

# Descripción detallada y análisis comparativo de técnicas para seguir el punto de máxima potencia en paneles solares usando OpenModelica

## Detailed description and comparative analysis of techniques for tracking the maximum power point of solar panels using OpenModelica

Yesika Andrea Gutiérrez-Villa<sup>1</sup>, José Robinson Ortiz-Castrillón<sup>2</sup>, Sergio Danilo Saldarriaga-Zuluaga<sup>3</sup>, Nicolás Muñoz Galeano<sup>1</sup>, Jesús María López-Lezama<sup>1\*</sup>, Carlos David Zuluaga-Ríos<sup>3</sup>

### Resumen

Este artículo explica, implementa, analiza y compara el rendimiento de las siguientes técnicas para el seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT por sus siglas en inglés) de un panel solar: 1) Perturbación y Observación (P&O), 2) tensión constante, 3) escalado simple, y 4) conductancia incremental. La descripción detallada de cada técnica se presenta como primera contribución del trabajo, para que los estudiantes de ingeniería y los ingenieros puedan comprenderlas más fácilmente y ver sus ventajas e inconvenientes. Las técnicas se implementaron en OpenModelica, donde se simula un panel solar comercial controlado por un convertidor Boost. OpenModelica dispone de dos bloques MPPT basados en el algoritmo clásico P&O, por lo que se crearon bloques con los algoritmos de las otras técnicas como segunda contribución del artículo. Los resultados de la simulación muestran que la técnica de voltaje constante tiene el peor rendimiento, es lenta y su eficiencia cae considerablemente con los cambios de temperatura, por lo que no se recomienda su uso; mientras que la técnica de conductancia incremental presenta el mejor rendimiento con los cambios de irradiancia y temperatura.

**Palabras Clave:** Análisis comparativo, voltaje constante, conductancia incremental, MPPT, P&O.

### Abstract

This paper explains, implements, analyzes and compares the performance of the following techniques for Maximum Point Power Tracking (MPPT) of a solar panel: 1) Perturbation and Observation (P&O), 2) constant voltage, 3) simple scaling, and 4) incremental conductance. The detailed description of each technique is presented as the first contribution of the paper, so that engineering students and engineers can more easily understand them and see their advantages and disadvantages. The techniques were implemented in OpenModelica, where a commercial solar panel controlled by a Boost converter is simulated. OpenModelica has two MPPT blocks based on the classical P&O algorithm, therefore, blocks with the algorithms of the other techniques were created as the second contribution of the article. Simulation results show that the constant voltage technique has the worst performance, it is slow, and its efficiency drops considerably with temperature changes, so its use is not recommended; while the incremental conductance technique presents the best performance with irradiance and temperature changes.

**Keywords:** Comparative analysis, constant voltage, incremental conductance, MPPT, P&O

**Recepción:** 29-Agosto-2023

**Aceptación:** 27-Noviembre-2023

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia

<sup>1\*</sup> Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia. Dirección electrónica: [jmaria.lopez@udea.edu.co](mailto:jmaria.lopez@udea.edu.co)

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Antioquia, Medellín-Colombia

<sup>3</sup>Facultad de ingeniería, Departamento de Eléctrica, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín-Colombia

## 1. Introducción

En los últimos años, la demanda de energía eléctrica se ha incrementado sustancialmente. Las fuentes de energía convencionales no renovables como las basadas en los combustibles fósiles han suplido gran parte de esta demanda; sin embargo, estos son recursos agotables y sus procesos altamente contaminantes [1]. Por otro lado, las fuentes renovables son virtualmente inagotables y generan energía eléctrica de forma limpia y también reducen las emisiones de gases de efecto invernadero; sin embargo, su naturaleza fluctuante conlleva a desafíos en materia de estabilidad, protección, optimización y conexión con la red eléctrica. Estos retos pueden enfrentarse con la implementación de microrredes de energía y sus técnicas correctas de gestión [2].

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes renovables más demandadas debido a la gran flexibilidad de instalación en el mismo lugar de abastecimiento. Su implementación permite disminuir costos relacionados con sistemas eléctricos de potencia y le permite al usuario vender energía a la red, reduciendo su factura de energía y a su vez, el pago que los operadores de red tendrían que hacer en el mercado mayoritario [3]. La Red de políticas de energía renovable para el siglo XXI (REN21) indicó que el uso de la energía solar se incrementó a nivel mundial un 25 % en el 2021 y representó el 5 % de la generación eléctrica frente a un 3.7 % respecto al 2020 [4].

En el entorno de la energía solar fotovoltaica, es esencial comprender que la curva característica (voltaje-corriente) de un panel solar no sigue una línea recta, sino que muestra un punto óptimo donde se puede obtener la máxima potencia. Para asegurar un uso eficiente de los recursos energéticos, el panel debe operar siempre en este punto de máxima potencia. Sin embargo, este punto varía con la irradiancia y temperatura [5]. Para encontrar este punto, es necesario un controlador para extraer la máxima potencia de un sistema fotovoltaico de forma automática conocido como seguidor del punto de máxima potencia (Maximum Power Point Tracker, MPPT) [6]. El MPPT busca la tensión donde la potencia del módulo es máxima y en caso de un cambio de condición ambiental, el MPPT adapte la tensión de salida de los paneles al punto óptimo [7].

Diversas estrategias se han desarrollado para la determinación del punto de máxima potencia, entre las cuales las más prominentes son: Perturbación y Observación (P&O), Voltaje Constante, Escala Simple y Conductancia Incremental [8]. Estas metodologías han sido extensivamente investigadas con el propósito de optimizar el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos [9, 10, 11]. Es relevante comprender que la cantidad de energía extraída de los paneles solares fluctúa no solo en respuesta a las condiciones ambientales y ubicación [12, 13], sino también debido a parámetros intrínsecos del controlador MPPT, como la afinación y el paso seleccionado para la modificación de las variables del

sistema.

Sin embargo, hasta la fecha, no se ha llevado a cabo una evaluación comparativa de estas técnicas con validación en OpenModelica. A partir de esto, este estudio presenta un minucioso análisis de estas técnicas junto con una evaluación comparativa detallada. El objetivo es discernir las ventajas y desventajas de cada enfoque bajo condiciones operativas uniformes. Por lo tanto, este artículo ofrece una contribución concreta al ámbito educativo en ingeniería, considerando la importancia innegable de las energías renovables para el progreso tecnológico y el avance en todas las esferas de la sociedad. Los trabajos de investigación con esta orientación adquieren un valor significativo al proporcionar información y conocimientos de alta valía. Estos recursos resultan especialmente beneficiosos para estudiantes y profesionales de la ingeniería, al enriquecer sus habilidades y comprensión en este campo en constante evolución [14, 15].

La simulación de sistemas de generación solar encuentra un aliado valioso en plataformas de código abierto como OpenModelica. Esta herramienta ofrece bibliotecas equipadas con componentes especializados que permiten el análisis minucioso de estos sistemas. Incluye una variedad de elementos como celdas solares, componentes eléctricos y sensores de corriente, voltaje y potencia. Además, cuenta con dos Seguidores del Punto de Máxima Potencia (MPPT), cada uno con sus características. Uno de ellos acepta entradas de voltaje y corriente, mientras que el segundo opera con una entrada de potencia. Ambos bloques emplean el algoritmo Perturbación y Observación (P&O), ampliamente reconocido en la industria; un bloque recibe las medidas de voltaje y corriente, mientras que el otro bloque recibe directamente la medida de potencia, sin embargo, el algoritmo es el mismo para ambos. Una particularidad valiosa de este software es su capacidad para crear nuevos algoritmos y bloques personalizados, permitiendo una integración fluida en las simulaciones [16]. Por lo que este artículo tiene como propósito crear, explicar de forma detallada y entregar a la comunidad académica los bloques en OpenModelica de las técnicas MPPT voltaje constante, escala simple y conductancia incremental para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles solares. Los bloques creados se encuentran en el siguiente repositorio de github [17].

Este artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera: la sección 2 describe el modelo clásico de los paneles solares y el convertidor Boost para la implementación de las técnicas. La sección 3 explica a detalle las técnicas MPPT con sus respectivos flujogramas. La sección 4 presenta los resultados de simulación usando los bloques de OpenModelica desarrollados. La sección 5 realiza un análisis comparativo de las técnicas utilizadas, y la sección 6 concluye y resalta los aspectos más relevantes del artículo.

## 2. Sistema fotovoltaico a implementar

### 2.1. Modelo del panel solar

Un panel solar está conformado por varias celdas solares que absorben fotones de luz y liberan electrones, generando energía eléctrica. El conjunto de celdas conectadas en serie forman un módulo fotovoltaico [18]. Entre los modelos de celdas fotovoltaicas el más usado es el de un diodo (Figura 1) [8], ya que los resultados son más eficientes y de baja complejidad para evaluar técnicas de MPPT y medidas de irradiancia [19]. Se parte de una fuente de corriente  $i_f$  cuyo valor dependerá del nivel de irradiancia y la temperatura del panel, luego se tiene un diodo  $D$  conectado en paralelo con una resistencia  $R_p$ , todos en serie con la resistencia  $R_s$  [1]; el diodo representa el material semiconductor; la resistencia serie corresponde a la resistencia de carga del material semiconductor, a los contactos metálicos y a las interconexiones y resistencias de contacto entre el semiconductor y los contactos metálicos; la resistencia en paralelo se debe a las no idealidades e impurezas de las uniones de los semiconductores. La corriente  $i_d$  es la corriente del diodo,  $i_{Rp}$  es la corriente de pérdidas de  $R_p$ , finalmente,  $i_{ph}$  y  $v_{ph}$  son la corriente y el voltaje (respectivamente) del panel solar que alimentarán, en este caso, a un convertidor Boost. Las medidas de voltaje y corriente deben ser procesadas por los algoritmos MPPT para poder obtener el punto en el que el panel entrega la máxima potencia.

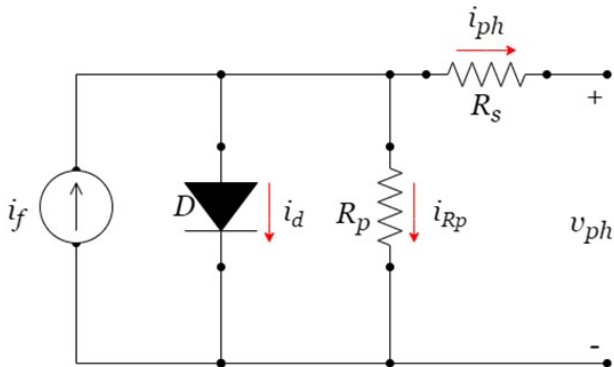


Figura 1: Circuito equivalente celda solar.

Las condiciones atmosféricas son fundamentales para la conversión de energía producida por los paneles solares [7]. El voltaje de circuito abierto y la potencia máxima del panel solar tiene una relación inversamente proporcional con la temperatura, mientras que la corriente de cortocircuito aumenta con la temperatura [20]. Por otro lado, el voltaje tiene un comportamiento logarítmico con la irradiancia y tanto la corriente de cortocircuito como la potencia máxima aumentan cuando la irradiancia aumenta [21]. En conclusión, La potencia del panel es directamente proporcional a la irradiancia e inversa a la temperatura [22].

### 2.2. Convertidor Boost

La Figura 2 muestra el sistema a analizar en este artículo que tiene 2 etapas principales. La primera (de izquierda a derecha) es un panel fotovoltaico, la segunda corresponde a un convertidor DC/DC Boost [23], siendo el capacitor ( $C_1$ ) un filtro de acople entre estas dos etapas. El convertidor está formado por un inductor ( $L$ ), un interruptor ( $Q$ ), un diodo ( $D_1$ ), un capacitor ( $C_2$ ) y la carga ( $R$ ). El panel solar ( $i_{ph}$ ,  $v_{ph}$ ) es la fuente de alimentación del convertidor, ( $i_{C1}$ ) es la corriente del filtro de entrada,  $i_L$  es la corriente del inductor,  $i_{C2}$  es la corriente del capacitor de salida,  $i_R$  es la corriente de la carga y  $v_o$  es el voltaje de salida del convertidor.

Las Ecuaciones 1, 2 y 3 describen el comportamiento de la corriente en el inductor  $L$ , el voltaje en el capacitor  $C_1$  (voltaje del panel) y el voltaje en el capacitor  $C_2$  (voltaje de salida). Estas ecuaciones pueden ser utilizadas para el diseño de los controladores del sistema y pueden ser consultadas en [17].

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{ph} - (1 - u)v_o \quad (1)$$

$$C_1 \frac{dv_{ph}}{dt} = i_{ph} - i_L \quad (2)$$

$$C_2 \frac{dv_o}{dt} = (1 - u)i_L - \frac{v_o}{R} \quad (3)$$

## 3. Técnicas MPPT implementadas

Esta sección tiene como propósito la descripción de las técnicas MPPT más usadas comercialmente y en la comunidad académica. En OpenModelica solo aparece reportado dos bloques de MPPT que están basados en el método P&O; además, en la literatura técnica no hay registro de otros algoritmos o técnicas MPPT en OpenModelica. Entonces se implementaron y analizaron las técnicas de voltaje constante, escala simple y conductancia incremental con la finalidad de comparar con el algoritmo de P&O de OpenModelica e incrementar las opciones de MPPT en el simulador.

### 3.1. Perturbación y observación

El método Perturbación y Observación (P&O) convencional es el más usado por su sencillez. Consiste básicamente en modificar el ciclo de trabajo del interruptor del convertidor Boost que opera como MPPT, sumando o restando un pequeño valor que puede ser fijo o variable. Este valor se conoce como paso, con el objetivo de encontrar el punto de máxima potencia. De esta forma mide la potencia de salida anterior y actual, debida al efecto de la perturbación. Si la potencia se incrementa, el algoritmo sigue perturbando el sistema en el mismo sentido en que venía haciéndolo; en caso contrario, el algoritmo cambia de dirección [24]. El método

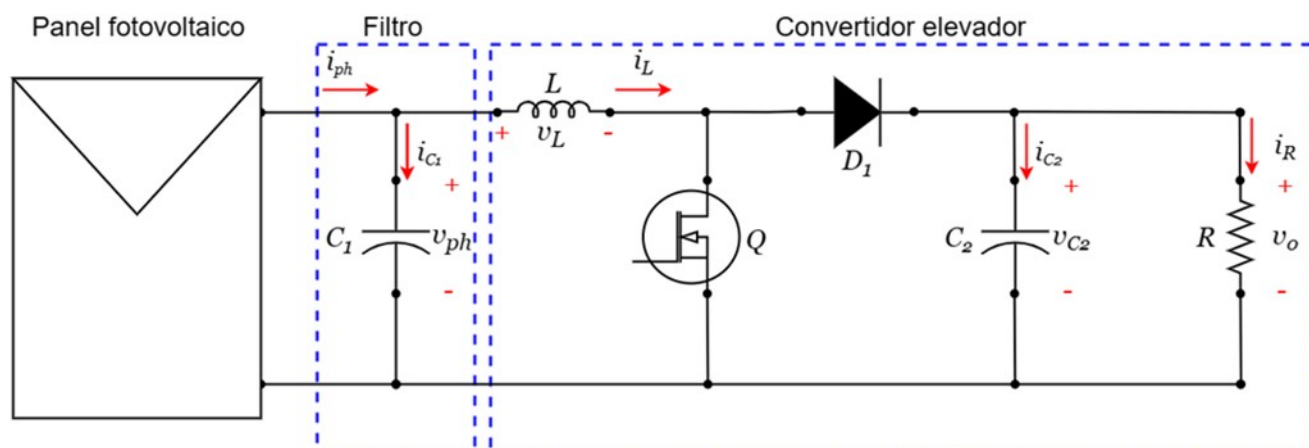


Figura 2: Sistema solar con convertidor Boost.

tiene como desventaja que, ante cambios bruscos de condiciones atmosféricas se aleja del punto de máxima potencia [25]. Las oscilaciones de la curva de potencia son proporcionales al paso, lo que indica que un gran paso ocasiona más oscilación y por ende un desperdicio de potencia, mientras que un paso pequeño por su parte es menos oscilatorio, pero causa una respuesta más lenta [26].

Existen tres técnicas para la implementación del método P&O que son perturbación de la corriente de referencia, perturbación de ciclo de trabajo y perturbación de la tensión de referencia [24]. El programa OpenModelica utiliza el método de tensión de referencia en su bloque "mPPTcontroller" que se ilustra en la Figura 3(a). Dicho bloque es un controlador que tiene un voltaje de referencia el cual va modificando; para esto, utiliza un pequeño paso que le permite perturbar el ciclo de trabajo, ya sea incrementándolo o disminuyéndolo con el fin de alcanzar la potencia máxima del panel solar. La Figura 3(b) muestra la ventana para la configuración de parámetros de este bloque los cuales son: 1) sample time (Periodo de muestreo); 2) VrefStep (Paso de cambio para el voltaje de referencia); y 3) pkThreshold (Valor de potencia por debajo del cual no se considera ningún cambio) [16].

En la Figura 4 se presenta el algoritmo del bloque mPPT-Controller, cuyo proceso se describe a continuación:

*Paso 1:* Se miden las variables de entrada  $v_{ph}(t)$  y  $i_{ph}(t)$  en el instante  $t$ .

*Paso 2:* Se calcula la potencia del panel ( $p_{ph}(t)$ ) a partir de las variables de entrada.

*Paso 3:* Se compara el valor de la potencia actual con el anterior, para esto se utiliza el valor de pkThreshold que es el margen de error permitido entre la potencia actual y anterior. Si la diferencia se mantiene menor al valor del pkThreshold se continúa con el paso 4. Caso contrario se pasa al paso 5.

*Paso 4:* Se considera que no se ha producido ningún cambio

en la potencia, por ende, el valor de voltaje no es modificado y se reinicia el proceso.

*Paso 5:* Si la potencia actual es mayor a la anterior se realiza el paso 6, pero si es menor se sigue con el paso 7.

*Paso 6:* El algoritmo incrementa el voltaje actual en una pequeña cantidad y se reinicia el algoritmo.

*Paso 7:* Se disminuye el voltaje y se reinicia el proceso.

### 3.2. Voltaje constante

Conocido también como circuito abierto fraccionado, es un método clásico, de gran rapidez, simplicidad y bajo costo para su implementación, que compara el voltaje del panel fotovoltaico con un voltaje de referencia fijo, haciendo uso de un solo sensor [27]. El algoritmo debe utilizarse en regiones donde la temperatura no cambie sustancialmente, de lo contrario la celda podría operar fuera del voltaje de máxima transferencia de potencia [8]. Esta técnica de MPPT, tiene como ventaja que sólo es necesario medir el voltaje del módulo fotovoltaico, para un control de lazo simple. El diagrama de flujo del algoritmo de voltaje constante se muestra en la Figura 5, donde la variable de entrada es  $v_{ph}(t)$ ; posteriormente, se compara con un voltaje de referencia ( $v_{ref}$ ) que corresponde al obtenido en el punto de máxima potencia en condiciones de prueba estándar, es decir una irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  y temperatura de 298 K. A continuación, se da una descripción del diagrama de flujo [28]:

*Paso 1:* Se mide la variable  $v_{ph}(t)$ .

*Paso 2:* Se compara el valor de  $v_{ph}(t)$  con  $v_{ref}$ , si son iguales se ejecuta el paso 3, pero si los valores de ambos voltajes son diferentes se realiza el paso 4.

*Paso 3:* Se considera un error nulo, lo que indica que el ciclo de trabajo del convertidor no será modificado y se reiniciará el algoritmo.

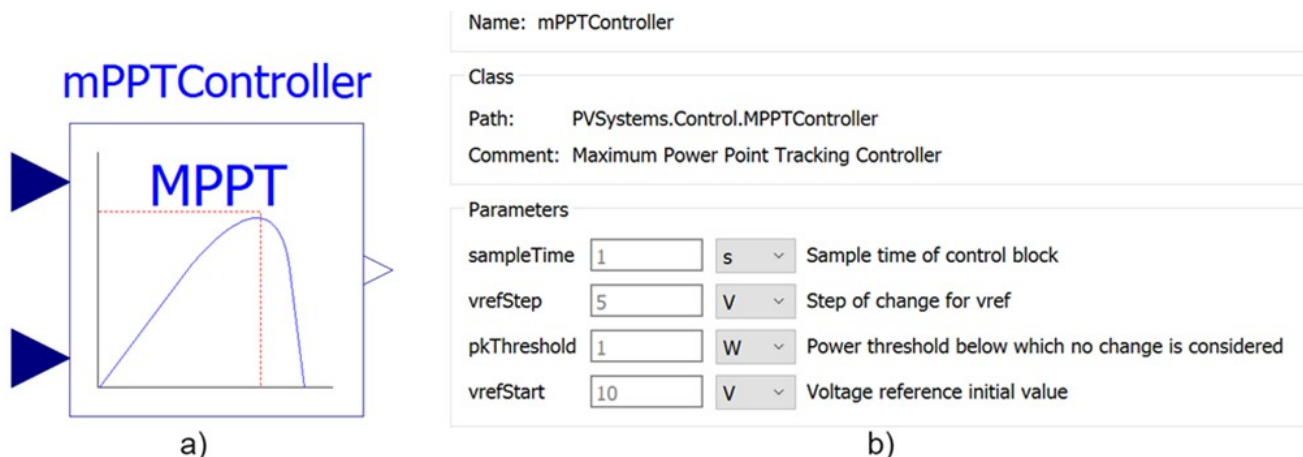


Figura 3: Bloque MPPT para P&O en OpenModelica. a) Bloque y b) Ventana de parámetros.

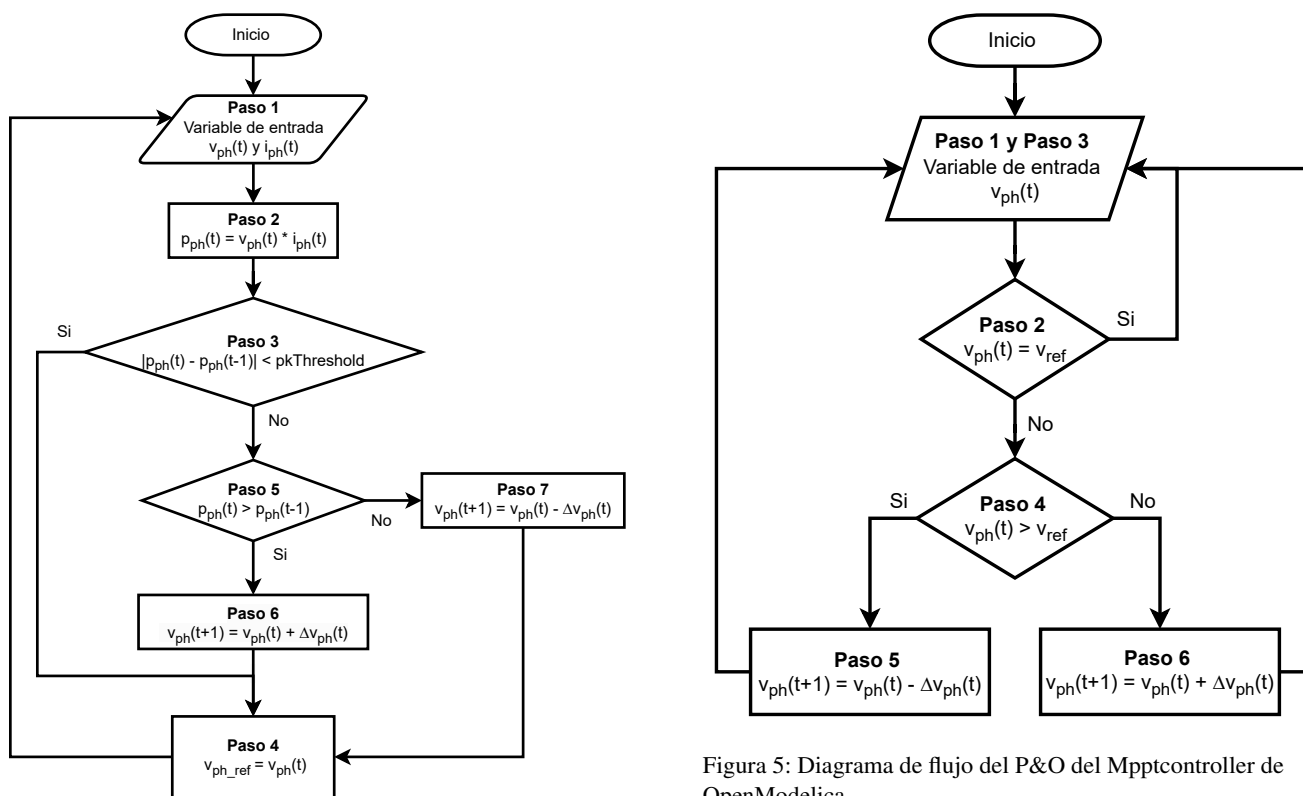


Figura 4: Diagrama de flujo del P&O del Mpptcontroller de OpenModelica.

*Paso 4:* Si  $v_{ph}(t)$  es mayor a  $v_{ref}$  se lleva a cabo el paso 5, caso contrario se sigue con el paso 6.

*Paso 5:* Esto indica un error positivo por lo cual el algoritmo procederá a corregir restando el valor de  $v_{ph}(t)$  para disminuir el voltaje.

*Paso 6:* El error es negativo entonces el delta se suma al valor de  $v_{ph}(t)$ .

### 3.3. Escala simple

Otro algoritmo clásico es el de escala simple, el cual es eficiente y fácil de implementar, siempre y cuando no se tengan cambios bruscos de irradiancia, ya que causa que oscile alrededor del punto de máxima potencia [29]. Su funcionamiento se basa en cambiar el ciclo de trabajo  $D$ , para perturbar la potencia del convertidor ( $p(t)$ ) y el voltaje de operación ( $v(t)$ ). El paso del ciclo de trabajo presenta dificultades en este método, ya que un paso pequeño causa lentitud en el algoritmo mientras que un paso grande conduce a oscilaciones en la potencia máxima; en consecuencia,

un paso pequeño se debe utilizar durante cambios bruscos de irradiancia y un paso grande es preferencial para irradiancias constantes [30].

La Figura 6 muestra el diagrama de flujo para el método de escala simple, se tienen 2 entradas (voltaje y corriente) que permiten obtener la potencia actual del panel, la cual se estará calculando constantemente [31]. Un resumen del algoritmo se presenta a continuación:

*Paso 1:* Se mide las variables de entrada  $v_{ph}(t)$  y  $i_{ph}(t)$ .

*Paso 2:* Se calcula  $p_{ph}(t)$  con las variables del paso 1.

*Paso 3:* Se compara  $p_{ph}(t)$  con  $p_{ph}(t-1)$ , si sus valores son iguales se realiza el paso 4. De lo contrario procede con el paso 5.

*Paso 4:* El algoritmo no realiza ninguna perturbación y se vuelve a reiniciar el proceso.

*Paso 5:* Si  $p_{ph}(t)$  es mayor que  $p_{ph}(t-1)$  se continúa con el paso 6. Si se da un caso contrario se lleva a cabo el paso 9.

*Paso 6:* Si  $v_{ph}(t)$  es mayor a  $v_{ph}(t-1)$  se ejecuta el paso 7. Si ocurre lo contrario entre los voltajes el paso a seguir es el 8.

*Paso 7:* Se perturba el ciclo de trabajo disminuyendo su valor una pequeña cantidad y se reinicia el proceso.

*Paso 8:* Se incrementa el valor del ciclo de trabajo un delta y se reinicia el proceso.

*Paso 9:* Si el voltaje actual  $v_{ph}(t)$  es mayor a  $v_{ph}(t-1)$  se ejecuta el paso 8. Si ocurre lo contrario entre los voltajes el paso a realizar es el 7.

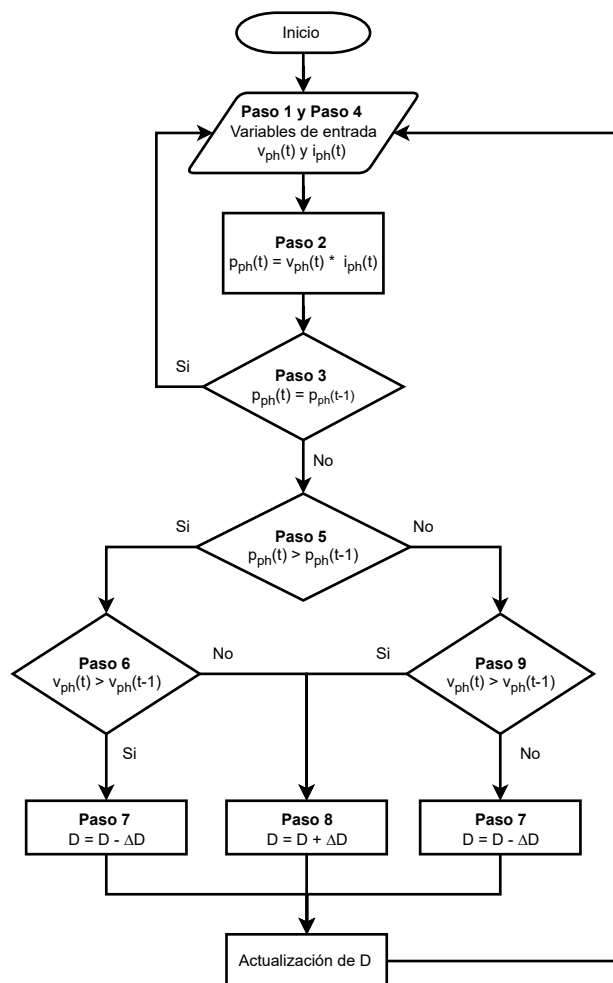


Figura 6: Diagrama de flujo del algoritmo de Escala simple.

### 3.4. Conductancia incremental

El algoritmo de conductancia incremental es uno de los más eficaces para obtener el punto de máxima potencia; sin embargo, su costo es elevado y su algoritmo [32]. Su ventaja es que obtiene el voltaje de máxima potencia ante los cambios de irradiancia presentados, lo cual hace que no oscilen alrededor del punto de máxima potencia como el algoritmo de perturbación y observación, no obstante, ante estos cambios le toma más tiempo calcular las variables. Este algoritmo es adecuado en casos en que el punto de máxima potencia no cambia con frecuencia [33].

El método implementa la tasa de cambio de potencia con respecto al voltaje, la cual debe ser cero para garantizar que está en su punto de máxima potencia como se muestra en la ecuación 4. Esta tasa de cambio ( $dp/dv$ ) se puede redefinir en términos del voltaje y la corriente del panel 5 y después de aplicar reglas de derivación obtener la expresión 6, donde ( $dv_{ph}$ ) y ( $di_{ph}$ ) son respectivamente la derivada del voltaje del panel y la derivada de la corriente del panel. Los términos ( $i_{ph}/v_{ph}$ ) y ( $di_{ph}/dv_{ph}$ ) son respectivamente la conductancia incremental y la conductancia instantánea [34].

En la Figura 7, se presenta una curva de potencia en función del voltaje de un panel solar en condiciones de prueba estándar. El punto de máxima potencia está ubicado donde la derivada es igual a cero 6, Si la pendiente es mayor a cero 7 indica que el punto está operando a la izquierda del MPPT. Si la pendiente es menor a cero 8 entonces está operando al lado derecho del MPP [35].

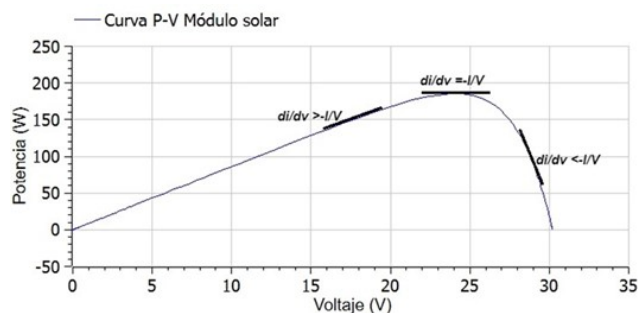


Figura 7: Aplicación del algoritmo de conductancia incremental en la curva P-V del módulo fotovoltaico.

En la Figura 8 se muestra el proceso del algoritmo de conductancia incremental, el cual se explica a continuación:

*Paso 1:* Se miden las variables de entrada  $v_{ph}(t)$  y  $i_{ph}(t)$ .

*Paso 2:* Se compara  $v_{ph}(t)$  anterior y actual, si este es igual a cero procede al paso 3. Si el voltaje  $v_{ph}(t)$  es diferente de cero se sigue con el paso 4.

*Paso 3:* Se analiza el cambio de la corriente  $i_{ph}$  donde se puede presentar:

- Paso 3.1:  $i_{ph}$  sea igual a cero, indica que está en el punto de máxima potencia, así reinicia el proceso.
- Paso 3.2:  $i_{ph}$  sea mayor a cero de esta forma se continúa con el paso 6, si por el contrario es menor a cero se realiza el paso 7.

*Paso 4:* En este paso se compara el valor de la pendiente, los siguientes casos:

- Paso 4.1: La pendiente sea cero entonces se reinicia el algoritmo.
- Paso 4.2: La pendiente de la curva P-V de positiva entonces se pasa al paso 5 o la pendiente sea menor a cero lo que lleva al paso 7.

*Paso 5:* Indica que el punto de operación está a la izquierda del punto de máxima potencia, por ende, se debe disminuir el ciclo de trabajo, posteriormente se prosigue con el paso 8.

*Paso 6:* Se disminuye el ciclo de trabajo y se sigue con el paso 8.

*Paso 7:* Como se está operando al lado derecho del MPP se debe aumentar el ciclo de trabajo para llegar al punto de máxima potencia y se continúa reinicia el algoritmo.

*Paso 8:* Se actualiza el ciclo de trabajo y se reinicia el algoritmo [36].

$$\frac{dp}{dv} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{d(i_{ph}v_{ph})}{dv} = 0 \tag{5}$$

$$\frac{i_{ph}}{v_{ph}} + \frac{di_{ph}}{dv_{ph}} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{di_{ph}}{dv_{ph}} > -\frac{i_{ph}}{v_{ph}} \tag{7}$$

$$\frac{di_{ph}}{dv_{ph}} < -\frac{i_{ph}}{v_{ph}} \tag{8}$$

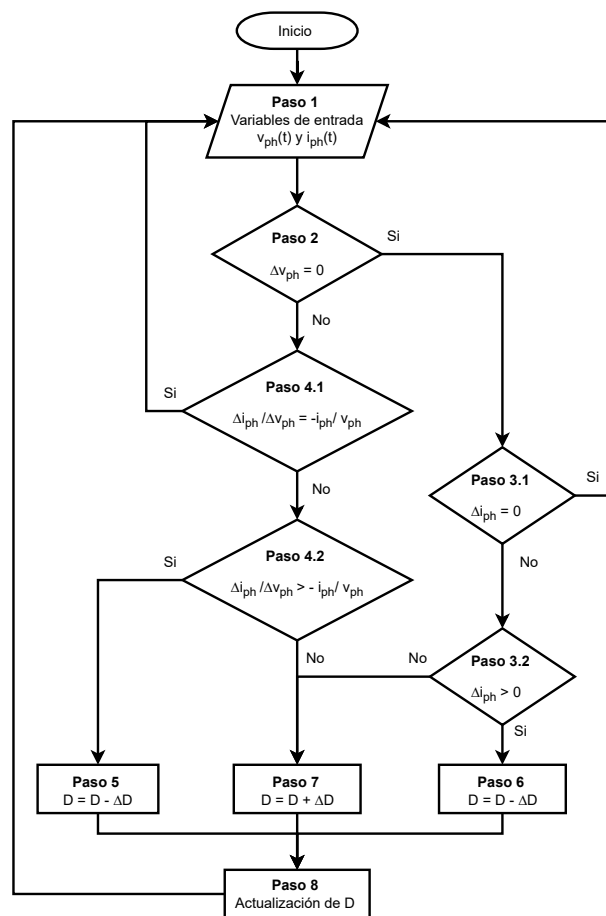


Figura 8: Diagrama de flujo del algoritmo de conductancia incremental.

#### 4. Resultados de simulación

Posteriormente, se conectaron al sistema fotovoltaico de primera etapa, agregando controladores PI y los datos de entrada de irradiancia y temperatura de un piranómetro. Se compara cada modelo en lazo cerrado (con MPPT y controlador PI) bajo las mismas condiciones, valores de entrada y parámetros, solo cambiando el bloque MPPT. Los resultados arrojados por cada simulación que serán analizados son las potencias. De igual forma, se contrastarán los anteriores resultados con los obtenidos por el bloque de OpenModelica tradicional. Se implementan algoritmos MPPT que mediante las señales de entrada restringen los puntos operativos logrando la obtención del punto de máxima potencia producido por un Módulo fotovoltaico solar bajo ciertas condiciones ambientales [27].

Los parámetros del se tomaron de un panel solar policristalino de la marca Seraphim y sus parámetros fueron introducidos en OpenModelica como se muestra en la Figura 9 en el bloque fotovoltaico "PV array". Los datos de irradiancia y temperatura son obtenidos por un piranómetro ubicado en la estación solar de la sede de investigación universitaria (SIU) de la Universidad de Antioquia. Los datos fueron tomados

el 17 de abril de 2022, son en total 584 valores tanto para irradiancia como para temperatura, tomado desde las 8:22 AM hasta las 6:37 PM, dando como resultado las gráficas expuestas en la Figura 10.

### Parameters

General Modifiers

Comment: Flexible PV array model

Parameters

Imp	8.65	A	Maximum power current
Vmp	38.2	V	Maximum power voltage
Iscn	8.96	A	Short circuit current
Vocn	46.9	V	Open circuit voltage
Kv	-0.32		Voc temperature coefficient
Ki	0.05		Isc temperature coefficient
Ns	72		Number of cells in series
Np	1		Number of cells in parallel
Rs	0.221	$\Omega$	Equivalent series resistance of array
Rp	415.405	$\Omega$	Equivalent parallel resistance of array
a	1.3		Diode ideality constant
Ipvn	Iscn	A	Photovoltaic current at STC

Figura 9: Parámetros utilizados para la configuración del panel solar.

La Figura 10(a) se observa una irradiancia muy variable, alcanzando en diferentes horas máximos y mínimos de radiación. La Figura 10(b) es la temperatura en el panel solar y no la temperatura ambiente, por ende, se muestra valores más altos, los cuales afectan la eficiencia del panel solar.

Las simulaciones son realizadas en OpenModelica utilizando la biblioteca especializada de PVsystems. En la Figura 11, se muestra el sistema que está conformado por dos bloques que contienen los datos de irradiancia y temperatura de un piranómetro, un panel solar, un circuito convertidor elevador, y un bloque de control donde está integrado el control PI y el respectivo algoritmo MPPT.

La Figura 12 presenta las diferentes técnicas de MPPT que se utilizaron en el bloque de control. Para los controladores 12 a) y 12 b), se implementó un controlador PI cuyos parámetros son los mismos usados en [23], siendo estos  $P = 2,5$  y  $I = 0,9$ . Los bloques de control 12 c) y 12 d) no se emplean parámetros PI, ya que no son necesarios. Las frecuencias de perturbación con la cual los controladores MPPT ajustan el parámetro de control es fija, al igual que el tamaño de sus pasos que es un pequeño cambio en la magnitud del parámetro de control.

## 5. Discusión

La Figura 13 muestra como la curva de potencia obtenida a partir del método voltaje constante presenta varias dificultades.

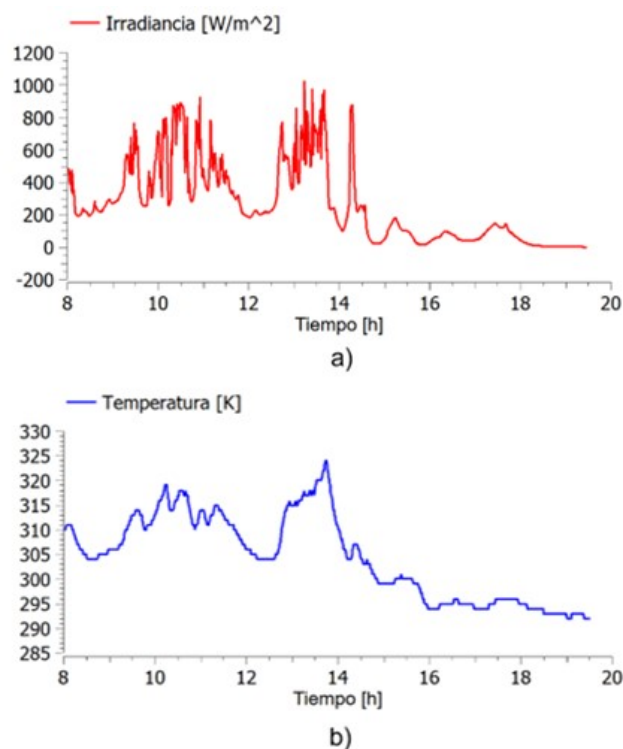


Figura 10: Gráfica de los datos arrojados por el piranómetro a) Irradiancia y b) Temperatura.

des. El tiempo en que se demora en operar es mucho mayor a comparación de las otras técnicas y tiene poca precisión, ya que los valores de máxima potencia obtenidos son mucho menores, teniendo un seguimiento lento del MPPT. En algunos intervalos, principalmente donde la irradiancia y la temperatura tienen valores muy bajos, no logra encontrar el punto de máxima potencia y arroja resultados muy cercanos al cero. Lo anterior se debe a los cambios de temperatura, lo que causa que la celda opere fuera del voltaje de máxima transferencia de potencia. De esta manera se le atribuye al algoritmo voltaje constante un desempeño bajo en comparación de las demás técnicas, por tener el más deficiente resultado.

A continuación (Figura 14), se eliminará el algoritmo de voltaje constante por su poca eficiencia en los resultados (no se recomienda implementar) y se dejará las 3 restantes técnicas MPPT para su comparación.

En la Figura 15, las tres técnicas de MPPT siguen la misma tendencia ante los diferentes cambios de irradiancia y temperatura. Los algoritmos de conductancia incremental y escala simple tienen un paso fijo de 0.01, valor obtenido manualmente después de lograr resultados de curva de potencia más eficientes. En la Figura 16 se observa que los algoritmos de conductancia incremental y escala simple alcanzan los valores de máxima potencia ante los cambios grandes de irradiancia y temperatura, pero presentan oscilaciones cuando la irradiancia es muy fluctuante, debido a que tienen



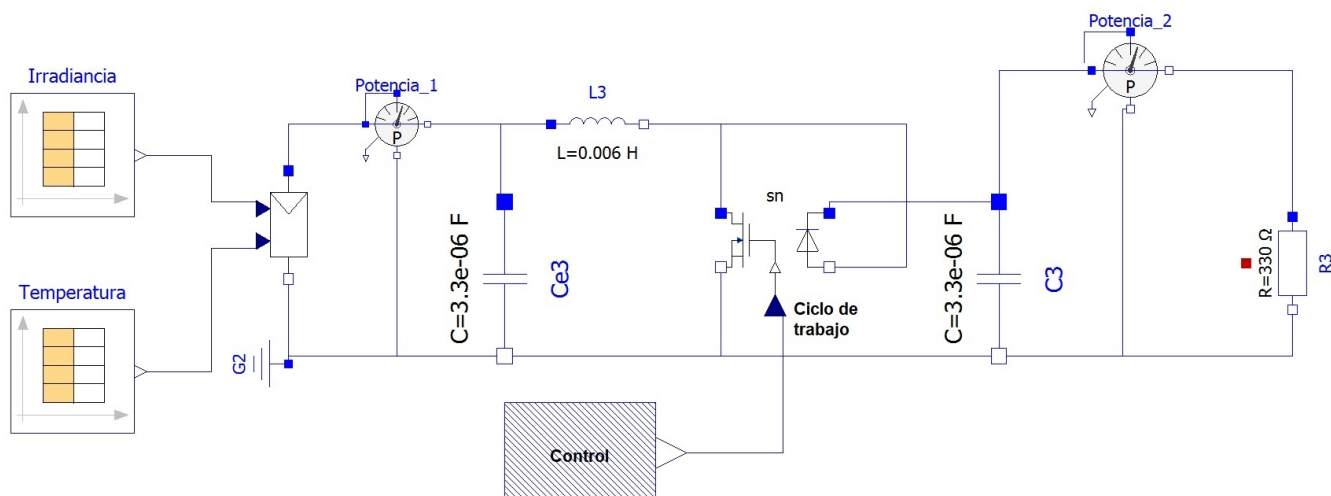


Figura 11: Sistema Convertidor elevador.

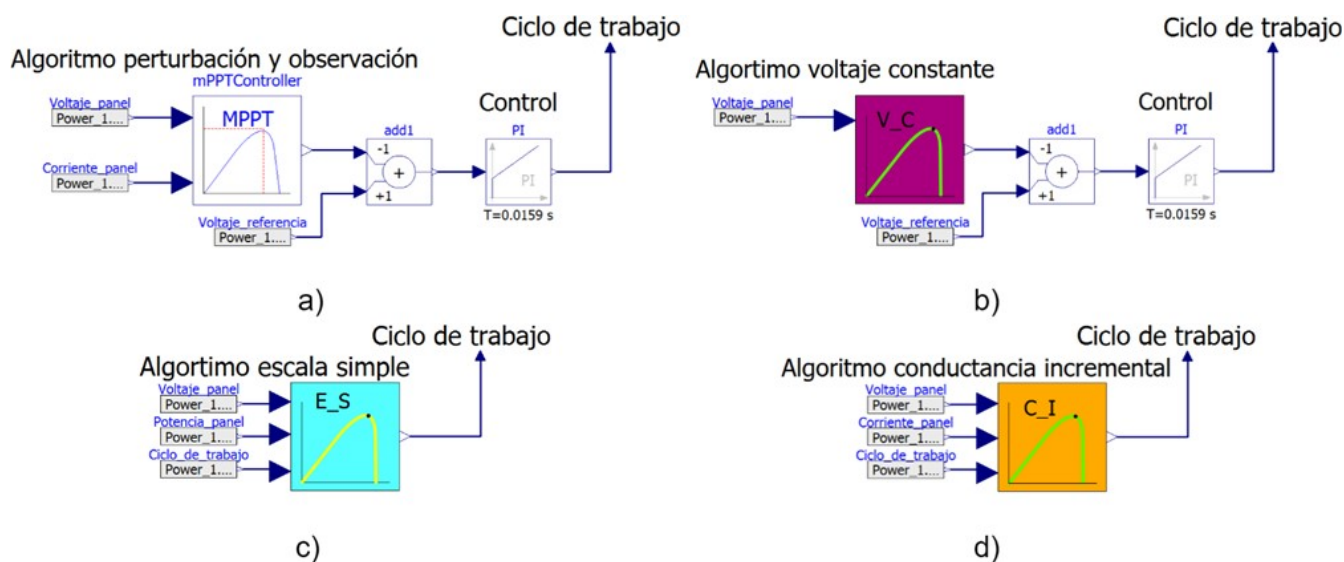


Figura 12: Bloques de control y mppt: a) perturbación y observación, b) Voltaje constante, c) Escala simple y d) conductancia incremental.

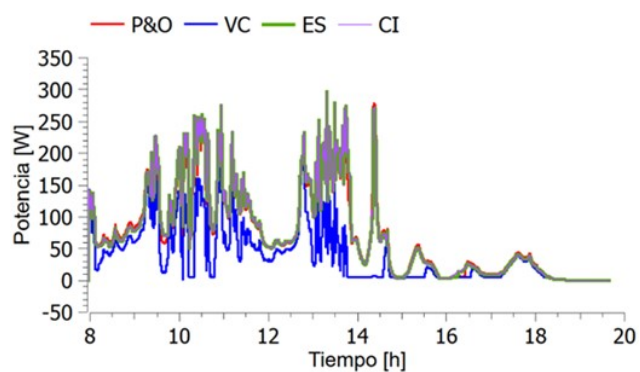


Figura 13: Curvas de potencias obtenidas de cada una de las técnicas MPPT.

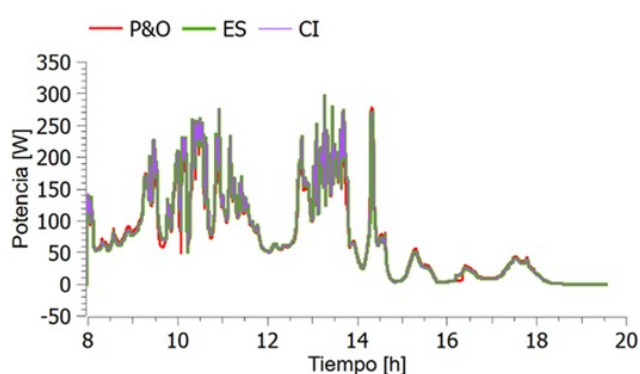


Figura 14: Curvas de potencias obtenidas de las tres mejores técnicas MPPT.

un paso de búsqueda constante el cual les permite calcular rápidamente el valor de la potencia, no obstante, en cambios bruscos le causa imprecisión.

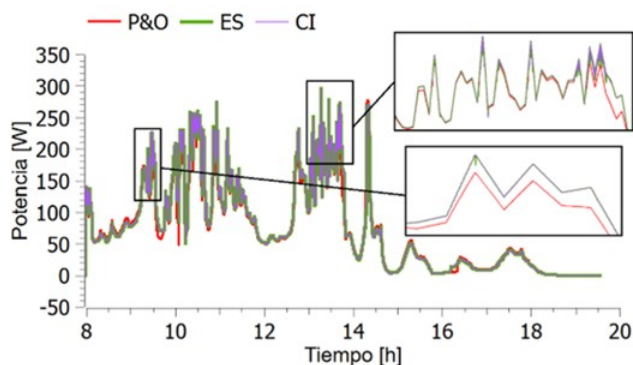


Figura 15: Acercamiento de las curvas de las potencias entre los intervalos de 9 a 10 horas y 13 a 14 horas.

En la Figura 16, el algoritmo de Openmodelica P&O tiene un paso fijo de 0.1, este tamaño le permite tener un inicio más rápido y valores potencia sin oscilaciones, además cuenta con un valor de referencia de inicio, lo que mejora su arranque, aunque está cerca al punto de máxima potencia no lo alcanza y por ende desperdicia energía. Al no obtener la máxima extracción de energía a diferencia de las técnicas escala simple y conductancia incremental, pero por tener un rendimiento superior al algoritmo de voltaje constante en las condiciones atmosféricas dadas, se clasifica con un desempeño Medio. Por su parte las técnicas de escala simple y conductancia incremental obtienen el punto de máxima potencia, teniendo un desempeño superior de las demás técnicas por consiguiente se cataloga con un desempeño alto.

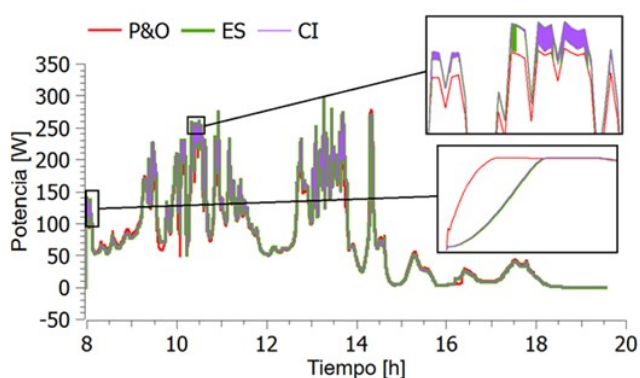


Figura 16: Acercamiento de las curvas de las potencias entre los intervalos de 8 a 8.3 horas y 10.3 a 10.9 horas.

Finalmente, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de simulación en la Tabla 1.

## 6. Conclusiones

En este artículo se implementaron y analizaron 4 técnicas MPPT (voltaje constante, escala simple, conductancia incremental, y P&O) para obtener la máxima potencia de un panel solar por medio de un convertidor Boost. Se comparó el desempeño de estas técnicas operando con un mismo convertidor, panel solar y las mismas condiciones de irradiancia y temperatura, estas dos últimas tomadas de datos reales. El sistema fue implementado en OpenModelica y se crearon los bloques para las técnicas de escala simple, voltaje constante y conductancia incremental con el fin de complementar la librería existente que solo posee el método de P&O; esto con el objetivo de este artículo sea una herramienta para que los estudiantes e ingenieros aprendan a usar e implementar las diferentes técnicas MPPT conociendo sus ventajas y desventajas. Los resultados mostraron lo siguiente:

- 1) El método de voltaje constante presenta el peor desempeño ante cambios de irradiancia y temperatura, durante toda la simulación la curva de potencia obtenida siempre fue menor a la de las otras técnicas, presentando grandes caídas de potencia cuando había grandes cambios en la temperatura.
- 2) El método de P&O presenta un desempeño superior, más velocidad, mayor potencia obtenida y menos caídas cuando cambia la temperatura que el método de voltaje constante, sin embargo, se obtiene menos potencia que con las técnicas de escala simple y conductancia incremental.
- 3) El método de escala simple presenta un desempeño mejor que el P&O, sin embargo, cuando el punto de máxima potencia cambia en cortos instantes de tiempo, la potencia entregada tiene oscilaciones haciendo que se demore en estabilizarse.
- 4) El método de conductancia incremental presenta el mejor desempeño (similar al de escala simple y mejor que el P&O y voltaje constante), sin embargo, el cambio del punto del punto de máxima potencia también hace que tenga oscilaciones, pero se recupera más rápido que el método de escala simple.

Como trabajo futuro, se propone incorporar el efecto del sombreado en los paneles solares. Este fenómeno puede tener una influencia significativa en la búsqueda del punto de máxima potencia, ya que las curvas V-I y P-V experimentan cambios sustanciales con la aparición del sombreado.

**Financiación:** Este trabajo fue financiado por la Institución Universitaria Pascual Bravo y la Dirección de Tecnología e Innovación a través del programa Talento Pascualino.

**Declaración de conflicto de interés:** Los autores manifiestan no tener conflictos de interés.

Tabla 1: Resumen comparativo de las ventajas y desventajas de las técnicas implementadas

Técnica	Ventajas	Desventajas	Control	Desempeño	Variables de entrada
P&O	Es el método más usado y viene incluido en la librería PVSystems	Ante cambios bruscos de irradiancia se aleja del punto potencia	PI	Medio	Voltaje y corriente
Voltaje constante	Método simple, rápido y de bajo costo que no requiere gran cantidad de parámetros, solo la medida del voltaje del panel	Ante cambio brusco de temperaturas, la celda opera fuera del rango de voltaje de máxima transferencia de potencia	PI	Bajo	Voltaje
Escala simple	Algoritmo eficiente y fácil de implementar para conseguir el punto de máxima potencia	Oscila alrededor de puntos de máxima potencia, cuando se presentan cambios bruscos de irradiancia	-	Alto	Voltaje y potencia
Conductancia incremental	Es una técnica muy eficiente, que obtiene el voltaje de máxima potencia ante los cambios de irradiancia presentados	Presenta un alto costo y complejidad. Su rapidez es inversa a su precisión	-	Alto	Voltaje y corriente

## 7. Conclusiones

## 8. Trabajo futuro

## 9. Agradecimientos

### Referencias

- [1] D. S. Abdelminaam, M. Said and E. H. Houssein, Turbulent Flow of Water-Based Optimization Using New Objective Function for Parameter Extraction of Six Photovoltaic Models, in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 35382-35398, 2021, doi:10.1109/ACCESS.2021.3061529.
- [2] M. U. Jan, A. Xin, M. A. Abdelbaky, H. U. Rehman and S. Iqbal, Adaptive and Fuzzy PI Controllers Design for Frequency Regulation of Isolated Microgrid Integrated With Electric Vehicles in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87621-87632, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993178.
- [3] P. Benalcázar, J. Lara and M. Samper, Distributed Photovoltaic Generation in Ecuador: Economic Analysis and Incentives Mechanisms, in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 03, pp. 564-572, March 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082728.
- [4] Ren21 Renewables., Renewables 2021 global status report. <https://www.ren21.net/gsr-2021> (2021).
- [5] J. Ma, K. L. Man, T. O. Ting, N. Zhang, S. -U. Guan and P. W. H. Wong, DEM: Direct Estimation Method for Photovoltaic Maximum Power Point Tracking, *Procedia Computer Science*, vol. 17, pp. 537-544, 2013, doi: 10.1016/j.procs.2013.05.069.
- [6] H. A. Sher, A. F. Murtaza, A. Noman, K. E. Addoweesh, K. Al-Haddad and M. Chiaberge, A New Sensorless Hybrid MPPT Algorithm Based on Fractional Short-Circuit Current Measurement and P&O MPPT, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1426-1434, Oct. 2015, doi: 10.1109/TS-TE.2015.2438781.
- [7] B. C. Babu and S. Gurjar, A Novel Simplified Two-Diode Model of Photovoltaic (PV) Module, in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 4, pp. 1156-1161, July 2014, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2316371.
- [8] M. A. G. de Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. d. A. e Melo and C. A. Canesin, Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1156-1167, March 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2198036.
- [9] M. Hlaili and H. Mechergui, Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems, *International Journal of Photoenergy*, vol. 2016, pp. 1-10, 2016, doi: 10.1155/2016/1728398.
- [10] S. Pant and R. P. Saini, Comparative Study of MPPT Techniques for Solar Photovoltaic System, *2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Aligarh, India, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPCON47278.2019.8980004.
- [11] L. Atik, P. Petit, J. P. Sawicki, Z. T. Ternifi, G. Bachir, M. Aillerie, Comparison of four MPPT techniques for PV systems, *AIP Conference Proceedings*, vol. 1758, no. 1, July 2016, doi: 10.1063/1.4959443.
- [12] Z. M. S. Elbarbary and M. A. Alranini, Review of maximum power point tracking algorithms of PV system, *Frontiers in Engineering and Built Environment*, vol. 1, no. 1, pp. 68-80, 2021, doi: 10.1108/FEBE-03-2021-0019.

- [13] J. López Seguel, S. I. Seleme Jr y L. M. F. Moráis, Comparison of the performance of MPPT methods applied in converters Buck and Buck-Boost for autonomous photovoltaic systems, *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 29, no. 2, pp. 229-244, June 2021 doi: 10.4067/s0718-33052021000200229.
- [14] N. Muñoz-Galeano, J. B. Cano-Quintero y J. M. López-Lezama, Enseñando el Funcionamiento de los Inversores Puente H: Análisis del Intercambio de Potencia entre Bobinas y Condensadores, *Formación universitaria*, vol. 9, no. 1, pp. 117-124, 2016, doi: 10.4067/s0718-50062016000100013.
- [15] N. Muñoz-Galeano, J. M. López-Lezama y F. Villada-Duque, Deducción de los Estados de Conmutación para los Inversores Multinivel VSC-MMC. Descripción Orientada a la Enseñanza en Ingeniería, *Formación universitaria*, vol. 11, no. 1, pp. 115-126, 2018, doi: 10.4067/s0718-50062018000100115.
- [16] OpenModelica, <https://build.openmodelica.org/Documentation/PVSystems.Control.MPPTController.html> (2021).
- [17] Y. A. Gutiérrez, J. R. Saldarriaga, N. Muñoz y J. M. López, YesikaGV/Tecnicas\_MPPT, *GitHub*, [https://github.com/YesikaGV/Tecnicas\\_MPPT](https://github.com/YesikaGV/Tecnicas_MPPT) (2022).
- [18] S. Murdoch and S. Reynoso, Design and Implementation of a MPPT circuit for a Solar UAV, in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 1, pp. 108-111, Feb. 2013, doi: 10.1109/TLA.2013.6502787.
- [19] Y. -C. Hsieh, L. -R. Yu, T. -C. Chang, W. -C. Liu, T. -H. Wu and C. -S. Moo, Parameter Identification of One-Diode Dynamic Equivalent Circuit Model for Photovoltaic Panel, in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 1, pp. 219-225, Jan. 2020, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2951920.
- [20] Y. A. Muñoz Maldonado, W. A. Cáceres Carvajal y A. D. Duarte Moreno, Evaluación de alternativas para el dimensionamiento y mantenimiento de la instalación fotovoltaica en Cens, *Repositorio UNAB*, 2021.
- [21] A. T. Elsayed, T. A. Youssef, A. Mohamed and O. A. Mohammed Design, Control and Management of P-V System for Residential Applications with Weak Grid Connection, *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2013.
- [22] Y. Hishikawa, T. Takenouchi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima and M. Yoshita, Translation of Solar Cell Performance for Irradiance and Temperature From a Single I-V Curve Without Advance Information of Translation Parameters, in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 5, pp. 1195-1201, Sept. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2924388.
- [23] Y. A. Gutiérrez, J. R. Ortiz-Castrillón, N. Muñoz-Galeano, J. B. Cano-Quintero y J. M. López-Lezama, Fast and Slow Dynamics in DC/DC Converters with MPPT for Applications in Photovoltaic Systems, *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 13, no. 11, p. 3255, Nov. 2020, doi: 10.37624/IJERT/13.11.2020.3255-3261.
- [24] M. A. Elgendy, B. Zahawi and D. J. Atkinson, Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 21-33, Jan. 2012, doi: 10.1109/TS-TE.2011.2168245.
- [25] M. Killi and S. Samanta, Modified Perturb and Observe MPPT Algorithm for Drift Avoidance in Photovoltaic Systems, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 9, pp. 5549-5559, Sept. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2407854.
- [26] 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, doi: 10.1109/TSTE.2014.2300162.
- [27] R. B. Bollipo, S. Mikkili and P. K. Bonthagorla, Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review, in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 9-33, Jan. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720.
- [28] A. Ali *et al.*, Investigation of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition-A Retrospection, in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 127368-127392, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007710.
- [29] C. Y. Tan, N. A. Rahim and J. Selvaraj, Improvement of hill climbing method by introducing simple irradiance detection method, *3rd IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT) 2014*, Kuching, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2014.1493.
- [30] R. Rawat y S. S. Chandel, Hill Climbing Techniques for tracking Maximum Power point in Solar Photovoltaic Systems-A Review, *Special Issue of International Journal of Sustainable Development and Green Economics (IJSDDGE)*, 2013.
- [31] S. B. Kjaer, Evaluation of the Hill Climbing and the Incremental Conductance Maximum Power Point Trackers for Photovoltaic Power Systems, in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 4, pp. 922-929, Dec. 2012, doi: 10.1109/TEC.2012.2218816.
- [32] T. M. Chung, H. Daniyal, M. H. Sulaiman and M. S. Bakar, Comparative study of P&O and modified incremental conductance algorithm in solar maximum power point tracking, *4th IET Clean Energy and Tech-*

- nology Conference (CEAT 2016)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2016.1300.
- [33] K. S. Tey and S. Mekhilef, Modified incremental conductance MPPT algorithm to mitigate inaccurate responses under fast-changing solar irradiation level, *Solar Energy*, vol. 101, pp. 333-342, March 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.01.003.
- [34] N. Kumar, I. Hussain, B. Singh and B. K. Panigrahi, Self-Adaptive Incremental Conductance Algorithm for Swift and Ripple-Free Maximum Power Harvesting From PV Array, in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 5, pp. 2031-2041, May 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2765083.
- [35] B. Ankaiah and J. Nageswararao, MPPT Algorithm for Solar Photovoltaic Cell by Incremental Conductance Method, *International Journal of Innovations in Engineering and Technology*, vol. 2, no. 1, 2013.
- [36] M. A. Elgendy, B. Zahawi and D. J. Atkinson, Assessment of the Incremental Conductance Maximum Power Point Tracking Algorithm, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 108-117, Jan. 2013, doi: 10.1109/TSSTE.2012.2202698.