

# Quadratic step-up DC-DC converter for photovoltaic applications

D. de la Rosa-Romo<sup>1</sup> davidrr@yahoo.com, R. Loera-Palomo<sup>2</sup>, F.S. Sellschopp-Sánchez<sup>1</sup>, M.A. Rivero-Corona<sup>2</sup>, C. Álvarez-Macías<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de la Laguna.

<sup>2</sup> CONACyT – Instituto Tecnológico de la Laguna. 27000 Torreón, Coah., México.

**Resumen**—El incremento en la demanda de energía, problemas medio-ambientales y la reducción de combustibles fósiles, ha llevado a buscar alternativas energéticas como el incremento de la generación solar-fotovoltaica. Sin embargo, es conocido que las aplicaciones fotovoltaicas presentan ciertos compromisos en su implementación, como: a) la generación de energía eléctrica es altamente variable dada su dependencia de las condiciones climáticas; b) la cantidad de potencia generada es dependiente del voltaje en terminales del arreglo fotovoltaico, presentando un punto de máxima potencia, el cual cambia de posición en función de la temperatura e irradiancia incidente; c) Los dispositivos fotovoltaicos presentan un bajo voltaje de operación; entre otros compromisos. En este contexto, se propone la implementación de un convertidor cuadrático en no-cascada, el cual presenta la característica de una alta ganancia del voltaje, así como la reducción de la potencia procesada desde su puerto de entrada hasta su puerto de salida. Además, en este convertidor es implementado un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) de tipo perturbar-observar, con el propósito de maximizar la potencia generada de módulos fotovoltaicos.

**Palabras claves**— Algoritmo, Convertidor, Cuadrático, Fotovoltaico, MPPT.

**Abstract**—The increase in the demand of energy, environmental problems and the reduction of fossil fuels, has led to look for alternative energies such as the increase of solar-photovoltaic generation. However, it is known that photovoltaic applications have certain commitments in their implementation, such as: a) the generation of electrical energy is highly variable given its dependence on climatic conditions; b) the amount of power generated is dependent on the voltage in terminals of the photovoltaic array, presenting a point of maximum power, which changes position as a function of the temperature and incident irradiance; c) The photovoltaic devices have a low operating voltage; among other commitments. In this context, the implementation of a quadratic converter in non-cascade is proposed, which has the characteristic of high voltage gain, as well as the reduction of the power processed from its input port to its output port. In addition, a maximum power point tracking (MPPT) algorithm of disturbance-observe type is implemented in this converter, with the purpose of maximizing the power generated from photovoltaic modules.

**Keywords**— Algorithm, Converter, MPPT, Photovoltaic, Quadratic.

## I. INTRODUCCIÓN

En años recientes, el agotamiento de combustibles fósiles, el incremento de la demanda de energía, y la preocupación por el cambio climático, marcan la necesidad de incrementar la energía generada a través de fuentes de energía renovables. Aunado a lo anterior, el aumento de cargas electrónicas, sistemas de variación de velocidad, cargas para iluminación tipo LED, entre otras, requieren de múltiples etapas de conversión (AC-DC, DC-AC); lo cual causa pérdidas de energía antes de la aplicación final. Para abordar esta limitación, se han propuesto sistemas en DC, los cuales ofrecen alta eficiencia y confiabilidad [1-7].

Con la intención de incrementar la eficiencia, así como disminuir el uso de fuentes de energía no renovable; se han desarrollado sistemas que proveen energía de fuentes renovables que se les conoce como Generadores Distribuidos de Energía Renovable (DREGs), donde la mayoría de estos generan energía en DC. Dentro de los DREGs podemos encontrar: paneles fotovoltaicos, celdas de combustible, generadores eólicos, entre otros.

Las características Voltaje – Corriente de los paneles fotovoltaicos se ven afectadas por las condiciones de irradiación y temperatura. El voltaje y la corriente se deben controlar para rastrear la máxima potencia de estos sistemas. Las técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés) se utilizan para extraer la máxima potencia disponible de un panel. En [8] se lleva a cabo una comparación de los algoritmos MPPT más utilizados en sistemas de generación fotovoltaicos.

El uso y desarrollo de esquemas de generación renovable a nivel residencial, complejos urbanos, así como en otro tipo de ambientes, involucra retos importantes, como son las tecnologías de generación, electrónica de potencia, sistemas de control y sistemas de protección. En este escenario, el sistema propuesto corresponde a un convertidor derivado de una estructura en no-cascada, el cual permite reducir las etapas de procesamiento de potencia. Además, el uso de celdas básicas tipo buck-boost

y boost sobre la estructura en no-cascada permite obtener una topología cuadrática, la cual presenta una alta ganancia dependiente del cuadrado del ciclo de trabajo. Finalmente, es implementado un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) sobre el convertidor propuesto.

II. ESTRUCTURA DEL CONVERTIDOR CUADRÁTICO

El convertidor cuadrático propuesto se basa en una estructura en no-cascada tipo I-IIA, como se muestra en la Figura 1. Esta estructura, así como otras configuraciones, fueron propuestas en [9] para el desarrollo de convertidores con corrección de factor de potencia y regulación del voltaje de salida. Sin embargo, se ha demostrado que estas estructuras son de utilidad para la generación de topologías de convertidores de DC-DC [10,11].

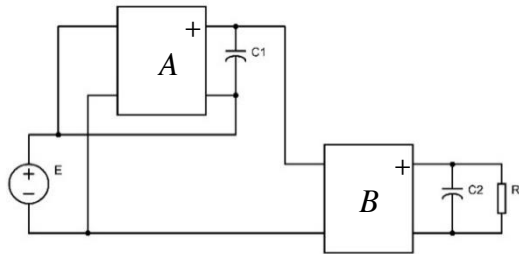


Figura 1. Estructura de la configuración no-cascada I-IIA

En la estructura de la Figura 1, asumiendo que los bloques A y B son celdas básicas de conmutación, se observa un camino de transferencia directa de potencia, donde una fracción de la potencia proporcionada por la fuente de alimentación no es procesada por la celda A. Este hecho implica una reducción de la potencia procesada, mejorando su eficiencia desde una concepción teórica. Por otro lado, y bajo un escenario de aplicación fotovoltaico, la celda A es la encargada de procesar sólo una fracción de la potencia generada por el sistema fotovoltaico, esto apoyando en la tarea de extracción de la máxima potencia. La celda B apoya en el incremento de la ganancia del convertidor para aumentar el voltaje de salida. En este contexto, es usada una celda básica de conmutación tipo buck-boost (Figura 2 (a)) en la celda A y una celda boost (Figura 2 (b)) en el bloque B.

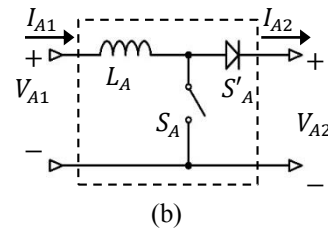
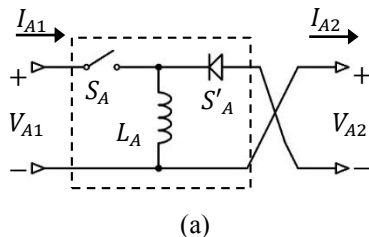


Figura 2. Celdas básicas de conmutación. (a) buck-boost, (b) boost.

La implementación de las celdas básicas de la Figura 2 en la estructura en no-cascada I-IIA resulta en la topología mostrada en la Figura 3. Como se observa, la topología del convertidor conmutado consta de dos inductores, dos capacitores, dos interruptores activos y dos interruptores pasivos. En este esquema, los interruptores activos determinan la operación del convertidor, siendo estos los elementos de control para alcanzar los objetivos de extracción de la máxima potencia del sistema fotovoltaico y elevación del voltaje de salida.

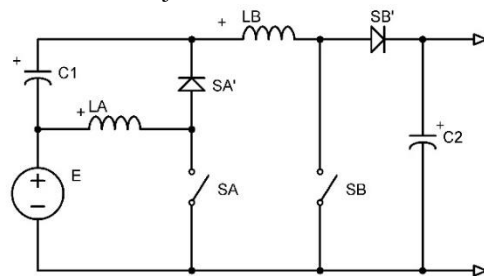


Figura 3. Topología derivada de la estructura I-IIA

Con el propósito de aumentar la confiabilidad del convertidor, así como reducir las etapas de activación de los interruptores, se opta por reducir la cantidad de interruptores activos a uno. En este sentido se realiza un proceso de síntesis de circuito para obtener una topología equivalente. Adoptando el esquema de injertos [12], donde se establece que un arreglo de dos interruptores puede reducirse solo si éstos comparten un nodo común y operan de forma sincronizada. La topología resultante de aplicar el proceso de síntesis se muestra en la Figura 4.

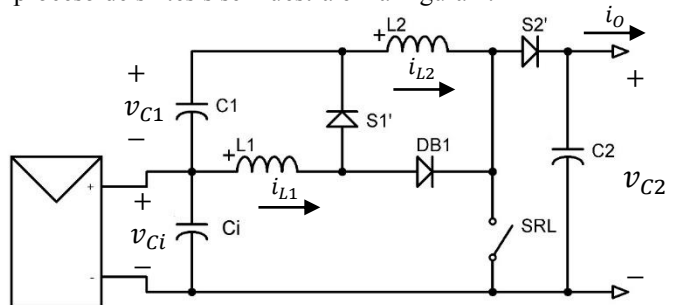


Figura 4. Topología equivalente bajo una alimentación fotovoltaica.

En la topología de la Figura 4 se muestra en el puerto de entrada del convertidor un arreglo fotovoltaico y un capacitor de acoplamiento  $C_i$ , siendo este último de uso común en sistemas fotovoltaicos. En la topología del convertidor se observa que se mantiene el uso de cuatros dispositivos semiconductores, donde el interruptor  $S_{RL}$  es el elemento de control del convertidor.

Para obtener el punto de operación del convertidor bajo estudio, es necesario definir los principios de aproximación de rizo pequeño, balance volt-segundo del inductor y balance de carga del capacitor. En [13] se presenta el desarrollo de estos principios útiles en el análisis de convertidores conmutados. Ahora son aplicados los principios antes mencionados a las ecuaciones de corriente de los capacitores y voltaje de los inductores como se expone a continuación.

A través de la aproximación de rizo pequeño y definiendo  $q$  como la función de conmutación del interruptor activo ( $1 =$  cerrador,  $0 =$  abierto), el voltaje en el inductor  $L_1$  está dado por las siguientes expresiones:

Cuando  $q = 1$ :

$$v_{L1} = V_{Ci}.$$

Cuando  $q = 0$ :

$$v_{L1} = -V_{C1}.$$

Aplicando el principio de balance volt-segundo del inductor, se obtiene la siguiente expresión

$$0 = V_{Ci}D - V_{C1}(1 - D),$$

Despejando  $V_{C1}$

$$V_{C1} = \frac{V_{Ci}D}{(1 - D)}. \quad (1)$$

De la misma forma en la que se llevó a cabo el análisis del voltaje en  $L_1$ , se analiza el voltaje en el inductor  $L_2$ . Además, en el caso de los capacitores, el principio de balance de carga es aplicado a las expresiones de corriente de capacitor cuando  $q = 1$  y  $q = 0$ . Como resultado, se obtiene el resto de expresiones que corresponden al punto de operación del convertidor.

$$V_{C2} = \frac{V_{Ci}}{(1 - D)^2}, \quad (2)$$

$$I_{L2} = \frac{I_o}{(1 - D)} = I_{PV}(1 - D), \quad (3)$$

$$I_{L1} = \frac{I_o}{(1 - D)^2} = I_{PV}, \quad (4)$$

$$I_{PV} = \frac{I_o}{(1 - D)^2}, \quad (5)$$

$$I_{PV} = \frac{P_{PV}}{V_{PV}}, \quad (6)$$

$$V_{Ci} = V_{PV}. \quad (7)$$

A través de la expresión (2) se observa que la relación de conversión de voltaje del convertidor, dado por la relación del voltaje en el puerto de salida ( $V_{C2}$ ) entre el voltaje en el puerto de entrada ( $V_{Ci}$ ) del convertidor, está en función del cuadrado del ciclo de trabajo, implicando que la topología propuesta corresponde a un convertidor cuadrático. Además, la estructura de (2) implica que la ganancia del convertidor es elevadora, siendo adecuado en aplicaciones fotovoltaicas

#### A. Panel fotovoltaico

En un sistema fotovoltaico, el elemento más pequeño es la celda fotovoltaica, la cual permite una transformación directa de la energía proveniente del Sol en energía eléctrica. La conexión de celdas en serie y/o paralelo forman arreglos fotovoltaicos. Independientemente de si se trata de una celda o un arreglo fotovoltaico, su comportamiento es igual bajo condiciones de irradiancia incidente uniforme. La operación de módulos fotovoltaicos está definida por sus curvas características corriente - voltaje ( $I - V$ ) y potencia - voltaje ( $P - V$ ), en la Figura 5 se muestra este tipo de curvas características.

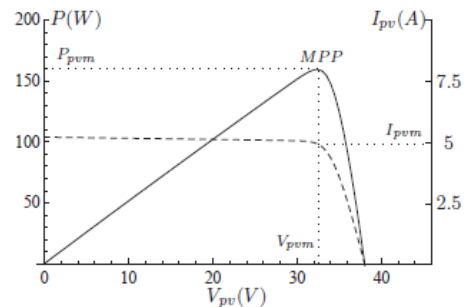


Figura5. Curva ( $P - V$ ) e ( $I - V$ ) de un dispositivo fotovoltaico

Como se observa en la Figura 5, la curva  $P - V$  (línea sólida) presenta un punto donde la potencia es máxima o punto de máxima potencia (MPP), el cual ocurre a un voltaje específico en terminales del arreglo fotovoltaico. Debido a que la instalación de sistemas fotovoltaicos es costosa, se busca la operación de sistemas fotovoltaicos en el MPP. Por otro lado, la curva  $I - V$  (línea segmentada) muestra que el arreglo fotovoltaico se comporta como una fuente de corriente hasta antes del MPP, después de este punto el arreglo se empieza a comportar como una fuente de voltaje.

El modelo de un módulo fotovoltaico está dado por:

$$I = I_{PV} - I_0 \left[ e^{\left( \frac{V + R_s I}{V_t a} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}, \quad (8)$$

donde  $I$  y  $V$  son la corriente y el voltaje en terminales del

módulo fotovoltaico,  $I_{PV}$  es la corriente generada por las celdas fotovoltaicas del módulo,  $I_o$  es la corriente de fuga del diodo,  $R_s$  es la resistencia equivalente en serie del arreglo,  $R_p$  es la resistencia equivalente en paralelo,  $a$  es el factor de idealidad y,  $V_t$  es el voltaje térmico, dado por:

$$V_t = N_s kT / q, \quad (9)$$

siendo  $N_s$  el número de celdas en serie conectadas dentro del módulo fotovoltaico.  $I_{PV}$  e  $I_o$  están definidos por:

$$I_{PV} = (I_{PV,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n}, \quad (10)$$

$$I_o = \frac{I_{SC,n} + K_I \Delta T}{e^{(V_{OC,n} + K_V \Delta T) / a V_t} - 1}. \quad (11)$$

De las expresiones anteriores, y considerando que  $\Delta T = T - T_n$ , los valores de  $I_{PV,n}$ ,  $I_{SC,n}$  y  $V_{SC,n}$  son obtenidos a partir de una prueba en condiciones estándar, donde se considera a  $G_n = 1000 \frac{W}{m^2}$ ,  $T_n = 25^\circ C$ .  $T$  es la temperatura actual del sistema y,  $G$  es la irradiancia incidente actual.

Como se muestra en la Figura 6, se puede trazar una recta desde el origen hasta cualquier punto de la curva. Bajo la concepción de una resistencia conectada en terminales del módulo PV, la pendiente de esta recta se asocia con el inverso de la resistencia ( $1/R$ ) conectada al módulo, dado por la ley de Ohm ( $I = V/R$ ). En este contexto, si la resistencia tiene un valor apropiado, cuya recta pase por el punto dado por  $(V_{MPP}, I_{MPP})$ , el valor resistivo será óptimo ( $R_{OPT}$ ). Esta resistencia ( $R_{OPT}$ ) permitirá extraer la máxima potencia del módulo fotovoltaico, lo cual se busca en arreglos fotovoltaicos comerciales.

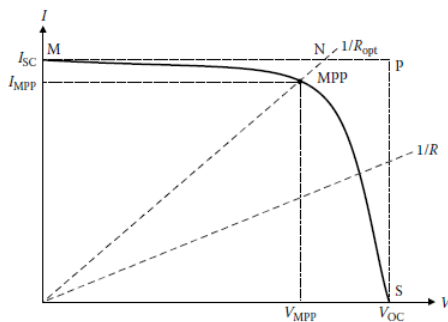


Figura 6. Punto de máxima potencia en curva  $I - V$

### III. ALGORITMO DE SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPPT)

En el contexto de convertidores para aplicaciones fotovoltaicas, la resistencia óptima que permite la extracción de la máxima potencia del módulo fotovoltaico está asociada a la relación voltaje en terminales del panel

( $V_{PV}$ ) con la corriente entregada por el mismo ( $I_{PV}$ ). La Figura 7 muestra esta relación, definiendo esta relación como  $R_{conv} = V_{PV} / I_{PV}$ , y sustituyendo las expresiones del punto de operación, se obtiene:

$$R_{conv} = \frac{(1 - D)^4 V_{C2}}{I_{PV}} = \frac{(1 - D)^4 V_{C2}^2}{P_{PV}}, \quad (12)$$

donde  $V_{C2}$  es el voltaje en el puerto de salida del convertidor y  $D$  el ciclo de trabajo del modulador por ancho de pulso (PWM), que proporciona la señal de disparo del interruptor activo ( $S_{RL}$ ). La ecuación (12) muestra una dependencia del valor de la resistencia del convertidor con el ciclo de trabajo ( $D$ ).

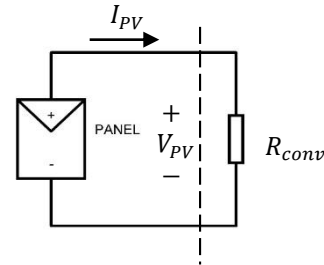


Figura 7. Aproximación del convertidor a una resistencia por su relación voltaje-corriente.

Con el propósito de que el convertidor alcance el valor óptimo de resistencia ( $R_{opt}$ ), a través de la señal de control  $D$ , se implementó un algoritmo MPPT del tipo *Perturbar y Observar* (P&O) para extraer la máxima potencia del panel. con lo anterior también se obtiene una alta eficiencia, así como una condición de operación estable en términos de potencia.

El algoritmo P&O corresponde a un algoritmo que no requiere conocer la información del modelo del convertidor. El principio de operación de este algoritmo se describe a continuación. A través de la señal de ciclo de trabajo del convertidor se perturba el voltaje en terminales del panel  $V_{pv}$  en una dirección, si la potencia  $P_{pv}$  se incrementa, entonces el punto de operación se ha movido hacia el punto de máxima potencia (MPP) y el voltaje del panel debe perturbarse nuevamente en la misma dirección. Por el contrario, si  $P_{pv}$  se decreta, entonces el punto de operación se ha movido en dirección opuesta al MPP, en consecuencia  $V_{pv}$  debe perturbarse en dirección contraria. La Figura 8 muestra un diagrama a bloques de la implementación de este algoritmo en el sistema generación de energía fotovoltaica propuesto.

Este algoritmo puede ser implementado fácilmente en un ambiente computacional o microcontrolador. Dado que el convertidor conmutado estará conectado a las terminales de salida del panel fotovoltaico, la señal perturbada por el algoritmo es la señal de ciclo de trabajo del convertidor.

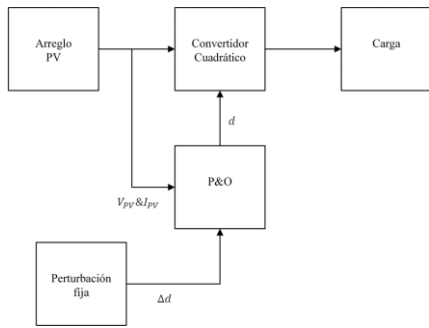
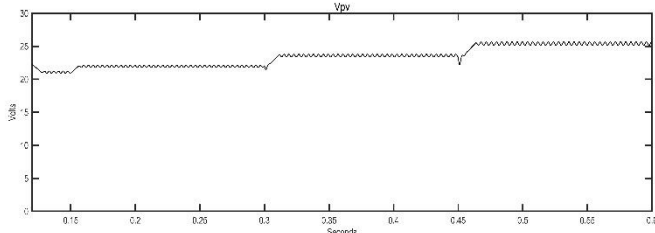


Figura 8. Diagrama a bloques de la implementación del algoritmo P&O

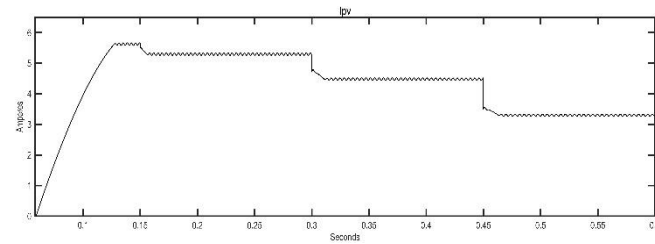
IV. RESULTADOS

Para validar la funcionalidad del convertidor cuadrático propuesto y el algoritmo de seguimiento del MPP, se llevó a cabo la simulación del sistema de generación de energía fotovoltaica. El cual está formado por un panel fotovoltaico, el convertidor cuadrático tipo I-IIA (Figura 5) y, conectado el puerto de salida del convertidor a una fuente de DC de 200 V, emulando así la integración del sistema a un a micro-red de DC.

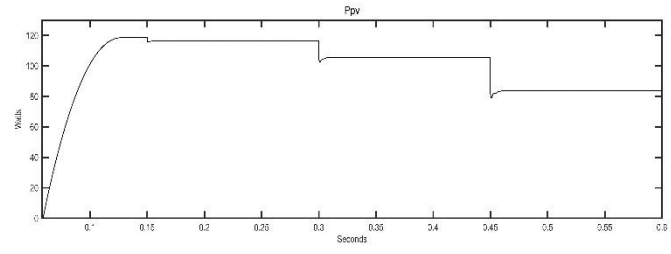
La simulación se llevó a cabo en el ambiente computacional Simulink. La Figura 9 muestra los resultados obtenidos de (a)  $V_{PV}$ , (b)  $I_{PV}$  y (c)  $P_{PV}$  que representan las condiciones de operación del panel fotovoltaico modelo BPX 47-451A.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. (a) Voltaje, (b) corriente y (c) potencia en terminales del panel con la operación del MPPT.

En (10) se observa que la corriente fotogenerada depende del valor de irradiancia y de la temperatura en la superficie del panel. En la simulación se aplicaron cambios de irradiancia ( $G$ ) manteniendo la temperatura constante. Los cambios se aplicaron como sigue:  $920 \text{ W/m}^2 \rightarrow t = 0$ ,  $800 \text{ W/m}^2 \rightarrow t = 150 \text{ ms}$ ,  $600 \text{ W/m}^2 \rightarrow t = 300 \text{ ms}$ ,  $400 \text{ W/m}^2 \rightarrow t = 400 \text{ ms}$ . Se puede observar el efecto de la operación del algoritmo MPPT, el cual fija el voltaje  $V_{PV}$  en el punto de máxima potencia. Para el valor de irradiancia más alto ( $920 \text{ W/m}^2$ ) en el periodo de 0 a 150 ms el voltaje  $V_{PV}$  es 21.2 V que resulta ser menor al obtenido en el periodo de menor irradiancia ( $400 \text{ W/m}^2$ ) de 400 a 600 ms cuyo valor de voltaje en terminales del sistema fotovoltaico es 25.5 V, como se puede observar en la Figura 9 (a). Sin embargo, la corriente entregada por el panel responde en forma opuesta al voltaje, en la Figura 9 (b) se observa que, para el periodo de mayor irradiancia, la corriente está en 5.6 A; y para el de menor irradiancia, la corriente se encuentra en 3.3 A. Lo que da como resultado que la potencia entregada por el sistema fotovoltaico es mayor para valores mas altos de irradiancia, como se puede observar en la Figura 9 (c) la cual muestra 118.7 W y 84.1 W para los periodos de mayor y menor irradiancia respectivamente.

V. CONCLUSIONES

El desarrollo de convertidores bajo estructuras de interconexión en no-cascada para aplicaciones fotovoltaicas resulta de gran interés, debido a que evita el doble procesamiento de la potencia entregada por el módulo fotovoltaico, gracias a su configuración de dos convertidores básicos en conexión no-cascada. Esto resulta conveniente, ya que el voltaje en terminales del módulo fotovoltaico es considerablemente menor comparado con el voltaje al que operan las micro-redes de DC. Estos sistemas de generación también pueden ser integrados a la red eléctrica pública a través de un inversor.

El uso del algoritmo MPPT incrementa la eficiencia del sistema, ya que la operación de este permite la extracción

de la máxima potencia del módulo fotovoltaico. Para hacer uso de estos algoritmos de seguimiento, como el utilizado en este proyecto (P&O), no requiere del conocimiento del modelo matemático del convertidor, lo que facilita su desarrollo e implementación. Por otro lado, estos algoritmos pueden resultar lentos en su operación, si el valor de la perturbación del ciclo de trabajo es pequeño, o presentar oscilaciones si la perturbación es grande. Sin embargo, son capaces de llevar a cabo la tarea de posicionar la operación del panel en su punto de máxima potencia.

El uso de micro-redes de DC, es sin duda también de interés, ya que son compatibles con las cargas eléctricas utilizadas en aplicaciones residenciales y comerciales, que actualmente hacen uso de un rectificador para su operación.

Una oportunidad que se presenta es, desarrollar un esquema de control que lleve a cabo la tarea de MPPT, reduciendo así el tiempo de respuesta y las oscilaciones derivadas del uso del algoritmo.

## VI. REFERENCIAS

- [1] S. Anand and B. G. Fernandes, "Optimal voltage level for DC microgrids," in *Proc. 36th Annu. IEEE Ind. Electron. Soc. Conf.*, Nov. 2010, pp. 3034–3039.
- [2] S. Anand and B. G. Fernandes, "Steady state performance analysis for load sharing in DC distributed generation system," in *Proc. 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, May 2011, pp. 1–4.
- [3] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "An adaptive control system for a DC microgrid for data centers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 6, pp. 1910–1917, Nov./Dec. 2008.
- [4] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, "Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3066–3075, Dec. 2010.
- [5] T.-F. Wu, K.-H. Sun, C.-L. Kuo, and C.-H. Chang, "Predictive current controlled 5-kW singlephase bidirectional inverter with wide inductance variation for DC-microgrid applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3076–3084, Dec. 2010.
- [6] A. Kwasinski, "Quantitative evaluation of DC microgrids availability: Effects of system architecture and converter topology design choices," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 835–851, Mar. 2011.
- [7] Y.-C. Chang and C.-M. Liaw, "Establishment of a switched-reluctance generator-based commonDCmicrogrid system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 9, pp. 2512–2527, Sep. 2011.
- [8] T. ESRAM, P.L. Chaoman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2007, Volume: 22, Issue: 2. Digital Object Identifier: 10.1109/TEC.2006.874230, pp. 439-449.
- [9] Tse, C.K.; Chow, M.H.L., "Theoretical study of switching power converters with power factor correction and output regulation," *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, IEEE Transactions on, vol.47, no.7, pp.1047,1055, Jul 2000.
- [10] R. Loera-Palomo; JA. Morales-Saldaña, E. Palacios Hernandez., "Quadratic step-down dc-dc converters based on reduced redundant power processing approach," *IET Power Electronics*, Volume 6, Issue 1, January 2013, p. 136 – 145.
- [11] R. Loera-Palomo; JA. Morales-Saldaña., "Family of quadratic step-up dc-dc converters based on non-cascading structures," *IET Power Electronics*, Volume 8, Issue 5, May 2015, p. 793– 801.
- [12] T. F. Wu and Y. K. Chen. A systematic and unied approach to modeling PWM DC/DC converters based on the graft scheme". *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 45(1):88{98, Feb 1998.

- [13] R.W. Erickson and D. Maksimovic. *Fundamentals of power electronics*. 2nd Ed. Kluwer Academic Publishers.

## VII. BIOGRAFÍA



**De la Rosa-Romo, David.** Recibió el título de Ingeniero en Electrónica en 2009 y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en 2011 por el Instituto Tecnológico de la Laguna en la ciudad de Torreón, Coahuila, México.

Actualmente cursa el octavo semestre del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en Instituto Tecnológico de la Laguna en la línea de investigación Potencia y Energías Renovables. Su tema de investigación es el desarrollo de convertidores DC-DC para aplicaciones fotovoltaicas.



**Sellschopp-Sánchez, Francisco Sergio.** Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de La Laguna en 2003 en la ciudad de Torreón, Coahuila, México.

Él actualmente forma parte de la planta académica del posgrado de Ingeniería Eléctrica del TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón, Coahuila, México. Sus áreas actuales de investigación son máquinas y redes eléctricas, calidad de la energía e incorporación de fuentes renovables a redes eléctricas.

**Loera-Palomo, Rodrigo.** Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica en 2007 en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en 2013 en la misma institución.

Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de la Laguna a través del programa Cátedras-CONACYT. Sus áreas de investigación corresponden a los sistemas electrónicos de potencia, reguladores conmutados de alta frecuencia y teoría de control aplicada a sistemas electrónicos de potencia.



**Rivero-Corona, Michel.** Doctor en Ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México. Investigador adscrito al CONACYT - Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de la Laguna.

Las líneas de interés del Dr. Rivero es la dinámica de fluidos, implementación de modelos para la estimación y predicción del potencial eólico y solar, flujos magnetohidrodinámicos, Procesamiento Electromagnético de Materiales.