$
C1	10 nF
C2	30 pF

La Fig. 10 muestra el circuito de la etapa de potencia y control del convertidor reductor síncrono diseñado para el electrolizador alcalino.

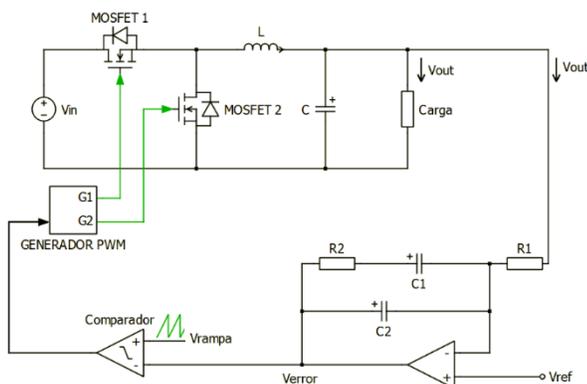


Fig. 10. Etapas de potencia y control del convertidor reductor síncrono.

En la Fig. 11 se muestra el prototipo del convertidor reductor síncrono que incluye el controlador.



Fig. 11. Prototipo del convertidor reductor síncrono.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La Fig. 12 muestra el banco de prueba experimental del convertidor reductor síncrono y el electrolizador alcalino para la generación de oxihidrógeno.

En el banco de pruebas de la Fig. 12 se utilizaron dos fuentes para la alimentación del sistema, una fuente simétrica y una fuente conmutada. La fuente simétrica proporciona una tensión de CD de 15 V+ y 15 V- que alimenta a los componentes analógicos del control. La fuente conmutada (BK PRECISION XLN10014) proporciona una tensión CD de 24 V que alimenta al convertidor reductor.

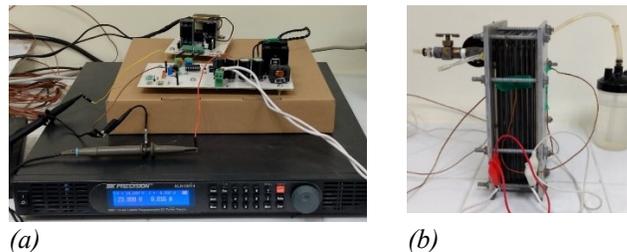


Fig. 12. Banco de prueba experimental. (a) Convertidor reductor síncrono. (b) Electrolizador alcalino de 7 celdas.

Las pruebas realizadas en este trabajo consistieron en tres puntos de operación para la generación de oxihidrógeno. Los puntos de operación fueron determinados a partir del rango de operación obtenido en la caracterización del electrolizador alcalino de siete celdas.

Las mediciones de los experimentos se realizaron mediante dos osciloscopios Tektronix modelo TDS1001B, así como una punta de medición de corriente Tektronix modelo TCPA300 de alta frecuencia.

Los tres puntos de operación del electrolizador seleccionados corresponden aproximadamente al 12%, 47% y 100% de la corriente total consumida. Las pruebas en los puntos de operación fueron de aproximadamente 5 minutos. La Tabla IV muestra los datos de tensión, corriente, potencia y eficiencia del convertidor reductor de las pruebas a 14, 15 y 16 V. Así como la estimación del flujo que se calcula en el apéndice A.

La respuesta dinámica del sistema depende de la interacción del electrolizador, la etapa de control y el convertidor reductor. El análisis de un solo componente de forma aislada no indica la dinámica de todos los componentes trabajando juntos a lazo cerrado. Las pruebas de los puntos de operación proporcionan información del comportamiento del sistema en el rango de operación establecido.

TABLA IV.  
EFICIENCIA DEL CONVERTIDOR CD/CD CONECTADO CON EL ELECTROLIZADOR ALCALINO

Voltaje aplicado al electrolizador (V)	Corriente promedio (A)	Potencia (W)	Eficiencia (%)	$\eta$	Flujo estimado (ml/min)
14.01	0.34	4.763	89.8		2.58
15.01	1.43	21.464	93.4		10.86
16.03	8.81	141	85.1		66.93

La Fig. 13 muestra el comportamiento de la corriente en el electrolizador ante un cambio de su punto de operación del 12% al 100%. La traza superior de la Figura 13 representa el voltaje aplicado al electrolizador en forma de escalón, mientras la traza inferior representa la corriente en el electrolizador. Esta prueba fue realizada con la finalidad de observar la respuesta en corriente del electrolizador ante cambios en el punto de operación del electrolizador del 12% al 100%.

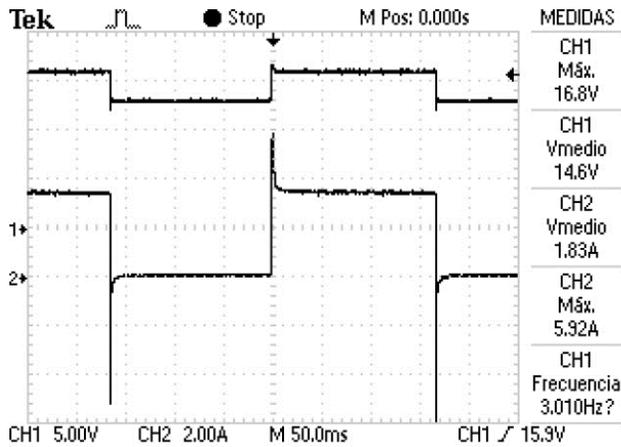


Fig. 13. Respuesta dinámica del electrolizador ante un cambio del punto de operación en escalón del 12% al 100%.

La respuesta de la corriente en el electrolizador ante un cambio en escalón del punto de operación que se le aplica muestra que tiene un comportamiento capacitivo. Este comportamiento se manifiesta en los picos de corriente que se observan en la forma de onda de la corriente del electrolizador en las transiciones del punto de operación.

La constante de tiempo del electrolizador alcalino es grande lo que limita la rapidez con la que puede cambiar el punto de operación del sistema de generación de oxihidrógeno. La frecuencia máxima de cambio del punto de operación en escalón experimentalmente fue aproximadamente de 5 Hz.

En la práctica, el cambio de punto de operación debido a la aceleración del vehículo tendrá una pendiente más suave. Tomando en cuenta esta consideración, la Fig. 14 muestra el comportamiento de la corriente demandada por el electrolizador en el que el punto de operación cambia en forma triangular con una frecuencia de 20 Hz.

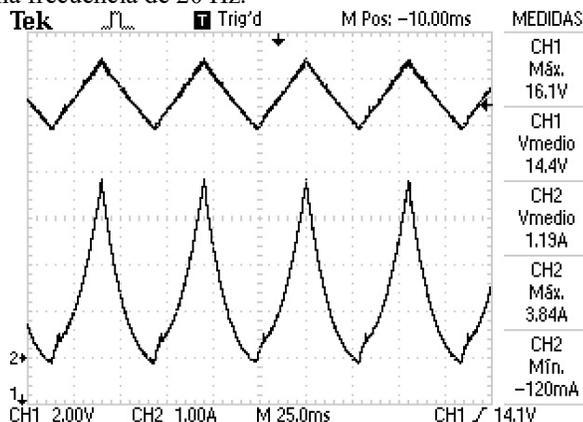


Fig. 14. Respuesta dinámica del electrolizador ante un cambio del punto de operación del 12% al 100%.

El comportamiento del electrolizador alcalino ante el cambio del punto de operación del 12% al 100% en forma triangular muestra un comportamiento principalmente capacitivo. La constante de tiempo del electrolizador alcalino es grande lo que limita la rapidez con la que puede cambiar el punto de operación del sistema de generación de oxihidrógeno. Experimentalmente se alcanzó una frecuencia máxima del cambio de punto de operación del electrolizador en forma triangular de 100 Hz.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron resultados experimentales para controlar la generación de oxihidrógeno mediante un electrolizador alcalino, con miras a enriquecer la mezcla de combustible en motores de combustión interna. La generación de oxihidrógeno se realizó mediante el control de suministro de potencia eléctrica con un convertidor reductor.

Los resultados de los experimentos probaron que el convertidor logra una eficiencia del 93.4% en el punto medio de los tres niveles de voltaje (14 - 16 V) elegidos para los experimentos. El control en lazo cerrado diseñado para el convertidor mencionado permite que la respuesta del sistema cambie conforme a la referencia, sin mantenerse durante más de un instante en un valor superior a 16.1 V, para evitar generar productos no deseados en la reacción.

El sistema de control y el convertidor cumplieron satisfactoriamente la necesidad de controlar y suministrar potencia al electrolizador dentro de los parámetros físicos del sistema de generación de hidrógeno.

Es importante mencionar que mediante el controlador se mantiene la consigna de voltaje establecido y además se muestra el cambio con la respuesta triangular, para la variación de flujo de hidrógeno que se requeriría en un cambio de velocidad del MCI.

## APÉNDICE A

La estimación del flujo de oxihidrógeno en (l/s) [26], es mediante la ecuación

$$\dot{V}_{H_2} = \frac{IRT}{eFP} \quad (17)$$

donde  $I$  es la corriente por celda,  $R = 0.082$  (atm l/mol °K) la constante universal de gases ideales,  $T = 298$  (°K) la temperatura ambiente,  $e = 2$  constante adimensional por la cantidad de electrones para la reacción electroquímica,  $F = 96,494$  (A s/mol) y  $P = 1$  (atm) la presión atmosférica.

## REFERENCIAS

- [1] SENER, S. d. (09 de 12 de 2016). SECRETARÍA DE ENERGÍA, MÉXICO. Obtenido de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cveca=IE7C01>
- [2] Y. Karagoz, N. Yuca, T. Sandalci, and A. Dalkilic, "Effect of hydrogen and oxygen addition as a mixture on emissions and performance characteristics of a gasoline engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 8750–8760, 2015.
- [3] C. Shuofeng Wang, "Lean burn performance of a hydrogen-blended gasoline engine at the wide open throttle condition," *Applied Energy*, vol. 136, no. 1, pp. 43–50, 2014.
- [4] V. Chintala and K. Subramanian, "Experimental investigations on effect of different compression ratios on enhancement of maximum hydrogen energy share in a compression ignition engine under dual-fuel mode," *Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 448–462, 2015.
- [5] K. Zeng and D. Zhang, "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 36, no. 3, pp. 307–326, 2010.

- [6] S. Al-Hallaj and K. Kiszynski, *Hybrid Hydrogen Systems - Stationary and Transportation Applications*. Chicago: Springer-Verlag London, 2011.
- [7] C. Grimes, V. O., and R. S., *Light, Water, Hydrogen - The Solar Generation of Hydrogen by Water Photoelectrolysis*. Pennsylvania: Springer Science Business Media, 2008.
- [8] D. Leon, *Hydrogen Technology, Mobile and Portable Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [9] A. Falahat, M. Hadman, and J. Yamin, "Engine performance powered by a mixture of hydrogen and oxygen fuel obtained from water electrolysis," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 97–101, 2014.
- [10] C. Ji and S. Wang, "Effect of hydrogen addition on the idle performance of a spark ignited gasoline engine at stoichiometric condition," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 8, no. 34, pp. 3546–3556, 2009.
- [11] C. Ji, S. Wang, and B. Zhang, "Combustion and emissions characteristics of a hybrid hydrogen-gasoline engine under various loads and lean conditions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 11, no. 35, pp. 5714–5722, 2010.
- [12] M. Horcasitas-Verdigué, J. Sandoval-Pineda, B. Grunstein-Ramírez, L. Teran-Balaguer, and R. Gonzalez-Huerta, "Design and manufacture of ice test module to reduce gasoline consumption using oxyhydrogen gas from an alkaline electrolyzer," *Energy and fuels*, vol. 30, no. 1, pp. 6640–6645, 2016.
- [13] T. Tsujimura and Y. Suzuki, "The utilization of hydrogen in hydrogen/diesel dual fuel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 14019–1429, 2017.
- [14] V. Chintala and K. Subramanian, "Cfd analysis on effect of localized in-cylinder temperature on nitric oxide (no) emission in a compression ignition engine under hydrogen-diesel dual-fuel mode," *Energy*, vol. 116, no. 1, pp. 470–488, 2016.
- [15] A. Sánchez Hernández, "Estudio y desarrollo de un módulo de regulación de voltaje multifase," Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.
- [16] N. Mohan and T. M. Undeland, *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 2007.
- [17] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 53, no. 2, pp. 486–494, 2006.
- [18] R. Andouisi, A. Mami, G. Dauphin-Tanguy, and M. Annabi, "Bond graph modelling and dynamic study of a photovoltaic system using mppt buck-boost converter," in *Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2002, pp. 6.
- [19] Heras-Cervantes M., Tellez Anguiano A., Anzurez-Marin J., Espinosa-Juarez E., Garcia-Ramirez C. and Correa-Gomez J. "Real-Time Simulation of a Luenberger Observer Applied to DC-DC Converters" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 3, pp. 981-986, 2018.
- [20] E. Guerrero, J. Linares, E. Guzmán, H. Sira, G. Guerrero and A. Martínez, "DC Motor Speed Control through Parallel DC/DC Buck Converters", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 5, MAY 2017.
- [21] E.H. Márquez, R.S. Ortigoza, J.R.G. Sánchez, V.H.G. Rodríguez and J.N.A. Juárez, "A New DC/DC Buck-Boost Converter-DC Motor System: Modeling and Experimental Validation", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 11, Nov. 2017
- [22] R.S. Ortigoza, V.H.G. Rodríguez, E.H. Márquez, M.Ponce, J.R.G. Sánchez, J.N.A. Juárez, G.S. Ortigoza and J.H. Pérez, "A Trajectory Tracking Control for a Boost Converter-Inverter-DC Motor Combination", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 4, APRIL 2018.
- [23] M. Heras-Cervantes, A. Téllez-Anguiano, J. Anzurez-Marin, E. Espinosa-Juárez, C. García-Ramírez and J. Correa-Gómez, "Real-Time Simulation of a Luenberger Observer Applied to DC-DC Converters", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 3, March 2018.
- [24] Rashid, M. H. (2004). *Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. PRENTICE HALL MEXICO.
- [25] Vatché Vorpérian. "Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch Part I: Continuous Conduction Mode", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 24, no. 3, May 1990.
- [26] Zeng, K. and Zhang D. "Recent progress in alkaline electrolysis for hydrogen production and applications", *Progress in Energy and*

*Combustion Science*, vol. 16, pp. 307-326, 2010.



**Carlos Cedano** maestro en Mecatrónica por la Universidad de Quintana Roo desde enero de 2017, sus intereses principales están enfocados en las aplicaciones de la mecatrónica y energías renovables.



**Victor M. Sánchez-Huerta** Ing. en electrónica por el instituto tecnológico de Orizaba, Maestro en ciencias en Ing. Electrónica por el CENIDET y Doctorado en ciencia en ingeniería eléctrica por el CINVETAV Guadalajara, actualmente profesor investigador en la Universidad de Quintana Roo sus áreas de interés están relacionadas con el uso de la electrónica de potencia en sistemas de generación de energías renovables y redes inteligentes.



**Guillermo Becerra** Ing. Mecánico Electricista por la Universidad de Colima, Maestría y Doctorado en ingeniería eléctrica por la UNAM, actualmente investigador catedrático CONACYT comisionado a la Universidad de Quintana Roo sus áreas de interés están relacionadas con aplicaciones de control y energías renovables.



**Edith Osorio** Licenciada en ciencias de la electrónica, Maestría y Doctorado en dispositivos semiconductores por la BUAP, actualmente investigador catedrático CONACYT comisionado a la Universidad de Quintana Roo sus áreas de interés están relacionadas con energías alternativas y recolección de energía.



**Romeli Barbosa** Licenciatura en Ingeniería en Sistemas de Energía por la Universidad de Quintana Roo, Maestría y Doctorado en ingeniería por el CIE UNAM, actualmente profesor investigador en la Universidad de Quintana Roo sus áreas de interés están relacionadas con el uso de hidrógeno y celdas de combustible.



**Rosa G. González-Huerta** Ing. Químico Industrial y Doctorado en Ciencias Químicas por el IPN, actualmente investigadora en ESQUIE, Laboratorio de Electroquímica y Corrosión UPALM del IPN, sus áreas de interés están relacionadas con el desarrollo de sistemas integrados por energías renovables y

tecnologías del hidrógeno.