

Experimental Study of the Equivalence of the Adaptive Incremental Conductance (AIC) and the Adaptive Perturb & Observe (APO) Algorithms for PV Systems Maximum Power Tracking

J. Díaz-Bernabé, *IEEE Student Member*; and A. Morales-Acevedo, *IEEE Senior Member*

Abstract—This work presents the formulation of the correct adaptive incremental conductance (AIC) algorithm which has been confused by some authors with the adaptive P&O (APO) algorithm. By means of simulation and the experimental implementation of these algorithms for maximum power point tracking (AIC and APO), is shown that their performance under static and dynamic conditions are similar, in agreement with previous results for the conventional IC and P&O algorithms. The relation for the optimum scaling factors for both the AIC and APO algorithms is established here. It is concluded that the AIC algorithm is adequate to implement in cases where a small adaptive scaling factor for the APO algorithm would be a very sensitive parameter to the variation of the PV array parameters. Experimental power tracking efficiencies above 98% have been obtained when both algorithms are used under dynamic operation of a DC-DC converter to be used in a dual-stage micro-converter for connecting PV modules directly to the grid.

Index Terms—Maximum power point tracking, DC-DC power conversion, Power system simulations.

I. INTRODUCCIÓN

Las celdas solares transforman la energía proveniente del sol en energía eléctrica. Los módulos fotovoltaicos (FV) agrupan celdas solares interconectadas en serie para proporcionar la potencia requerida con el voltaje y la corriente adecuados para una aplicación determinada. Sin embargo, los módulos fotovoltaicos son fuentes de energía no reguladas y sensibles a la irradiación solar incidente y a la temperatura de las celdas. Por lo tanto, para lograr un comportamiento óptimo de los sistemas fotovoltaicos, el Punto de Potencia Máxima (MPP, por sus siglas en Inglés) debe rastrearse continuamente.

El módulo FV de corriente-alterna (CA) se conforma de un dispositivo micro-inversor y un módulo FV, y produce corriente-alterna (CA) para su conexión a la red. Las principales características del micro-inversor son una alta eficiencia de conversión de potencia, alta densidad de potencia y un único algoritmo de Seguimiento del Punto de Potencia Máxima (MPPT, por sus siglas en Inglés) para el módulo FV [1], [2], [3]. En micro-inversores FV de doble-etapa conectados a la red, un convertidor corriente-directa a corriente-directa (CD-CD) realiza el control de MPPT.

José L. Díaz-Bernabé and Arturo Morales-Acevedo are with the Department of Electrical Engineering of Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N., Av. IPN No. 2508, 07360, Mexico City, México, e-mail: (jldiaz@cinvestav.mx, amorales@solar.cinvestav.mx).

La Fig. 1a muestra la estructura de control de MPPT de lazo-doble donde el bloque MPPT recibe el voltaje v y la corriente i actuales, y modifica la referencia i_{ref} de un lazo de control para la corriente del módulo FV. El bloque C , es una función, lineal o no-lineal, que modifica el ciclo de trabajo u . Un esquema similar puede regular el voltaje del módulo FV. La Fig. 1b muestra la estructura de control de MPPT en lazo-sencillo, donde el bloque MPPT modifica directamente el ciclo de trabajo del convertidor P . Esta estructura es más simple, pero algunas topologías de convertidores corriente directa a corriente directa (CD-CD) requieren rigurosamente la estructura de MPPT de lazo-doble para garantizar un funcionamiento adecuado. El mismo algoritmo Φ se aplica en ambas estructuras de control.

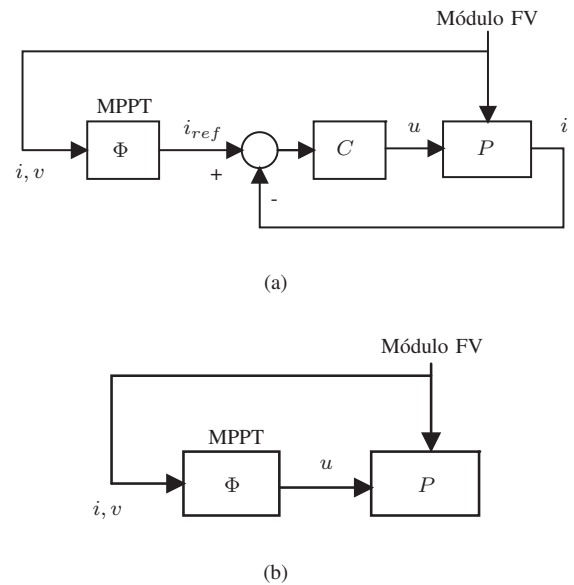


Fig. 1. Estructuras de control de MPPT. a) Lazo doble; b) Lazo sencillo.

Una figura de mérito que permite la evaluación del rendimiento es la denominada eficiencia de MPPT definida como [4]:

$$\eta_{mppt} = \frac{\int_0^T P(t) dt}{\int_0^T P_{max}(t) dt} \times 100 \quad (1)$$

donde $P(t)$ es la potencia del módulo FV con el control de MPPT, $P_{max}(t)$ es la potencia máxima ideal que entregaría el

módulo FV, y T es el periodo de tiempo en el cual se hace la evaluación.

Los fundamentos de los algoritmos de MPPT propuestos para su uso en sistemas FV autónomos y conectados a la red se han revisado en varios trabajos como [5], [6], [7], [8], [9], [10]. Específicamente, el método Perturba y Observa (P&O) es un algoritmo de MPPT de búsqueda verdadera ya que no requiere datos del módulo FV [7]. Basado en las curvas características de potencia contra voltaje del módulo FV, el algoritmo P&O convencional acerca el punto de operación de potencia máxima al verificar la pendiente de la potencia como una función del voltaje (dp/dv). Un término de corrección constante u_{step} se agrega o se resta del ciclo de trabajo u_k según el signo de dp/dv . Alternativamente, el método de Conductancia Incremental (IC, por sus siglas en Inglés) se basa en el hecho de que $di/dv = -i/v$ en el punto de potencia máxima [11], y así compara la conductancia incremental (di/dv) con el negativo de la conductancia instantánea (i/v) para decidir si u_{step} se agrega o resta del ciclo de trabajo u_k . En principio, estos dos algoritmos deberían ser diferentes, pero recientemente D. Sera et al. [12] mostró que los métodos P&O e IC tienen un comportamiento equivalente en condiciones dinámicas y estáticas.

Los algoritmos P&O e IC requieren valores adecuados del término de corrección u_{step} y del periodo de muestreo T_S . Un método para optimizarlos dado en [13] recomienda que, para un u_{step} crítico, el periodo mínimo T_S debe ser igual al tiempo de asentamiento del voltaje del módulo FV. Los valores óptimos de u_{step} y T_S proporcionan un equilibrio entre una respuesta dinámica rápida y pequeñas oscilaciones de estado estacionario. En la práctica, las oscilaciones de potencia siempre aparecerán alrededor del MPP porque el método se basa en un factor de corrección constante u_{step} . Luego, recientemente se han desarrollado algoritmos de MPPT adaptativos para mejorar la respuesta dinámica y las oscilaciones de potencia en estado estable alrededor del MPP [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]. Por ejemplo, Huynh y Cho [21] implementaron el algoritmo P&O Adaptable (APO, por sus siglas en Inglés) utilizando una estructura de control MPPT de lazo-doble. Wolf et al. [15] y Pandey et al [16], entre otros, implementaron el APO de un lazo-sencillo. Para el método APO, la magnitud del término de corrección es proporcional a dp/dv . Por otro lado, Liu et al. [17] mostró un método de IC con incrementos variables donde la pendiente dp/dv también se usa como una regla adaptativa para modificar el término de corrección. Sin embargo, éste es realmente el algoritmo APO de acuerdo con [12] y, por lo tanto, se generó una gran confusión porque a veces el APO real se denomina método de Conductancia Incremental Adaptable (AIC, por sus siglas en Inglés), como en los trabajos [26] y [27], después del trabajo de Liu et al. En un trabajo previo [25], se propone la definición correcta del algoritmo de AIC para una estructura de control de MPPT de lazo-sencillo. En este caso, el término de corrección adaptable está determinado por la función de conductancia generalizada total ($\Phi = di/dv + i/v$). En este trabajo se lleva a cabo una evaluación comparativa de los métodos AIC y APO para un micro-inversor FV de doble etapa. La simulación y los

resultados experimentales muestran que APO y AIC tienen un comportamiento similar, pero diferentes valores de parámetros optimizados. A continuación, este artículo está organizado de la siguiente manera: En la sección II se da la definición de los algoritmos AIC y APO, que son la base de nuestro estudio. Luego, en la sección III se explica la modelación de módulos fotovoltaicos y convertidores CD-CD, con lo cual se procede a simular el comportamiento de los algoritmos de MPPT, antes mencionados. En la sección IV se presentan los resultados experimentales obtenidos con el circuito realizado, y con los algoritmos AIC y APO implementados, ante el mismo perfil de variación de irradiación solar simulado anteriormente. En la sección V se discuten los resultados, para finalmente dar nuestra conclusión.

II. ALGORITMOS AIC Y APO

Para el algoritmo AIC, una función no-lineal Φ_{aic} determina el punto de operación del modulo FV [25]:

$$\Phi_{aic} = N_{aic} \left(\frac{i}{v} + \frac{di}{dv} \right) \quad (2)$$

el primer término a la derecha se conoce como conductancia instantánea y el segundo término es la conductancia incremental. $(i/v + di/dv)$ representa una regla adaptativa para el término de corrección variable y N_{aic} , expresado en ohms (Ω), es un factor de escalamiento que debe optimizarse. La función Φ_{aic} se convierte en cero en el punto de potencia máxima, por lo que en un artículo anterior [25] se tomó como una regla de adaptabilidad para el algoritmo AIC. Por lo tanto, el algoritmo AIC hace que se acerque al punto de potencia máxima cambiando el ciclo de trabajo u_k de acuerdo con:

$$u_k = u_{k-1} - \Phi_{aic} \quad (3)$$

Por lo tanto, para aplicar este método se debe evaluar tanto la conductancia incremental como la conductancia instantánea y se agrega o resta Φ_{aic} del ciclo de trabajo anterior u_{k-1} .

Recordando que el método APO [12], [23], [24], determina la corrección del ciclo de trabajo en el paso de tiempo k como:

$$\Phi_{apo} = N_{apo} \left(\frac{dp}{dv} \right) \quad (4)$$

donde N_{apo} tiene unidades de corriente inversa (A^{-1}) y también debe estar optimizado (por diseño). El algoritmo APO se acerca al punto de potencia máxima cambiando el ciclo de trabajo u_k de acuerdo con:

$$u_k = u_{k-1} - \Phi_{apo} \quad (5)$$

Para que ambos algoritmos sean equivalentes, la relación entre N_{aic} y N_{apo} debe ser:

$$N_{aic} = vN_{apo} \quad (6)$$

La expresión en (6) muestra que N_{apo} se puede relacionar con N_{aic} a través del factor $1/v$ para que ambos algoritmos sean equivalentes. Entonces, el comportamiento de ambos algoritmos sería similar en los casos adaptativos, como en los métodos convencionales de P&O e IC, según el estudio realizado por D. Sera et al. [12].

III. MODELADO Y RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La Fig. 2 muestra el sistema FV que se eligió para evaluar el rendimiento de los algoritmos de MPPT anteriores. En un micro-inversor FV de doble-etapa con conexión a la red, el convertidor CD-CD realiza el control MPPT y amplifica el voltaje al valor requerido para el convertidor CD-CA. La estructura de control de MPPT de lazo-sencillo se usa ampliamente como se describe en [8], [20], [22] porque es más simple que la estructura de MPPT de lazo-doble.

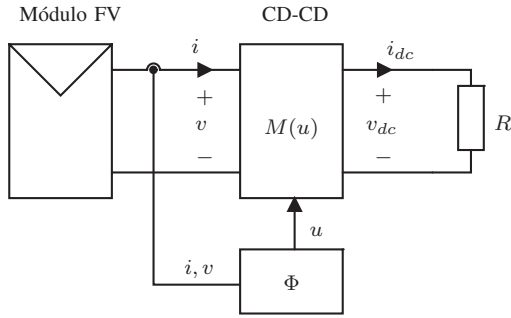


Fig. 2. Sistema FV elegido para probar los algoritmos de MPPT.

A. Módulo Fotovoltaico

El modelado del módulo FV se desarrolló con el diagrama de circuito que se muestra en la Fig. 3. El circuito incluye una fuente de corriente i_L dependiente de la irradiación solar G , un diodo que modela las características en oscuridad, una resistencia en serie R_S y una resistencia paralela R_P para modelar las pérdidas internas. El modelo debe incluir los efectos de la irradiación solar y la temperatura de la celda sobre el comportamiento del módulo fotovoltaico [28], [29].

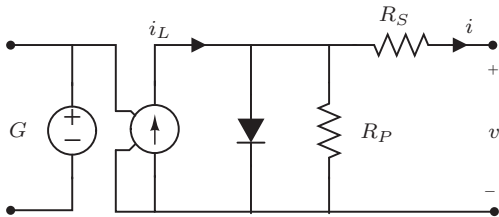


Fig. 3. Circuito equivalente del módulo FV.

La expresión matemática para la corriente i como una función del voltaje de salida v es:

$$i = i_L - i_0 \left(\exp \left(\frac{v + iR_S}{AN_S V_T} \right) - 1 \right) - \frac{v + iR_S}{R_P} \quad (7)$$

donde i_0 es la corriente de saturación en oscuridad del diodo, A es el factor de idealidad, V_T es el voltaje térmico, y N_S es el número de celdas en serie del módulo FV.

La foto-corriente i_L es proporcional a la foto-corriente nominal I_L a una irradiación solar específica G_0 en STC (Condiciones de Prueba Normalizadas), y afectada por la temperatura de las celdas del módulo:

$$i_L = \frac{G}{G_0} I_L (1 + K_i (T_C - T_R)) \quad (8)$$

donde $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_R = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, y K_i es el término de temperatura de la corriente en corto-circuito para un módulo FV en particular.

La temperatura de las celdas T_C afecta la potencia y el voltaje a circuitoabierto del módulo FV, ya que la corriente i_0 depende de la temperatura de acuerdo con:

$$i_0 = I_0 \left(\frac{T_C}{T_R} \right)^{\frac{3}{A}} \left(\frac{-qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_C + 273} - \frac{1}{T_R + 273} \right) \right) \quad (9)$$

donde I_0 es el valor nominal de la corriente de saturación en STC, K es la constante de Boltzmann, y q es la carga del electrón.

La Tabla I muestra los datos típicos de un módulo FV de 50 Watts en STC. Los cinco parámetros desconocidos en (7) fueron estimados con el procedimiento descrito en [29] y se muestran en la Tabla II.

TABLA I
DATOS DE UN MÓDULO FV DE 50 W EN STC

Parámetro	Símbolo	Valor
Corriente de corto-circuito	I_{SC}	2.381 A
Voltaje de circuitoabierto	V_{OC}	30.50 V
Corriente en el MPP	I_M	2.18 A
Voltaje en el MPP	V_M	22.83 V
Número de celdas en serie	N_S	60

TABLA II
PARÁMETROS ESTIMADOS DEL MÓDULO FV DE 50 W

Parámetro	Símbolo	Valor
Factor de idealidad del diodo	A	0.85
Resistencia Serie	R_S	1.87 Ω
Resistencia Paralela	R_P	446.83 Ω
Foto-corriente	I_L	2.39 A
Corriente en oscuridad del diodo	I_0	1.92×10^{-10} A

B. Convertidor CD-CD

El convertidor flyback se implementa ampliamente en módulos FV de CA, como se observa en [1], [2], [3] y [30], debido a que proporciona aislamiento galvánico y elevación del voltaje en un solo paso, no implica un gran costo, y evita mayores esfuerzos en la electrónica en comparación con un convertidor Boost controlado con una $u > 0.5$. D. Maksimovic et al. [31] resume varias enfoques para modelar convertidores CD-CD conmutados. Sin embargo, no todas las técnicas de modelado revisadas son adecuadas para evaluar algoritmos de MPPT. En este caso el comportamiento del convertidor mostrado en la Fig. 2 se estima por medio del modelo de transformador CD promedio [32]:

$$v_{dc} = M(u) v \quad (10a)$$

$$i_{dc} = \frac{1}{M(u)} i \quad (10b)$$

donde $M(u)$ es la razón de conversión de voltaje para el convertidor flyback en modo continuo de corriente (CCM):

$$M(u) = N \left(\frac{u}{1-u} \right) \quad (11)$$

donde N es la razón de vueltas del devanado secundario al devanado primario del transformador flyback y u es el ciclo de trabajo.

C. Resultados de Simulación

Para evaluar los algoritmos de MPPT se desarrolló un modelo de Matlab/Simulink del sistema FV de la Fig. 2. La Tabla III muestra los parámetros de simulación (tiempo de muestreo y factores de escalamiento) para los algoritmos APO y AIC. Observe que N_{aic} es del orden de N_{apo} multiplicado por V_M (≈ 21.42 V) necesario para que ambos algoritmos sean equivalentes. Sin embargo, N_{aic} debe ser menos sensible que N_{apo} a cualquier perturbación. La Tabla IV muestra la inductancia de magnetización L_m , el factor de vueltas del transformador N , y la frecuencia de PWM del convertidor de flyback obtenidos con el método de [33].

TABLA III
PARÁMETROS OPTIMIZADOS PARA LOS ALGORITMOS DE MPPT

Parámetro	APO	AIC
T_S	15 ms	15 ms
N_{apo}	$0.007 A^{-1}$	
N_{aic}		0.15Ω

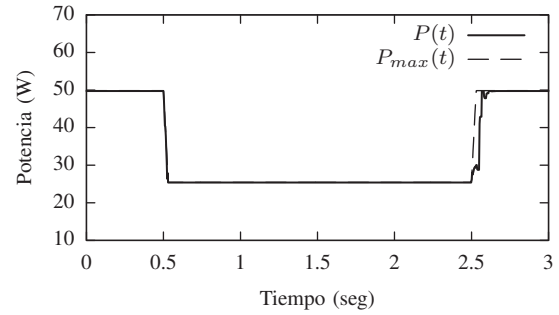
TABLA IV
ESPECIFICACIONES DEL CONVERTIDOR FLYBACK

Parámetro	Value
L_m	85×10^{-6} H
N	5
F_S	100×10^3 Hz

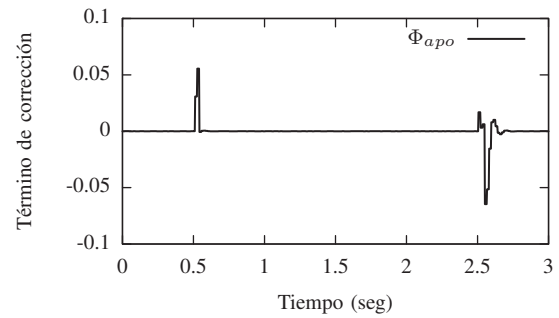
Los algoritmos APO y AIC se probaron utilizando un mismo perfil de irradiación solar y temperatura de las celdas. El transitorio es formado por un borde negativo donde la irradiación solar cae de 1 kW/m^2 a 0.5 kW/m^2 en el tiempo $t = 0.5$ s, y un borde positivo donde la irradiación solar pasa de 0.5 kW/m^2 a 1 kW/m^2 en el tiempo $t = 2.5$ s. Los bordes del transitorio representan cambios inesperados y severos de la irradiación solar.

La Fig. 4a muestra la respuesta dinámica para el control APO. El seguimiento es rápido en los bordes positivo y negativo del transitorio. Además, las oscilaciones de potencia son despreciables cuando se alcanza la potencia máxima, o durante periodos de irradiación solar constante. La Fig. 4b muestra el comportamiento de la función Φ_{apo} que modifica

el ciclo de trabajo. Su valor disminuye rápidamente a cero cuando se alcanza el MPP.



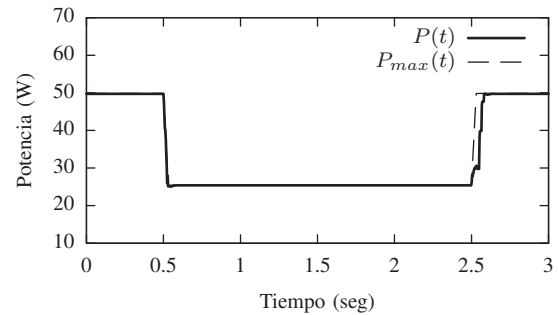
(a)



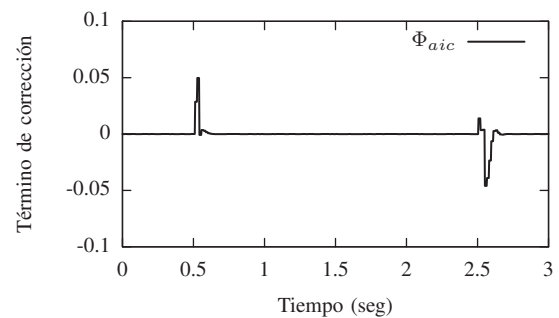
(b)

Fig. 4. Respuesta del algoritmo APO. a) Potencia del módulo FV. La línea discontinua es la potencia ideal; b) Término de corrección del ciclo de trabajo.

La Fig. 5a muestra respuesta dinámica al usar el algoritmo



(a)



(b)

Fig. 5. Respuesta del algoritmo AIC. a) Potencia del módulo FV. La línea discontinua es la potencia ideal; b) Término de corrección del ciclo de trabajo.

AIC. Se observa un rápido seguimiento de la potencia máxima en los bordes positivo y negativo del transitorio. Las oscilaciones de potencia no son perceptibles cuando se alcanza el MPP o durante periodos de irradiación solar constante. La Fig. 5b muestra la variación de la función Φ_{aic} durante el ciclo de prueba. Nuevamente, el término de corrección rápidamente se pone a cero cuando se alcanza el MPP.

La Fig. 6 muestra la respuesta del algoritmo AIC a tres temperaturas diferentes de celda. De acuerdo con (8) y (9) el punto de máxima potencia está afectado por la temperatura. Se puede observar que la respuesta es similar en cualquiera de estos casos, a excepción del valor máximo de potencia, que se reduce como resultado del aumento de la temperatura. El seguimiento de potencia que se observa es semejante para estas tres temperaturas.

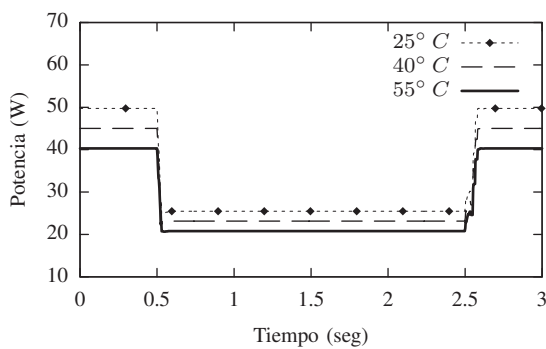


Fig. 6. Respuesta del algoritmo AIC a varias temperaturas de celda.

Para el caso del algoritmo APO los resultados son idénticos. Lo importante, a observar, es que la temperatura simplemente modifica la potencia máxima (como es de esperarse), pero no el comportamiento ante la variación de la irradiación solar, en cualquiera de los dos casos (AIC y APO).

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A. Emulador de Módulo FV

Sobre la base del circuito propuesto por Blanes [34], se implementó un circuito emulador de módulo fotovoltaico de 50 W controlado por software para comparar experimentalmente ambos algoritmos MPPT. El transitorio de la irradiación solar se controla mediante un programa desarrollado en LabView. La Tabla I y la Tabla II muestran los parámetros del emulador de módulo fotovoltaico.

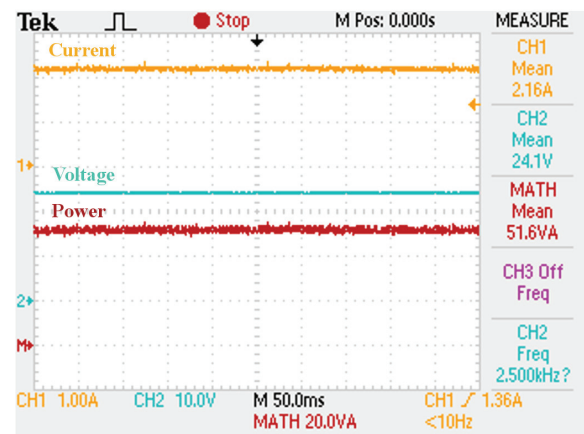
B. Convertidor Flyback

Se desarrolló un prototipo del convertidor flyback para las pruebas experimentales de los algoritmos de MPPT. El convertidor flyback fue diseñado para funcionar en modo de corriente continua (CCM). Un sensor de efecto Hall ACS715 [35] detectó la corriente instantánea y un divisor de voltaje realizó la detección de voltaje del módulo FV. Los algoritmos de MPPT se implementaron en un microcontrolador ATXMEGA128A4U de alto rendimiento de 16 bits [36], con un reloj interno de 100 MHz. Todas las operaciones aritméticas requeridas por el algoritmo de control MPPT

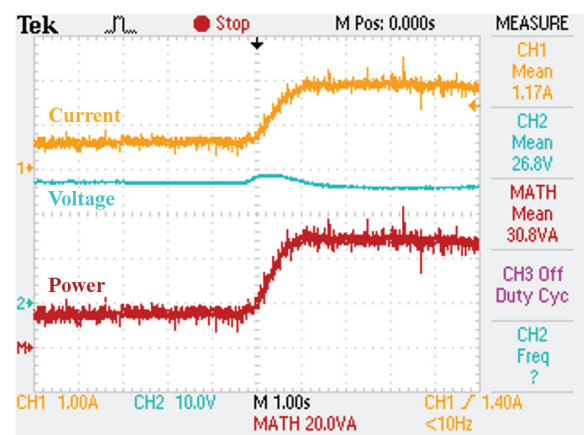
utilizaron números en un formato de punto fijo Q15. El periodo de muestreo se fijó en 20 milisegundos. Para cada periodo, se promediaron sesenta y cuatro valores de datos de corriente y voltaje para reducir la ondulación y los efectos de ruido. Los factores de escalamiento se seleccionaron de forma independiente para obtener el mejor rendimiento para los algoritmos APO y AIC.

C. Respuestas del AIC y APO

La Fig. 7a muestra los resultados experimentales para el algoritmo APO en condiciones de irradiación solar constante. La imagen del osciloscopio muestra las señales de corriente, voltaje y potencia del módulo fotovoltaico. La Fig. 7b muestra las señales de corriente, voltaje y potencia de salida del módulo fotovoltaico cuando se utiliza el algoritmo APO durante el borde transitorio de radiación solar de bajo a alto (de 0.5 a 1 kW/m²) explicado anteriormente.



(a)

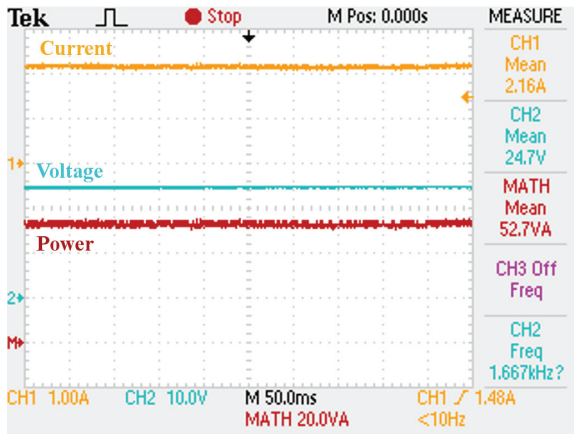


(b)

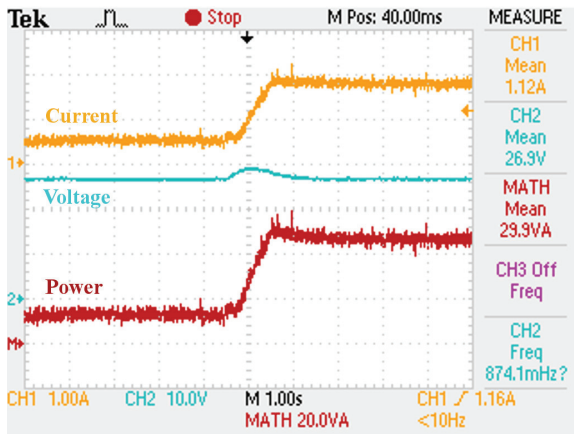
Fig. 7. Respuesta experimental del algoritmo APO. a) con irradiación solar constante $G=1$ kW/m²; b) en el borde bajo-alto del transitorio de irradiación solar.

De manera similar, la Fig. 8a muestra una imagen del osciloscopio para la corriente, voltaje y potencia del módulo fotovoltaico cuando se usa el algoritmo AIC en condiciones

de irradiación solar constante. Luego, la Fig. 8b muestra la corriente, el voltaje y la potencia de salida del módulo fotovoltaico cuando se usa el algoritmo AIC durante un único borde de bajo a alto del transitorio de irradiación solar.



(a)



(b)

Fig. 8. Respuesta experimental del algoritmo AIC. a) con irradiación solar constante $G=1 \text{ kW/m}^2$; b) en el borde bajo-alto del transitorio de irradiación solar.

La eficiencia de seguimiento de MPPT se evaluó de acuerdo con (1) para los algoritmos APO y AIC, y los resultados se presentan en la Tabla V.

TABLA V
EFICIENCIAS EXPERIMENTALES DE LOS ALGORITMOS DE MPPT

Algoritmo	Eficiencia en estado estacionario	Eficiencia dinámica
APO	$98 \pm 1 \%$	$98 \pm 1 \%$
AIC	$99 \pm 1 \%$	$98 \pm 1 \%$

Las eficiencias de MPPT dadas en la Tabla V muestran que el AIC tiene un rendimiento similar al algoritmo APO en condiciones de irradiación solar dinámica. La respuesta dinámica para los algoritmos APO y AIC es muy similar, alrededor del 98 %. Además, la eficiencia de MPPT del estado estacionario fue ligeramente mayor para el AIC que para el algoritmo APO. Las oscilaciones de potencia alrededor del

punto de máxima potencia son pequeñas en ambos casos. Estos resultados confirman la alta eficiencia esperada y también confirman la equivalencia entre los algoritmos APO y AIC.

Una observación importante es que el tiempo de respuesta del sistema cuando se aplica el transitorio de radiación baja a alta es de alrededor de 1 segundo y es un poco más corto para el AIC en comparación con el algoritmo APO (ver Fig. 7b y Fig. 8b). Los resultados de las simulaciones dieron tiempos de respuesta ideales de alrededor de 120 ms en ambos casos. Los tiempos de respuesta experimental son mayores, en comparación con los tiempos de respuesta en simulación, debido a que el emulador del módulo FV también causa cierto retraso en la respuesta del circuito experimental MPPT. En cualquier caso, un tiempo de respuesta de alrededor de 1 s es aceptable para una perturbación repentina de la intensidad de radiación, como se considera aquí.

V. CONCLUSIÓN

En resumen, este trabajo ha establecido la definición correcta para el algoritmo de conductancia incremental adaptable (AIC) que algunos otros autores confundieron con el algoritmo P&O (APO) adaptable. Mediante la simulación y la implementación experimental de estos algoritmos para el seguimiento del punto de potencia máxima, hemos demostrado que, aunque su formulación es diferente, ver (2) y (4), sus rendimientos bajo condiciones estáticas y dinámicas son similares, de acuerdo con los resultados anteriores para los algoritmos convencionales P&O e IC [12]. Sin embargo, el algoritmo AIC es adecuado para implementarse en los casos en que el parámetro N_{apo} es pequeño (en comparación con N_{aic}) y sería muy sensible a la variación de los parámetros del módulo FV, ver la Tabla III. La realización experimental para la prueba de ambos algoritmos adaptativos confirmó que son equivalentes y se pueden esperar eficiencias de seguimiento de potencia máxima por encima del 98 %, incluso bajo un cambio extremo de irradiación solar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sr. Armando Acevedo-Luna por la realización del emulador de módulo FV. José L. Díaz-Bernabé agradece a CONACyT-México por su beca de Doctorado y el apoyo otorgado a este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Kjaer, S., Pedersen, J. and Blaabjerg, F., "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, Vol. 41(5), pp. 1292 - 1306.
- [2] Li, Q. and Wolfs, P., "A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies With Three Different DC Link Configurations," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, Vol. 23(3), pp. 1320-1333.
- [3] Prapanavarat, C., Barnes, M. and Jenkins, N., "Investigation of the performance of a photovoltaic AC module," in *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 2002, Vol. 149(4), pp. 472-478.
- [4] D. Hohm and M. Ropp, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms," in *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, vol. 11, pp. 47-62, 2003.

- [5] V. Salas, E. Olías, A. Barrado and A. Lázaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, No. 11, pp. 1555-1578, 2006.
- [6] T. Esmam and P. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, No. 2, pp. 439-449, 2007.
- [7] M. de Brito, L. Galotto, L. Sampaio, G. de Azevedo e Melo and C. Canesin, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, No. 3, pp. 1156-1167, 2013.
- [8] S. Saravanan and Ramesh Babu N., "Maximum power point tracking algorithms for photovoltaic systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, Vol. 57, pp. 192 - 204.
- [9] Ram J. P., Babu, T. S. and Rajasekar, N., "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, Vol. 67, pp. 826 - 847.
- [10] Husain, M. A., Tariq, A., Hameed, S., Arif, M. S. B. and Jain, A. "Comparative assessment of maximum power point tracking procedures for photovoltaic systems," *Green Energy & Environment*, 2017, Vol. 2(1), pp. 5 - 17.
- [11] K. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," in *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, No. 1, pp. 59-64, 1995.
- [12] D. Sera, L. Mathe, T. Kerekes, S. V. Spataru and R. Teodorescu, "On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 3, No. 3, pp. 1070-1078, July 2013.
- [13] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G. and Vitelli, M., "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, Vol. 20 No. 4, pp. 963-973.
- [14] W. Xiao and W. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2004, Vol. 3, pp. 1957-1963.
- [15] P. J. Wolfs and L. Tang, "A Single Cell Maximum Power Point Tracking Converter without a Current Sensor for High Performance Vehicle Solar Arrays," in *2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, Recife, 2005, pp.165-171.
- [16] A. Pandey, N. Dasgupta and A. Mukerjee, "Design Issues in Implementing MPPT for Improved Tracking and Dynamic Performance," in *IEEE IECON 2006 - 32nd Annual Conference on Industrial Electronics*, 2006.
- [17] F. Liu, S. Duan, F. Liu, B. Liu and Y. Kang, "A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, No. 7, pp. 2622-2628, 2008.
- [18] Y. Ou, C. Wang and F. Hong, "A Variable Step Maximum Power Point Tracking Method Using Taylor Mean Value Theorem," in *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2010.
- [19] Q. Mei, M. Shan, L. Liu and J. M. Guerrero, "A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, No. 6, pp. 2427-2434, June 2011.
- [20] H. Kumar and R. K. Tripathi, "Simulation of variable incremental conductance method with direct control method using boost converter," in *2012 Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, 2012.
- [21] P. Huynh and B. H. Cho, "Design and analysis of a microprocessor-controlled peak-power-tracking system for solar cell arrays," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, No. 1, pp. 182-190, Jan 1996.
- [22] S. K. Kollimalla and M. K. Mishra, "Variable Perturbation Size Adaptive P&O MPPT Algorithm for Sudden Changes in Irradiance," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, No. 3, pp. 718-728, July 2014.
- [23] S. Satapathy, K. M. Dash and B. C. Babu, "Variable step size MPPT algorithm for photo voltaic array using zeta converter - A comparative analysis," in *2013 Students Conference Engineering and Systems (SCES)*, Allahabad, 2013, pp. 1-6.
- [24] M. Killi and S. Samanta, "Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, No. 9, Sept 2015, pp. 5549-5559.
- [25] A. Morales-Acevedo, J. L. Diaz-Bernabe and R. Garrido-Moctezuma, "Improved MPPT adaptive incremental conductance algorithm," in *IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2014, pp. 5540-5545.
- [26] A. Abdelsalam, A. Massoud, S. Ahmed, and P. Enjeti, "High-performance adaptive perturb and observe mppt technique for photovoltaic-based micro-grids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1010-1021, 2011.
- [27] N. E. Zakzouk, A. K. Abdelsalam, A. A. Helal and B. W. Williams, "Modified variable-step incremental conductance maximum power point tracking technique for photovoltaic systems," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013.
- [28] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, 2007, pp. 2392-2396.
- [29] J. L. Diaz-Bernabe and A. Morales-Acevedo, "Photovoltaic module simulator implemented in SPICE and Simulink," in *2015 12th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2015.
- [30] Nanakos, A. C., Tatakis, E. C. and Papanikolaou, N. P., "A Weighted-Efficiency-Oriented Design Methodology of Flyback Inverter for AC Photovoltaic Modules," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, Vol. 27(7), pp. 3221-3233.
- [31] D. Maksimovic, A. M. Stankovic, V. J. Thottuvelil and C. Verghese, "Modeling and simulation of power electronic converters," in *Proceedings of IEEE*, vol. 89, No. 6, June 2001, pp. 898-911.
- [32] Erickson, R. W. and Maksimovic, D., "Principles of Steady-State Analysis," in *Fundamentals of Power Electronics*, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [33] Pressman, Abraham. "The Flyback Converter Topologies," in *Switching power Supply Design*. McGraw-Hill, Inc., Third Edition, 2009, pp. 117-160.
- [34] J. M. Blanes and Ausias Garrigos, Circuit implements photovoltaic module simulator, EDN Network. 2011.
- [35] Allegro MicroSystems, LLC, "Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC ACS715 with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor," *ACS715-DS, Rev. 11*, June 5, 2017.
- [36] Atmel Corporation, 8/16-bit Atmel XMEGA Microcontroller, Rev.: Atmel-8387H-AVR-ATxmega16A4U-32A4U-64A4U-128A4U-Datasheet_09/2014.