

ALGORITMO SEGUIDOR DE MÁXIMA POTENCIA BASADO EN DIFERENCIACIÓN DE TRANSITORIOS PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS

MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHM BASED ON TRANSIENT DIFFERENTIATION FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

Roberto Isaac Rico Camacho

Universidad Autónoma de Yucatán, México
squall1811@hotmail.com

Luis Josué Ricalde Castellanos

Universidad Autónoma de Yucatán, México
lricalde@correo.uady.mx

Renan Gabriel Quijano Cetina

Universidad Autónoma de Yucatán, México
renan.quijano@correo.uady.mx

Eduardo Ernesto Ordoñez López

Universidad Autónoma de Yucatán, México
eduardo.ordonez@correo.uady.mx

Braulio José Cruz Jiménez

Universidad Autónoma de Yucatán, México
braulio.cruz@correo.uady.mx

Recepción: 23/noviembre/2022

Aceptación: 8/abril/2023

Resumen

Este artículo presenta un algoritmo de búsqueda de máxima potencia (MPPT) que utiliza estados transitorios a fin de prevenir problemas de deriva y reducir las oscilaciones en estado estacionario. El algoritmo propuesto está basado en el tradicional Perturbar y Observar (P&O) con una fase de medición adicional que se realiza durante el punto de máximo sobretiro después de la fase de perturbación. Mediante la comparación de las diferenciales de potencia, el algoritmo puede identificar si la perturbación anterior se realizó en la dirección correcta. La validación del funcionamiento se realizó mediante simulaciones utilizando un perfil de irradiación basado en el estándar EN50530 acelerado con un factor de 100x. El

algoritmo propuesto alcanzó una eficiencia global de 99.74% en comparación con el 97.4% que alcanzó el P&O bajo las condiciones probadas.

Palabras Clave: MPPT, fotovoltaico, plataforma de pruebas.

Abstract

This article presents a maximum power point tracking algorithm (MPPT) that measures transitory states to prevent drift and steady-state oscillation issues. The proposed algorithm is based on the traditional Perturb and Observe (P&O), with an additional measuring stage performed during the maximum overshoot point right after the perturbing phase. By comparing power differentials, the proposed algorithm can identify whether the previous perturbation was performed in the correct direction. The operation validation was made through simulations using an irradiance profile based on the EN50530 standard accelerated by a 100x factor. The proposed algorithm reached a global efficiency of 99.74% compared with the 97.4% of the classical P&O.

Keywords: MPPT, photovoltaic, test-platform.

1. Introducción

El aumento de los precios de los combustibles tradicionales convierte a los proyectos de energías renovables en empresas económicamente viables. Además, la energía solar se encuentra distribuida abundantemente en todo el territorio nacional con una radiación promedio de alrededor de 5 kWh/m²/día [Aleman-Nava, 2014]. Por ello, mejorar la eficiencia de los sistemas que la aprovechan es de gran importancia para el desarrollo nacional. Los paneles fotovoltaicos sometidos a irradiación uniforme poseen un punto de máxima potencia (MPP) en su curva característica potencia vs. voltaje (PV). Sin embargo, esta curva cambia su forma debido a factores externos como cambios en irradiación y/o temperatura. Es deseable que las celdas operen siempre en dicho MPP implementando esquemas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) [Kivimaki, 2017].

Una de las técnicas MPPT más utilizadas es la denominada “Perturbar y Observar” (P&O). Se trata de un algoritmo simple y de fácil implementación mediante sistemas

digitales que no requiere conocimiento preciso de las características del generador fotovoltaico (FV), ni la irradiación o temperatura de la celda [Motahhir, 2020]. El método consiste en introducir pequeñas perturbaciones al voltaje de la celda y posteriormente se mide la potencia entregada antes y después de la perturbación. Si la potencia aumentó, el algoritmo continúa perturbando al sistema en la misma dirección, si no, se perturba en el sentido contrario [Elgendy, 2012].

El esquema P&O considera que la curva de potencia no cambia mientras se hace la perturbación, que los cambios de potencia observados se deben únicamente al efecto de la perturbación. Debido a esto, el algoritmo no sabe distinguir entre los cambios de potencia producidos por la perturbación de los producidos por factores externos (irradiación y/o temperatura). Dicho fenómeno cobra mayor importancia cuando las condiciones externas fluctúan relativamente rápido, aunque en forma gradual [Escobar, 2017] por ejemplo, en condiciones de nubosidad y fuertes vientos. En estos casos, se ha observado que el controlador puede tomar decisiones equivocadas, lo que conduce a pérdidas en la eficiencia del sistema [Ahmed, 2015]. Se propone diseñar, simular y evaluar un algoritmo que obtenga más información de cada perturbación del punto de operación a partir de técnicas de multi muestreo. Esta información adicional en la etapa transitoria permitirá prevenir confusiones durante el seguimiento del MPP y en consecuencia mejorar la eficiencia.

En este artículo se presenta el principio de operación del algoritmo propuesto, simulaciones y comparativos de la eficiencia obtenida con respecto del P&O tradicional. En estos escenarios se muestra que el algoritmo propuesto es más eficiente que el de perturbar y observar (P&O) tradicional.

2. Métodos

La descripción del funcionamiento y la lógica detrás del algoritmo P&O tradicional y el algoritmo de diferenciación de transitorios se presenta en esta sección.

Algoritmo clásico P&O

El algoritmo P&O tradicional se presenta en la figura 1. Este método ha sido empleado ampliamente principalmente debido a su simplicidad, buen rendimiento

en relación con otros métodos, e implementación genérica (no se requiere conocer los datos del panel para su implementación).

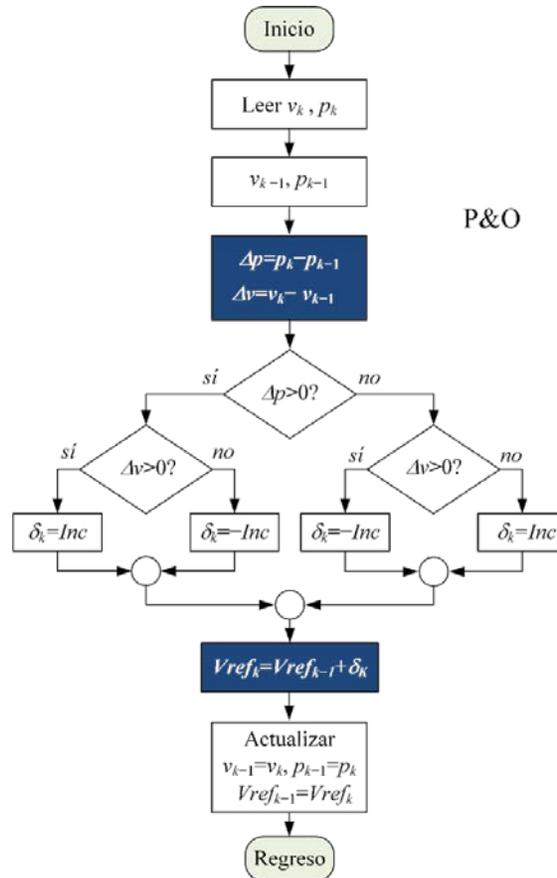


Figura 1 Diagrama de flujo del algoritmo P&O tradicional.

Las acciones de control se ejecutan cada periodo de tiempo k -ésimo (usualmente a intervalos de tiempo fijos (T_{MPPT}) con el propósito de detectar la pendiente en la curva PV y así seguir al $MPPT$. En lo consiguiente, se utilizará el subíndice k para indicar que el valor hace referencia a un periodo determinado en cada iteración. Por ejemplo, v_k y p_k representan el voltaje y la potencia del módulo fotovoltaico respectivamente durante la iteración k -ésima del algoritmo. El P&O detecta la pendiente al calcular las diferencias en potencia ($\Delta p = p_k - p_{k-1}$) después de añadir o sustraer al punto de operación una perturbación de tamaño fijo (δ). Si posterior a la introducción de esta perturbación, se calcula que Δp es positivo, se deduce que la perturbación acercó al sistema al MPP y que la siguiente perturbación

debe realizarse en el mismo sentido. Dicho de otro modo, $\Delta p/\delta > 0$ al lado izquierdo del MPP y $\Delta p/\delta < 0$ a la derecha del MPP.

El algoritmo de P&O ha sido ampliamente utilizado debido a su estructura relativamente simple, rendimiento aceptable, fácil implementación y que no depende de información previa acerca del sistema [Kandemir, 2017].

Problemas del P&O bajo cambios rápidos de irradiación

El algoritmo P&O tradicional se ve afectado por dos problemas principales [Rico-Camacho, 2022]. Debido a que por su naturaleza requiere perturbar al sistema para funcionar, oscila alrededor del MPP reduciendo la eficiencia del sistema cuando la irradiación permanece estable. Además, durante cambios rápidos de irradiación, es posible que se confunda y busque al MPP en la dirección equivocada en un fenómeno denominado como deriva (*drift*) [Escobar, 2017]. Este fenómeno ocurre debido a que la lógica del algoritmo asume que todos los cambios de potencia son causados únicamente por la perturbación del MPPT. Sin embargo, un cambio en la irradiación lo suficientemente rápido puede tener un efecto mayor en las variaciones de potencia que las acciones del controlador como se ilustra en la figura 2.

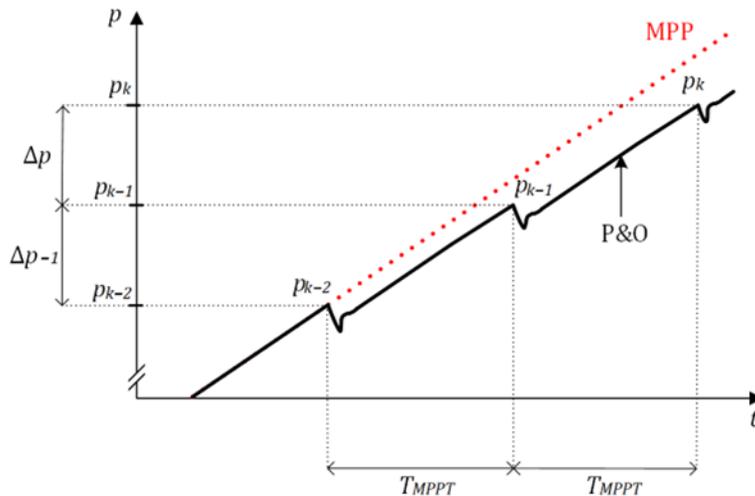


Figura 2 Comportamiento clásico del P&O alrededor del MPP.

El incremento constante de irradiancia con respecto al tiempo desplaza al MPP en una rampa ascendente. La potencia producida por el sistema también aumenta a

consecuencia de un incremento de irradiación. En el punto de operación inicial p_{k-2} se realiza una perturbación en el sentido incorrecto y esto aleja al sistema del MPP. A pesar de que la decisión de control fue equivocada se puede observar que $p_{k-2} < p_{k-1}$ debido al aumento de irradiación. De acuerdo con esta condición, el algoritmo continuaría perturbando en la dirección equivocada a pesar de que cada iteración aleja más y más al sistema del MPP. Este fenómeno continuaría hasta que el efecto de la decisión errónea tuviera un impacto mayor que los factores externos.

Distintas técnicas de MPPT

Las técnicas de MPPT se pueden dividir en clásicas, inteligentes, de optimización e híbridas [Bollipo, 2021]. Las técnicas de optimización e híbridas están enfocadas en solucionar problemas de optimización global cuando existe más de un máximo local en la curva PV (condiciones de sombreado parcial). Las híbridas, en particular, se conforman por una combinación de un algoritmo de búsqueda local como el P&O y un algoritmo de optimización. Los algoritmos de optimización más comúnmente utilizados son *particle swarm optimization* (PSO), *cuckoo search* (CS), *artificial bee colony* (ABC) y *grey wolf optimization* (GWO) [Padmanaban, 2019]. Es posible combinar el algoritmo propuesto con un algoritmo de optimización.

Las técnicas de MPPT clásicas son de implementación sencilla y baja carga computacional. Por lo tanto, son muy populares y se pueden implementar en microcontroladores de bajo consumo [Motahhir, 2020]. No obstante, presentan oscilaciones en estado estacionario y pueden confundirse durante cambios rápidos de irradiación. Aunado a esto, no son capaces de diferenciar un máximo global de un máximo local por lo que fallan bajo condiciones de sombreado parcial [Ram, 2020]. Ejemplos de estas técnicas incluyen *Hill climbing* (HC), Perturbar y Observar (P&O), voltaje constante (CV), inductancia incremental (InC), voltaje de circuito abierto (OCV), corriente corto circuito (SCC), voltaje de referencia adaptativo (ARV), control por correlación de rizado (RCC), y *look-up table* [Ahmad, 2019].

En la literatura se han propuesto diversas modificaciones al P&O, con el propósito de mejorar su eficiencia y reducir las oscilaciones alrededor del MPP durante condiciones de irradiación estática. En [Bhattacharyya, 2021] se ha propuesto

utilizar perturbaciones de tamaño dinámico. Estos algoritmos utilizan la relación entre los cambios de poder observados y el tamaño de la perturbación ($\Delta p/\delta$) a fin de establecer el tamaño de la próxima perturbación. Cuando ocurren cambios rápidos de irradiación esta relación crece y el tamaño de la perturbación introducida podría volverse errático. [Zhang, 2013] propone limitar el tamaño de la perturbación a un rango razonable mediante una función logarítmica. Como solución al problema del *drift* se usan perturbaciones dinámicas en conjunto con condiciones de frontera al punto de operación del sistema [Ahmed, 2018] y se utilizan cambios en la corriente de corto circuito como indicador de cambios en la irradiación [Sher, 2015]. Otras técnicas consideran utilizar condiciones adicionales que detectan los escenarios en los que el P&O es más propenso a fallar [Kill, 2015], perturbaciones adicionales previas a la toma de decisiones de control finales [Escobar, 2017], y mediciones adicionales durante cada etapa de perturbación [Sera, 2008]. El algoritmo planteado reduce tanto las pérdidas en estado estacionario como las causadas por el *drift*. Modificaciones implementadas sobre el algoritmo P&O clásico como adoptar un tamaño de perturbación dinámica, también podrían implementarse. De esta forma, se podría crear una familia de algoritmos completamente nueva que toma como base el algoritmo aquí presentado.

Algoritmo propuesto

Los algoritmos de MPPT pueden operar mejor si cuentan con más información acerca de la curva PV. Los algoritmos tradicionales perturban cada intervalo definido (T_{MPPT}) y después esperan a que el sistema alcance el estado estacionario o filtran las oscilaciones naturales del sistema antes de registrar los cambios de potencia. El método está basado en el P&O pero añade un muestreo adicional durante el estado transitorio (p_x).

El algoritmo propuesto calcula los diferenciales de potencia por lo que se le denomina *Transient differentiation Maximum Power Point Tracking* (Td-MPPT) mostrado en la figura 3. La medición adicional se registra en el punto de sobretiro posterior a la perturbación realizada por el MPPT, mostrado en la figura 4. La mejora previene el *drift* y la oscilación características del P&O.

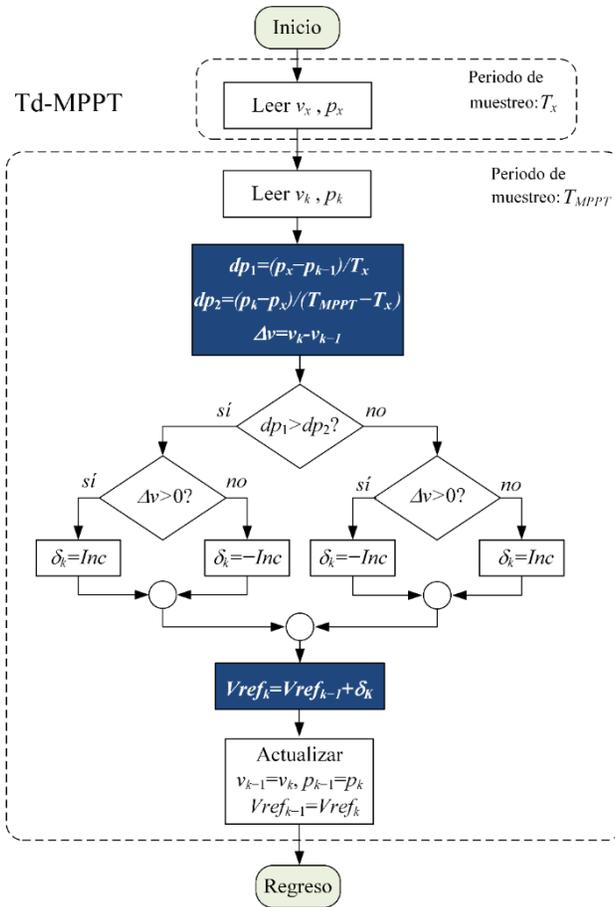


Figura 3 Diagrama de flujo del algoritmo Td-MPPT.

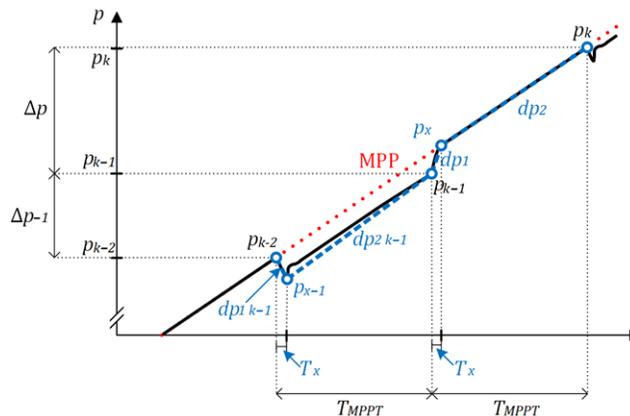


Figura 4 Perturbación realizada por el algoritmo Td-MPPT alrededor del MPP.

La figura 5 muestra los transitorios del comportamiento en potencia y voltaje bajo irradiancia estática cuando se somete a una irradiancia que aumenta de igual forma que lo mostrado previamente en la figura 2.

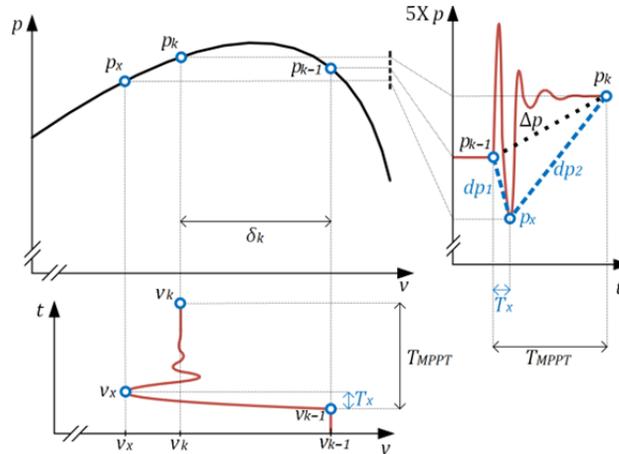


Figura 5 Comportamiento del sistema fotovoltaico después de una perturbación.

Al registrar tres puntos de operación diferentes, el algoritmo propuesto calcula dos diferenciales de potencia para cada perturbación usando las ecuaciones 1 y 2.

$$dp_1 = \frac{p_x - p_{k-1}}{T_x} \quad (1)$$

$$dp_2 = \frac{p_k - p_x}{T_{MPPT} - T_x} \quad (2)$$

Durante la primera iteración del algoritmo se calculan $dp_{1\ k-1}$ y $dp_{2\ k-1}$ donde $dp_{1\ k-1}$ se reduce drásticamente cuando el algoritmo introduce una perturbación que aleja al punto de operación del MPP aun cuando la irradiación está aumentando. En contraste, $dp_{2\ k-1}$ depende en mayor medida de los cambios en la irradiancia. Dado que $dp_{2\ k-1} > dp_{1\ k-1}$ cuando la perturbación alejó al sistema del MPP, el algoritmo ejecuta la siguiente perturbación en el sentido contrario a pesar de que $p_{k-1} > p_{k-2}$ y la perturbación se realiza en sentido correcto previamente a p_{k-1} .

Durante esta iteración se cumple que la perturbación se realiza en la dirección correcta siempre y cuando la tasa de cambio en la irradiancia permanezca constante como se indica en la ecuación 3.

$$dp_1 > dp_2 \quad (3)$$

A fin de reducir la carga computacional de la división en la ecuación 1, T_{MPPT} se puede seleccionar como un múltiplo del tiempo de sobretiro T_x . De esta forma la ecuación 3 se expresa con la ecuación 4 y al despejar se tiene ecuación 5.

$$(p_x - p_{k-1}) \cdot (\alpha - 1) > p_k - p_x \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{T_{MPPT}}{T_x} \quad (5)$$

La figura 5 muestra la respuesta transitoria usualmente sub-amortiguada que se espera cuando un sistema con control directo perturba el punto de operación del sistema por la operación de un algoritmo de MPPT [Kandemir, 2017]. Se observa que el sistema inicia en un punto a la derecha del MPP (v_{k-1}) y el algoritmo MPPT perturba al sistema en la dirección correcta hasta un punto a la izquierda del MPP (v_k). El P&O clásico utilizaría únicamente Δp para decidir si la siguiente perturbación debería hacerse en el mismo sentido o no. Por lo tanto, el algoritmo tradicional realizaría la siguiente perturbación en el mismo sentido. Sin embargo, alejaría al punto de operación del MPP al hacer esto. Este fenómeno es la razón del que el P&O oscila entre tres puntos de operación alrededor del MPP en estado estacionario. El sobretiro provee información adicional acerca de la forma de la curva PV ya que ocurre en la misma dirección que la perturbación δk . Al aplicar este principio, el Td-MPPT puede decidir si perturbar al sistema en la misma dirección lo acercaría al MPP o no. Puede asumirse que la perturbación se realizó de manera correcta si $dp_1 > dp_2$ bajo irradiación constante. Dicho de otro modo, el MPP está más allá de v_k y el MPPT debería perturbar en la misma dirección para alcanzarlo. Si $dp_1 < dp_2$ entonces el algoritmo propuesto debe perturbar en la dirección opuesta a la perturbación anterior ya que v_k está más cerca del MPP que v_x . El Td-MPPT reduce las oscilaciones al alternar entre dos puntos de operación.

Es evidente que T_x y T_{MPPT} deben seleccionarse con cuidado a fin de sintonizar el MPPT apropiadamente. Tradicionalmente, los algoritmos de MPPT pueden presentar comportamiento errático debido al muestreo de los estados transitorios si T_{MPPT} es muy pequeño y se perturba al sistema demasiado rápido. La opción más segura y utilizada es seleccionar un T_{MPPT} que sea mucho más grande que el periodo de oscilación natural del sistema. Para un convertidor de tipo boost como el mostrado en la figura 6 con capacitancia (C) e inductancia (L), T_{MPPT} se puede seleccionar de acuerdo con la ecuación 6.

$$T_{MPPT} \gg 2\pi\sqrt{LC} \quad (6)$$

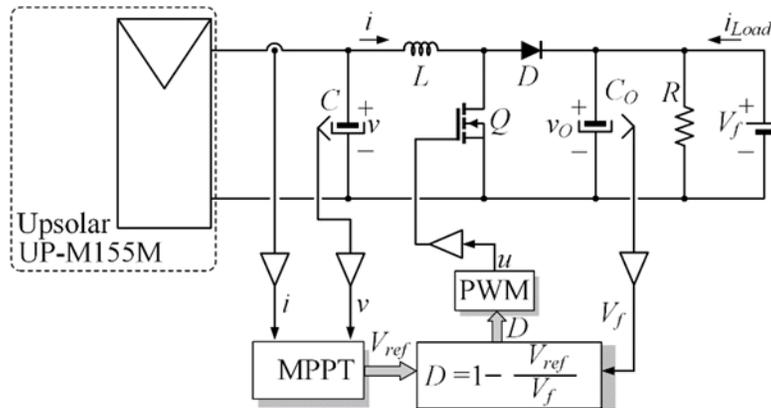


Figura 6 Plataforma de pruebas utilizada en la simulación.

Resulta evidente que esta condición tiene un límite práctico, ya que el MPPT podría ser incapaz de seguir cambios muy rápidos en factores externos si la velocidad de perturbación es muy lenta [Motahir, 2020] llevaron a cabo un detallado análisis de la dinámica de los sistemas fotovoltaicos y sus convertidores a fin de optimizar T_{MPPT} y mejorar la respuesta dinámica de los sistemas tradicionales de MPPT. Este análisis podría aplicarse de igual manera al Td-MPPT y, en teoría, permitiría seleccionar T_x de forma que coincida con el mayor punto de sobretiro causado por la perturbación.

La función de transferencia mostrada en la figura 7 presenta las curvas PV para todas las irradiaciones estáticas del estándar EN50530:2010 con el MPP teórico para cada irradiancia del panel solar UP-M155M. para el comportamiento dinámico de la plataforma utilizada en este artículo es la ecuación 7.

$$G_v = \frac{\mu\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

Donde $\mu = -V_o$, $\omega_n \approx 1/\sqrt{LC}$ y $\xi \approx \sqrt{LC}/(2R_{in})$. Cabe hacer notar que esta ecuación asume una aplicación sin variaciones en la corriente de carga y un boost ideal ($R_{in} = R(1 - D)^2$) a fin de simplificar el análisis y evidenciar los efectos de la resistencia del panel.

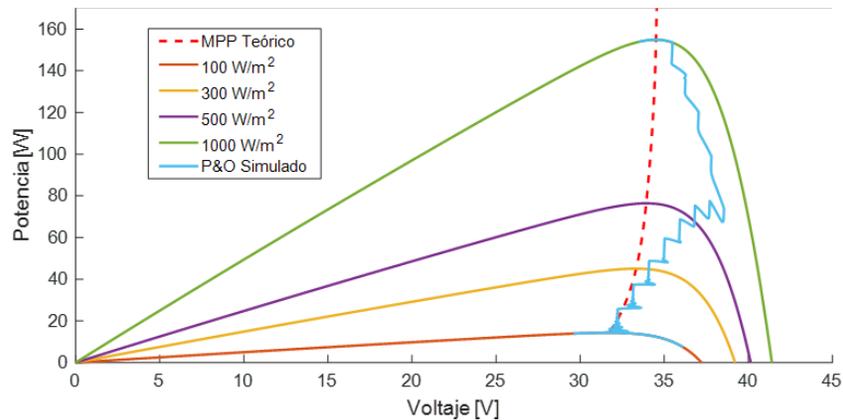


Figura 7 Curvas teóricas PV para las irradiaciones estáticas del estándar EN50530:2010.

Se observa que R_{in} describe la relación entre el voltaje y la corriente del panel PV y varía dependiendo de las características del panel, el punto de operación y las condiciones externas como irradiación y temperatura. Por lo tanto, este análisis evidencia que en la práctica T_x no es fijo debido a que el comportamiento transitorio de los sistemas fotovoltaicos cambia dependiendo del punto de operación en el que se encuentren [Kivimaki, 2017].

Debido a lo anterior, en el presente artículo se utiliza la frecuencia natural del convertidor DC-DC como aproximación de T_x . Es conveniente mencionar que, a pesar de esta inexactitud, el algoritmo propuesto eliminaría el *drift*. Además, también reduciría las oscilaciones en estado estacionario siempre y cuando T_x indique un punto de operación más allá de v_k .

Características de la simulación

El algoritmo Td-MPPT se simuló en MATLAB/Simulink a fin de compararlo con el algoritmo P&O tradicional. Ambos algoritmos se simularon usando una prueba basada en el estándar EN50530:2010 [CENELEC, 2010].

Debido a que el algoritmo presentado tiene como objetivo para mejorar la respuesta dinámica a los cambios muy rápidos de irradiación, se introdujo un multiplicador de 10^2 a la velocidad de la prueba de eficiencia estándar. El perfil probado se muestra en la tabla 1. Se utilizó el modelo provisto con Matlab/Simulink de un panel solar UP-M155M del fabricante Upsolar debido a su reducida resistencia en serie. Está

constituido por 72 celdas, un coeficiente de temperatura en el voltaje de $V_{OC} = -0.401,22 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ y de la corriente de $I_{SC} = 0.057,535 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$, una corriente generada por luz (I_l) de 5.0443 A, una corriente de saturación (I_0) de 6.41×10^{-10} A, un factor de idealidad de 0.98551, una resistencia en *shunt* (R_{SH}) de 111.107,2 Ω y una resistencia en serie (R_S) de 0.315,95 Ω .

Características del panel en condiciones estándar de prueba (STC , $G_{STC} = 1,000 \text{ W/m}^2$ y $T_{STC} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$): $P_{MPP} = 154.905 \text{ W}$; $V_{OC} = 41.4 \text{ V}$; $V_{MPP} = 34.5 \text{ V}$; $I_{SC} = 5.03 \text{ A}$; $I_{MPP} = 4.49 \text{ A}$. Las curvas para las irradiancias estáticas descritas en el estándar EN505030:2010 se muestran en la figura 7. La línea punteada representa el MPP teórico para cada irradiación entre 100 W/m^2 y $1,100 \text{ W/m}^2$.

Tabla 1 Perfil de irradiancia como fue simulado.

a. Irradiancia baja-media ($100 \text{ W/m}^2 - 500 \text{ W/m}^2$)							
Reposo (s)	Repeticiones (n)	Pendiente ($\text{W/m}^2/\text{s}$)	Subida (s)	Espera (s)	Bajada (s)	Espera (s)	Duración (s)
3	2	50	8	0.1	8	0.1	35.4
3	2	100	4	0.1	4	0.1	19.4
3	3	200	2	0.1	2	0.1	15.6
3	4	300	1.33	0.1	1.33	0.1	14.44
3	6	500	0.8	0.1	0.8	0.1	13.8
3	8	700	0.57	0.1	0.57	0.1	13.72
3	10	1,000	0.40	0.1	0.40	0.1	13
3	10	1,400	0.29	0.1	0.29	0.1	10.8
3	10	2,000	0.2	0.1	0.2	0.1	9
3	10	3,000	0.13	0.1	0.13	0.1	7.6
3	10	5,000	0.08	0.1	0.08	0.1	6.6
Total							159.36
b. Irradiancia media a alta ($300 \text{ W/m}^2 - 1,000 \text{ W/m}^2$)							
Reposo (s)	Repeticiones (n)	Pendiente ($\text{W/m}^2/\text{s}$)	Subida (s)	Espera (s)	Bajada (s)	Espera (s)	Duración (s)
3	10	1,000	0.7	10	0.7	0.1	19
3	10	1,400	0.5	10	0.5	0.1	15
3	10	2,000	0.35	10	0.35	0.1	12
3	10	3,000	0.23	10	0.23	0.1	9.6
3	10	5,000	0.14	10	0.14	0.1	7.8
3	10	10,000	0.07	10	0.07	0.1	6.4
Total							69.8

3. Resultados

Se realizaron pruebas siguiendo el perfil de irradiación del estándar EN0530:2010 tal y como se observa en la figura 8.

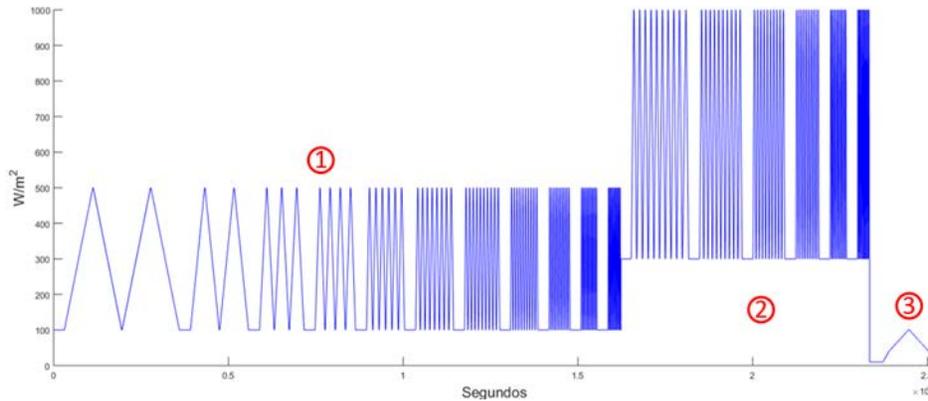


Figura 8 Perfil de irradiación de prueba completa EN5030:2010.

El estándar completo consta de 2 secciones principales: la primera (1) registra fluctuaciones entre irradiaciones bajas y medias (10-50% STC), y la segunda (2) registra fluctuaciones entre irradiaciones medias y altas (30-100% STC). Por último, hay una sección de prueba “*start-up*” (3) en donde se parte de una irradiación de 10 W/m^2 y se aumenta lentamente hasta 100 W/m^2 . La eficiencia general durante la prueba fue calculada con la ecuación 8.

$$\% \text{ Efficiency} = \frac{\int_0^{T_M} P}{\int_0^{T_M} P_{MPP}} \times 100 \quad (8)$$

Donde T_M consiste en el tiempo de simulación, P_{MPP} es la potencia máxima teórica en el MPP para las condiciones dadas, y P es la potencia real que se obtiene de la celda para las mismas condiciones. Se calculó la eficiencia dinámica de cada sección a partir de la tasa de cambio en la irradiación usando la ecuación 8.

El algoritmo se probó con un tiempo de prueba fijo (T_{MPPT}) de 15 ms. El parámetro de perturbación δ también se fijó al 2% de V_{oc} de acuerdo con lo sugerido en [Pandey, 2008]. Los puntos ideales en el MPP, para todos los casos, se muestran con una línea punteada en color rojo, mientras que el valor medido real en el sistema se muestra con una línea sólida azul.

El comportamiento de ambos algoritmos probados durante la prueba completa descrita en la tabla 1 se muestra en las figuras 9 y 10. Se observa que, durante las iteraciones con una tasa de cambio más lenta, ambos algoritmos siguen de manera satisfactoria al MPP. A medida que los cambios en irradiación se vuelven más

pronunciados, el P&O presenta el *drift* característico que reduce su potencia de salida y por consiguiente su eficiencia.

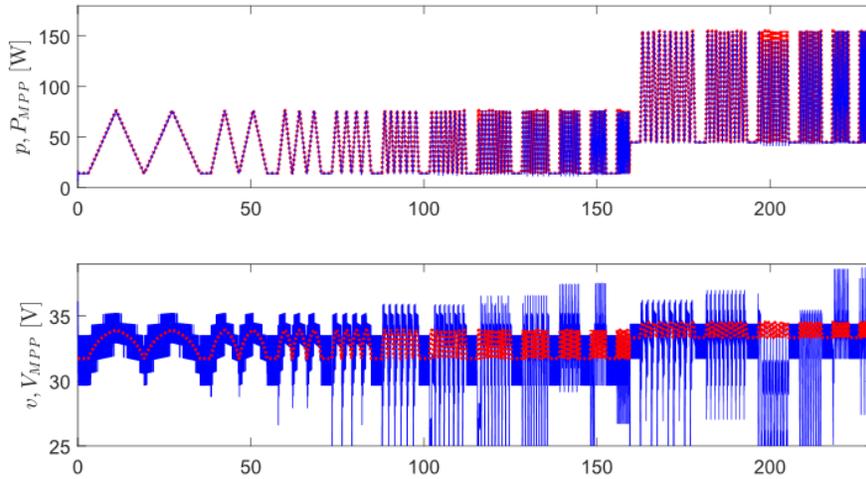


Figura 9 Valores teóricos vs prácticos comportamiento del P&O.

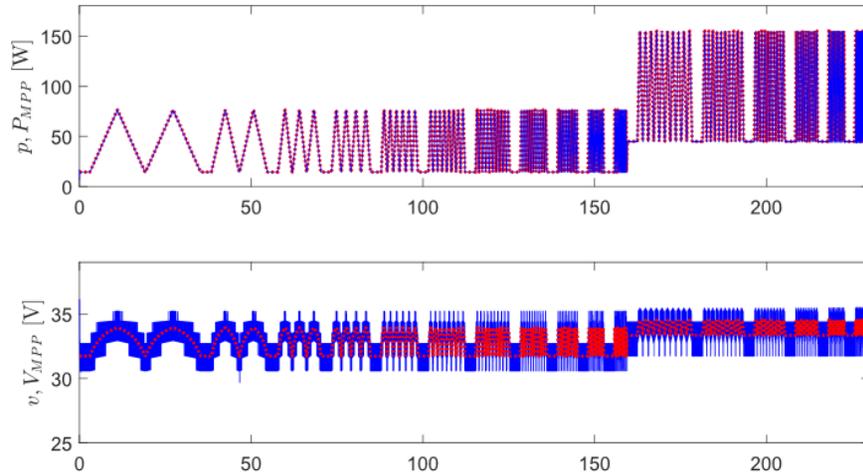


Figura 10 Valores teóricos vs prácticos comportamiento del Td-MPPT.

En contraste, el algoritmo propuesto no presenta problemas de *drift*, y sigue de manera efectiva al MPP durante la prueba. La eficiencia global del P&O (97.26%) fue menor que la del Td-MPPT (99.68%), figura 11.

Los cambios de irradiación más rápidos para la sección de la prueba de irradiación baja a media muestran diferencias más marcadas entre el P&O, figura 12, y el Td-MPPT, figura 13.

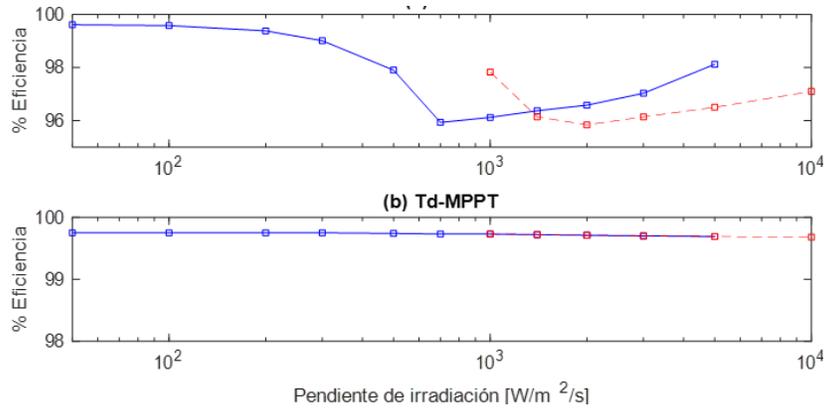


Figura 11 Eficiencia de ambos algoritmos MPPT simulados.

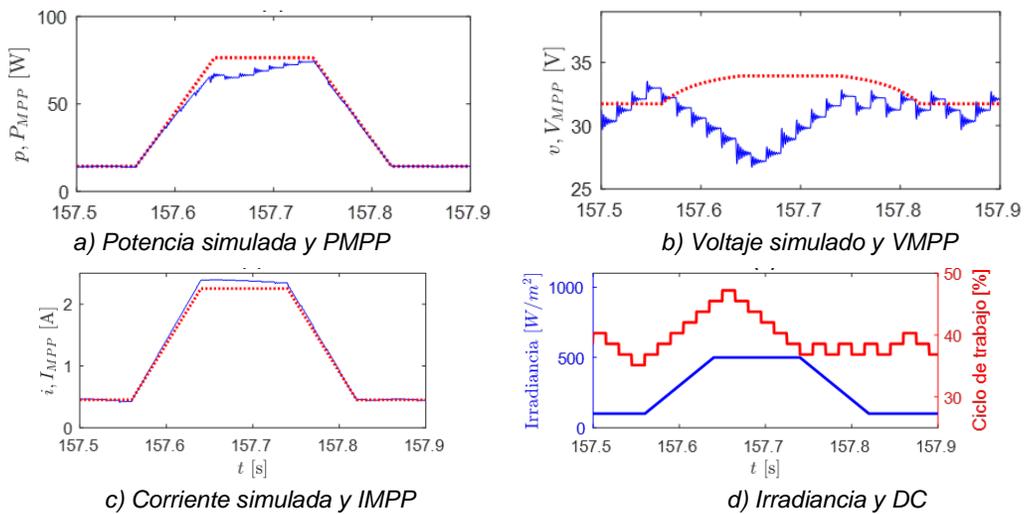


Figura 12 Respuesta del algoritmo P&O a los cambios de irradiación rápidos.

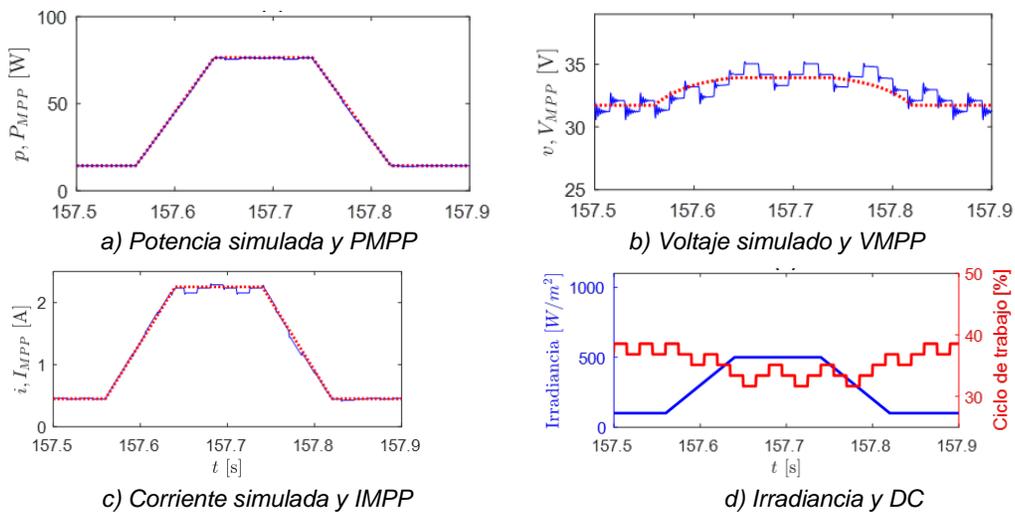


Figura 13 Respuesta del Td-MPPT a cambios de irradiación rápidos.

Se evidencia el *drift* característico del P&O reportado en la literatura. Aunque el MPPT perturba en la dirección correcta al principio de la forma trapezoidal, no puede detectar que ha pasado al MPP. Incluso, cuando el perfil de irradiación comienza su descenso, el P&O atribuye la reducción en la potencia de salida a los efectos del controlador por lo que continúa perturbando alrededor del mismo punto de operación hasta que se alcanza el punto de irradiación constante.

Es posible observar que la corriente del sistema disminuye por debajo del MPP debido a este fenómeno. En consecuencia, la potencia producida decrece (Figura 13b) por lo que la eficiencia del P&O (98.12%) es menor que la del Td-MPPT (99.22%).

4. Discusión

Las pruebas estandarizadas se desarrollaron con el propósito de evaluar algoritmos de MPPT para sistemas de estado estacionario. La tasa de cambio en la irradiación que proponen puede ser más lenta que los perfiles de irradiación a los que se somete una plataforma en movimiento. Es conveniente proponer modificaciones que permitan evaluar cambios de irradiación más rápidos. Las simulaciones realizadas mostraron un comportamiento equivalente a lo observado en la literatura.

Debido a que el Td-MPPT está basado en la estructura del P&O, podría mejorar sus capacidades en trabajos futuros desarrollando de un algoritmo híbrido que combine al Td-MPPT propuesto con un algoritmo de búsqueda de máximos globales con el propósito de solucionar problemas de sombreado parcial.

5. Conclusiones

Este trabajo presentó un algoritmo basado en el P&O tradicional que utiliza técnicas de muestreo de los estados transitorios para reducir las oscilaciones en estado estacionario y *drift* característicos de este. Se observó que el Td-MPPT no presentó *drift* durante cambios rápidos de irradiación en contraste con el P&O. Se observó que las oscilaciones en estado estacionario se redujeron en comparación con el P&O tradicional. El algoritmo propuesto mejoró la eficiencia global en las

simulaciones basadas en el estándar de pruebas EN50530:2010. Mediante el muestreo de los estados transitorios es posible obtener información adicional que permite a los algoritmos de MPPT tomar mejores decisiones de control.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ahmad, R., Murtaza, A. F., & Ahmed, H., (2019). Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101(October 2018), 82–102.
- [2] Ahmed, J., & Salam, Z., (2015). An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency. *Applied Energy*, 150, 97–108.
- [3] Ahmed, J., & Salam, Z., (2018). An Enhanced Adaptive P&O MPPT for Fast and Efficient Tracking Under Varying Environmental Conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(3), 1487–1496.
- [4] Bhattacharyya, S., Kumar P, D. S., Samanta, S., & Mishra, S., (2021). Steady output and fast tracking MPPT (SOFT-MPPT) for P&O and InC algorithms. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 293–302.
- [5] Bollipo, R. B., Mikkili, S., & Bonthagorla, P. K., (2021). Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(1), 9–33.
- [6] CENELEC, E. C. for E. S., (2010). European Standard EN 50530. Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters.
- [7] Elgendy, M. A., Zahawi, B., & Atkinson, D. J., (2012). Evaluation of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques. *IET Conference Publications*, 2012(592 CP), 21–33.
- [8] Kandemir, E., Cetin, N. S., & Borekci, S., (2017). A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(December 2016), 93–112.
- [9] Motahhir, S., El Hammoumi, A., & El Ghzizal, A., (2020). The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 246.

- [10] Escobar, G., Pettersson, S., Ho, C. N. M., & Rico-Camacho, R., (2017). Multisampling Maximum Power Point Tracker (MS-MPPT) to Compensate Irradiance and Temperature Changes. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(3), 1096–1105.
- [11] Kivimaki, J., Kolesnik, S., Sitbon, M., Suntio, T., & Kuperman, A., (2017). Revisited Perturbation Frequency Design Guideline for Direct Fixed-Step Maximum Power Point Tracking Algorithms. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(6), 4601–4609.
- [12] Padmanaban, S., Priyadarshi, N., Bhaskar, M. S., Holm-Nielsen, J. B., Ramachandaramurthy, V. K., & Hossain, E., (2019). A Hybrid ANFIS-ABC Based MPPT Controller for PV System with Anti-Islanding Grid Protection: Experimental Realization. *IEEE Access*, 7, 103377–103389.
- [13] Pandey, A., Dasgupta, N., & Mukerjee, A. K., (2008). High-performance algorithms for drift avoidance and fast tracking in solar MPPT system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(2), 681–689.
- [14] Ram, J. P., Pillai, D. S., Rajasekar, N., & Strachan, S. M., (2020). Detection and Identification of Global Maximum Power Point Operation in Solar PV Applications Using a Hybrid ELPSO-PO Tracking Technique. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 8(2), 1361–1374. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2900999>.
- [15] Rico-camacho, R. I., Ricalde, L. J., Bassam, A., Flota-bañuelos, M. I., & Alanis, A. Y., (2022). Transient Differentiation Maximum Power Point Tracker (Td-MPPT) for Optimized Tracking under Very Fast-Changing Irradiance: A Theoretical Approach for Mobile PV Applications. *Applied Sciences*, 12(5),2671.
- [16] Sera, D., Teodorescu, R., Hantschel, J., & Knoll, M., (2008). Optimized Maximum Power Point Tracker for fast changing environmental conditions. 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2401–2407.